

Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 194

bast

Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen

von

Frohmut Wellner
Viktoria Sommer
Markus Clauß
Titus Spanier

Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau
Technische Universität Dresden

Stephan Villaret
Tanja Tschernack
Karl Villaret
Clemens Gebhardt

Villaret Ingenieurgesellschaft mbH
Hoppegarten

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 194

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 04.0327

Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen

Fachbetreuung

Bianca Leipzig

Referat

Analyse und Entwicklung von Straßenoberbauten

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 978-3-95606-756-3

Bergisch Gladbach, August 2023

Kurzfassung – Abstract

Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen

Die in diesem Forschungsprojekt an Asphaltbefestigungen durchgeführten Untersuchungen basieren im Wesentlichen auf einer Bewertung der strukturellen Substanz nach den RSO Asphalt [RSO Asphalt E 15]. Für einen fiktiven Streckenabschnitt, dessen Materialparameter aus den Ergebnissen vorangegangener Forschungsprojekte stammen wurde die Auswirkung unterschiedlicher Abstände des Lasteintragungspunktes zum Fahrbahnrand auf die Dauerhaftigkeit der Befestigung untersucht. Resultierend aus den Abmessungen der Fahrbahnbreiten und Markierungen wurde eine Auswahl der zu betrachtenden, relevanten Abstände des Lasteintragungspunktes zum Fahrbahnrand getroffen.

Zur Bewertung der strukturellen Substanz nach den RSO Asphalt [RSO Asphalt E 15] sind die Beanspruchungen (Spannungen und Dehnungen) in den maßgeblichen Nachweispunkten zu bestimmen. Diese können mit der Mehrschichtentheorie oder mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet werden. Die Anwendung der Mehrschichtentheorie setzt unter anderem voraus, dass die Schichten in horizontaler Richtung unendlich ausgedehnt sind. Für den Regelfall wird angenommen, dass diese Voraussetzung gegeben ist (Berechnung der Beanspruchung nach den RDO Asphalt). Bei den hier untersuchten Laststellungen ist diese Voraussetzung jedoch nicht erfüllt. Die Beanspruchungen wurden deshalb mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) bestimmt.

Zunächst wurde das Finite-Elemente-Modell entwickelt, die Berechnungsverfahren nach den RSO implementiert, und beides miteinander verknüpft. Zur Prüfung und Validierung wurden für ein Referenzmodell Berechnungen sowohl auf Grundlage der Mehrschichtentheorie als auch mit der FEM durchgeführt und gegenübergestellt. Die Bewertung aller weiteren Berechnungen erfolgt jeweils in Bezug auf dieses Referenzmodell.

Im nächsten Schritt wurde auf Basis des deterministischen Berechnungskonzeptes die Auswirkung des Abstandes der Lasteintragungsstelle zum Rand der befestigten Fläche auf die ertragbare Lastwechselzahl der Asphaltbefestigung untersucht. Darauf aufbauend wurde die Wirksamkeit mehrerer Varianten konstruktiver Maßnahmen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit untersucht. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden 2 konstruktive Maßnahmen ausgewählt und für diese Bewertungen der Strukturellen Substanz anhand des probabilistischen Verfahrens durchgeführt.

Für die Untersuchungen der temporären Nutzung von Randbereichen bei Oberbauten mit Betondecke werden im ersten Schritt rechnerische Dimensionierungen/Nachrechnungen nach dem Verfahren der [RDO Beton 09] vorgenommen. Hierbei kann auf den Erfahrungshintergrund der Dimensionierung der Platten des Hauptfahrestreifens zurückgegriffen werden. Dabei ist auch das Sicherheitsniveau des semiprobabilistischen Verfahrens hinreichend praxiserprobt.

Im nächsten Schritt werden mit Hilfe der analytischen Rechenmethode der RDO Beton die Platten des Seitenstreifens dimensioniert, wobei die geringere B-Zahl, die veränderte Plattengeometrie und der freie Plattenrand Berücksichtigung finden.

Im Folgeschritt können präzise FEM-Berechnungen angestellt werden, bei denen realistischere Laststellungen berücksichtigt werden. Zur Beibehaltung des Sicherheitsniveaus der RDO Beton wird als gemeinsamer Referenzpunkt die Berechnung im Hauptfahrestreifen ohne Seitenstreifen-freigabe verwendet.

Aspects of dimensioning and design to ensure availability for temporary use of peripheral areas of federal trunk roads

The investigations carried out on asphalt pavements in this research project are essentially based on an evaluation of the structural substance according to the RSO Asphalt [RSO Asphalt E 15]. For a fictitious road section, whose material parameters originate from the results of previous research projects the effect of different distances of the load application point to the pavement edge on the durability of the pavement was investigated. Based on the dimensions of the pavement widths and markings, a selection of the relevant distances of the load application point to the pavement edge was made.

For the evaluation of the structural substance according to the RSO Asphalt [RSO Asphalt E 15], the stresses (stresses and strains) in the decisive proof points have to be determined. These can be calculated using the multilayer theory or the finite element method (FEM). The application of the multilayer theory assumes, among other things, that the layers are infinitely extended in the horizontal direction. For the standard case, it is assumed that this prerequisite is fulfilled (calculation of the load according to the RDO Asphalt). However, this

condition is not fulfilled for the load positions investigated here. The stresses were therefore determined using the finite element method (FEM).

Firstly, the finite element model was developed, the calculation procedures according to the RSO were implemented, and both were linked. For testing and validation, calculations based on both the multilayer theory and the FEM were performed and compared for a reference model. The evaluation of all further calculations is carried out in relation to this reference model in each case.

In the next step, the effect of the distance between the load application point and the edge of the paved surface on the number of load cycles that the asphalt pavement is able to withstand was investigated on the basis of the deterministic calculation concept. Based on this, the effectiveness of several variants of constructive measures for improving durability was investigated (see Section 4.4). As a result of these investigations, two constructive measures were selected and evaluations of the structural substance were carried out using the probabilistic method.

For the investigation of the temporary use of edge areas in concrete pavement superstructures, the first step is to carry out computational dimensioning/recalculations according to the procedure of [RDO Beton 09]. The experience gained in dimensioning the slabs of the main lane can be used for this purpose. The safety level of the semi-probabilistic method has also been sufficiently tested in practice.

In the next step, the analytical calculation method of RDO Beton is used to design the slabs of the side strip, taking into account the lower B-number, the changed slab geometry and the free slab edge.

In the subsequent step, precise FEM calculations can be carried out in which more realistic load positions are taken into account. In order to maintain the safety level of the RDO Concrete, the calculation in the main lane without hard shoulder clearance is used as a common reference point.

Summary

Aspects of dimensioning and design to ensure availability for temporary use of peripheral areas of federal highways

1 Objective and content

For the dimensioning and design of road pavements, especially highways, it is assumed that the traffic loads are at a certain distance from the edge of the pavement, since the main traffic lane has been the main focus of attention in terms of dimensioning so far. If traffic is redirected as a result of construction work or other causes, it is sometimes brought very close to the edge of the pavement. This can have an unfavorable effect on the service life, expressed in terms of reduced axle transitions that the pavement can withstand, and the resulting necessary maintenance measures, especially due to the high stresses resulting from heavy traffic. Accordingly, the quantification of the reduced tolerable axle transitions as a result of driving near the edge of the pavement is required. This requires necessary measures to be carried out for a deviating traffic routing with a construction condition-related duration. This research project aims to provide a procedure for the technical evaluation of a hard shoulder clearance (temporary or permanent) from a design point of view. For this purpose, the reduced number of load cycles resulting from the traffic routing on different road cross-sections were determined.

2 Method

Asphalt construction

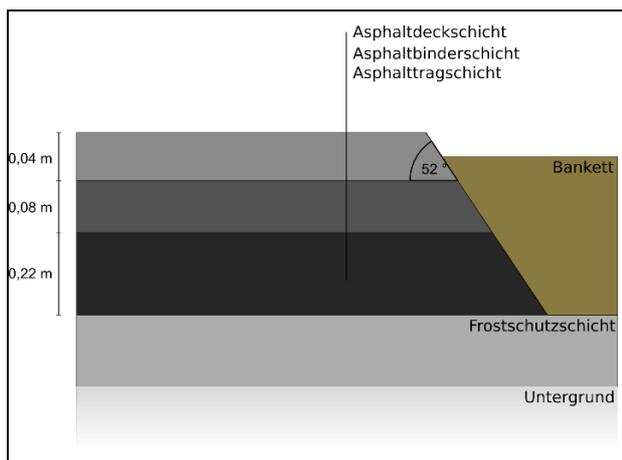


Fig. 2 1: Mounting structure for BK 100 according to RSTO
2012 Panel1, line1, (reference model)

The investigations carried out in this research project on asphalt pavements are essentially based on an evaluation of the structural substance according to the RSO Asphalt [RSO Asphalt E 15]. For a fictitious road section with the pavement structure shown in Fig. 2 1, whose material parameters originate from the results of previous research projects, the effect of different distances between the load application point and the edge of the carriageway on the durability of the pavement was investigated. As a result of the measurements of the carriageway widths and markings, a selection was made of the relevant distances between the load application point and the carriageway edge to be considered.

For the evaluation of the structural substance according to the RSO Asphalt [RSO Asphalt E 15], the stresses (stresses and strains) in the relevant verification points have to be determined, this was done with the finite element method (FEM).

First, the finite element model was developed, the calculation methods according to the RSO were implemented, and both were linked with each other. For testing and validation, calculations were carried out and compared for a reference model on the basis of both the multi-layer theory and the FEM. The evaluation of all further calculations is carried out in relation to this reference model.

In the next step, the effect of the distance between the load application point and the edge of the paved surface on the number of load cycles that can be borne by the asphalt pavement was investigated on the basis of the deterministic calculation concept (see Fig. 3 1). Based on this, the effectiveness of several variants of constructive measures to improve durability was investigated. As a result of these investigations, 2 constructive measures (see Fig. 3 2, Fig. 3 3) were selected and evaluations of the structural substance were carried out for them using the probabilistic method (see Fig. 3 4).

Concrete construction

For the investigations of the temporary use of edge areas in superstructures with concrete pavement, the first step is to carry out computational dimensioning/recalculations according to the procedure of [RDO Beton 09].

Here, the background experience of the dimensioning of the slabs of the main carriageway can be used. The safety level of the semi-probabilistic method has also been sufficiently tested in practice.

In the next step, the analytical calculation method of RDO Beton is used to dimension the slabs of the secondary lane, taking into account the lower B-number, the modified slab geometry and the free slab edge. In the subsequent step, precise FEM calculations can be performed, taking into account more realistic load positions. To maintain the safety level of the RDO Concrete, the calculation in the main lane without shoulder clearance is used as a common reference point.

3 Investigations for asphalt pavements

In the first step, the effects of the distance between the load application point and the edge of the paved surface on the load cycles the superstructure is able to withstand were investigated. These investigations are based on the previously identified significant load application points at distances of 0.0 m, 0.25 m, 0.5 m and 0.75 m from the edge of the pavement. First, the deterministic calculation method was used to determine the fatigue status for each asphalt layer (ratio of predicted number of axle passes / tolerable number of axle passes) and to set it in relation to the maximum of the determined values (relative fatigue status). Fig. 3-1 shows the result of these investigations.

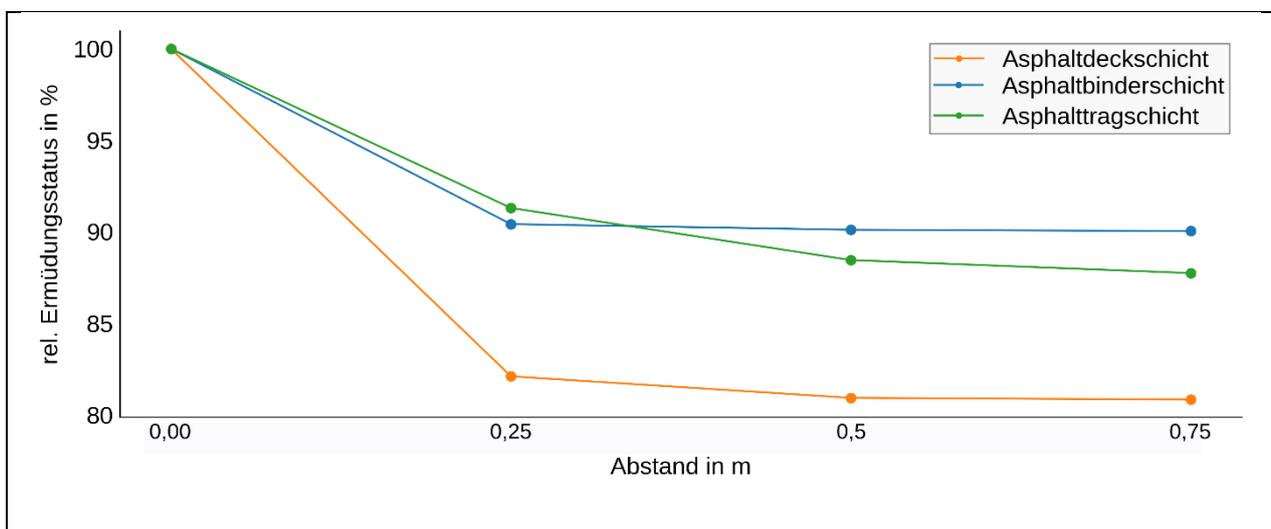


Fig. 3 1: Development of the fatigue status as a function of the distance between the load application point and the edge of the pavement

Reducing the distance from the edge leads to a decrease in durability. Shifting the load bearing distance from 0.75 m to 0.5 m to the edge of the pavement has the greatest effect on the asphalt base course. A further reduction of the edge distance from 0.5 m to 0.25 m leads to a shortening of the service life of the asphalt wearing course and asphalt base course, in which the greater influence on the asphalt base course can also be observed here. The shift of the load application to the very edge of the pavement has a significant influence on all asphalt layers. The asphalt wearing course has the largest increase in relative fatigue status here, but also for asphalt binder course and base course this reduction of the edge distance means a significant reduction of the service life.

As a result of deterministic service life predictions for various designs and their variants, the following fastening variants were selected for investigation using the probabilistic calculation approach.

- Variant with route in the asphalt base course (see Fig. 3 2)
- Variant with concrete L-panel support (see Fig. 3 3)
- structure according to RStO Table1 Line1 (reference model, see Fig. 3 3)

Figure 3 4 shows a summarised evaluation of these calculations. It shows the relative service life of the hard shoulder in relation to the service life of the main lane as a function of the proportional traffic load on the hard shoulder for different construction methods and load positions. From this, forecasts can be derived regarding the restriction of the service life of the hard shoulder in order to achieve the same service life in the hard shoulder and the main lane.

Taking into account the results of this project, permanent use of the hard shoulder is possible for the standard cross-sections according to [RAA 2008] under the condition of equal service life for the main lane and hard shoulder. It is assumed that the necessary re-marking is possible (no joints). In addition, it is assumed that the stress and consequently the service life is the same for an edge distance of at least 0.5 m as for the reference variant (3.5 m edge distance). If the edge distance is less than 0.5 m, only a temporary hard shoulder clearance

is possible. The permissible proportion of heavy goods traffic on the hard shoulder is calculated as a function of the realizable edge distance from Fig. 4 40. As a result of these calculations, approx. 40 % of the heavy goods traffic can be routed via the hard shoulder with an edge distance of at least 0.25 m. The following table shows the permissible proportion of heavy goods traffic on the hard shoulder

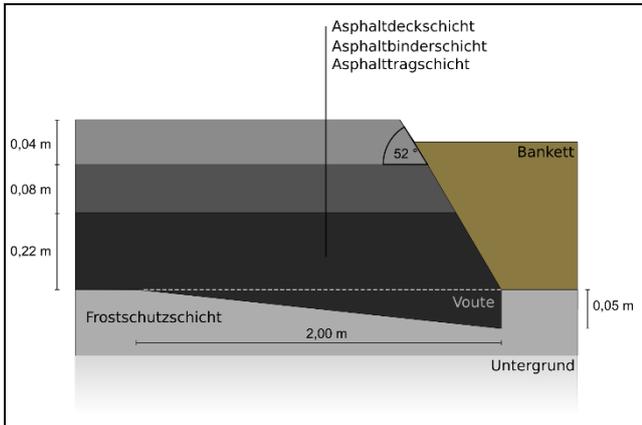


Fig. 3 2: Asphalt pavement with voute in the asphalt base course

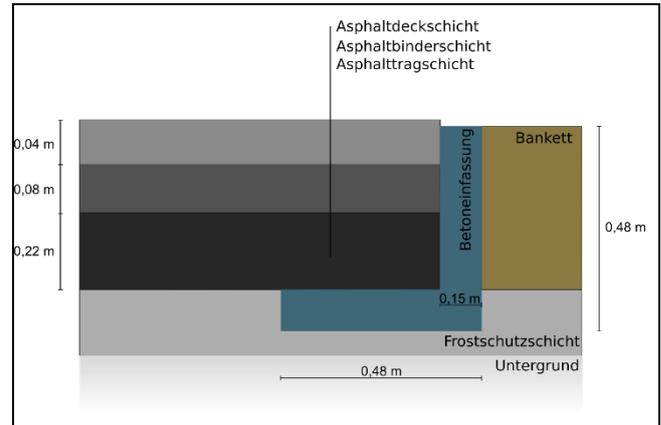


Fig. 3 3: Support with concrete L-elements

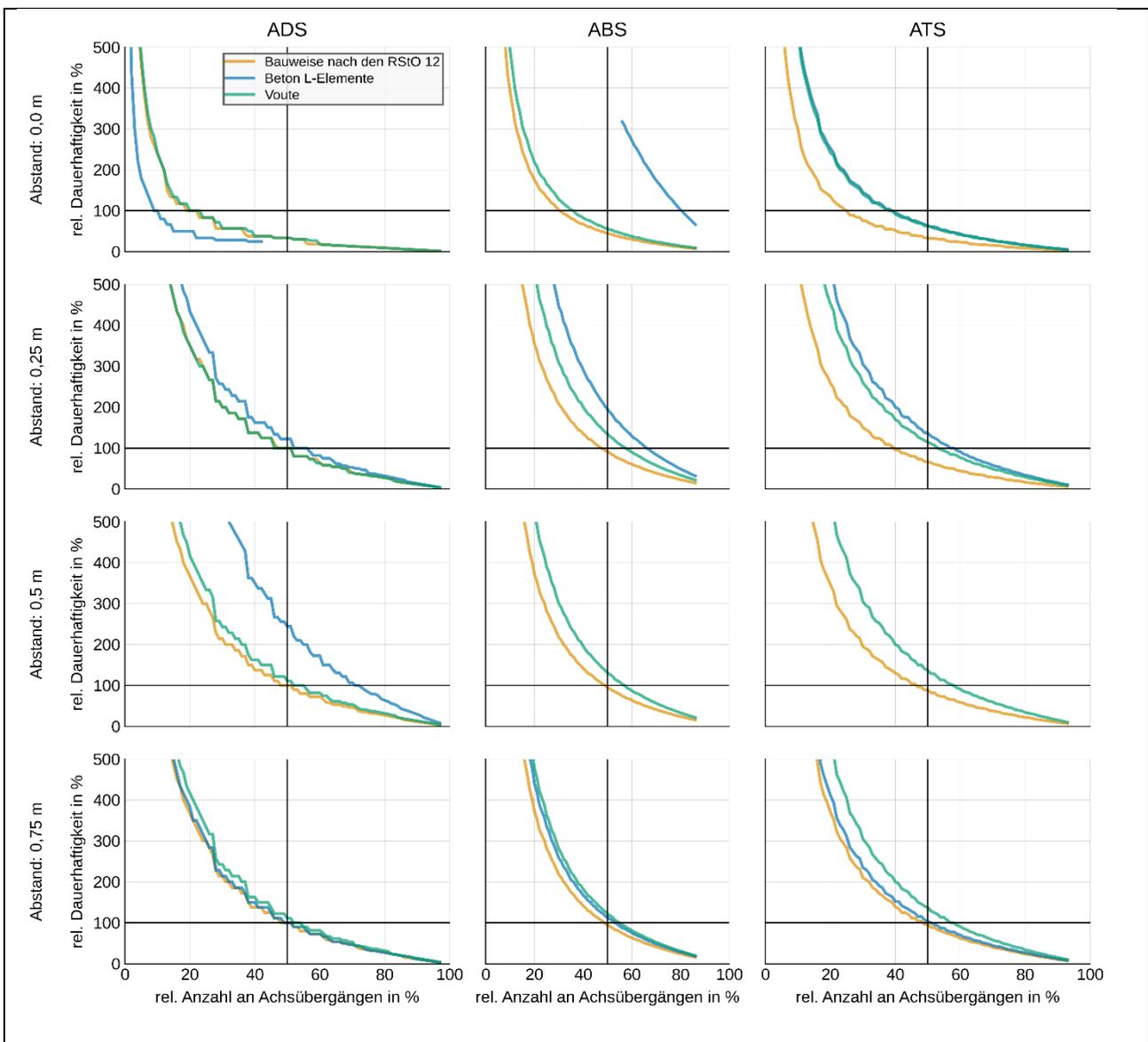


Figure 3 4: Service life of the hard shoulder in % with reference to the service life of the main carriageway as a function of the proportionate traffic load on the hard shoulder

This proportion can be increased with a greater thickness of the asphalt base course in the edge area in the form of a voute. The width and thickness of the haunch can be dimensioned depending on the predicted stress and material properties using the finite element method described in [RDO Asphalt 09]. With respect to the design measures investigated in Section 4.5, the construction of a voute in the asphalt base course is the preferred option for improving the service life. The edge construction variants investigated in Sections 4.5 and 4.6 offer only minor benefits in relation to the construction effort and space requirements and are therefore not recommended.

Direct access to the edge, especially for the ADS, leads to a considerable reduction in the service life and is not planned.

These forecasts are based on the investigation of a fictitious, homogeneous road section with the same conditions over the entire road cross-section. For the specific case of use of an existing roadway, a modified substance evaluation according to [RSO Asphalt 14] is generally recommended with regard to the special use. When planning new stretches or fundamental renewal, the respective utilization concept is to be taken into account in the course of dimensioning according to [RDO Asphalt 09].

4 Investigations for concrete pavements

In the case of concrete pavements, it is not only of interest at which point the load acts, but also how the slab geometry is represented, the geometry of the hard shoulder in particular. With their load class-dependent definition of slab thicknesses, the RStO presuppose certain slab geometries for which the thickness specifications are applicable. Only a general recommendation is given for slab geometries of the main lane. The other lanes, some of which also have an edge area, are not taken into account.

The dimensions of the slabs can be varied during computational dimensioning. In many cases, the selected slab length and width of the main lane is decisive for the slab thickness. In the hard shoulder, however, the slab geometries are usually much less favorable than in the main lane.

The width of the slabs in the hard shoulder has a major influence on the sensitivity of the governing principal stresses during hard shoulder release with regard to the distance to the free edge of the slab. It should be noted here that with small slab widths in the hard shoulder, vehicles (always or already when driving at a small distance from the edge of the roadway) drive simultaneously on the slab in the hard shoulder and on the slab in the main lane.

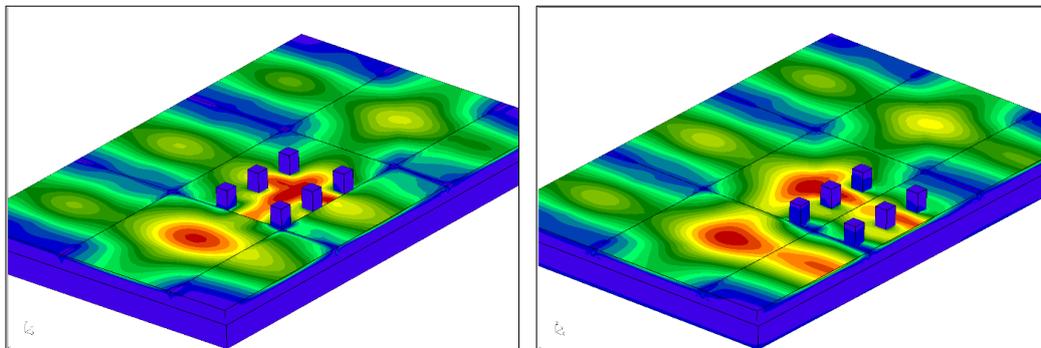


Fig. 4 1: Different loading scenarios for hard shoulder clearance and narrow slabs in the hard shoulder

Furthermore, the width of the hard shoulder has an influence on a significant principal stress when the slab of the main lane is loaded and vice versa.

Higher stresses occur at the edges than in the main lane. Using the fatigue function from the RDO Beton, these stress variations can be projected onto reduced B-numbers.

The evaluations of the projected B-numbers show that there is no general dependence of the reduced B-number on the observed edge distance of the vehicle from the free edge of the road. It is evident that a B-number reduction of 10 to 60 % can be assumed. If an unfavorable bearing with resulting impact factors is also assumed, a reduction in the bearable B-number of 25 to 80 % can be assumed. This range of values matches with practical experience. It has to be pointed out that the projection of the expectable B-numbers could be done directly by means of the fatigue function from the RDO Beton without any further adjustments or model-implied calibration. This should be emphasized due to the very high sensitivity of the fatigue function in the range of large load cycles.

The amount of heavy traffic moving close to the edge is of significant importance if existing roadways are to be used in peripheral areas. The evaluations show that if the slabs are well bedded, up to 20% of the heavy traffic can be routed over the hard shoulder. Due to potential erosion of the base courses in the edge areas

that cannot be modeled, it is recommended that a maximum of up to 10% of the heavy traffic can be routed over the shoulder without further testing if the condition of the shoulder is apparently good. If 10-20% of the heavy traffic is to be routed over slabs of the hard shoulder, an assessment of the bearing conditions and the condition of the base courses in the hard shoulder must be carried out. If more than 20% of the heavy traffic is to be routed over the hard shoulder, an evaluation of the substance of both the hard shoulder and the main lane should be carried out, since the longer service life of the main lane as a result of reduced load changes should be included in the evaluation in addition to the degradation of the hard shoulder.

The calculations have also shown that in the case of new construction or pavement rehabilitation, increasing the pavement thickness by 2.5 cm will reduce the stresses in the hard shoulder to such an extent that a non reduced service life in the hard shoulder can be assumed. However, the service life in the main lane is also significantly increased. The slab length can also be reduced to lower the stress level and so the degree of utilization.

The idea of forming a haunch with an increased thickness at the edge of the slab of 3 cm was rejected on the basis of practical construction considerations and with regard to the slope conditions. Another option considered to increase the performance of the edge area was to anchor the concrete slab with a concrete protection wall foundation. Calculations showed that high stress peaks could occur with this form of construction and that drainage of base and frost protection layers would be problematic. A general increase in service life of the hard shoulder by connecting the free edge of the carriageway to concrete safety barriers can therefore not be derived.

In the course of planning new pavements or reconstruction of existing roads, an additional calculated dimensioning of the hard shoulder according to [RDO Beton E 22] is recommended for the intended use of edge areas. For the traffic load, the case is to be considered that the maximum conceivable part of heavy traffic uses the hard shoulder. There is a potential for optimization in the choice of slab geometry and the position of the longitudinal joints in relation to the road marking.

When using the edge areas of existing sections, a recalculation according to the procedure of [RSO Beton E 22] is generally recommended. The existing boundary conditions, such as layer sequence and layer thicknesses of the superstructure, slab geometry and the mechanical concrete parameters, must be taken into account. The condition of the superstructure, in particular the concrete pavement, also plays an important role.

In case of a relocation of less than 10% of the heavy traffic foreseen in the service life, the use of the hard shoulder is not problematic if the condition of the concrete pavement can be described as good (failure rate in the main lane < 5% (see [RSO Concrete E 22])).

Inhalt

1	Einführung	15
1.1	Problemstellung und Ausgangslage	15
1.2	Gesamtziel.....	15
1.3	Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung	15
2	Theoretische Grundlagen und Erfahrungen / Stand der Technik.....	17
2.1	Seitenstreifenfreigabe in Deutschland	17
2.2	Auftretende Schadensbilder und zugrundliegende Schädigungsmechanismen an Straßenbefestigungen unter Randbefahrung	19
2.2.1	Asphaltbefestigungen.....	19
2.2.2	Betonbefestigungen	20
2.3	Bauliche Ertüchtigung zur Seitenstreifenfreigabe und bekannte Konstruktionen zur Vermeidung von Schädigungen	21
2.3.1	Deutsches Regelwerk	21
2.3.2	Konstruktionen.....	22
3	Grundlagen.....	23
3.1	Bestimmung der relevanten Verkehrsbelastung bzw. des einwirkenden Verkehrs.....	23
3.2	Lasteintragungspunkte.....	27
4	Untersuchungen Asphaltbauweise	29
4.1	Eingangsparameter für Modellerstellung und Berechnungen	29
4.1.1	Dimensionierungsrelevante Parameter.....	29
4.1.2	Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur	29
4.1.3	Achslastkollektiv	30
4.1.4	Materialauswahl Asphalt	30
4.1.5	Aufbau	37
4.1.6	Randausbildung.....	37
4.1.7	Probabilistische Verfahrensweise.....	38
4.2	Modellaufbau und Implementation der Prognoseverfahren nach den RSO Asphalt.....	41
4.2.1	FE-Modell	41
4.2.2	Nutzungsdauerprognose bzw. Bestimmung des Ausfallzeitpunktes	44
4.3	Validierung des implementierten Modells und des Berechnungsverfahrens	48
4.4	Auswirkung des Randabstandes auf die ertragbare Lastwechselzahl	49
4.5	Prüfung der Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen.....	54
4.5.1	Randausbildung.....	54
4.5.2	Voüte in der Asphalttragschicht.....	56
4.5.3	Randeinfassung.....	58
4.6	Untersuchung konstruktiver Maßnahmen mit dem probabilistischen Berechnungsansatz	60
4.7	Schlussfolgerungen	63
4.7.1	Bestandsstrecken	63
4.7.2	Neubaustrecken.....	64
5	Untersuchungen Betonbauweise.....	66
5.1	Eingangsdaten.....	66
5.1.1	Plattengeometrien Hauptfahrstreifen	66
5.1.2	Deckendicke	69
5.1.3	Materialparameter der Betondecke.....	69
5.1.4	Unterlage	70
5.1.5	Dübel und Anker	70
5.1.6	Temperaturbelastung.....	70

5.2	Vergleichende semiprobabilistische Dimensionierung von Hauptfahrstreifen und Seitenstreifen nach den RDO Beton	70
5.3	Methode zur Projektion der Dimensionierungsergebnisse mit den RDO Beton auf die FEM-Berechnungsergebnisse.....	71
5.3.1	Laststellungen und Modellierung	73
5.3.2	Aufstellen von Zusammenhängen zwischen ertragbaren Lastwechseln im Hauptfahrstreifen und Randbereich unter Variation des Lasteinleitungspunktes - Methode für den Übertrag der Ermüdungsfunktion der RDO Beton.....	75
5.4	FEM-Spannungsberechnungen und Vergleich.....	77
5.5	Auswirkungen der Randbefahrung auf die ertragbaren Lastwechselzahlen	86
5.5.1	Projektion der Spannungen auf die ertragbaren B-Zahlen.....	86
5.5.2	Auswertung der Projektion der Spannungen auf die ertragbaren B-Zahlen	92
5.5.3	Schlussfolgerungen für Bestandsstrecken bzgl. der Befahrung von Randbereichen.....	98
5.6	Schlussfolgerungen für Neubauten bei vorgesehener Befahrung von Randbereichen	99
5.6.1	Änderung der Plattengeometrie	99
5.6.2	Ausbildung einer Voute zum Fahrbahnrand	101
5.6.3	Anbindung an Betonschutzwände	102
6	Vorschläge zur Einarbeitung in die Regelwerke	104
6.1	Asphaltbauweise	104
6.2	Betonbauweise	105
7	Zusammenfassung.....	106
7.1	Asphaltbauweise	106
7.2	Betonbauweise:.....	107
	Literatur	108
	Bilder	111
	Tabellen.....	118
	Anhang	119

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Asphaltbinderschicht
ADS	Asphaltdeckschicht
AP	Arbeitspaket
ATS	Asphalttragschicht
B	Dimensionierungsrelevante Beanspruchung
BAB	Bundesautobahnen
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
Bk	Belastungsklasse
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (in Kfz/24h)
DTV ^(SV)	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs(in Kfz/24h)
EKA	Entwurfsklasse für Autobahnen
FEM	Finite Elemente Modelle
FS	Fahstreifen
HFS	Hauptfahstreifen
NBA	Netzbeeinflussungsanlage: lenken den Verkehr über Wechselwegweisersysteme von überlasteten oder grenzbelasteten Strecken auf jene Netzteile die noch Reserven aufweisen
RDO Asphalt	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht
RDO Beton	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen
RQ	Regelquerschnitt
RStO 2012	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012
SBA	Streckenbeeinflussungsanlage: zur Stabilisierung des Verkehrsflusses an knotenfreien Strecken, beinhalten Anlagen zur Geschwindigkeitshomogenisierung und zur Fahstreifensignalisierung (Sperrung von Fahstreifen)
SFS	Seitenfahstreifen
TSF	temporäre Seitenstreifenfreigabe: ermöglicht auf stark belasteten Straßen die Freigabe des Seitenstreifens, um kurzfristig/für einen beschränkten Zeitraum die Kapazität des Abschnittes zu erhöhen
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage (Oberbegriff): techn. Einrichtung, um den Verkehrsfluss zu beeinflussen/verbessern
ZTV Asphalt-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt
ZTV Beton-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Ausgangslage

Das deutsche Autobahnnetz ist eines der dichtesten und am stärksten ausgelasteten Fernstraßennetze weltweit. Immer wieder kommt es zu Verfügbarkeitsengpässen auf besonders hoch ausgelasteten Streckenabschnitten infolge von:

- Baumaßnahmen (Erhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen),
- sehr hohem Verkehrsaufkommen (besonders zu Spitzenzeiten) und
- schweren Verkehrsstörungen (Stau und unfallbedingt).

Bei der Dimensionierung und Konstruktion von Straßenbefestigungen wird davon ausgegangen, dass die Verkehrslasten einen Abstand zum Fahrbahnrand haben, da im Hinblick auf die Dimensionierung bislang maßgeblich der Hauptfahrstreifen betrachtet wird. Wird aufgrund einer der oben genannten Aspekte der Verkehr umgelegt, wird dieser zum Teil sehr nah an den Fahrbahnrand geführt. Dabei werden Betonoberbauten mit ungünstigerer Plattengeometrie und Asphalt- oberbauten in nicht selten schlechter verdichteten Randbereichen belastet, was zu einer ungünstigen Belastungssituation der Straßenbefestigung und folglich zu einer Verringerung der aufnehmbaren Lastwechselzahl führt.

1.2 Gesamtziel

Dieses Forschungsvorhaben soll eine Vorgehensweise zur fachtechnischen Bewertung einer Seitenstreifenfreigabe (temporär oder dauerhaft) aus konstruktiver Sicht zur Verfügung stellen. Hierfür werden die reduzierten Lastwechselzahlen bestimmt, die sich aus den Verkehrsführungen auf unterschiedlichen Straßenquerschnitten ergeben.

Es sollen bautechnische Maßnahmen zur Ertüchtigung vorhandener Befestigungen bzw. für den Neubau bei Seitenstreifennutzung durch den Schwerverkehr entwickelt werden. Mit Hilfe von Modellen zur Simulation der Beanspruchung der Asphalt- bzw. Betonbefestigungen bei Seitenstreifennutzung durch den Schwerlastverkehr und darauf aufbauenden Nutzungsdauerprognosen für die Fahrbahnbefestigungen bei randnaher Befahrung der befestigten Fläche sind diese bautechnischen Maßnahmen zu begründen. Unter Berücksichtigung der Nutzungszeiten pro Tag sollen diese Maßnahmen an den Seitenstreifen eine zum Hauptfahrstreifen vergleichbare Nutzungsdauer erreichen. Auf der Grundlage von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind die entwickelten Maßnahmen zu reihen und Textvorschläge für die Einarbeitung der Maßnahmen in die dimensionierungsrelevanten Regelwerke der FGSV zu erarbeiten.

1.3 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Eine Seitenstreifennutzung durch Schwerverkehrsfahrzeuge führt zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Straßen während der Zeit des täglichen Spitzenverkehrsaufkommens ohne zusätzliche Fahrstreifen. Der Seitenstreifen verfügt jedoch über eine geringere Breite (i.d.R. 2,5 m) gegenüber dem Hauptfahrstreifen (i.d.R. 3,5 bis 3,75 m) und einen freien Rand, sodass andere Belastungszustände als im Hauptfahrstreifen auftreten. Infolge dessen wird die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen durch vorzeitige Schäden aufgrund des dauerhaft reduzierten Abstandes der Rollspur von dem in Fahrrichtung rechten Rand der befestigten Fläche (Randbelastungsfall) beeinträchtigt. Die mit Hilfe von Modellrechnungen simulierten Beanspruchungen werden verwendet, um zu bestimmen, ab welcher Verkehrsbelastung bedingt durch die Seitenstreifenfreigabe nicht mehr der Hauptfahrstreifen sondern der Seitenstreifen dimensionierungsrelevant wird.

Des Weiteren sollen mit Hilfe von Simulationen bautechnische Maßnahmen entwickelt werden, mit denen rechnerisch gleiche Nutzungsdauern des Seitenstreifens sowie des Hauptfahrstreifens

abgeschätzt werden können. Damit wird auf wissenschaftlicher Grundlage ein wesentlicher Erkenntniszuwachs zur Beanspruchung des Oberbaus von Seitenstreifen sowie zur Feststellung der Ursachen für bisher aufgetretene Schäden bei Benutzung der Streifen durch Schwerverkehrsfahrzeuge gewonnen. Außerdem werden bautechnische Maßnahmen entwickelt, mit welchen gleiche Erhaltungs- bzw. Erneuerungsintervalle erreicht werden wie für den Hauptfahrstreifen. Aufgrund dessen lassen sich die Baustellenzahl, die damit verbundenen Nutzungseinschränkungen sowie Staus mit sämtlichen Folgekosten reduzieren.

2 Theoretische Grundlagen und Erfahrungen / Stand der Technik

2.1 Seitenstreifenfreigabe in Deutschland

Fahrbahnen weisen in der Regel zwei Randbereiche auf. Während der in Fahrtrichtung linke Fahrbahnrand für die hier durchgeführten Untersuchungen nur eine untergeordnete Rolle spielt, da er außer im Rahmen von Verkehrsführungen selten vom Schwerverkehr befahren wird, kann der rechte Fahrbahnrand deutlich höheren Belastungen ausgesetzt sein. Aus diesem Grund wird diesem Fahrbahnrand hier die größere Aufmerksamkeit entgegengebracht.

Bei der temporären Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden:

- Nutzung aufgrund der temporären Seitenstreifenfreigabe (TSF) zur kurzzeitigen Verfügung
- Nutzung aufgrund von Arbeitsstellen (Baustellen) für einen längeren und auch kürzeren (bestimmten) Zeitraum.

Die temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) ist ein Anlagentyp der Verkehrsbeeinflussungsanlagen. „Temporäre Seitenstreifenfreigaben können auf regelmäßig überlasteten Autobahnen eingesetzt werden, um in den Spitzenstunden das Befahren des Seitenstreifens zu ermöglichen und somit kurzzeitig einen zusätzlichen Fahrstreifen zur Verfügung zu stellen. Meist werden die Seitenstreifenfreigaben mit Streckenbeeinflussungsanlagen kombiniert, können aber auch als separate Anlagen errichtet werden. Derzeit sind rund 210 Kilometer Seitenstreifen durch temporäre Seitenstreifenfreigabe nutzbar.“ [BASt 2017]

In dem „Projektplan Straßenverkehrstelematik 2015“ (aufgestellt 2011) sind bundesweit für das Autobahnnetz Streckenbeeinflussungsanlagen, temporäre Seitenstreifenfreigabe sowie Netzbeeinflussungs- und Zuflussregelanlagen eingetragen, jeweils farblich markiert mit dem Status Planung, Erneuerung oder Bestand (Beispiel-Ausschnitte in Bild 2-1). Für die temporäre Seitenstreifenfreigabe sind weitere 350 Richtungskilometer geplant.

Gemäß [ARS 20/2002] „kommt eine generelle oder flächendeckende Umnutzung des Seitenstreifens aus Verkehrssicherheitsgründen nicht in Frage.“ Eine Freigabe ist demnach nur in sehr begrenztem Umfang vorzunehmen. Zudem ist eine Seitenstreifennutzung nur dann möglich, wenn planmäßig ein Ausbau (Bedarfsplan) vorgesehen ist.

Eine Seitenstreifennutzung kommt auch nur in Frage, wenn im Nachweis gemäß [HBS 2001] eine Qualitätsstufe D für den Verkehrsablauf an mehr als 30 Stunden pro Jahr erreicht wird. Eine weitere Voraussetzung zur Freigabe des Seitenstreifens ist gemäß Rundschreiben das Vorliegen von Verkehrsstärken > 65.000 Kfz/24 h bei 4-streifigen Streckenabschnitten. Zudem muss der Querschnitt „so ummarkiert oder verbreitert werden, dass alle planmäßig vom Schwerverkehr benutzten Fahr- und/oder Seitenstreifen eine Mindestbreite von 3,50 m aufweisen und ein Befahren des äußeren Randes verhindert wird (Randabbrüche)“. [ARS 20/2002]

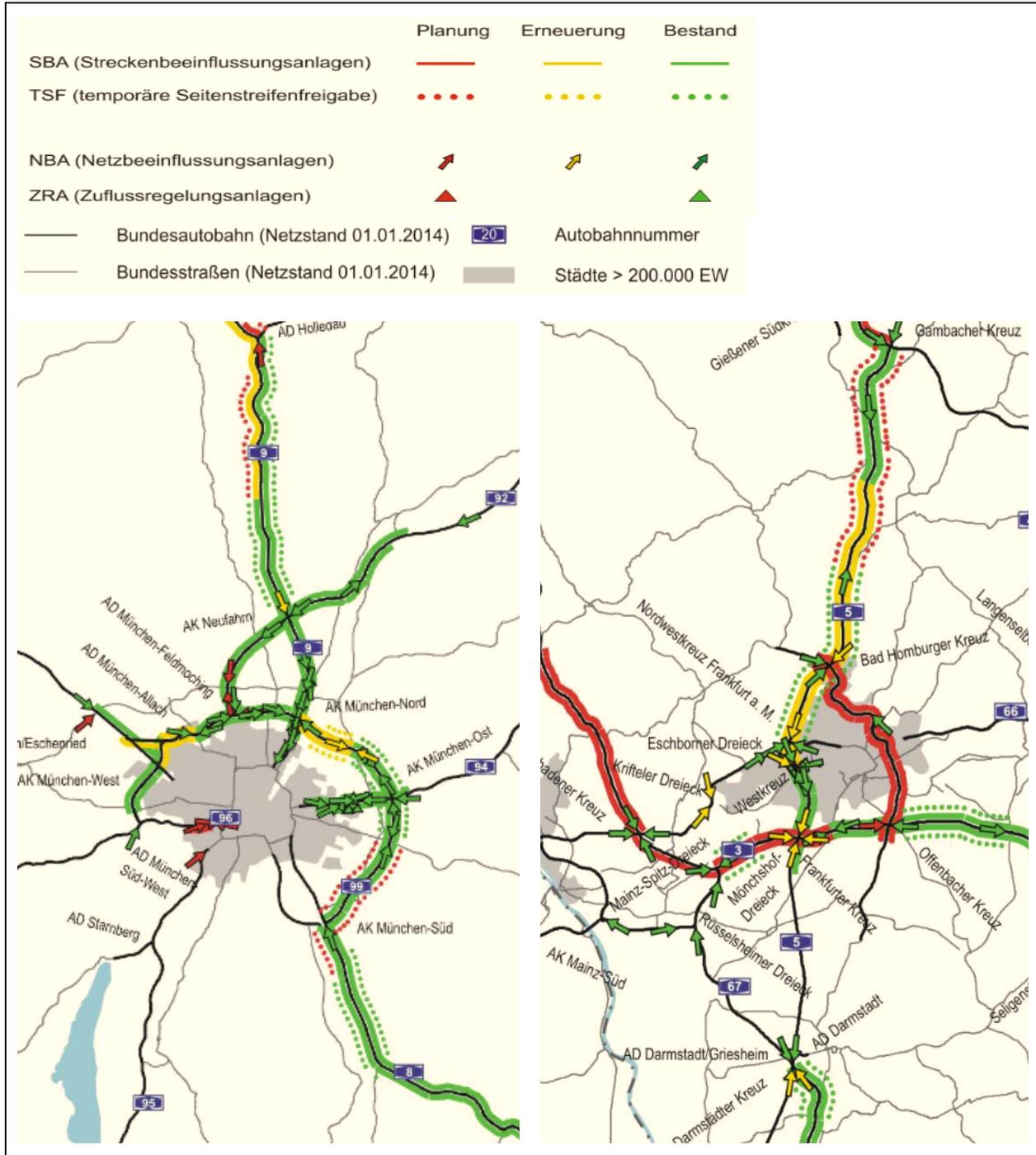


Bild 2-1: Ausschnitte aus dem Projektplan Verkehrstelematik 2015, links: Raum München, rechts: Raum (Mainz und) Frankfurt [Karte, Projektplan Verkehrstelematik, 2015]

2.2 Auftretende Schadensbilder und zugrundeliegende Schädigungsmechanismen an Straßenbefestigungen unter Randbefahrung

2.2.1 Asphaltbefestigungen

Die Straßenbefestigungen (Asphalt- und Betonbefestigung) sind hohen Verkehrs- und Temperaturbelastungen ausgesetzt. Auf Grund der Verkehrsbelastung wird in der Asphaltbefestigung in vertikaler Richtung eine Druckbeanspruchung und in horizontaler Richtung eine Biegezug- bzw. eine Biegedruckbeanspruchung hervorgerufen. Die Beanspruchung durch die Temperatur ist abhängig von der Abkühlung oder Erwärmung der Befestigung. Die Abkühlung der Asphaltbefestigung führt zu einer horizontalen Zugbeanspruchung und die Erwärmung zu einer horizontalen Druckbeanspruchung. Die Beanspruchungszustände sind schematisch in Bild 2-2 und Bild 2-3 dargestellt.

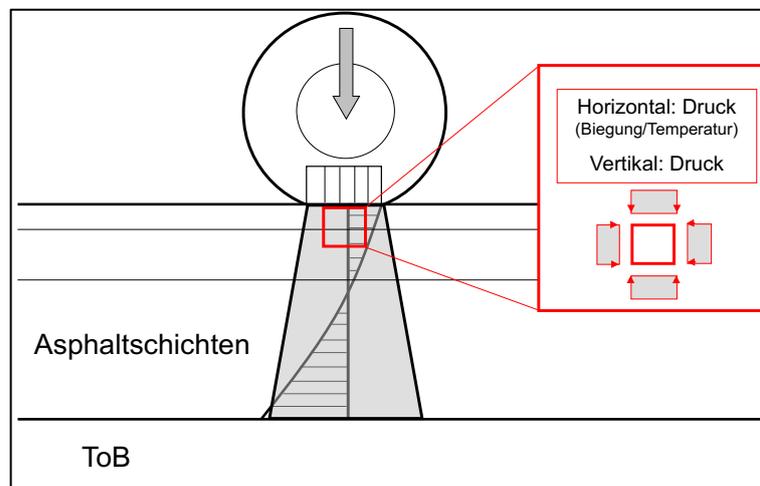


Bild 2-2: Vertikale Druckbeanspruchung durch Verkehr, horizontale (Biege-) Druckbeanspruchung an der Oberseite der Asphaltbefestigung durch Verkehr und Temperatur

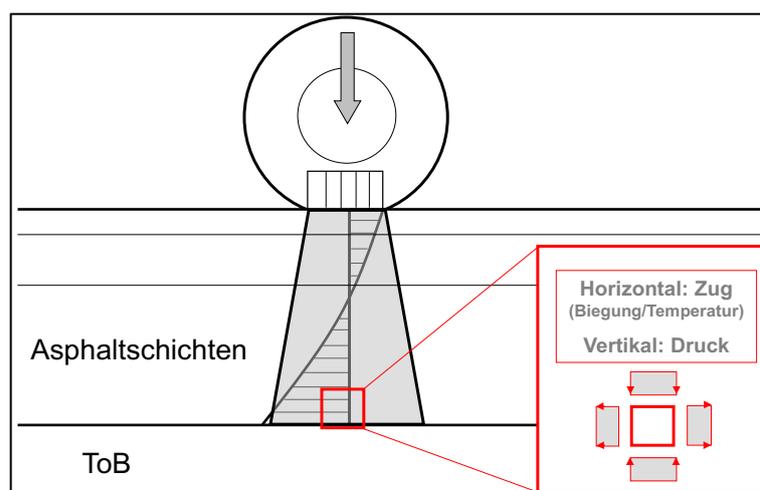


Bild 2-3: Vertikale Druckbeanspruchung durch Verkehr, horizontale (Biege-) Zugbeanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht durch Verkehr und Temperatur

Die durch die Verkehrsbelastung ausgelöste vertikale Druckspannung kann abstrakt wie in Bild 2-4 dargestellt werden.

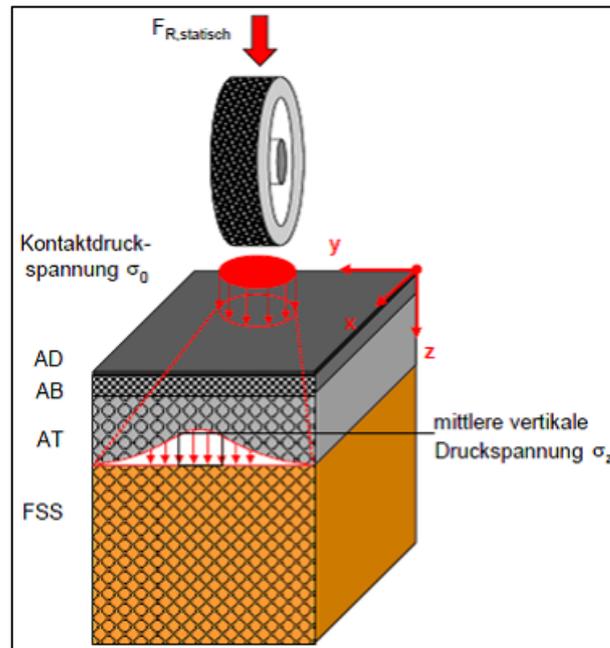


Bild 2-4: Vertikale Kontaktdruckspannung (Rad – Asphaltdeckschicht) und mittlere vertikale Druckspannung in den Asphaltsschichten

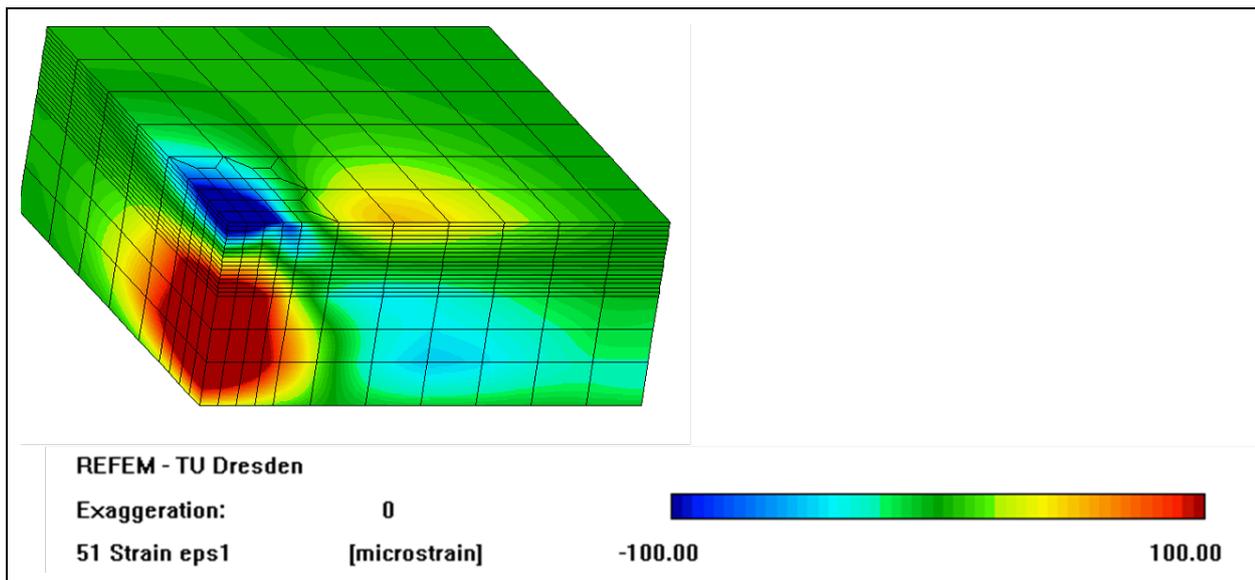


Bild 2-5: Berechnungsbeispiel aus REFEM mit Zug- und Druckspannung in einer Asphaltbefestigung

Diese Verkehrs- und Temperaturbelastungen führen zu Schäden, die sich vorrangig in Form von Riss- und Spurrinnenbildung in der gesamten Asphaltbefestigung äußern.

2.2.2 Betonbefestigungen

Konkrete Schadensfälle im Seitenstreifen, die sich auf eine gesteigerte Verkehrsbelastung zurückführen lassen, sind bislang nicht bekannt. Es ist jedoch möglich, dass sich aufgrund der ungünstigeren Plattengeometrien Querrisse einstellen, die sich abweichend von Bild 2-6 eher in Plattenmitte befinden. Durch vermehrte Befahrungen des Plattenrandes erscheinen in Abhängigkeit vom Zustand des Banketts auch Kantenabbrüche möglich.



Bild 2-6: Querrisse im Seitenstreifen [Foto Villaret]

2.3 Bauliche Ertüchtigung zur Seitenstreifenfreigabe und bekannte Konstruktionen zur Vermeidung von Schädigungen

2.3.1 Deutsches Regelwerk

Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)

Nach den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen sind Seitenstreifen Bestandteil von Autobahnquerschnitten für die Verkehrssicherheit und den Betriebsdienst. Im Regelfall erfolgt die konstruktive Ausbildung des Seitenstreifens wie die der Fahrstreifen, damit diese in Arbeitsstellen und Pannen auch vom Lkw-Verkehr genutzt werden können. Die Breite des Seitenstreifens richtet sich nach der Entwurfsklasse Autobahn (EKA) und beträgt mindestens 2,00 m.

Die Umnutzung von Seitenstreifen kann bei Autobahnen der EKA 1 zur zeitlich befristeten Kapazitätserhöhung erwogen werden, wenn ständig Staus oder schwere Verkehrsstörungen auftreten, die Auffahrunfälle nach sich ziehen. Weitere Anlagen und Elemente der Autobahn wie bspw. Nothaltebuchten, Raststätten oder Anschlussstellen dürfen durch die Nutzung des Seitenstreifens in ihrer Funktion nicht beeinträchtigt werden. Es sind verschiedene Aspekte zu beachten, jedoch wird nur auf die für die Bearbeitung dieses FuE-Projektes relevanten Punkte eingegangen.

Bei der Umnutzung ist eine Ummarkierung oder eine Verbreiterung des Querschnitts durchzuführen, sodass alle vom Lkw-Verkehr benutzten Fahr- und/oder Seitenstreifen eine Mindestbreite von 3,50 m aufweisen und das Befahren des äußeren Randes verhindert wird. Es ist sicherzustellen, dass die Seitenstreifen dem Schwerverkehr konstruktiv standhalten.

Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS)

Aus den Richtlinien für die Markierung von Straßen Teil 1: Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen [RMS-1] gehen die Strichbreiten der Markierung hervor, die ebenfalls für die Ermittlung der Lasteinleitungspunkte relevant sind. In Tab. 2-1 sind die in den RMS Teil 1 festgelegten Strichbreiten der Längsmarkierung für die Fahrbahnrandmarkierung auf Autobahnen aufgelistet. „Auf Straßen mit befestigten Seitenstreifen von 1,00 m Breite oder mehr sollen Fahrbahnbegrenzungen (Trennung zwischen Fahrbahn und Seitenstreifen) als Breitstrich

ausgeführt werden, sonst als Schmalstrich. Sind befestigte Seitenstreifen markiert, so dürfen an deren rechten Rändern keine Markierung aufgebracht werden [...]. Auf Fahrbahnen mit befestigten Randstreifen sind die Fahrbahnbegrenzungen auf den inneren Rändern des Randstreifens aufzutragen“ [RMS-1].

Strichbreite	Autobahn
Schmalstrich	0,15 m
Breitstrich	0,30 m

Tab. 2-1: Strichbreite

Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA)

Die Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) gelten für die verkehrsrechtliche Sicherung von Arbeitsstellen an und auf Straßen, wobei zwischen den Anwendungsbereichen innerörtlicher Straßen, Landstraßen und Autobahnen unterschieden wird. Zur Bearbeitung des vorliegenden FuE-Projektes wird der Teil Autobahnen herangezogen, da sich aus der Umleitung des Verkehrs in Arbeitsstellen Lasteinleitungspunkte für die Dimensionierung der Randbereiche ableiten lassen.

Bei der Einrichtung von Arbeitsstellen wird des Weiteren zwischen Arbeitsstellen von längerer und kürzerer Dauer unterschieden. In Arbeitsstellen von längerer Dauer ist der Verkehr „[...] unter Ausnutzung der befestigten Straßenbreite, eventuell auch nach Verbreiterung durch Ansetzen eines entsprechenden Streifens oder auf Behelfsfahrbahnen [...]“ abzuwickeln (RSA). Dabei werden Fahrstreifenbegrenzungen jeweils dem anliegenden Fahrstreifen angerechnet. Die Markierung wird auf ein Minimum von 0,15 m für alle Linien reduziert.

In Arbeitsstellen kürzerer Dauer, bei denen Arbeiten in dem oder den Überholfahrstreifen erfolgen, kann der Verkehr auch über den Seitenstreifen geführt werden, wenn zwei Fahrstreifen aufrecht erhalten werden sollen (Regelpläne DIII/4 und DIII/6 der (RSA)). Eine gesonderte Markierung wird bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer meist nicht aufgebracht. Die Führung der Verkehrsteilnehmer erfolgt über entsprechende Beschilderungen und umfasst im Regelfall nur einen eng begrenzten Abschnitt.

2.3.2 Konstruktionen

Zur Nutzung einer Fahrbahn im Baustellenverkehr reichen oftmals die vorhandenen Fahrbahnbreiten nicht aus. Um dennoch eine Nutzung gewährleisten zu können, muss eine temporäre Verbreiterung erfolgen. Dies geschieht meist durch den Anbau eines mehr oder weniger breiten Asphaltstreifens an die vorhandene Konstruktion. Dieser wird im Regelfall nach Beendigung der Nutzung (bzw. der Baustelle) wieder zurückgebaut. Diese Variante stellt daher keine Konstruktion zur Vermeidung von Schäden dar, sondern dient lediglich der Verbreiterung der Fahrbahn, um den Verkehr für die Zeit der Arbeitsstellendauer aufnehmen zu können.

3 Grundlagen

3.1 Bestimmung der relevanten Verkehrsbelastung bzw. des einwirkenden Verkehrs

Die dimensionierungsrelevante Beanspruchung einer Fahrbahn wird mit Hilfe der B-Zahl ausgedrückt. Diese ergibt sich auf der Grundlage des DTV^(SV) in Verbindung mit den Faktoren gemäß [RStO 12] u.a. für Fahrstreifenanzahl und Fahrstreifenbreite. Die B-Zahl wird dabei jedoch immer für den Fahrstreifen ermittelt, der die größten Belastungen aufweist, den Hauptfahrstreifen. Eine detaillierte Berechnung nach Fahrstreifen ist nicht vorgesehen. Dies wird nur möglich, sofern detaillierte fahrstreifenbezogene Zählzeiten vorliegen.

Die frei zugänglichen Verkehrsdaten der BAST Zählstellen werden hier jeweils für den Querschnitt angegeben und können noch für die einzelnen Richtungsfahrbahnen unterschieden werden. Angaben zu den Belastungen der einzelnen Fahrstreifen werden allerdings nicht gemacht. Um jedoch eine grobe Übersicht zu erhalten, mit welchem Verkehr (oder Anteil) zu rechnen ist, wurde anhand eines Beispiels und unter zugrunde legen sinnvoller Annahmen die Belastung des Seitenstreifens ermittelt. Hierfür war es erforderlich, die vorhandenen tages- und stundengenauen Einzeldaten hinsichtlich des Tagesgangs des Verkehrs auszuwerten und Annahmen für den zu erwartenden Verkehr auf dem Seitenstreifen zu treffen.

Beispiel mit Tagesganglinie

Betrachtet wurde in diesem Fall die Strecke der BAB A99 bei München, deren Zählstelle AK München Ost (S) Angaben zur Verkehrsbelastung aus dem Jahr 2018 liefert. Der DTV^(SV) im Jahr 2018 lag für die betrachtete Zählstelle bei 13.980 Kfz/24h (Zählwert). Ausgehend von einem 6-streifigen Querschnitt mit einer Fahrstreifenbreite im Hauptfahrstreifen von 3,75 m sowie einer Höchstlängsneigung zwischen 2 und 4 % (Werte entsprechen Tab. 4-1), lässt sich die dimensionierungsrelevante Beanspruchung innerhalb des 30-jährigen Nutzungszeitraums zu 147 Mio. äquivalenten 10 t-Achsübergängen ermitteln (Tab. 3-1). Gemäß Tabelle 1 der [RStO 12] ergibt sich somit eine Belastungsklasse Bk100.

Zeitraum [Jahre]	Berechnungsgrundlage	DTV ^(SV) [Kfz/24h]	B-Zahl [Mio.]	
			Ohne Seitenstreifenfreigabe, Fahrstreifenbreite im HFS 3,75 m	Mit Seitenstreifenfreigabe, Fahrstreifenbreite im HFS 3,50 m
2018 - 2047	Zählstelle A99 AK München-Ost (S)	13.980	147,1	161,8

Tab. 3-1: Relevante B-Zahl auf Grundlage der DTV^(SV)-Werte der Zählstelle

Es wird angenommen, dass der Seitenstreifen voraussichtlich nur zu Zeiten hoher Belastung für den Verkehr freigegeben wird, um so die Kapazität der Strecke zu erhöhen. Genaue Freigabezeiten sind nicht allgemein gültig und können je Strecke variieren. Um die Belastungen getrennt für Hauptfahr- und Seitenstreifen ableiten zu können, ist es sinnvoll, mögliche streckenbezogene Freigabezeiten zu eruieren. Hilfsmittel hierfür ist die mittlere Tagesganglinie für den werktäglichen Verkehr. Diese wurde mit Hilfe von Stundenwerten der Zählstelle aus dem Jahr 2018 ermittelt. Bild 3-1 zeigt die Tagesganglinien getrennt für den PKW- und LKW-Verkehr sowie für alle KFZ zusammen. Als Werkzeuge wurden dafür alle Tage von Montag bis Freitag angenommen und ausgewertet. Ausgenommen wurden Samstage, Sonn- und Feiertage sowie Urlaubswerkzeuge.

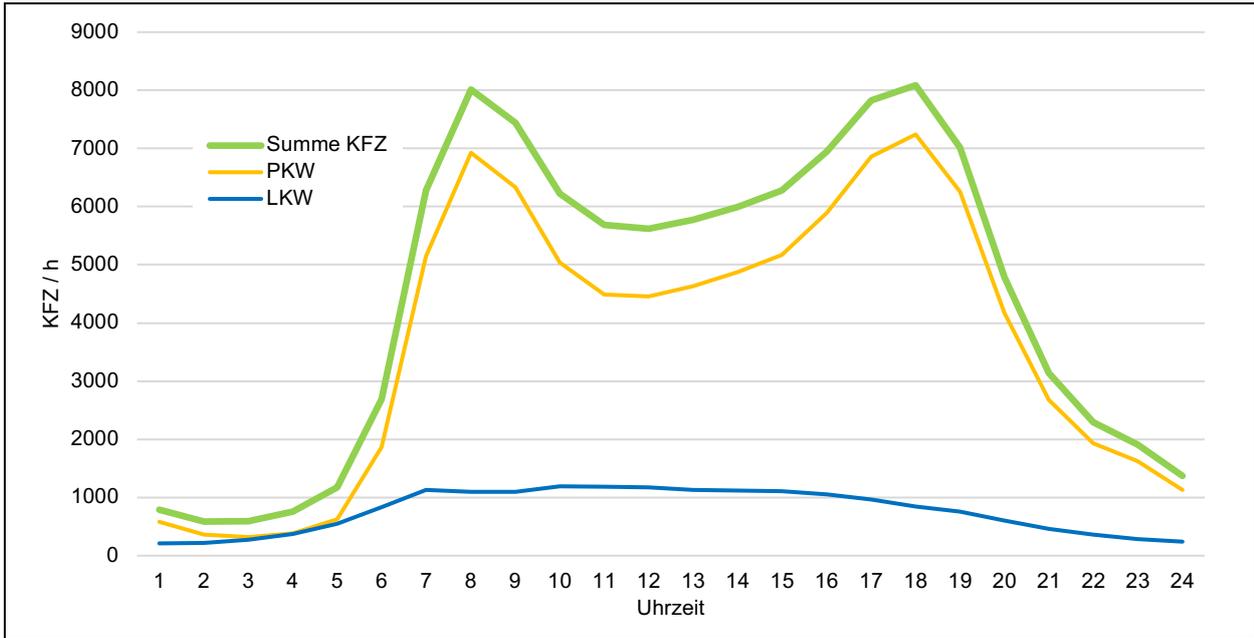


Bild 3-1: Tagesganglinien Verkehr werktags Ø 2018 getrennt für PKW, LKW und Summe KFZ

Es ist deutlich erkennbar, dass im Laufe des Tages zwei Verkehrsspitzenzeiten existieren. Diese können in etwa auf die Zeiträume von 07:00 – 10:00 sowie 15:00 – 19:00 Uhr festgelegt werden. Für diese Zeiten ist daher eine temporäre Seitenstreifenfreigabe denkbar. Für die weiteren Untersuchungen wird vereinfachend davon ausgegangen, dass eine Freigabe des Seitenstreifens von Montag bis Freitag erfolgt. Es wird also angenommen, dass der Seitenstreifen an fünf Tagen zu jeweils sieben Stunden vom Verkehr befahren wird.

Um den entsprechenden Anteil der Verkehrsbelastung ermitteln zu können, wurde der Anteil des Schwerverkehrs am Beispiel des werktäglichen Verkehrs 2018 während der angenommenen Freigabezeiten ermittelt. Zu den Verkehrsspitzenzeiten konnte in diesem Beispiel ein Anteil von 40 % des LKW-Verkehrs festgestellt werden. Der DTV^(SV) wird hingegen über den Gesamtzeitraum eines Jahres ermittelt und unterscheidet demnach nicht zwischen Werk- und Sonn- bzw. Feiertagen.

Um den Anteil des DTV^(SV) herauszuarbeiten, der den weiteren Berechnungen für Hauptfahr- und Seitenstreifen zu Grunde gelegt werden kann, wurde ein Durchschnittswert für alle Tage gemäß Tab. 3-2 gebildet. Demzufolge sind von Montag bis Freitag ca. 60 % des Schwerverkehrs auf dem Hauptfahrstreifen und ca. 40 % auf dem Seitenstreifen zu erwarten. Mit der Annahme, dass an den Wochenenden keine Seitenstreifenfreigabe erfolgt und somit auch kein Schwerverkehr auf dem Seitenstreifen fährt, ergibt sich eine Verteilung des DTV^(SV) von ~ 71 % auf dem Hauptfahrstreifen und ~ 29 % auf dem Seitenstreifen. Die sich daraus ergebenden B-Zahlen (Randbedingungen gemäß Tab. 4-1) sind ebenfalls in der Tab. 3-2 aufgeführt.

	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Ø	DTV ^(SV) 2018	B-Zahl für Fahrstreifenbreite >3,50 und ≤3,75 m
HFS	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	100 %	100 %	71,4 %	9.982	115,5
SFS	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	0 %	0 %	28,6 %	3.998	46,3
Σ									13.980	161,8

Tab. 3-2: Anteile Verkehrsbelastung auf Seiten- und Hauptfahrstreifen, resultierender Anteil DTV^(SV) und B-Zahl

Dieser Ansatz stellt den Pessimalfall dar, um die zu erwartende Höchstbelastung abschätzen zu können. In der Realität sind zu Zeiten einer Seitenstreifenfreigabe nahezu gleiche Anteile des

Schwerverkehrs auf Seiten- und Hauptfahrstreifen zu verzeichnen. Belastbare Zahlen existieren dazu jedoch nicht.

Daten aus Zählstellen

Der Auftraggeber stellte Daten von Dauerzählstellen für das Jahr 2018 zur Verfügung. Eine Auswertung ergab, dass es für das Jahr 2018 insgesamt 10 Zählstellen gab, an denen in einer oder beiden Richtungen der Seitenstreifen temporär freigegeben war. Der genaue Zeitraum der Freigabe ist unterschiedlich und nicht weiter bekannt. Die Zählstellen, für die eine Seitenstreifenfreigabe verzeichnet war, sind in der nachfolgenden Tab. 3-3 aufgelistet. Die Verkehrsdaten lagen getrennt für die einzelnen Fahrstreifen vor. In Bild 3-2 sind jeweils die Zahlen aus dem Jahr 2018 zum DTV^(SV) auf dem 1. Fahrstreifen der Zählstelle dargestellt.

BASSt-Nr.	Name	Land	Str.-KL	Str.-Nr.	Allgemeine Hinweise/ Zählstellenbesonderheit für die Datei „Auswertung“ Übernahme aus Infosammlung 2017 Stand 30.10.2018
9212	AK München-Ost (N)	BY	A	99	Temporäre Seitenstreifenfreigabe (Ri1/Ri2)
9213	AK München-Ost (S)	BY	A	99	Temporäre Seitenstreifenfreigabe (Ri1/Ri2)
6821	AK Frankfurt NW (N)	HE	A	5	Temporäre Seitenstreifenfreigabe
6854	AD Mönchshof (O)	HE	A	3	Temporäre Seitenstreifenfreigabe in Ri 2
6859	Hanau	HE	A	3	Temporäre Seitenstreifenfreigabe
6923	Frankfurt-Niederrad	HE	A	5	Temporäre Seitenstreifenfreigabe Ri 1 (N)
6959	Heusenstamm	HE	A	3	Temporäre Seitenstreifenfreigabe
3429	Braunschweig-Flughafen	NI	A	2	R1/R2 temp. Seitenstreifenfreigabe vorbereitet
7415	AS Klein-Winternh. VQ S	RP	A	63	Temporäre Seitenstreifenfreigabe
7786	Marienborn	RP	A	63	Temporäre Seitenstreifenfreigabe

Tab. 3-3: Zählstellen 2018 mit Hinweis zu einer temporären Seitenstreifenfreigabe

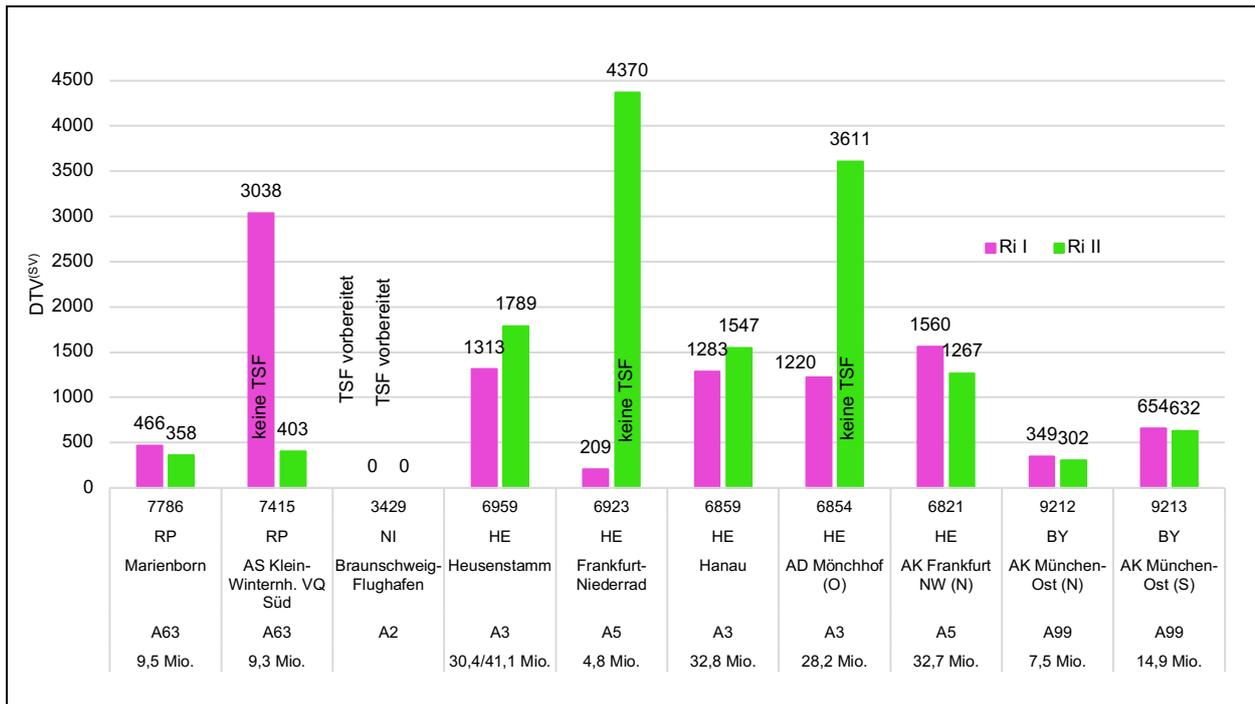


Bild 3-2: DTV^(SV) 2018 für den 1. Fahrstreifen der Zählstellen

Aus Bild 3-2 gehen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Abschnitten bei der Nutzung des Seitenstreifens hervor. Dies kann aus unterschiedlichen Freigabezeiten, generell unterschiedlichen Belastungszahlen und/oder unterschiedlichen Fahrstreifenanzahlen resultieren.

Ebenfalls pro Zählstelle angegeben ist eine überschläglich ermittelte B-Zahl für den Seitenstreifen, die sich auf Basis der Zahlen aus dem Jahr 2018 für eine 30-jährige Nutzungsdauer ergibt. Die Zahlen liegen demnach zwischen 4,8 und 41,1 Mio. äquivalenten 10 t-Achsübergängen und streuen somit erheblich. Es ist daher notwendig, allgemeine Szenarien der Verkehrsbelastung anzunehmen/ zu entwickeln.

Ebenso ist festzustellen, dass die dimensionierungsrelevante Beanspruchung an der Zählstelle A99 AK München-Ost (S), wie sie aus der Tagesganglinie abgeleitet wurde (siehe Bild 3-1 und Tab. 3-2), und jene, die sich aus den Zähldaten ergibt (siehe Bild 3-2), deutlich voneinander unterscheiden. Es ist zu vermuten, dass in diesem Fall die tatsächliche Freigabezeit für eine Seitenstreifenbefahrung weitaus kürzer ausgefallen sein könnte, als es die Tagesganglinie erwarten lässt. Es wird demnach deutlich, dass insbesondere die Freigabezeit von verschiedenen Faktoren abhängig ist, die nicht ohne weiteres pauschalisiert betrachtet werden können.

Auf Grundlage der weiter oben geführten Betrachtungen wurden für das Projekt drei verschiedene Verkehrsbelastungen gewählt. Die Aufteilung des DTV^(SV) von ca. 70 % auf dem HFS und ca. 30 % auf dem SS wurden auf Grundlage der Beispielberechnung mit einer Tagesganglinie angenommen. Die niedrige (B_n) und die mittlere (B_m) B-Zahl ergeben sich aus den Obergrenzen der Belastungsklassen Bk32 und Bk100 unter der Annahme, dass 70 % der Schwerverkehrsfahrzeuge den Hauptfahrstreifen und 30 % den Seitenstreifen benutzen. Die hohe B-Zahl (B_h) mit 150 Mio. ergibt sich als Obergrenze aus den Ergebnissen der im Rahmen des Projekts durchgeführten Analyse der Zählstellen (Bild 3-2). Die genaue Verteilung des DTV^(SV) ist der Tab. 3-4 bzw. Tab. 3-5 zu entnehmen. Für die FE-Berechnungen der Asphaltbefestigungen wurde die Verteilung des DTV(SV) mit einem Zuwachs von $p = 0$ % ermittelt (Tab. 3-5).

FS	B_n [Mio]	$DTV_n^{(SV)}$ [-]	Verteilung [%]	B_m [Mio]	$DTV_m^{(SV)}$ [-]	Verteilung [%]	B_h [Mio]	$DTV_h^{(SV)}$ [-]	Verteilung [%]
	32	2.765	100	100	8.641	100	150	12.961	100
HFS	22	1.901	69	70	6.049	70	100	8.641	67
SS	10	864	31	30	2.592	30	50	4.320	33

Tab. 3-4: Angenommene B-Zahlen mit zugehörigem $DTV^{(SV)}$ und prozentualer Verteilung auf dem Seiten- und Hauptfahrstreifen mit einem Zuwachs des $DTV^{(SV)}$ von $p = 3\%$

FS	B_n [Mio]	$DTV_n^{(SV)}$ [-]	Verteilung [%]	B_m [Mio]	$DTV_m^{(SV)}$ [-]	Verteilung [%]	B_h [Mio]	$DTV_h^{(SV)}$ [-]	Verteilung [%]
	32	4.385	100	100	13.703	100	150	20.554	100
HFS	22	3.015	69	70	9.592	70	100	13.703	67
SS	10	1.370	31	30	4.111	30	50	6.851	33

Tab. 3-5: Angenommene B-Zahlen mit zugehörigem $DTV^{(SV)}$ und prozentualer Verteilung auf dem Seiten- und Hauptfahrstreifen mit einem Zuwachs des $DTV^{(SV)}$ von $p = 0\%$

3.2 Lasteintragungspunkte

Relevante Lasteinleitungspunkte für die FE-Modelle ergeben sich für beide Befestigungsvarianten (Asphalt und Beton) auf Grund der Breite der Fahrstreifen bzw. der Markierung und für die Betonbefestigungen zusätzlich auf Grund der Plattengeometrien.

Die Berechnungen werden mit unterschiedlichen Laststellungen, aufgelistet in Tab. 3-6, durchgeführt. Dabei werden die Lasten beginnend vom Fahrbahnrand (0,00 m) in 0,25 m Schritten bis zu einem Abstand von 0,75 m angesetzt. In Längsrichtung wird für die Betonbefestigungen zusätzlich in zwei Varianten unterschieden. In der ersten Variante befindet sich die letzte Achse an der Quertuge, bei der zweiten Variante sind die Lasten in Plattenmitte aufgebracht (siehe Bild 3-3).

Nr.	Abstand vom Rand [m]	Begründung
1	0,75	Randstreifen (ohne Standstreifen) - wenn dadurch die erforderliche Breite für eine bestimmte Führung des Verkehrs im Bereich von Arbeitsstellen ermöglicht werden soll (Abschnitt 4.2.3.3 RAA) - (und bei Autobahnen der EKA 1 am Mittelstreifen liegende Randstreifen, um in Linkskurven die Sichtweite zu vergrößern.) (Abschnitt 4.2.3.3 RAA) - bei TSF (Abschnitt 4.2.3.5 RAA)
2	0,50	Reguläre Breite des Randstreifens (RAA) - ohne Standstreifen - mit Standstreifen - bei Ummarkierung des Seitenstreifens zur TSF, sodass ein Befahren des äußeren Randes verhindert wird (Abschnitt 8.8 RAA)
3	0,25	Zwischenschritt für ein gleichmäßig definiertes Raster Entspricht des Weiteren den Dübelabständen
4	0,00	Grenzfall / Extremfall

Tab. 3-6: relevante Lasteintragungspunkte [RAA 2008; RSA; RMS-1]

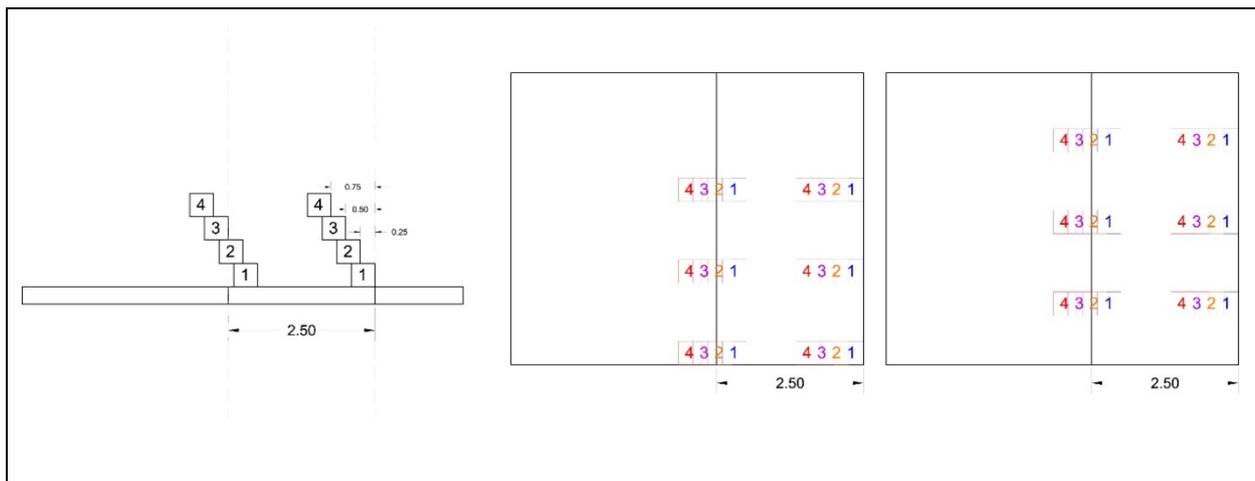


Bild 3-3: Lasteintragungspunkte 3-fach Achse

Das in den Nachweisen nach RDO Beton anzusetzende Einzelrad entspricht offensichtlich nicht der real auftretenden Lastkonstellationen. Es wird deshalb verwendet, weil die im Verfahren benutzte Westergaard-Formel nur für Einzellasten in Randmitte anwendbar ist. Der Ansatz liefert höhere Biegemomente, als die real auftretende Achslast (mit gleichen Radlasten).

Ein weiteres, ebenfalls aus den begrenzten Anwendungsmöglichkeiten der analytischen Formeln resultierendes Manko des RDO Beton -Verfahrens besteht darin, dass die Wirkung der temperaturbedingten Vorverformung der Platte auf die durch die Verkehrslast verursachten Spannungen nicht berücksichtigt wird. Die durch die Verkehrslast bedingten Biegemomente werden dadurch zu klein berechnet.

Die beiden hier aufgeführten Defizite des RDO Beton -Verfahrens gleichen sich in ihren Auswirkungen also tendenziell aus. Im FEM-Modell wird aber die Wirkung der Verkehrslast auf einer vorverformten Platte realitätsnah abgebildet. Folglich würde ein Ausgleich des durch den Ansatz der Einzelradlast entstehenden Fehlers nicht mehr stattfinden. Im FEM-Modell ist also die eher virtuelle Radlast, durch eine real vorkommende Achslast zu ersetzen. Konsequenterweise wurde

hier die Achskonstellation aus der dominierenden Fahrzeugart 98 gewählt. Dies ist die 3-fach-Achse.

4 Untersuchungen Asphaltbauweise

4.1 Eingangsparameter für Modellerstellung und Berechnungen

Die für die Dimensionierung und FE-Rechnungen notwendigen Eingangsdaten werden den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, kurz RStO [RStO 2012] und den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, kurz RDO Asphalt 09 [RDO Asphalt 09] entnommen. In Tab. 4-1 sind die Parameter zur Ermittlung der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung aufgelistet. Die Verfahrensweise nach den RDO Asphalt kann wegen der empirisch ermittelten Achslastkollektive und Temperaturbedingungen derzeit als semi-probabilistisch angesehen werden.

4.1.1 Dimensionierungsrelevante Parameter

Faktoren		
Lastkollektivquotient q_{Bm} [-]	BAB	0,33
Fahrstreifenfaktor f_1 [-]	6 FS	0,40
Fahrstreifenbreitenfaktor f_2 [-]	3,25 – 3,75 m	1,10
Steigungsfaktor f_3 [-]	2 – 4 %	1,02
Mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs p_z [-]	3 % bzw. 0 %	0,03 / 0,00
Achszahlfaktor f_A [-]	BAB	4,50
Nutzungsdauer [Jahre]		30,00

Tab. 4-1: dimensionierungsrelevante Parameter nach den RStO

4.1.2 Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur

Die Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur wird für das Beispiel für den Standort Dresden ausgewählt und entspricht somit der Temperaturzone 3. Diese ist in Bild 4-1 dargestellt.

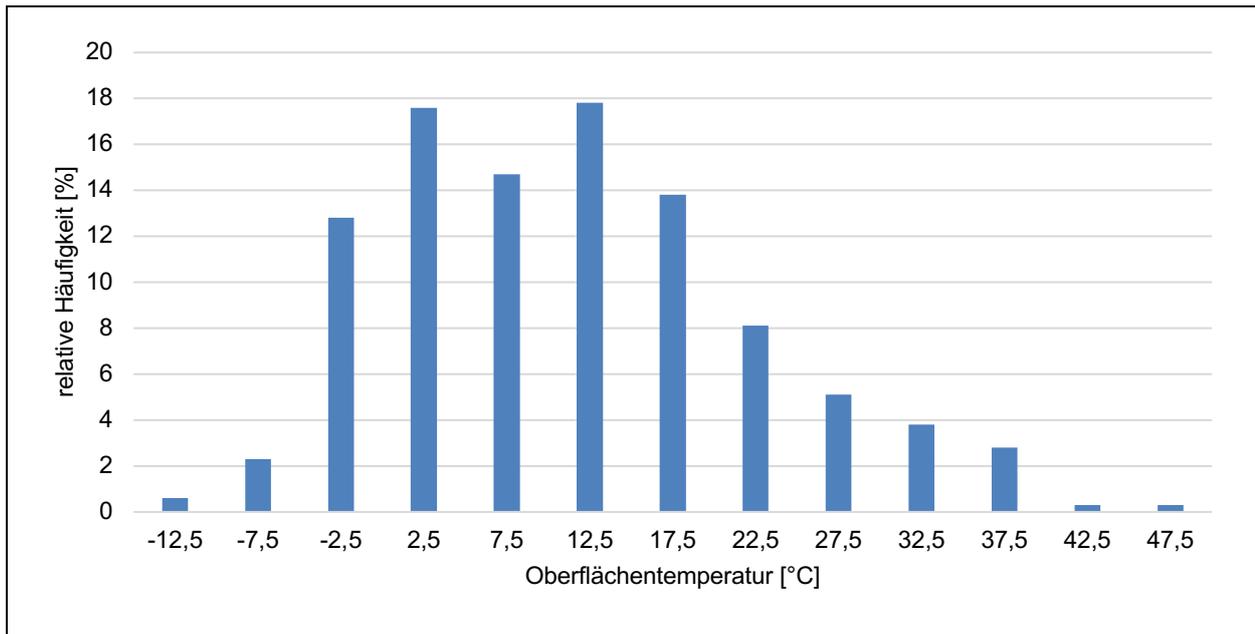


Bild 4-1: Relative Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur, Temperaturzone 3 [RDO Asphalt 09]

4.1.3 Achslastkollektiv

Für die Berechnungen wird das Achslastkollektiv BAB Fernverkehr der RDO Asphalt 09 angesetzt. Die zugehörige Häufigkeitsverteilung ist in Bild 4-2 dargestellt.

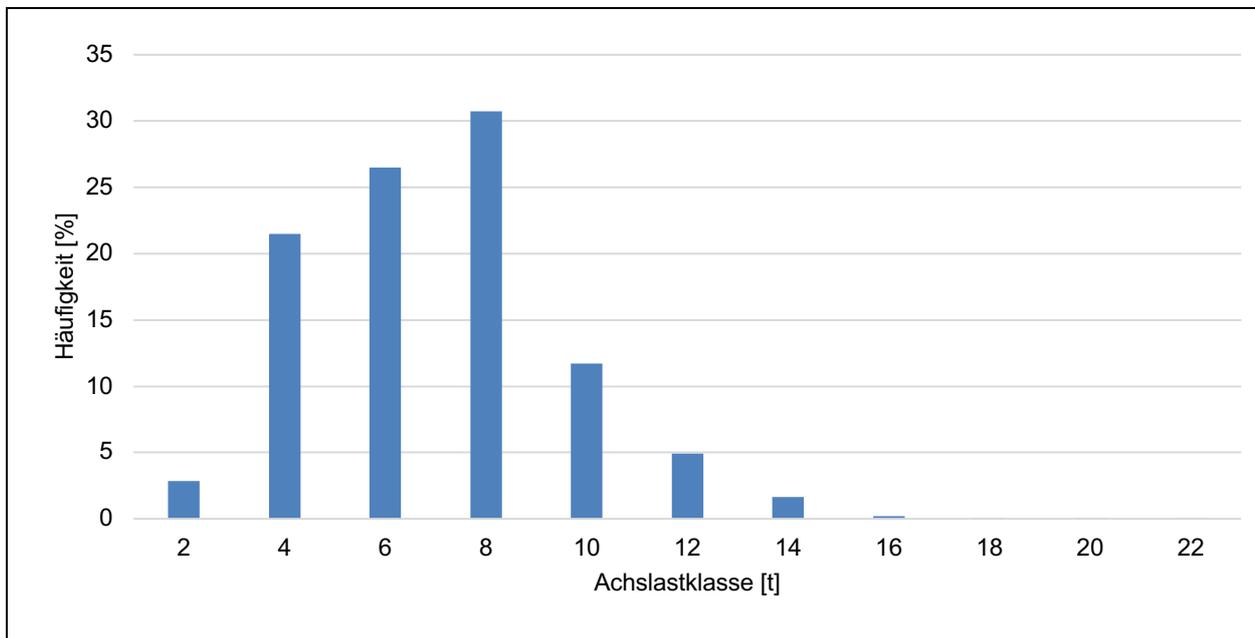


Bild 4-2: Achslastkollektiv BAB Fernverkehr der RDO Asphalt 09 [RDO Asphalt 09]

4.1.4 Materialauswahl Asphalt

Die Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen wird von den Materialkennwerten der Asphalte stark beeinflusst. Für die Dimensionierungsberechnungen nach den RDO Asphalt werden als Eingangsdaten die Hauptkurven (Steifigkeiten in Anhängigkeit von der Temperatur und Belastungsfrequenz) und die Ermüdungsfunktion (Ermüdungsverhalten) der Asphalte benötigt. Da ein fiktiver Streckenabschnitt untersucht wird, und in den RSO Asphalt bzw. RDO Asphalt keine allgemeingültigen Materialeigenschaften von Asphalt vorgegeben sind, wurden für die einzelnen

Schichten (ADS, ABS und ATS) jeweils Materialeigenschaften aus der Datensammlung der TU Dresden abgeleitet.

Die Auswahl erfolgte in Anlehnung an das Projekt „Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums“ [Stöckner et al. 2019]. Die Datensätze wurden hinsichtlich der Vollständigkeit der Ermüdungs- und Steifigkeitsfunktionen überprüft und nach den Vorgaben der TP Asphalt, Teil 24 (2018) und TP Asphalt, Teil 26 (2018) ausgewertet. Getrennt nach der Schichtart wurden aus den Datensätzen Hauptkurven und Ermüdungsfunktionen zu Funktionsscharen zusammengefasst. In dem Forschungsprojekt von [Stöckner et al., 2019] wurde bereits festgestellt, dass die jeweiligen Funktionen der Gebrauchseigenschaften von Bestandsmaterialien und frischen Materialien fast deckungsgleich liegen, weshalb keine weitere Differenzierung notwendig ist. Die als brauchbar eingestufte Anzahl der Materialien je Schicht ist in Tab. 4-2 aufgelistet. In Bild 4-3 bis Bild 4-5 sind die Funktionsscharen der Steifigkeits- und Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschicht dargestellt.

Asphaltdeckschicht	43
Asphaltbinderschicht	18
Asphalttragschicht	95

Tab. 4-2: Stichprobenmenge je Schichtart

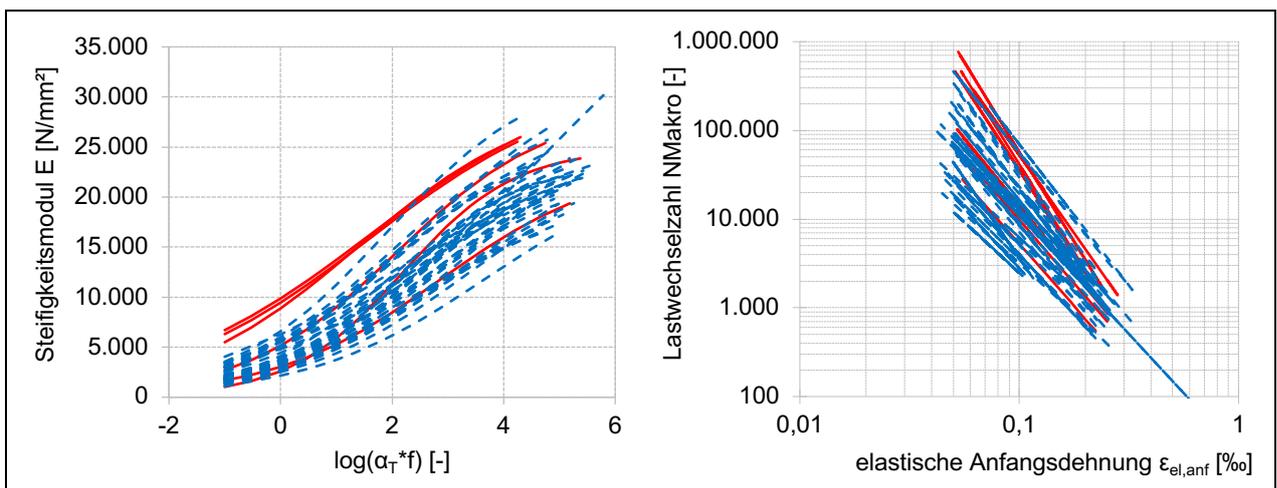


Bild 4-3: Hauptkurven (links) und Ermüdungsfunktionen (rechts) Asphaltdeckschichtgemische; blau: Frisch, rot: Bestand

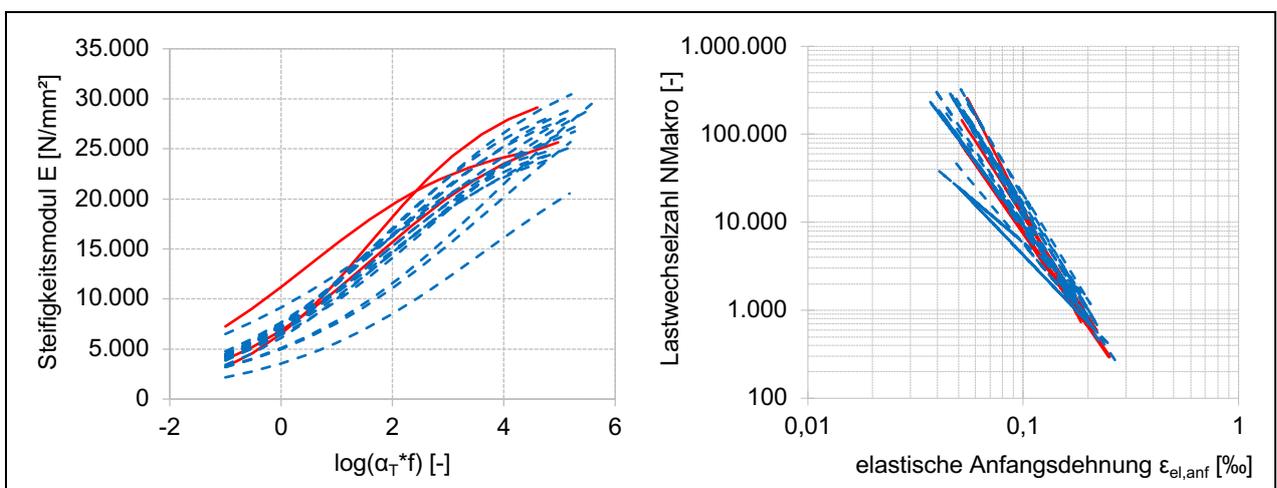


Bild 4-4: Hauptkurven (links) und Ermüdungsfunktionen (rechts) Asphaltbinderschichtgemische; blau: Frisch, rot: Bestand

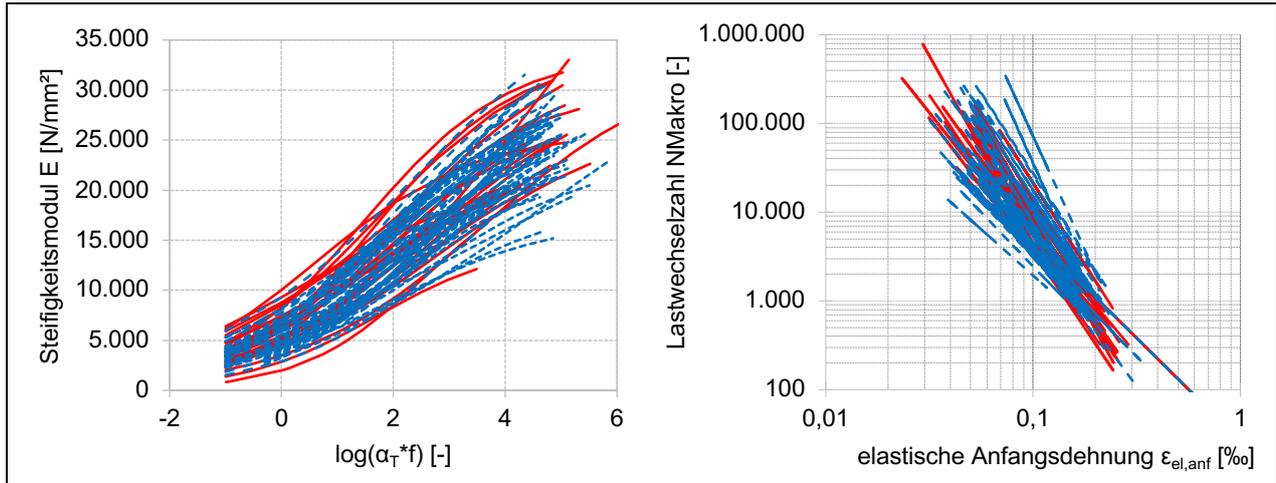


Bild 4-5: Hauptkurven (links) und Ermüdungsfunktionen (rechts) Asphalttragschichtgemische; blau: Frisch, rot: Bestand

Aus den Funktionsscharen der Hauptkurven und Ermüdungsfunktionen erfolgte die Ableitung allgemeingültiger charakteristischer Materialeigenschaften. Dazu wurden zunächst einzelne sichtlich abweichende Funktionen in den Randbereichen entfernt. Anhand der verbleibenden Funktionsscharen wurden für jede Schicht jeweils Grenzfunktionen (oben und unten) gewählt und anhand dieser Grenzfunktionen eine optisch mittlere Funktion (mitte) abgeleitet. Die Parameter der Hauptkurven sind in Tab. 4-3 und die der Ermüdungsfunktionen in Tab. 4-4 aufgelistet. Bild 4-6 bis Bild 4-8 zeigen die ausgewählten Hauptkurven (oben, mitte, unten) und Bild 4-9 bis Bild 4-11 die ausgewählten Ermüdungsfunktionen (oben, mitte, unten) jeweils getrennt nach Schichtart.

Material	E_{min}	E_{max}	m	b_1	b_0	T_0
ADS Grenzfunktion oben	0	32.386	19.556	-0,518	0,826	20
ADS mittlere Funktion	0	27.945	21.292	-0,560	1,400	20
ADS Grenzfunktion unten	0	23.504	23.028	-0,629	2,295	20
ABS Grenzfunktion oben	0	34.991	24.924	-0,614	1,297	20
ABS mittlere Funktion	0	32.233	24.832	-0,579	1,642	20
ABS Grenzfunktion unten	0	29.474	24.739	-0,544	1,988	20
ATS Grenzfunktion oben	0	42.490	19.822	-0,536	1,274	20
ATS mittlere Funktion	0	35.105	21.445	-0,600	1,600	20
ATS Grenzfunktion unten	0	27.719	23.067	-0,699	2,154	20

Tab. 4-3: Materialparameter der ausgewählten Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische, ermittelt mit den Funktionsansätzen der (FGSV TP Asphalt, Teil 26, 2018)

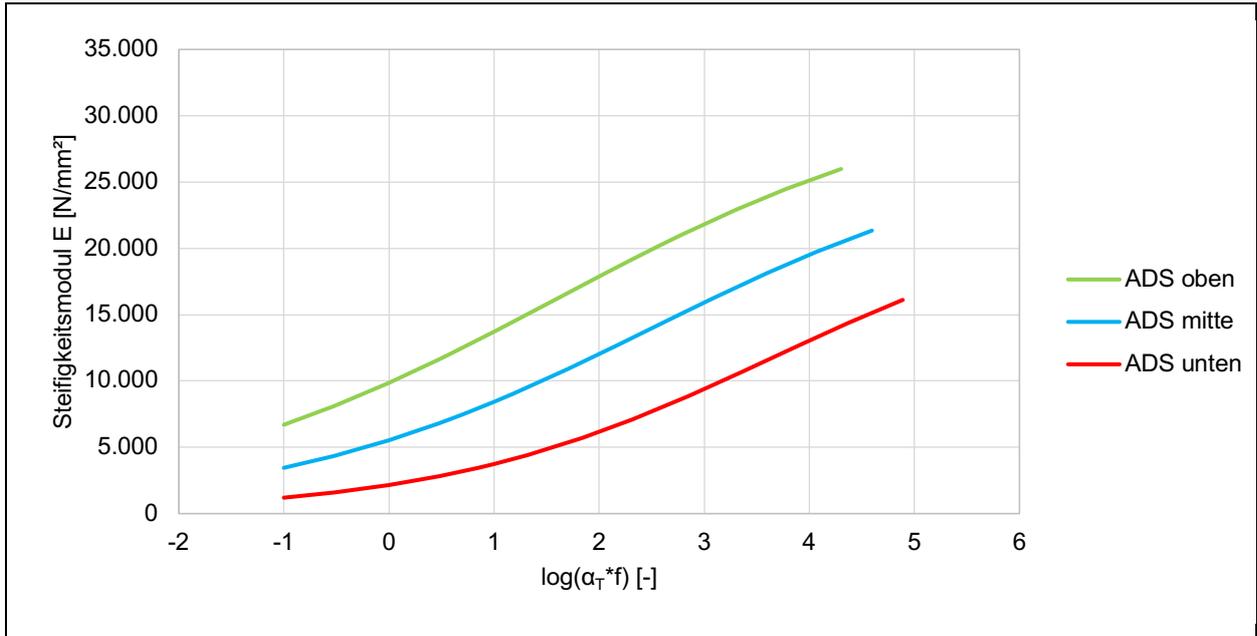


Bild 4-6: Ausgewählte Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische

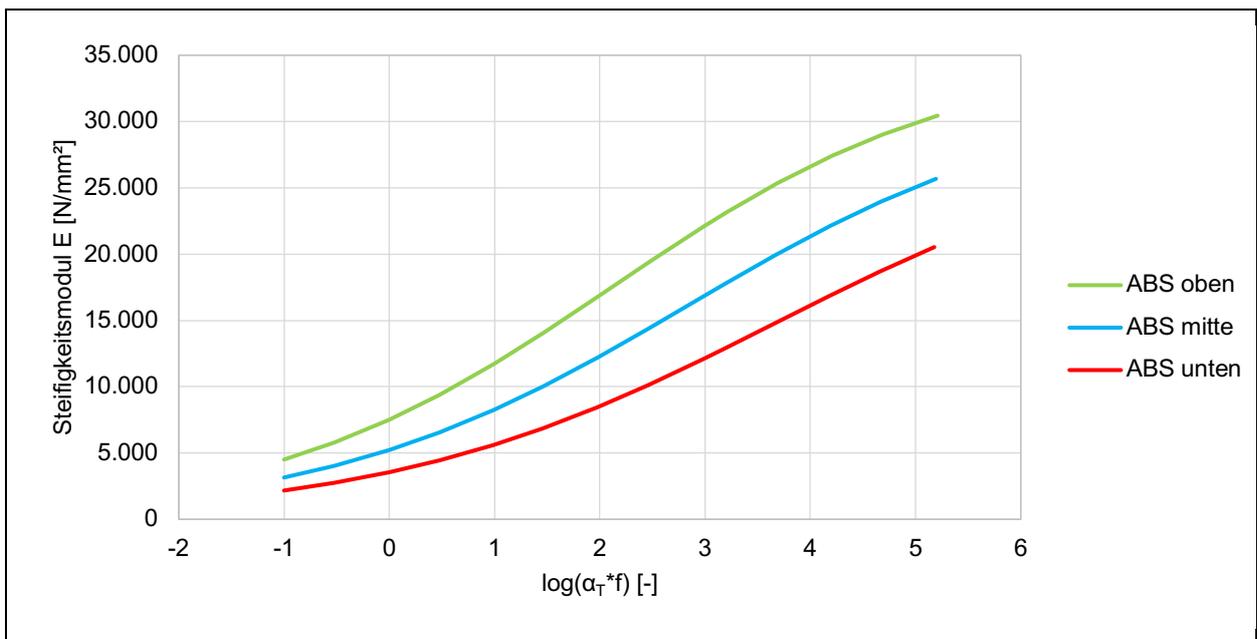


Bild 4-7: Ausgewählte Hauptkurven der Asphaltbinderschichtgemische

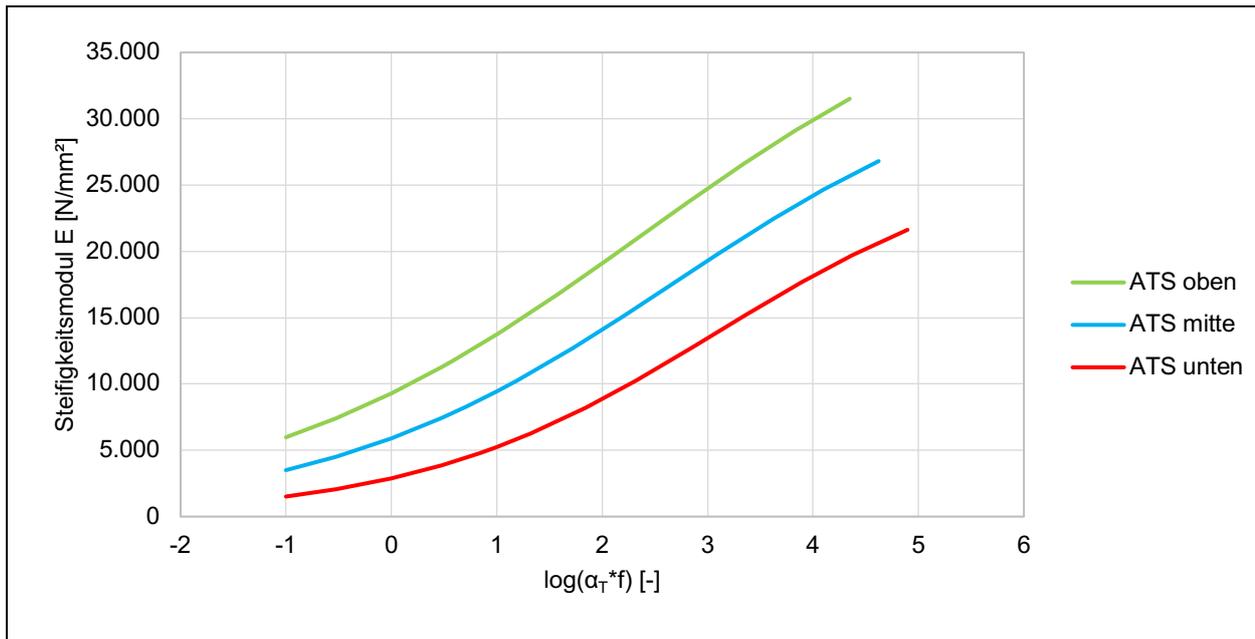


Bild 4-8: Ausgewählte Hauptkurven der Asphalttragschichtgemische

Material	C_1	C_2
ADS Grenzfunktion oben	16,054	-3,515
ADS mittlere Funktion	16,943	-2,883
ADS Grenzfunktion unten	17,831	-2,250
ABS Grenzfunktion oben	2,110	-3,993
ABS mittlere Funktion	7,700	-3,050
ABS Grenzfunktion unten	11,974	-2,551
ATS Grenzfunktion oben	6,494	-3,627
ATS mittlere Funktion	4,681	-3,258
ATS Grenzfunktion unten	2,869	-2,889

Tab. 4-4: Materialparameter der ausgewählten Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische, ermittelt mit den Funktionsansätzen der (FGSV TP Asphalt, Teil 24, 2018)

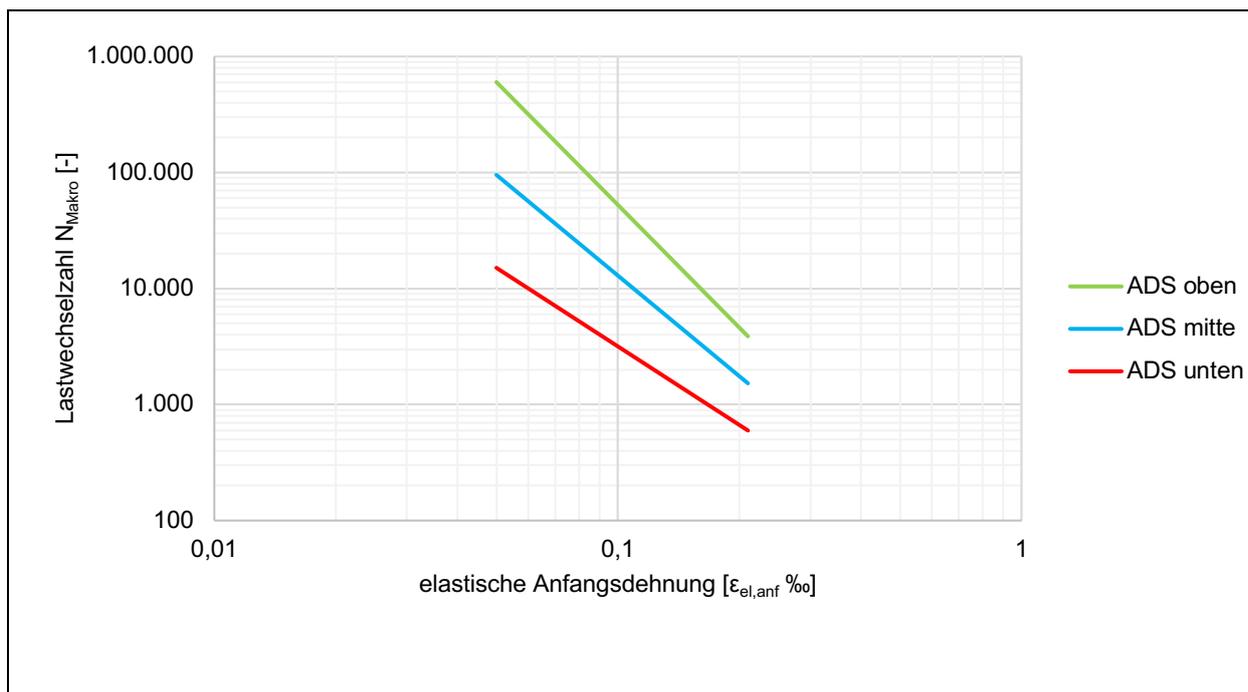


Bild 4-9: Ausgewählte Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische

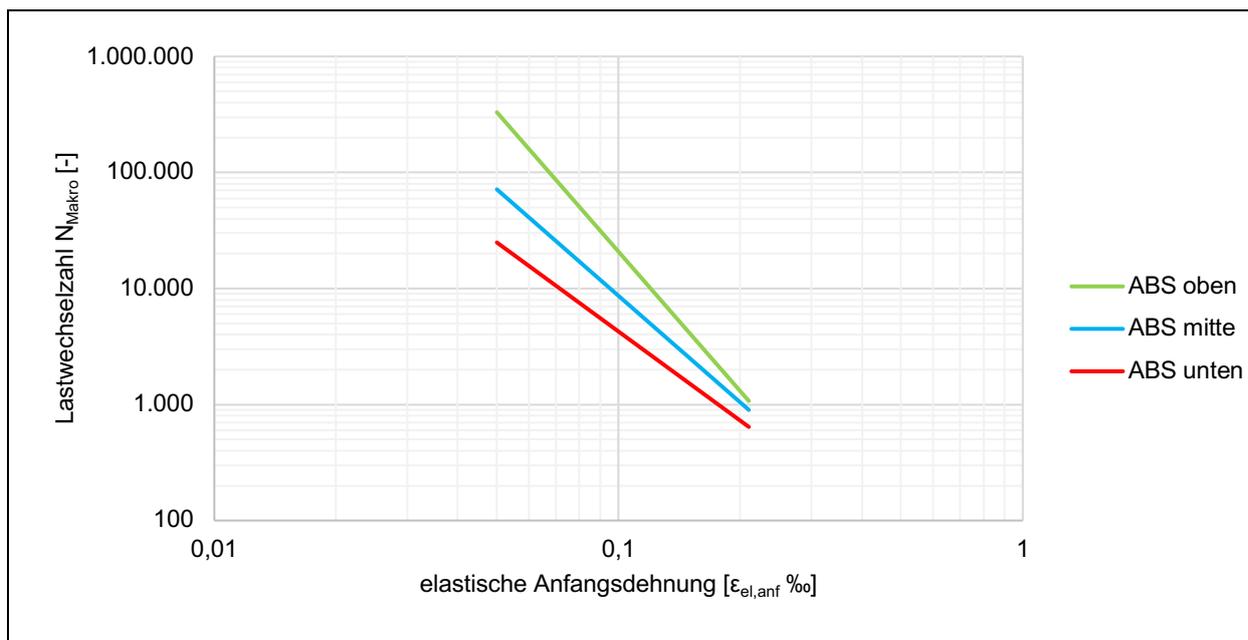


Bild 4-10: Ausgewählte Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschichtgemische

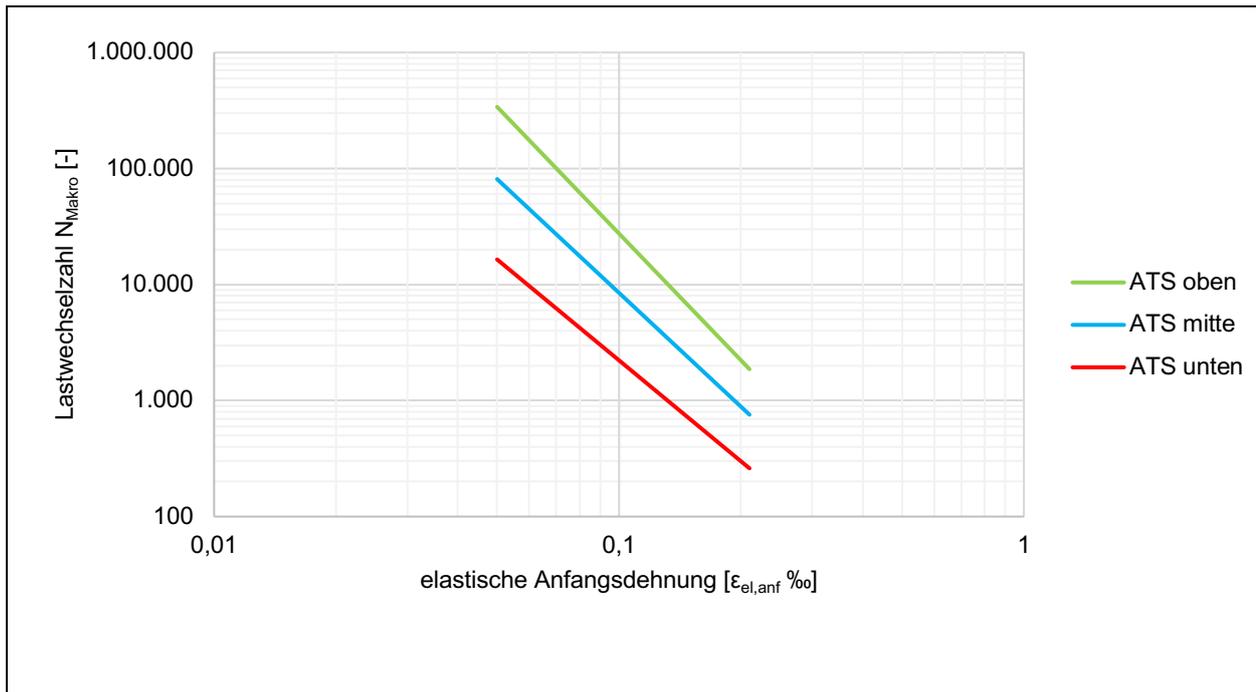


Bild 4-11: Ausgewählte Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschichtgemische

Anschließend wurden alle vorhandenen Funktionen (Hauptkurven und Ermüdungsfunktionen) einer Qualitätsstufe (oben, mitte, unten) zugeordnet. Um allgemeingültige Materialeigenschaften zu erhalten, wurden die Steifigkeits- (oben, mitte, unten) und Ermüdungsfunktionen (oben, mitte, unten) für jede Schichtart jeweils miteinander kombiniert. Daraus ergeben sich pro Schichtart neun Materialkombinationen mit den Bezeichnungen ADS_1 ... ADS_9, ABS_1 ... ABS_9 und ATS_1 ... ATS_9.

In Tab. 4-5 sind die Kombinationen mit der jeweiligen relativen Häufigkeit der Kombinationen aufgelistet. Die Häufigkeiten beziehen sich an dieser Stelle nur auf die Sammlung der Asphaltmaterialien, die vom Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau der Fakultät Bauingenieurwesen bisher getestet wurden.

Steifigkeit	Ermüdung	ADS rel. Hfgk.	Kombination ADS	ABS rel. Hfgk.	Kombination ABS	ATS rel. Hfgk.	Kombination ATS
o	o	6,98	ADS_1	22,22	ABS_1	2,11	ATS_1
o	m	2,33	ADS_2	44,44	ABS_2	14,74	ATS_2
o	u	0,00	ADS_3	0,00	ABS_3	2,11	ATS_3
m	o	11,63	ADS_4	0,00	ABS_4	7,37	ATS_4
m	m	9,30	ADS_5	22,22	ABS_5	37,89	ATS_5
m	u	13,95	ADS_6	5,56	ABS_6	14,74	ATS_6
u	o	13,95	ADS_7	0,00	ABS_7	2,11	ATS_7
u	m	37,21	ADS_8	5,56	ABS_8	8,42	ATS_8
u	u	4,65	ADS_9	0,00	ABS_9	10,53	ATS_9

Tab. 4-5: Kombinationen aus Ermüdungsverhalten und Steifigkeit je Schichtart mit der jeweiligen rel. Anzahl

Für die nachfolgenden Berechnungen werden die Materialeigenschaften der jeweils am häufigsten vorkommenden Materialkombinationen (s. Tab. 4-6) jeder Schicht verwendet, da einerseits in dem Projekt von [Stöckner et al. 2019] bereits festgestellt wurde, dass die unterschiedlichen Materialkombinationen der Asphaltdeck- und -binderschicht lediglich einen geringen Einfluss auf

die Nutzungsdauer der Asphaltbefestigungen haben (und andererseits durch die Anwendung der FEM die Berechnungszeiten für die Modelle mit unterschiedlicher Ausbildung des Randbereiches sehr lang sind und so die Berücksichtigung aller Materialkombinationen zu unverhältnismäßig großen Berechnungszeiten führen würde).

Schicht	Materialkombination	Steifigkeit	Ermüdung
Asphaltdeckschicht	ADS_8	u	m
Asphaltbinderschicht	ABS_2	o	m
Asphalttragschicht	ATS_5	m	m

Tab. 4-6: Häufigste Materialkombination der jeweiligen Schicht

4.1.5 Aufbau

Die Schichtdicken für die Berechnungen der Asphaltbefestigungen wurden nach dem Aufbau für eine Bk100 der RStO 2012, Tafel 1, Zeile 1 angenommen. Die Schichtdicken betragen für die ADS 4 cm, für die ABS 8 cm und für die ATS 22 cm. Die Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus beträgt für dieses Beispiel 80 cm. Die Dicke der Frostschuttschicht ergibt sich zu 46 cm. Der Aufbau ist in Bild 4-12 dargestellt.

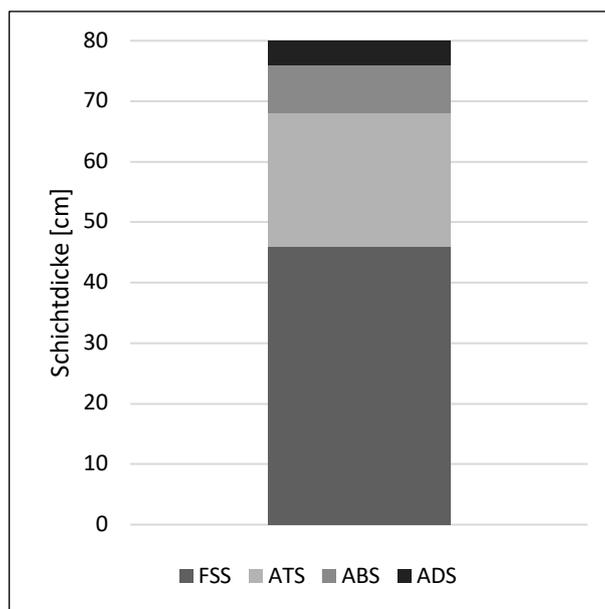


Bild 4-12: Schichtdicken der Asphaltbefestigung für eine Bk100 nach den RStO 2012, Tafel 1, Zeile 1 [RStO 2012]

4.1.6 Randausbildung

Der Aufbau der Modelle hängt maßgeblich von der Randausbildung der Asphaltbefestigungen ab. Den RStO 2012 ist zu entnehmen, dass die Ränder Asphaltsschichten (ATS, ABS und ADS) abgeschrägt werden (siehe Bild 4-13). Nach den ZTV Asphalt [ZTV Asphalt-StB] können die Asphaltsschichten bündig ausgeführt werden und sind nicht steiler als 2:1 abzuschrägen. Der Vögele Einbaufibel [Vögele 2012] ist zu entnehmen, dass die Abschrägung des Randes standardmäßig mit einem Winkel von 52° ausgeführt wird.

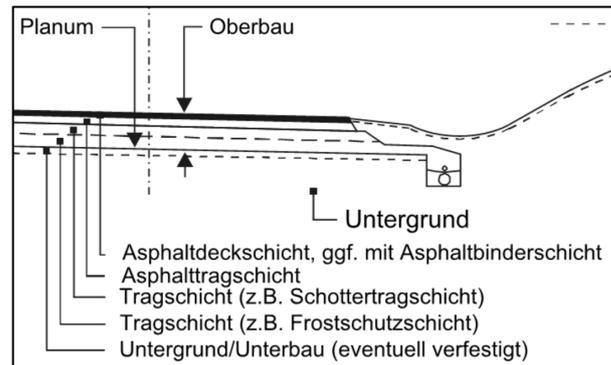


Bild 4-13: Beispielhafter Aufbau einer Befestigung [RStO 2012]

4.1.7 Probabilistische Verfahrensweise

Die notwendigen Eingangsparameter und –daten für die probabilistischen Prognoserechnungen wurden gemäß den RSO Asphalt 15 E aufbereitet. In der probabilistischen Verfahrensweise werden die Variabilität der Eingangswerte und Vergleichskenngrößen durch Normalverteilung stochastisch modelliert und anschließend in diskrete Verteilung übertragen. Die Anzahl der Kombinationen/Zustände für die probabilistischen Prognoserechnungen ergibt sich aus der Multiplikation folgender Werte [RSO Asphalt 15]:

- Anzahl der Steifigkeitsklassen für die Deckschicht
- Anzahl der Steifigkeitsklassen für die Binderschicht
- Anzahl der Steifigkeitsklassen für die Tragschicht
- Anzahl der Klassen für die Ermüdungsfunktion der Tragschicht
- Anzahl der Klassen zur Beschreibung der Variabilität der Dicke der gesamten Asphalt-schichten
- Anzahl der Lastklassen (RDO Asphalt 09)
- Anzahl der Temperaturklassen (RDO Asphalt 09)

Auf Grund der sehr hohen Berechnungszeiten der Finite-Elemente-Methode und den sich ergebenden Berechnungsaufwand bei Einbindung der probabilistischen Verfahrensweise wird in diesem FE-Projekt die Dickenschwankung des Asphaltoberbaus vernachlässigt. Zur Beschreibung der Variabilität der Steifigkeits- und Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeck-, -binder- und -trag-schicht wurden die Mindest-Klassenanzahlen (Tab. 4-7) gewählt.

Schicht	Klassenanzahl Steifigkeitsmodul	Klassenanzahl Ermüdungslastwechselzahl
ADS	$k_E = 3$	$k_N = 7$
ABS	$k_E = 3$	$k_N = 7$
ATS	$k_E = 3$	$k_N = 7$

Tab. 4-7: Klassenanzahlen der Asphalttragschichtmaterialien

Die Klassenwahrscheinlichkeiten der Steifigkeits- und der Ermüdungsfunktionen, dargestellt in Bild 4-14, werden aus diskretisierten Standardnormalverteilungen mit der zuvor gewählten Klassenanzahl ermittelt. Die maximal zulässige Unterschreitungswahrscheinlichkeit wird anhand der Anzahl der Klassen festgelegt und beträgt für die in diesem Projekt gewählten Anzahlen an Klassen (3 für die Steifigkeit und 7 für die Ermüdung) maximal 1 %. Die Berechnung der Klassengrenzen erfolgt in der Regel auf der Basis einer vorliegenden Stichprobe und der Unterschreitungswahrscheinlichkeit. Da für dieses Forschungsvorhaben keine Stichproben vorliegen, wurden die für die Berechnung der Klassengrenzen notwendigen Parameter von den Kalibrierasphalten (Tab. 4-8) angenommen.

Prob.-Para.	Prob.-Para.	Hauptkurve	Ermüdungsfunktion
Stichprobenanzahl	n	45	9
Standardabweichung	σ_r	0,106	0,129
Mittelwert	\bar{x}	2,064	-1,000
Summe d. Abweichungsquadrate vom Mittelwert	$\sum(x_i - \bar{x})^2$	52,115	0,381

Tab. 4-8: Probabilistische Parameter für die Berechnung der Klassengrenzen, Parameter der Kalibrierasphalte

Die entsprechenden Klassenmittenfunktionen der Steifigkeit für ADS, ABS und ATS sowie die Klassenmittenfunktion der Ermüdung für die ATS sind in Bild 4-16 bis Bild 4-18 dargestellt. Die Wahrscheinlichkeiten für die Last- und Temperaturklassen entsprechen den relativen Häufigkeiten der RDO Asphalt 09 (Bild 4-1 und Bild 4-2). Anhand der gewählten Klassenanzahlen ergeben sich für alle Kombinationsmöglichkeiten der Materialkenngrößenzustände 189 ($=3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 7$) virtuelle Einzelergebnisse je Nachweispunkt. Die Summe aller virtuellen Einzelergebnisse ergibt sich in Kombination mit den Last- und Temperaturklassen zu 27.027 ($=189 \cdot 11 \cdot 13$).

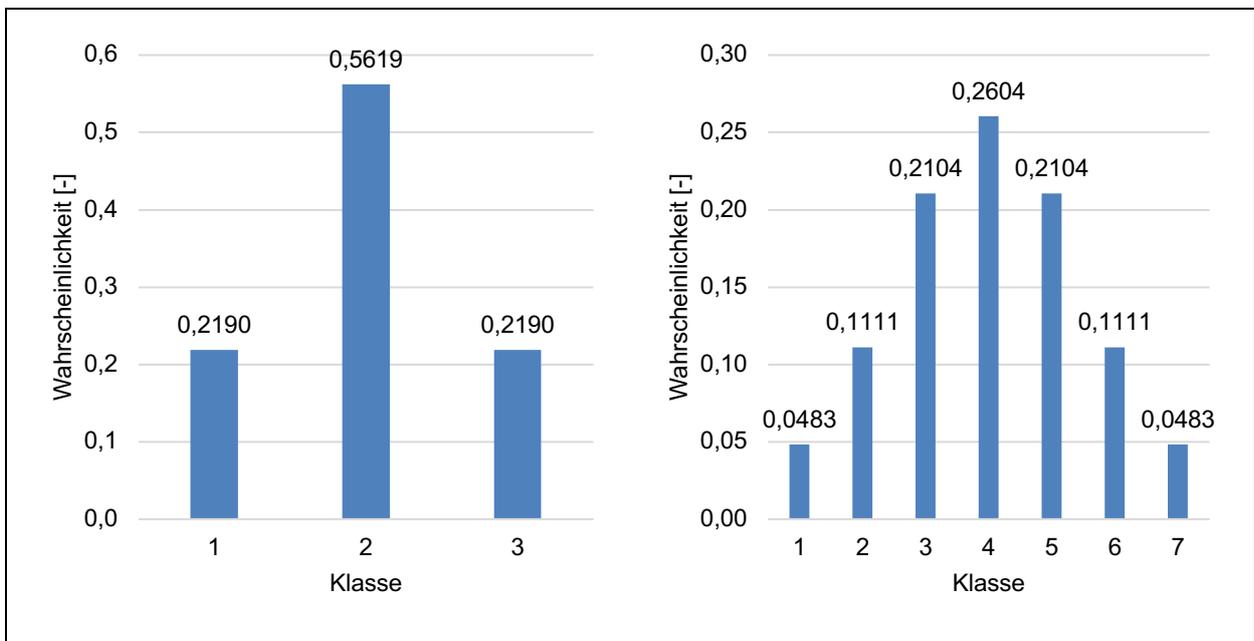


Bild 4-14: Klassenwahrscheinlichkeiten für die Klassenmittenfunktionen der temperaturabhängigen Steifigkeitsfunktionen aller Asphalt-schichten (links) und der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht (rechts)

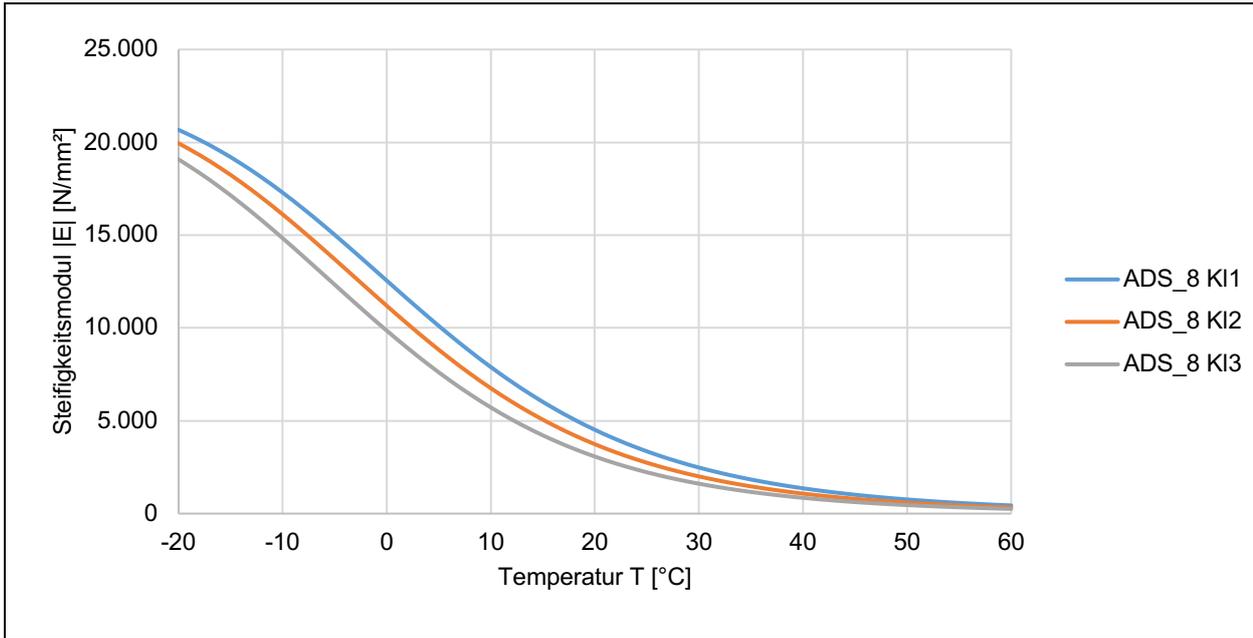


Bild 4-15: Rücktransformierte Klassenmittenfunktion (Steifigkeit) der Asphaltdeckschicht ADS_8 für die Klassen 1, 2 und 3

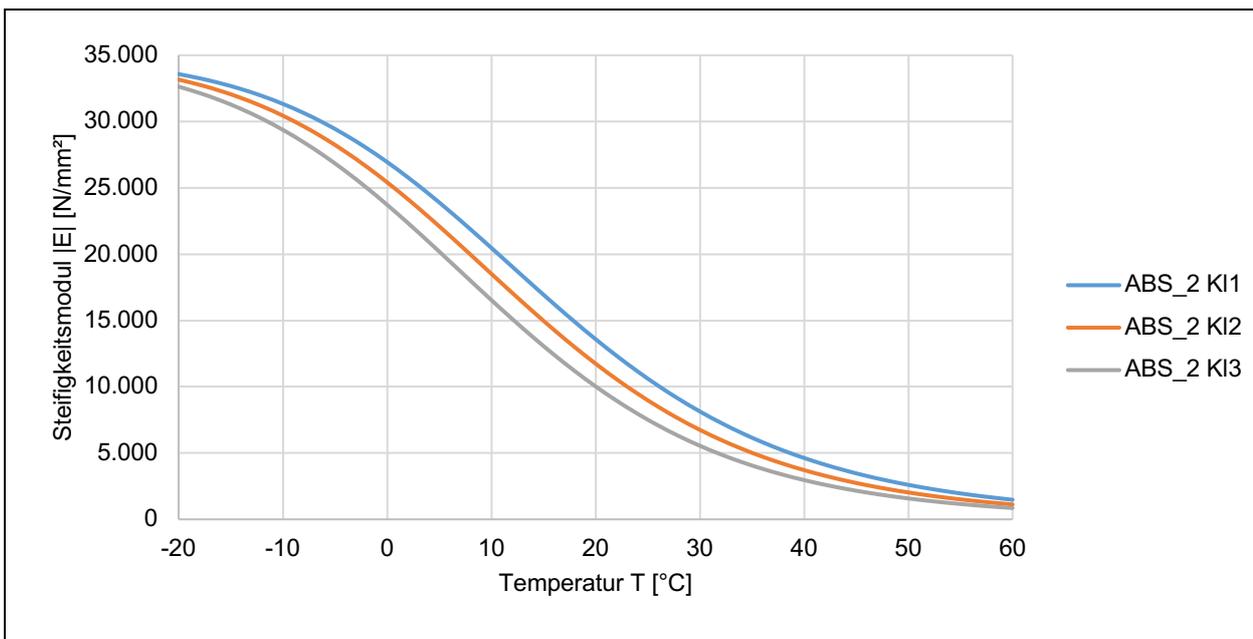


Bild 4-16: Rücktransformierte Klassenmittenfunktion (Steifigkeit) der Asphaltbinderschicht ABS_2 für die Klassen 1, 2 und 3

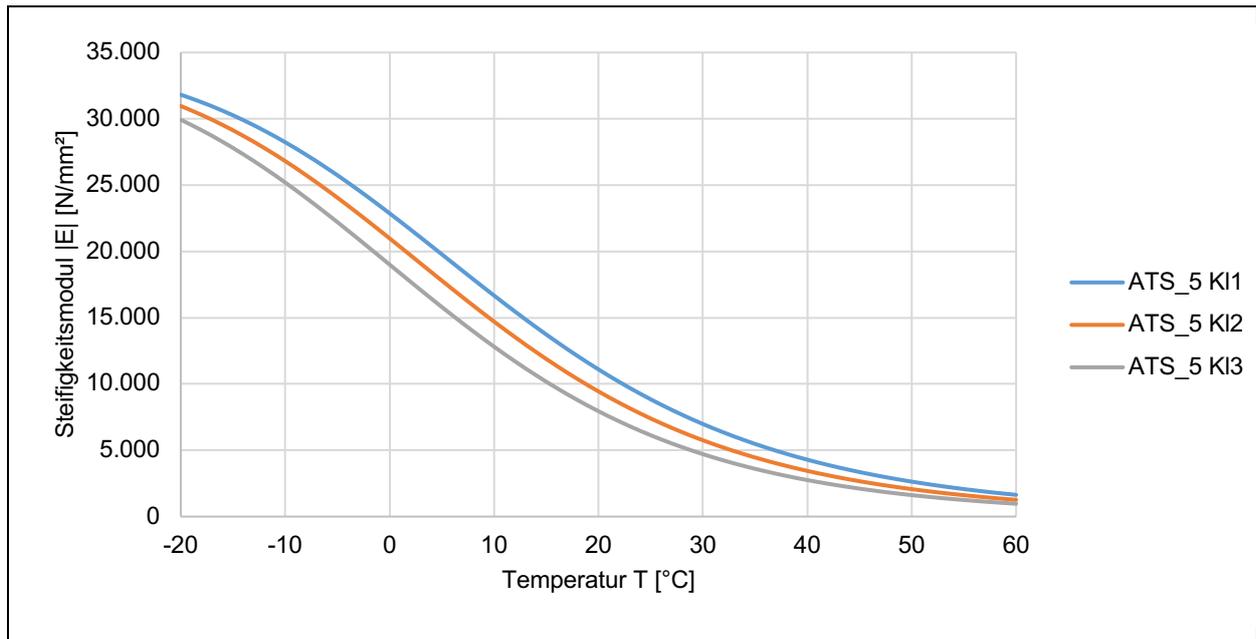


Bild 4-17: Rücktransformierte Klassenmittenfunktion (Steifigkeit) der Asphalttragschicht ATS_5 für die Klassen 1, 2 und 3

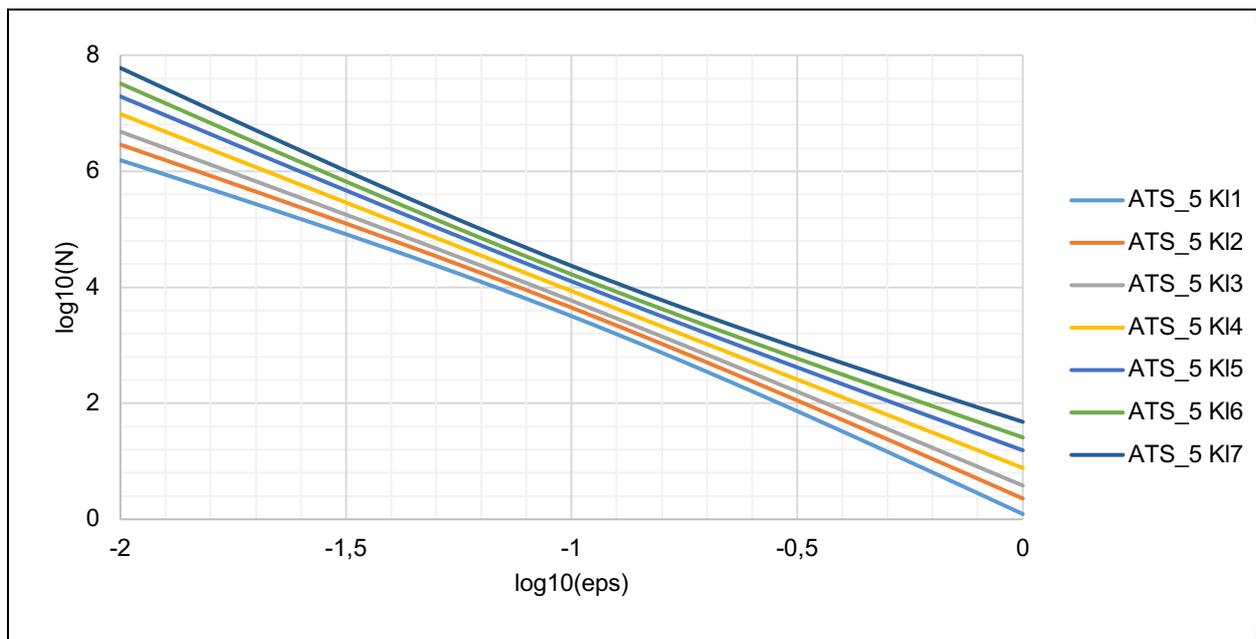


Bild 4-18: Rücktransformierte Klassenmittenfunktion (Ermüdung) der Asphalttragschicht für die Klassen 1 bis 7

4.2 Modellaufbau und Implementation der Prognoseverfahren nach den RSO Asphalt

4.2.1 FE-Modell

Nach den RDO Asphalt [RDO Asphalt 09] sind Beanspruchungen auf Grundlage der Mehrschichtentheorie zu berechnen. Mit der Mehrschichtentheorie kann eine Straßenbefestigung - idealisiert durch ein unendlich ausgedehntes, rotationssymmetrisches Modell - beschrieben werden. Dieses Verfahren unterliegt bestimmten Einschränkungen, die von [Numrich 2003] und [Neutag 2005] wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Einzelschichten müssen als dünne, unendlich ausgebreitete Schichten mit jeweils spezifischen Materialparametern definiert werden.

- Die Parameter jeder Subschicht sind homogen und isotrop.
- Das Stoffmodell wird als linear-elastisch angenommen.
- Der Schichtenverbund zwischen den einzelnen Subschichten ist als fest verbunden, als Teilverbund oder reibungsfrei aufeinander gelagert definiert.
- Die eingetragene Belastung des Systems wirkt statisch.
- Der Untergrund wird als unendlich ausgedehnter Halbraum angenommen.

Infolge dieser Randbedingungen muss davon ausgegangen werden, dass eine Berechnung der mechanischen Beanspruchungen im Seitenraum einer Straßenkonstruktion (beschränkte Geometrie) mit der Mehrschichtenmethode zu signifikanten Abweichungen zwischen den real auftretenden und den ermittelten Dehnungen führt. Die Finite-Elemente-Methode unterliegt nicht diesen Restriktionen.

Im Fokus der Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens stehen mechanische Beanspruchungen, hervorgerufen durch den Verkehr im Bereich des Seitenstreifens. Um eine verfahrensbedingte Fehlbewertung zu mindern, wurden in dieser Arbeit alle Berechnungen zur Ermittlung der mechanischen Beanspruchungen mittels eines dreidimensionalen FE-Modells durchgeführt.

Für eine realitätsnahe Beschreibung der mechanischen Beanspruchungen wurde ein dreidimensionales FE-Modell entwickelt, mit dessen Hilfe der Bereich des Banketts sowie der Randbereich der Straßenbefestigung im Detail abgebildet werden können.

Zunächst wurde ein Modell für den Befestigungsaufbau gemäß Bild 4-19 implementiert (Asphaltbefestigung für eine Bk100 nach den RStO 2012, Tafel 1, Zeile 1 [RStO 2012] siehe auch Abschnitt 4.1). Dieses Modell ist Ausgangspunkt bzw. Grundlage (Referenzmodell) für alle weiteren Variationen und Bewertungen.

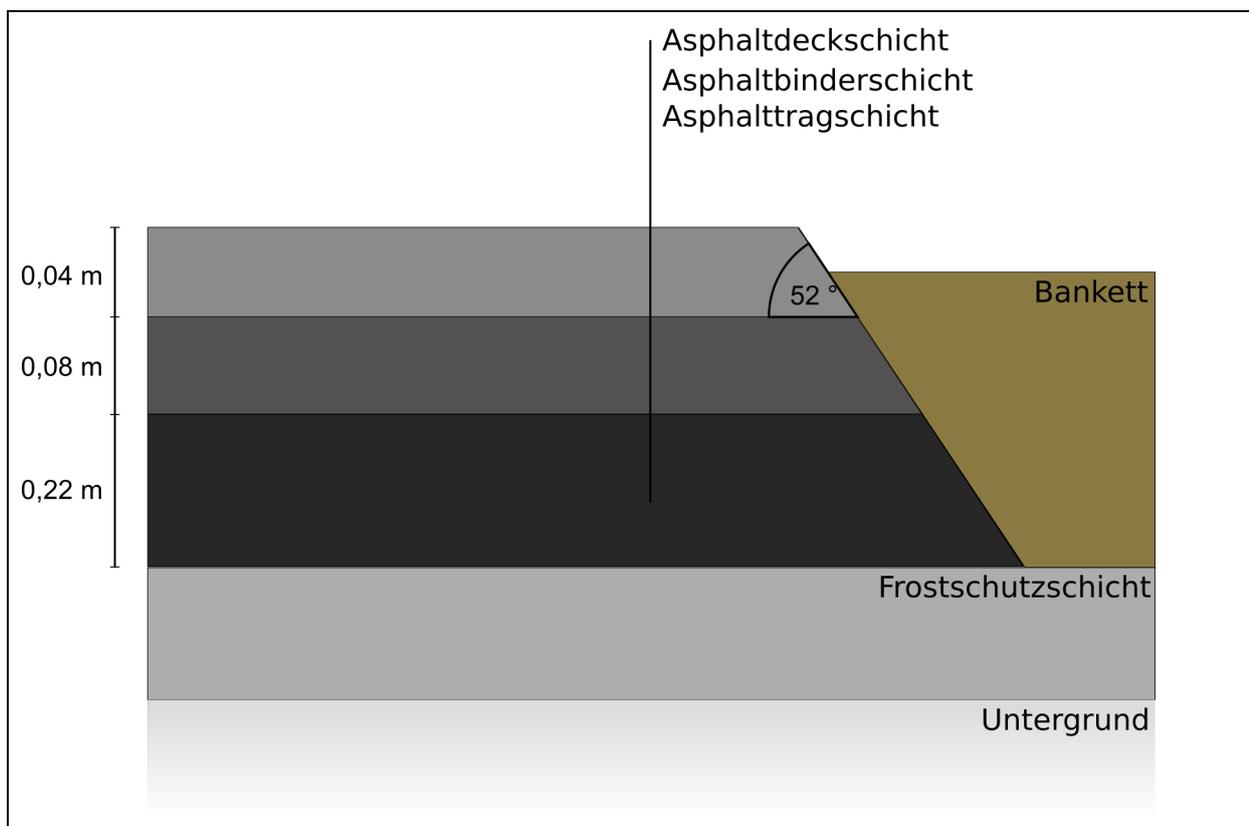


Bild 4-19: Befestigungsaufbau für BK 100 nach RStO 2012 Tafel1, Zeile1, (Referenzmodell)

Der Modellaufbau ist in Bild 4-20 dargestellt. Der Boden (grau) und die Frostschutzschicht (braun) wurden als homogene Schichten definiert. Auf der Frostschutzschicht wurden die Asphalt-schichten (Asphalttragschicht (rot), Asphaltbinderschicht (grün), Asphaltdeckschicht (orange)) mit ei-

nem Böschungswinkel von 52° definiert. Das Bankett (blau) wurde so modelliert, dass die Kontaktflächen zwischen den Asphalt-schichten sowie der Frostschutzschicht bündig sind. Weiterhin wurde ein Höhenversatz zwischen der Fahrbahnoberfläche und dem Bankett von 2 cm angeordnet.

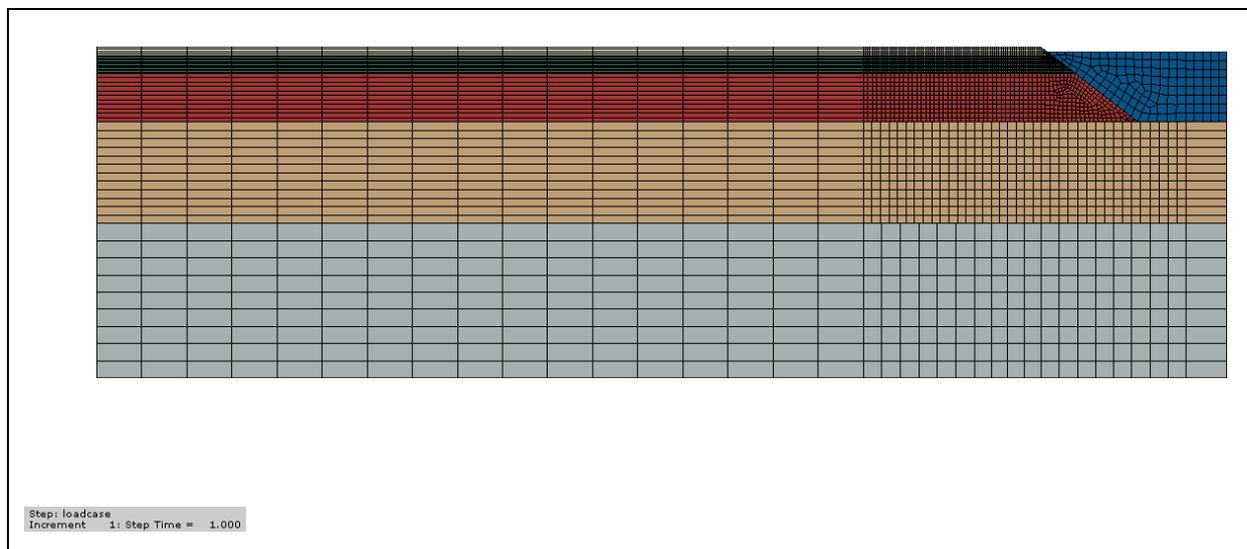


Bild 4-20: Modellaufbau des Referenzmodells: Asphaltdeckschicht: orange, Asphaltbinderschicht: grün, Asphalttragschicht: rot, Frostschutzschicht: braun, Bodenschicht: grau, Bankett: blau

Für alle Außenkanten der Schichten wurden die Randbedingungen als unverschieblich in Richtung der Modellmitte festgelegt. Der Kontakt zwischen einer gebundenen und ungebundenen Schicht sowie zwischen zwei ungebundenen Schichten wurde einheitlich als reibungsfrei in radiale Richtung und als undurchdringbar in axiale Richtung spezifiziert. Zwischen den Asphalt-schichten wurde ein fester Verbund definiert, was dazu führt, dass eine Verschiebung zwischen den Schichten nicht möglich ist und die Übertragung der mechanischen Beanspruchungen direkt erfolgt.

Im Bereich der Lastaufstandsfläche entstehen durch die Belastungen der Fahrzeuge hohe Gradienten bei den mechanischen Beanspruchungen. Aus diesem Grund wurde das Netz des FE-Modells in diesem spezifischen Bereich deutlich verfeinert (Kernbereich). Die Größe des Kernbereiches wurde durch Testrechnungen vor Ausführung der Simulationen ermittelt. Die Anwendung dieser Modifikation führte dazu, dass eine Steigerung der Güte der Berechnungsergebnisse im Kernbereich festgestellt werden konnte und gleichzeitig die Gesamtzahl der Elemente im Modell nicht erheblich angestiegen ist. Diese Optimierung ermöglicht eine relativ schnelle Berechnung der einzelnen Beanspruchungszustände.

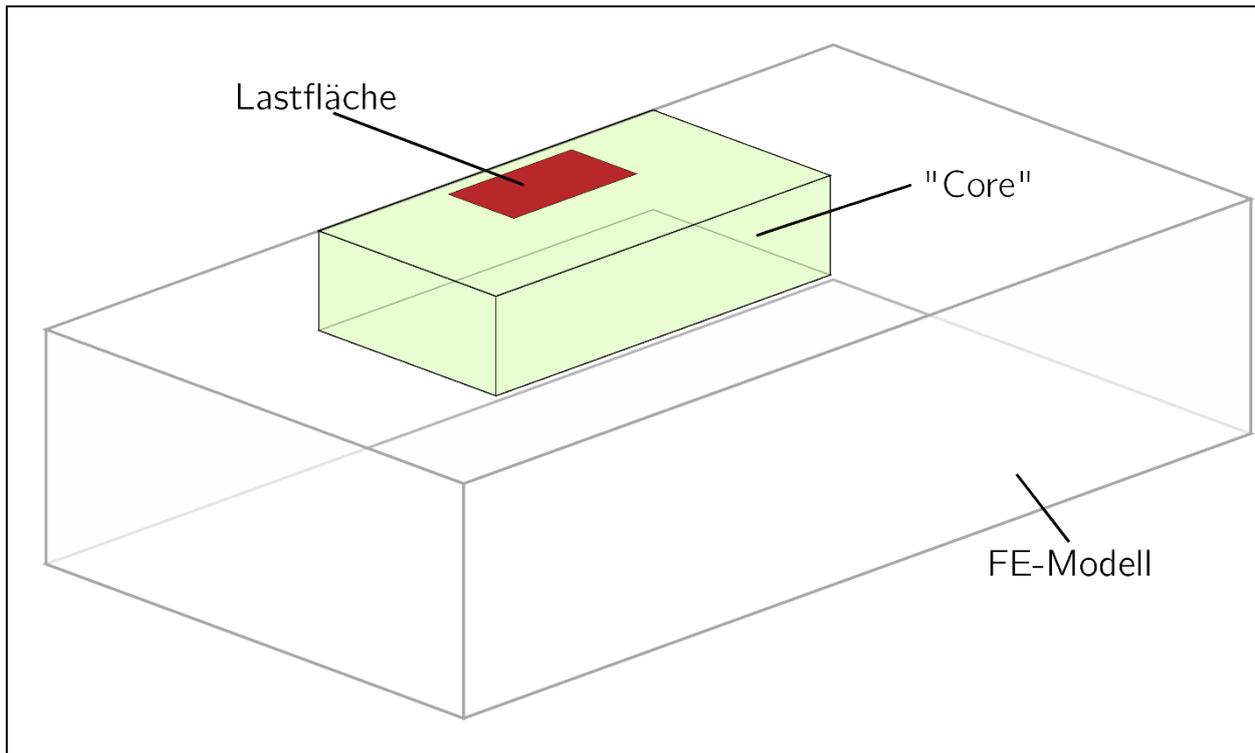


Bild 4-21: Schematische Darstellung des Kernbereiches des FE-Modells

4.2.2 Nutzungsdauerprognose bzw. Bestimmung des Ausfallzeitpunktes

Ziel der, an einer fiktiven Asphaltbefestigung, durchgeführten Untersuchungen sind Nutzungsdauerprognosen. Diese sind für verschiedenen Laststellungen der Verkehrslast mit und ohne zusätzliche konstruktive Maßnahmen zu treffen. Nach gegenwärtigem Wissensstand lässt das in den RSO Asphalt [RSO Asphalt E 15] beschriebene Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz die genauesten Ergebnisse für diese Aufgabenstellung erwarten. Die Prognoserechnungen wurden deshalb in Anlehnung an die Bewertungsverfahren RSO Asphalt [RSO Asphalt E 15] durchgeführt.

Grundlage der Substanzbewertung (bzw. Nutzungsdauerprognose) nach den RSO Asphalt ist der Ermüdungsnachweis an maßgebenden Nachweispunkten nach den RDO Asphalt. Maßgebende Nachweispunkte sind in diesem Fall die Punkte in der Befestigung, an denen die höchste Biegezugspannung auftritt. Für den Lasteintrag mit großem Abstand zum Fahrbahnrand (d.h. Voraussetzungen zur Anwendung der Mehrschichtentheorie sind gegeben) ist die Lage des Nachweispunktes in der jeweiligen Schicht in der Regel bekannt. Die Berechnung der Belastung und Nachweisführung erfolgt in diesem Fall für jeweils einen Punkt in der jeweiligen Asphalt-schicht (in der Regel an der Unterseite der Asphalttragschicht).

Für die in diesem Forschungsprojekt zu untersuchenden Laststellungen und Konstruktionsvarianten lagen keine Erfahrungen zur Lage der maßgebenden Nachweispunkte vor. Die Randbefahrung der Straßenkonstruktion verursacht mechanische Beanspruchungen im Seitenbereich, welche ungleichmäßig in der Asphaltbefestigung abgeleitet werden. An den Nachweispunkten wurden die Einzelkomponenten des Verzerrungstensors analysiert und nach den Empfehlungen von Clauß [CLAU 2021] aufbereitet. Dabei wurde für jedes Element durch eine Tensortransformation die Hauptdehnungen berechnet. In der Studie von Clauß konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Temperaturbedingungen und Beanspruchungen durch den Verkehr im Kernbereich von Straßenkonstruktionen dazu führen, dass die Richtungen (Eigenvektoren) der Hauptdehnungen nahezu identisch sind. Dies führt dazu, dass die Schädigungshypothese nach Miner bei der Berechnung des Ermüdungsstatus verwendet werden kann.

Die Ergebnisse einer vergleichenden FEM Berechnung für zwei unterschiedliche Laststellungen in Bild 4-22 zeigen die Verteilung der elastischen Dehnungen bei unterschiedlicher Laststellung. Es ist erkennbar, dass eine Belastung nahe dem Fahrbahnrand zu einer unsymmetrischen Verteilung der Dehnungen führt. Unterhalb der Radaufstandsfläche entstehen jeweils hohe Stauungen (blau). Außerhalb der Radaufstandsfläche, an deren Rändern, wurden sehr große Dehnungen (rot) ermittelt. Bei einem Radabstand von 0,75 m (Bild 4-22 unten) sind diese Dehnungen in Betrag und Fläche (Ausdehnung) augenscheinlich identisch. Die Radlast unmittelbar auf dem Fahrbahnrand (Bild 4-22 oben) erzeugt deutlich höhere Dehnungen am freien Rand.

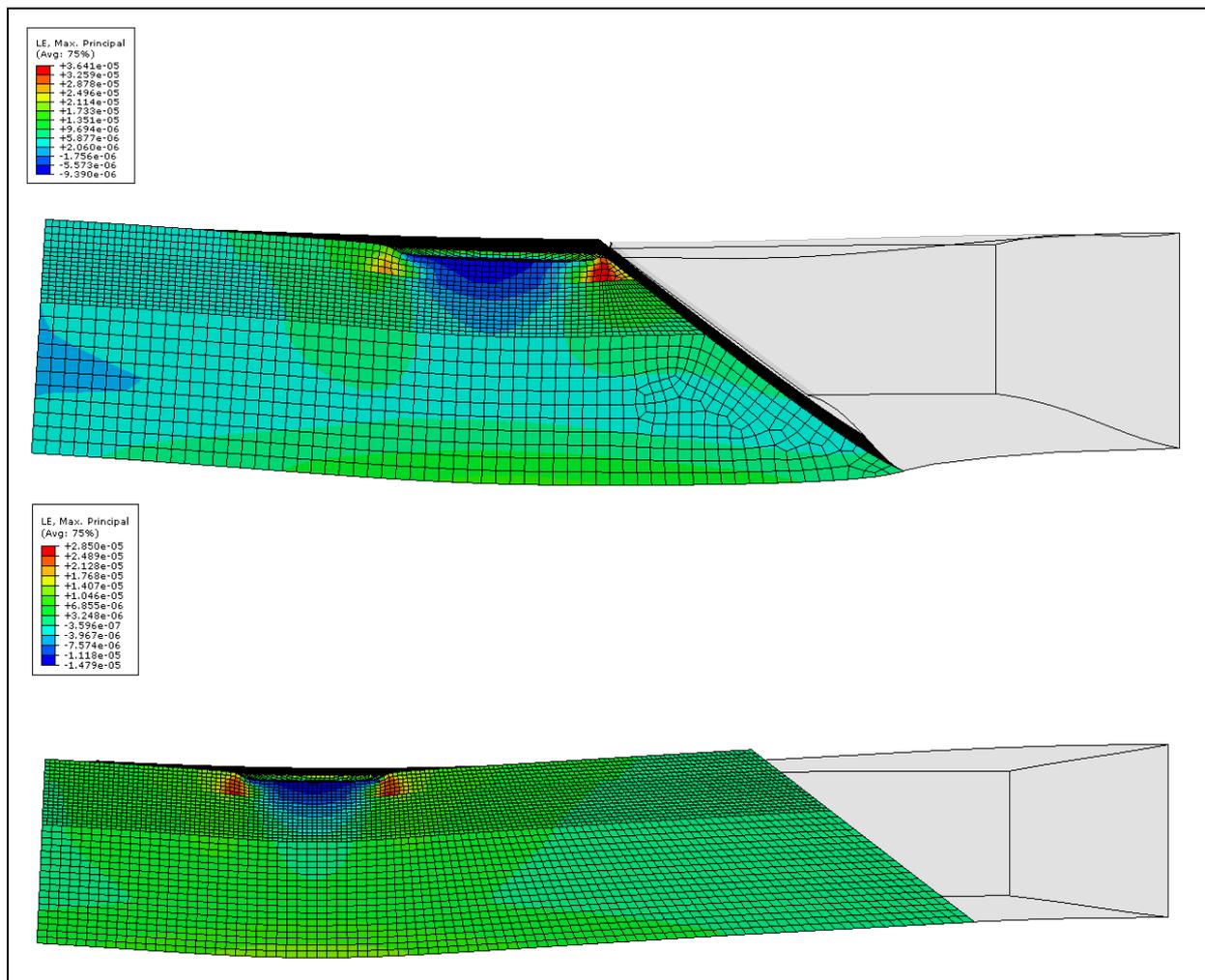


Bild 4-22: Elastische Dehnung im Kernbereich, oben: Seitenabstand Belastung 0,00 m, unten: Seitenabstand Belastung 0,75 m

Infolge dessen, dass mit der FE-Methode Dehnungen aus allen Beanspruchungszuständen für jedes Element bestimmt werden, lässt sich der Nachweispunkt lokalisieren. Das Element (einer Schicht) mit der größten Dehnung im jeweiligen Beanspruchungszustand ist maßgebender Nachweispunkt. Der feinmaschige Kernbereich des Modells ermöglicht hohe Präzision der Lagebestimmung des Nachweispunktes. Dieses Vorgehen ist mit einem erheblichen Mehraufwand gegenüber der regulären Nachweisführung verbunden, bietet jedoch einen deutlichen Zugewinn an Informationen und somit eine höhere Sicherheit der realitätsnahen Bewertung der Folgen der Befahrung des Seitenrandes.

Bild 4-23 zeigt die unterschiedlichen Positionen des maßgebenden Nachweispunktes der einzelnen Asphaltsschichten in Abhängigkeit von der Straßenkonstruktion (siehe auch Untersuchung konstruktiver Maßnahmen im Abschnitt 4.5 und 4.6) und Laststellung.

Zur Reduzierung der Rechenzeit wurden in Abwägung zwischen Ergebnispräzision und Aufwand folgende Festlegungen getroffen:

Die Belastungen werden für Oberflächentemperaturen und Achslastkollektive nach den [RDO Asphalt 09] berechnet (siehe Abschnitt 4.1, Bild 4-1, Bild 4-2).

Die Beschreibung der Variabilität der Steifigkeits- und Ermüdungsfunktionen der Asphaltsschichten wird auf die in den RSO geforderte Mindest-Klassenanzahl beschränkt (siehe Tab. 4-7).

Schwankungen der Schichtdicken bleiben unberücksichtigt.

Für die Ausfallwahrscheinlichkeit jedes Modells ergeben sich hieraus 3.861 Beanspruchungszustände (13 Temperaturklassen, 11 Achslastklassen, 27 Kombinationen der Asphaltsteifigkeit) mit denen 27.027 Nachweise (7 Ermüdungsfunktionen) je Schicht für jeden Seitenabstand geführt werden.

Seitenabstand	Elemente (Nachweispunkte)	Einzelergebnisse aus Beanspruchungszuständen
0,00 m	93.881	362.474.541
0,25 m	146.426	565.350.786
0,50 m	226.853	875.879.433
0,75 m	264.856	1.022.609.016

Tab. 4-9: Anzahl der Elemente und Einzelergebnisse aus Beanspruchungszuständen

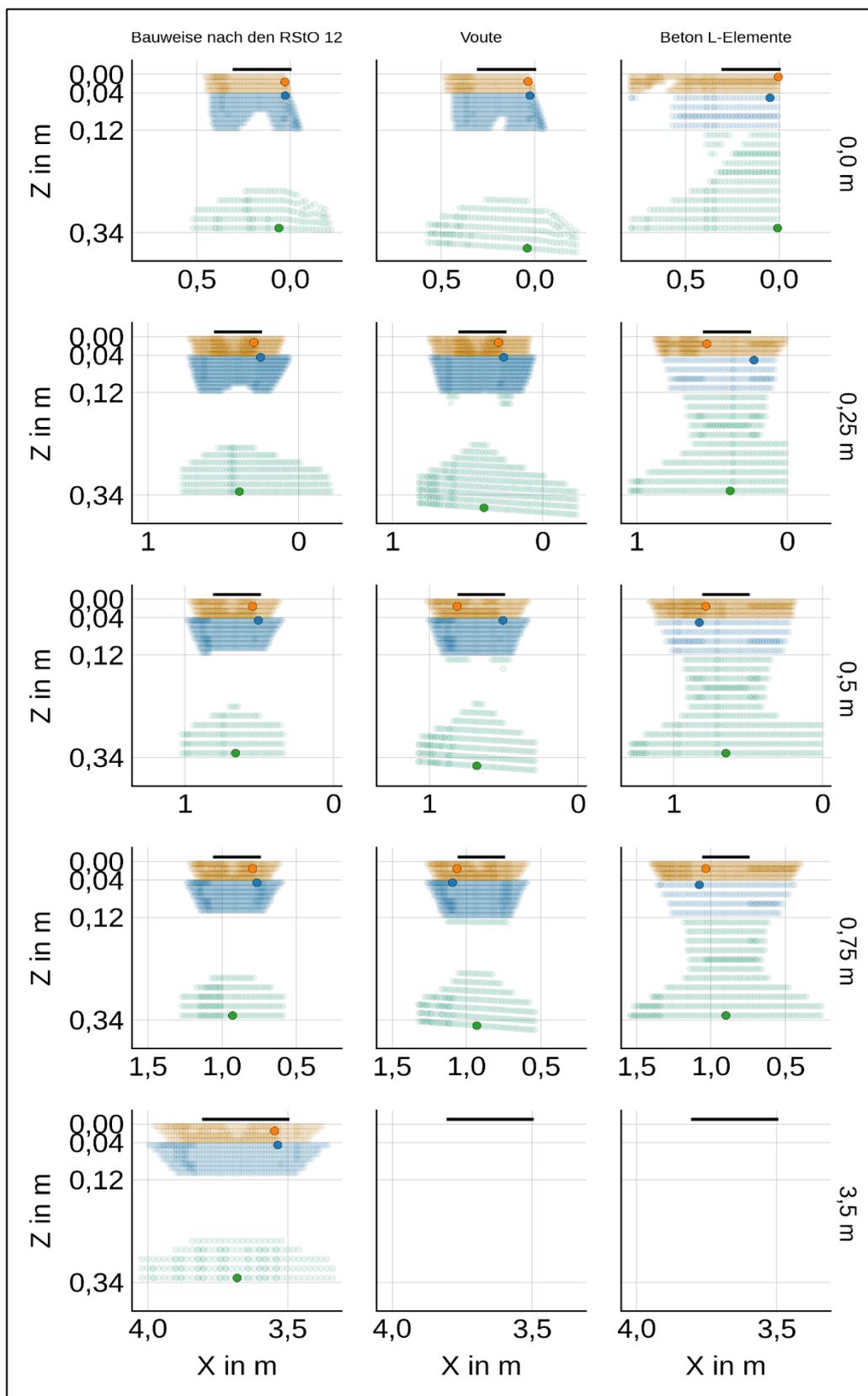


Bild 4-23: Position des maßgebenden Nachweispunktes (Rot = DS; Blau = BS, grün = TS) in Abhängigkeit von der Straßenkonstruktion (Spalten: Bauweise nach RSt12, mit Voute, mit Beton L-Element) und Laststellung (Zeilen: 0 m ,0,25m 0,5 m, 0,75 m, 3,5 m),

4.3 Validierung des implementierten Modells und des Berechnungsverfahrens

Zur Prüfung und Validierung des FE-Modells und der implementierten Verfahren zur Ermittlung der strukturellen Substanz wurden für das Referenzmodell (siehe Bild 4-19) bei 3,5 m Randabstand des Lasteintrages (siehe Bild 4-24) Vergleichsrechnungen mit dem Programm *ABAQUS* (Ermittlung der Beanspruchung mit der FE-Methode) und dem Programm *ADtoPave* (Ermittlung der Beanspruchung mit Mehrschichtentheorie) durchgeführt.

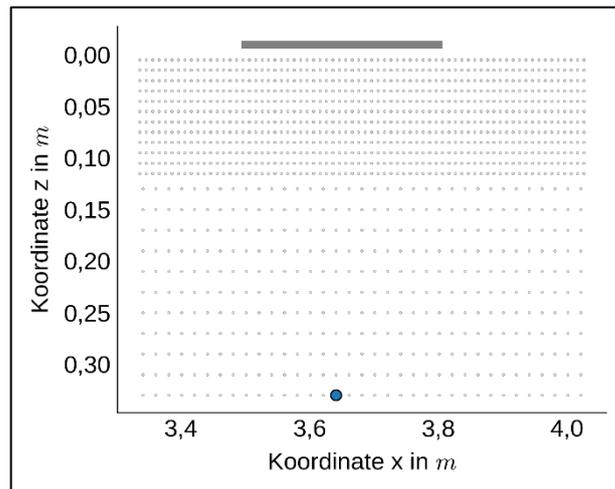


Bild 4-24: Vergleichsrechnung für das Referenzmodell, Position des Lasteintrages und Lage des Nachweispunktes

Die für gleiche Beanspruchungszustände berechneten Dehnungen sind in Bild 4-25 gegenübergestellt, die Berechnungsergebnisse beider Verfahren stimmen gut überein. Die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen in den Berechnungen zeigt Bild 4-26. Die relative Abweichung zwischen den Berechnungsergebnissen beträgt $\pm 4\%$. Mit der FE Methode (*ABAQUS*) wurden tendenziell etwas kleinere Dehnungen ermittelt als mit der Mehrschichtentheorie. Beide Berechnungsverfahren führten zu nahezu identischen Ergebnissen.

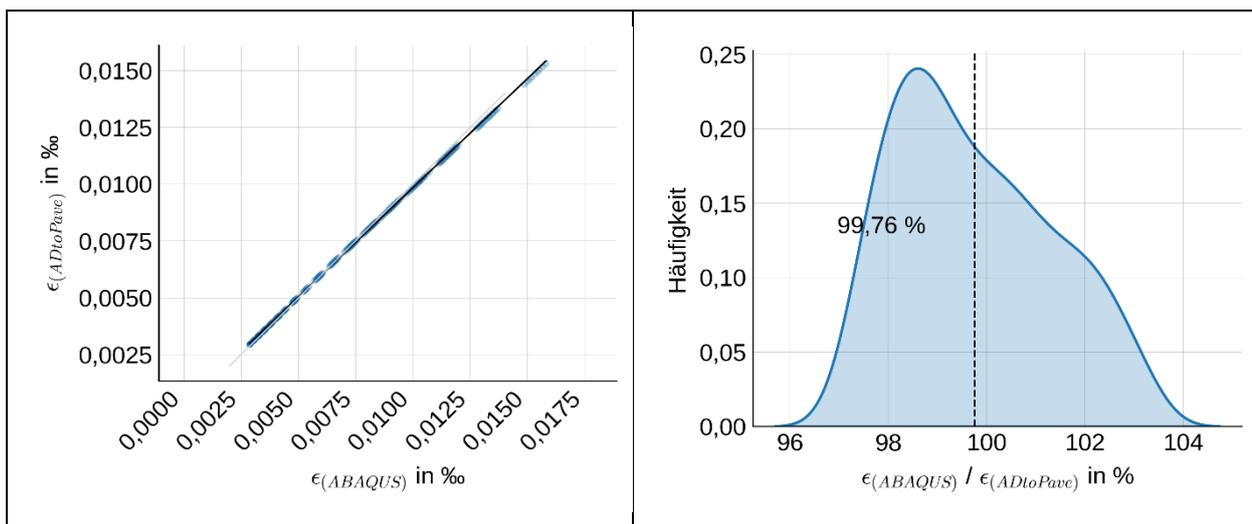


Bild 4-25: Gegenüberstellung der für gleiche Beanspruchung im Nachweispunkt berechneten Dehnungen

Bild 4-26: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichung zwischen den Berechnungen mit *ABAQUS* / *ADtoPave*

Die Gegenüberstellung der mit beiden Berechnungsmethoden bzw. Programmen für die Asphalttragschicht des Referenzmodells (Bild 4-19) bei einem Lasteintrag mit 3,5 m vom Fahrbahnrand für eine hohe Verkehrsbelastung auf dem Hauptfahrstreifen nach Tab. 3-5 (7.070.781 AÜ/a) ermittelten Ausfallwahrscheinlichkeiten zeigt Bild 4-27. Beide Berechnungsmethoden lieferten auch hier nahezu übereinstimmende Werte.

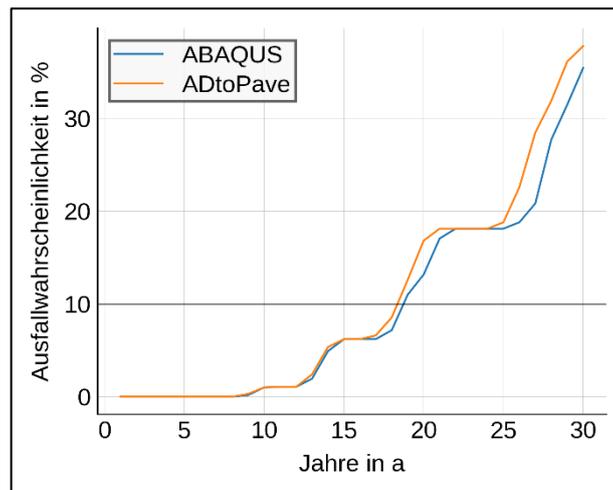


Bild 4-27: Gegenüberstellung der ABAQUS / ADtoPave bestimmten Ausfallwahrscheinlichkeit für die Asphalttragschicht des Referenzmodells

Die gegenübergestellten Implementierungen mit ABAQUS und ADtoPave lieferten für identische Straßenbefestigungen und Beanspruchungen nahezu übereinstimmende Berechnungsergebnisse für die Dehnungen im maßgebenden Nachweispunkt und Dauerhaftigkeitsprognosen der Asphalttragschicht. Die für dieses Forschungsprojekt implementierte Software wurde mit Bezug auf eine einsatzerprobte, kalibrierte Softwareanwendung erfolgreich validiert.

4.4 Auswirkung des Randabstandes auf die ertragbare Lastwechselzahl

In diesem Arbeitsschritt wurden die Auswirkungen des Abstandes der Lasteintragungsstelle zum Rand der befestigten Fläche auf die ertragbare Lastwechselzahl der Oberbaukonstruktion untersucht. Grundlage dieser Untersuchungen sind die im Abschnitt 3.2 herausgearbeiteten, signifikanten Lasteintragungspunkte im Abstand von 0,00 m, 0,25 m, 0,50 m und 0,75 m zum Fahrbahnrand. Dabei wurde zunächst mit dem deterministischen Berechnungsverfahren für jede Asphaltdeck- und Asphalttragschicht der Ermüdungsstatus (Quotient aus prognostizierte Anzahl Achsübergänge / ertragbare Anzahl Achsübergänge) bestimmt und ins Verhältnis zum Maximum der ermittelten Werte gesetzt (relativer Ermüdungsstatus). Bild 4-28 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen.

Eine Verringerung des Randabstandes führt zur Abnahme der Dauerhaftigkeit. Die Verschiebung des Lasteintrages von 0,75 m auf 0,5 m zum Fahrbahnrand hat innerhalb der Asphaltbefestigung die größten Auswirkungen auf die Asphalttragschicht. Eine weitere Reduzierung des Randabstandes von 0,5 m auf 0,25 m führt zur Verkürzung der Nutzungsdauer von Asphaltdeck- und Asphalttragschicht, wobei auch hier der größere Einfluss auf die Asphalttragschicht festzustellen ist. Die Verschiebung des Lasteintrages zum unmittelbaren Fahrbahnrand hat signifikanten Einfluss auf alle Asphaltdeck- und Asphalttragschichten. Die Asphaltdeckschicht hat hier den größten Anstieg des relativen Ermüdungsstatus. Aber auch für Asphaltbinder- und Asphalttragschicht bedeutet diese Reduzierung des Randabstandes eine deutliche Verkürzung der Nutzungszeit. Eine Belastung mit einem Abstand von 0,00 m zum Rand führt schließlich zum Versagen / Ausfall der gesamten Befestigung.

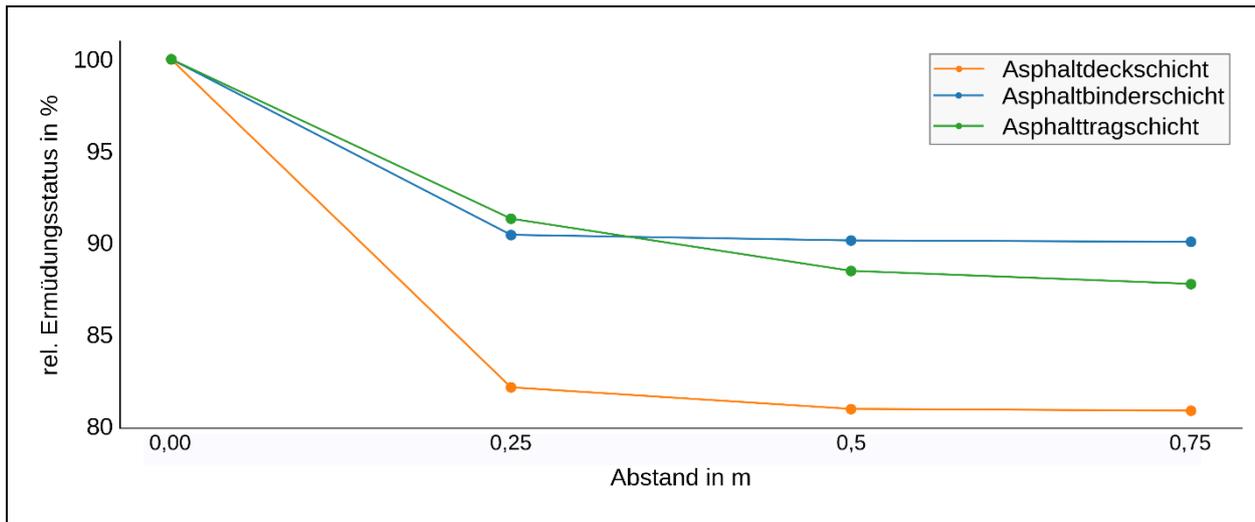


Bild 4-28: Entwicklung des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom Abstand des Lasteintragungspunktes zum Fahrbahnrand

Im nächsten Schritt wurden für das Referenzmodell Ausfallwahrscheinlichkeiten mit dem probabilistischen Berechnungsansatz ermittelt. Die zeitliche Entwicklung der Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Asphalt-schichten in Abhängigkeit vom Seitenabstand der Überfahrungen zeigt Bild 4-29. Die gekennzeichneten dünnen Linien entsprechen jeweils dem Verlauf an einem Nachweis-punkt. Die maßgebende Entwicklung wurde mittels der deutlich hervorgehobenen Linie gekennzeichnet. Die nachfolgenden Analysen beruhen auf der Festlegung, dass bei einer Ausfall-wahrscheinlichkeit von 10 % (d.h. 10% der virtuellen Teilabschnitte eines Streckenabschnittes sind ausgefallen) der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit erreicht ist (siehe [RSO Asphalt 2015]). Das Erreichen dieses Kriteriums ist in den Diagrammen mit einer roten Linie kenntlich gemacht. Diese Linie kennzeichnet das Ende des Jahres, in welchem 10% der virtuellen Teilabschnitte des Streckenabschnittes ausgefallen sind. Die Ausfallrate ist zu diesem konkreten Zeit-punkt im Regelfall höher als 10% (das Berechnungsverfahren liefert diskrete Werte für jeweils volle Jahre). Der Betrachtungszeitraum wurde auf eine 30-jährige Periode festgelegt.

Der Vergleich in Abhängigkeit vom Seitenabstand zeigt, dass eine direkte Befahrung des Seiten-raums signifikant höhere Schädigungen in der Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttrag-schicht verursacht (Bild 4-29). Die Randparameter aller FE-Modelle wurden als konstant festge-legt. Die Änderung der Nutzungszeiten bzw. die Zunahme des Schädigungspotenzials entsteht allein aus der Veränderung des Seitenabstandes der Lasteinleitungsfläche.

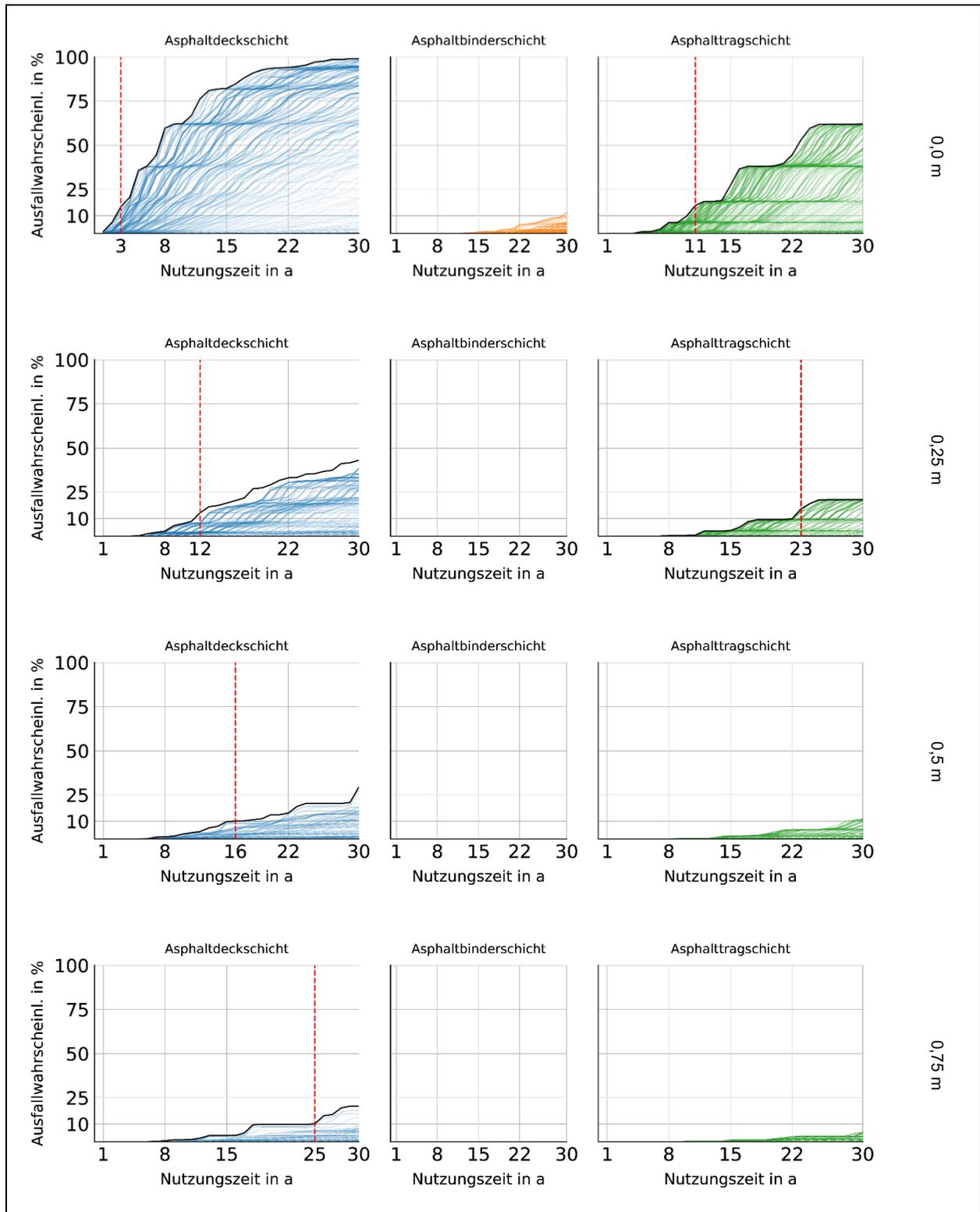


Bild 4-29: Entwicklung der Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Nutzungsdauer und Asphalttschicht; Anzahl der jährlichen Achsübergänge: 1.000.000; Zeile 1 – 4: Randabstand Lasteintrag 0,00; 0,25; 0,5; 0,75 m

Bild 4-30 zeigt die räumliche Lage der signifikanten Nachweispunkte in Abhängigkeit von Asphalttschicht und Seitenabstand. Das Gesamtsystem ist an der Achse mit $y = 0$ m symmetrisch aufgebaut. Die Lastaufstandsfläche wird durch einen schwarzen Halbbogen symbolisiert. Die Größe des Punktes gibt das Schädigungspotenzial hinsichtlich der Ermüdungsrissbildung an. Ein großer Durchmesser entspricht einer hohen Beanspruchung und somit einem hohen Schädigungspotential, wohingegen ein kleiner Durchmesser ein geringes Potential repräsentiert.

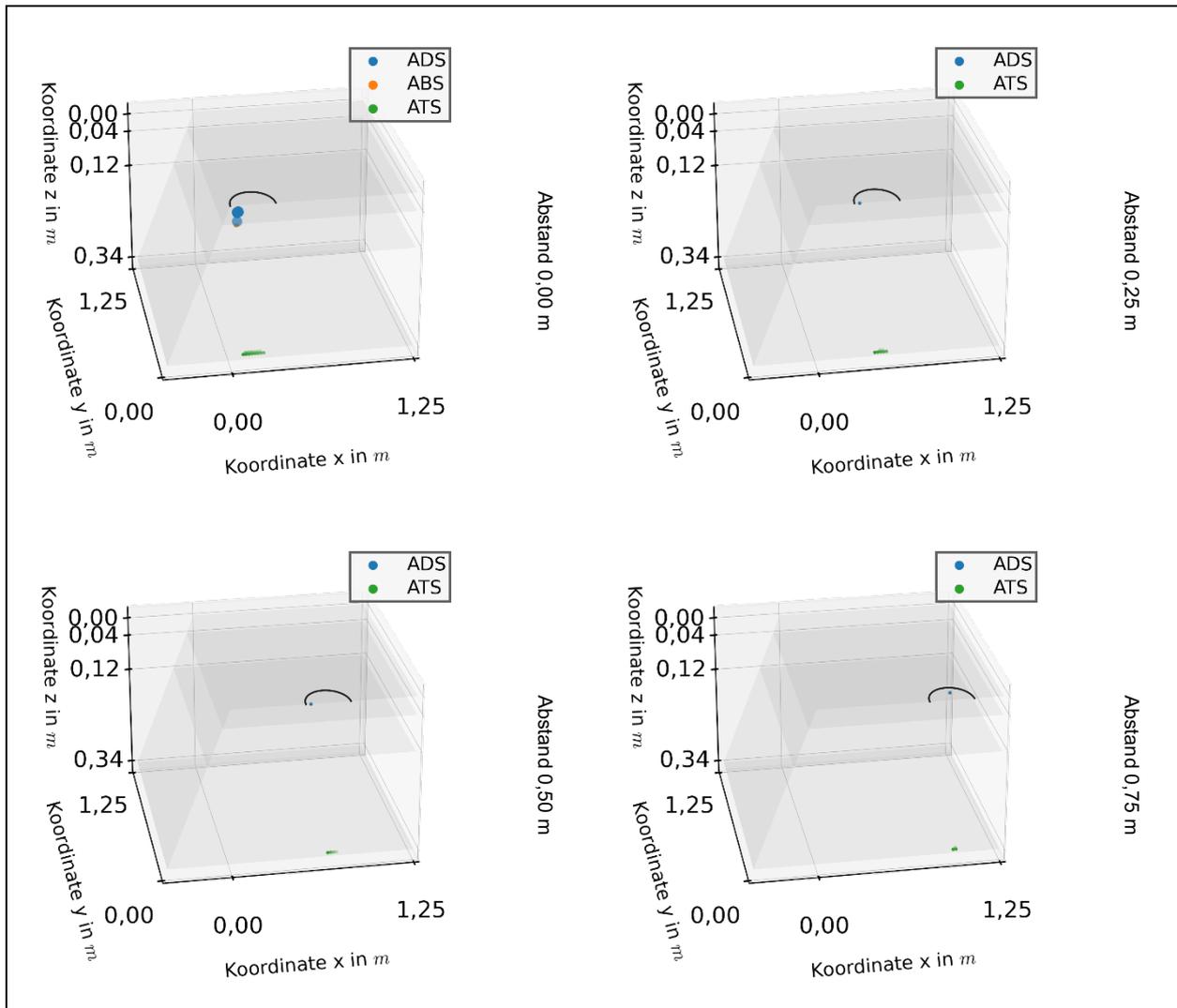


Bild 4-30: Position der maßgebenden Nachweispunkte in Abhängigkeit vom Seitenabstand, oben links: 0,00 m, oben rechts: 0,25 m, unten links: 0,50 m, unten rechts: 0,75 m

Wie bereits festgestellt, hat der Seitenabstand einen erheblichen Einfluss auf die geometrische Lage des Nachweispunktes. Im Falle der Randbefahrung (Seitenabstand 0,00 m) entstehen sehr hohe Dehnungen im Bereich der Asphaltdeckschicht, unweit vom äußeren Rand. Diese hohen Dehnungen führen zu einem deutlich verfrühten Entstehen von Ermüdungsrissen. Für unterschiedliche Kombinationen der Klassen des Steifigkeitsmoduls sowie der Ermüdungsfunktionen ergeben die FE-Simulationen nicht immer eine gleiche Lage der maximalen Dehnung und somit ist eine pauschalisierte Ableitung des Nachweispunktes bei dieser komplexen Geometrie nicht möglich. Das Dimensionierungs- und Prognoseverfahren für die Bewertung der Dauerhaftigkeit des Seitenstreifens ist deshalb anspruchsvoller als der Regelfall. Im Bereich der Asphaltbinder-schicht liegt das höchste Risiko auf Ermüdungsrissbildung an der Oberseite der Schicht, wenige Zentimeter vom Rand entfernt. Das absolute Potenzial gegenüber Ermüdungsrissbildung ist jedoch deutlich geringer als bei den anderen Asphalt-schichten. Im Bereich der Asphalttragschicht wurde festgestellt, dass Ermüdungsrisse an der Unterseite der Schicht entstehen, diese im Vergleich zu der Asphaltdeckschicht jedoch zu einem deutlich späteren Zeitpunkt auftreten. Bedingt durch die nicht symmetrische Lastableitung im Randbereich befinden sich die maximalen Dehnungen nicht exakt zentrisch unterhalb der Lasteinleitungsfläche, sondern sind in Richtung des Seitenrandes verschoben.

Eine Erhöhung des Seitenabstandes des Lasteinleitungspunktes auf 0,25 m verringert das Schädigungspotenzial, vor allem in der Asphaltdeckschicht, erheblich. Die Lastableitung in die Tiefe der Asphaltbefestigung erfolgt eher symmetrisch und somit entstehen die maximalen Dehnungen

an der Unterseite der Asphalttragschicht. Eine weitere Vergrößerung des Seitenabstandes des Lasteinleitungspunktes bewirkt eine weitere Verringerung des Schadenpotentials. Die Absolutwerte der Dehnungen sinken und die Beanspruchungen aus dem Verkehr werden symmetrisch innerhalb der Asphaltbefestigung abgeleitet. Dies hat zur Folge, dass die maßgebenden Dehnungen innerhalb eines kleineren Bereiches entstehen. Anhand der Daten ist festzustellen, dass eine weitere Vergrößerung des Seitenabstandes zu einer geringeren Streuung der geometrischen Lage der Nachweispunkte an der Unterseite der Asphalttragschicht führt. Mit einem ausreichend großen Abstand sollte sich eine Konzentration der Nachweispunkte auf einen Punkt (x-y-Koordinate) ergeben, da die Randeinflüsse für den Bereich der Nachweisführung vernachlässigbar werden. Somit ist die Anwendbarkeit für Berechnungen auf Basis der Mehrschichtentheorie bei großen Seitenabständen möglich, wohingegen die Ergebnisse belegen, dass in der Nähe des Seitenbereiches nur Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode sinnvoll sind. Das für diese Berechnungen angewendete Finite-Elemente basierte Verfahren führt zu einer deutlich erhöhten Berechnungszeit gegenüber der Mehrschichtentheorie, eine realitätsnähere Beschreibung der Beanspruchungen und der Lastverteilung innerhalb der Asphaltbefestigung ist jedoch zu erwarten. Die in diesem Forschungsvorhaben berechneten Ergebnisse sollten zwingend in einem nachfolgenden Projekt anhand von großmaßstäblichen Versuchen validiert werden.

4.5 Prüfung der Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen

4.5.1 Randausbildung

Im Zusammenhang mit Asphaltbefestigungen bezeichnet der Begriff Randausbildung die Herstellung, Formgebung und Verdichtung der freien Ränder sämtlicher Asphaltschichten sowie deren Abdichtung. Die Ränder der einzelnen Asphaltschichten können dabei versetzt oder bündig ausgeführt werden und sind mit einer Neigung von maximal 2:1 abzuschrägen und über die gesamte Fläche der Flanken anzudrücken. Diese Forderung kann nur durch Einsatz geeigneter Kantenschragformer und Verdichter (Kantenschuhe mit Höhe entsprechend der Einbaudicke) erfüllt werden (siehe auch [Schäfer 2001]). Gegenwärtig gebräuchliche Kantenschuhe haben eine Abschrägung von 52° , diese wurde für das Referenzmodell gewählt.

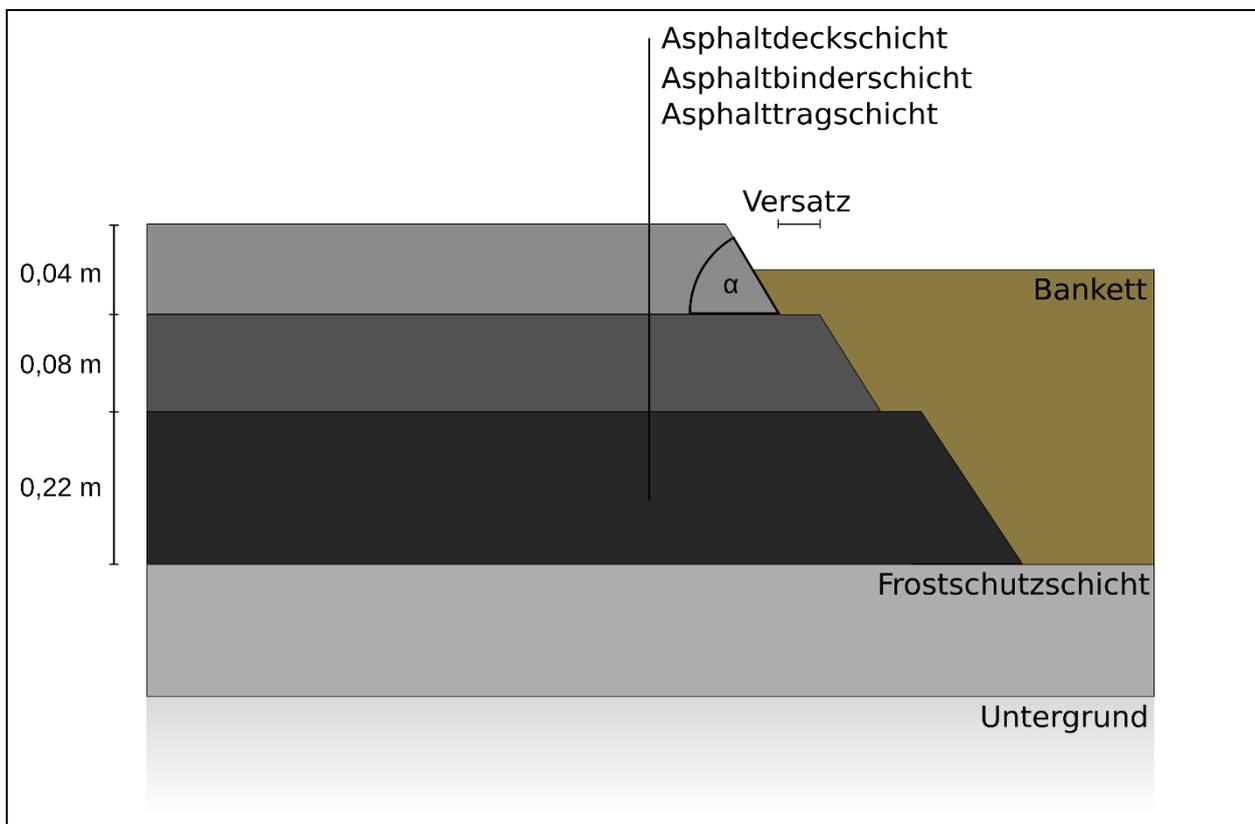


Bild 4-31: Befestigungsaufbau für BK 100 nach RSTO 2012 Tafel1, Zeile1, mit Böschungswinkel α und Versatz der Asphaltschichten

In Bild 4-32 ist der Einfluss der Randausbildung auf den Ermüdungsstatus dargestellt. Untersucht wurden unterschiedliche Böschungswinkel zwischen 35° und 70° und ein Versatz der Asphaltschichten von 50 mm und 100 mm bei Randabständen des Lasteintragungspunktes von 0,0 m (unmittelbare Randbefahrung) und 0,25 m. Die Bewertung der Berechnungsergebnisse erfolgt jeweils in Bezug auf das Referenzmodell (Asphaltschichten liegen bündig übereinander, Böschungswinkel 52°) und einen Randabstand des Lasteintragungspunktes von 0,0 m.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass bei direkter Randbefahrung mit zunehmendem Böschungswinkel auch der Ermüdungsstatus der Asphaltdeckschicht (ADS) zunimmt, ein Versatz der Asphaltschichten jedoch kaum Auswirkungen hat. Beim Randabstand des Lasteintragungspunktes von 0,25 m ist kein Einfluss der unterschiedlichen Randausbildung feststellbar. Die Berechnungsergebnisse der Asphaltbinderschicht (ABS) weisen die gleiche Tendenz auf. Die

größte Auswirkung hat die unterschiedliche Geometrie der Randausbildung auf die Asphalttragschicht (ATS). Im Unterschied zur ADS und ABS ist eine eindeutige Auswirkung eines Schichtenversatzes erkennbar. Darüber hinaus hat die Randausbildung auch noch Auswirkungen bei einem Randabstand des Lasteintragungspunktes von 0,25 m.

Insgesamt haben die untersuchten Geometrien der Randausbildung nur einen geringen Einfluss auf die Beanspruchung und Ermüdung der Asphaltbefestigung. Mit Zunahme des Abstandes der zwischen Reifenschulter und Fahrbahnrand, sinkt der Einfluss der Modifikationen. Bereits bei einem Seitenabstand von 0,25 m ergeben sich keine signifikanten rechnerischen Vorteile. Diese Variante wurde daher nicht weiterverfolgt.

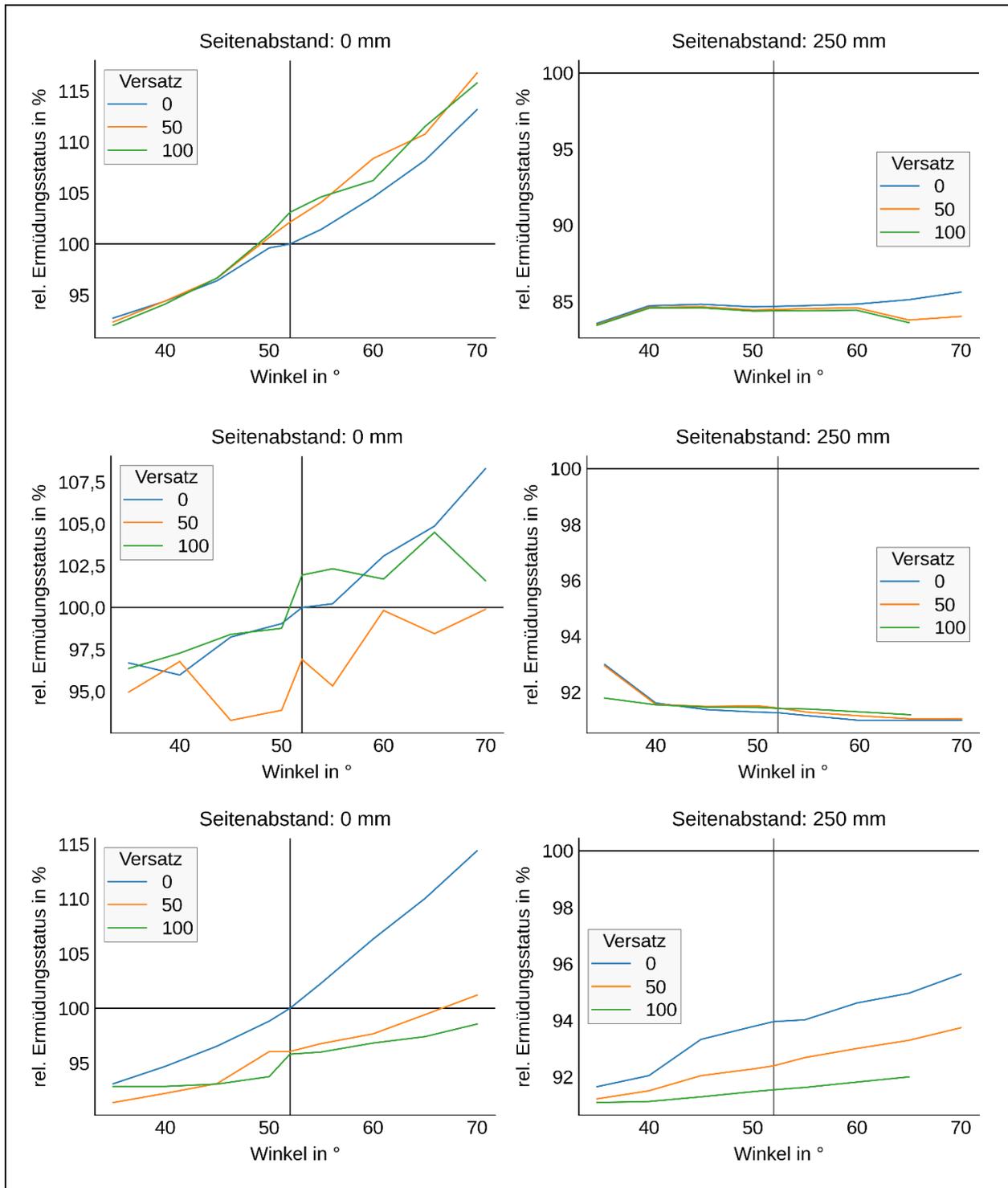


Bild 4-32: Auswirkung unterschiedlicher Randausbildungen auf den rel. Ermüdungsstatus der Asphaltsschichten, von oben nach unten ADS, ABS ATS, Angaben zum Schichtenversatz in mm, Bezugsgröße: Ermüdungsstatus für das Referenzmodell (Asphaltsschichten liegen bündig übereinander, Böschungswinkel 52°) Randabstand des Lasteintragungspunktes 0,0 m

4.5.2 Voute in der Asphalttragschicht

Eine konstruktive Maßnahme zur Reduzierung der Beanspruchungen in den Schichten der Randbefestigung ist die Ausbildung einer Voute in der Asphalttragschicht. Da hierfür keine nennenswerten Erfahrungswerte vorlagen, wurden Vouten mit verschiedenen Abmessungen (Breiten, Dicken) untersucht. Die Geometrien der untersuchten Vouten sind in Bild 4-33 zusammengestellt. Es wurden deterministische Berechnungen für 12 Vouten (4 Breiten in jeweils 3 verschiedenen

Dicken bzw. Höhen) durchgeführt, die Ergebnisse zeigt Bild 4-34. Deutliche Auswirkung hat die Voute auf den Ermüdungsstatus der Asphalttragschicht. Die Wirksamkeit der Voute nimmt mit deren Größe zu. Die Breite der Voute bestimmt, bei welchem Randabstand des Lasteintrages der positive Einfluss auf die Ermüdung nachlässt. Vouten mit 1 m Breite haben bei 0,5 m Randabstand des Lasteintrages kaum noch Einfluss. Für die Beanspruchung der Asphalttragschicht und der Asphaltbinderschicht ist kein signifikanter Einfluss erkennbar.

Den Befestigungsaufbau mit der im Ergebnis dieser Untersuchungen gewählten Vorzugsvariante zeigt Bild 4-35. Mit diesem Aufbau wurden weitergehende probabilistische Berechnungen durchgeführt (siehe Abschnitt 4.6).

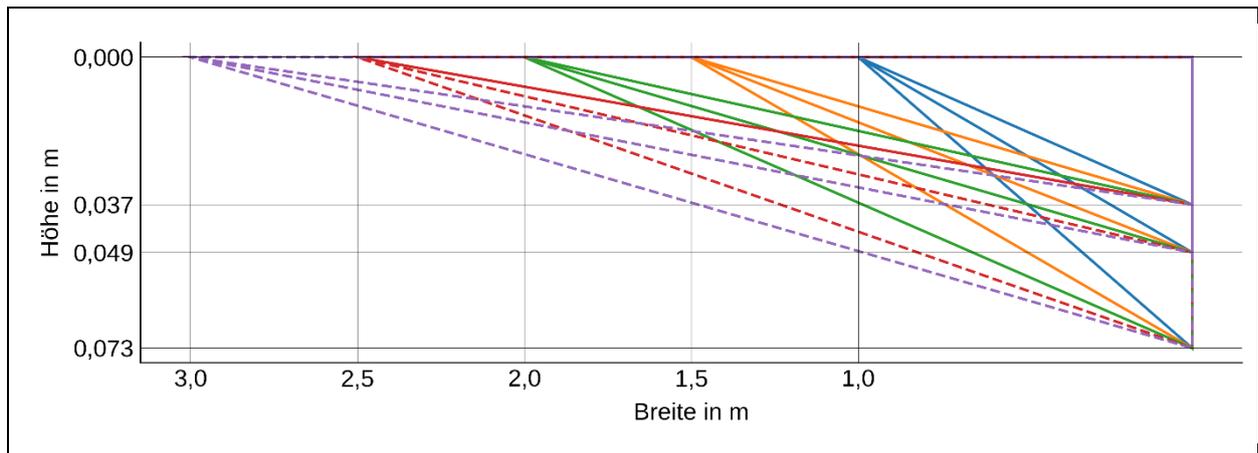


Bild 4-33: Abmessungen der untersuchten Varianten einer Voute in der ATS

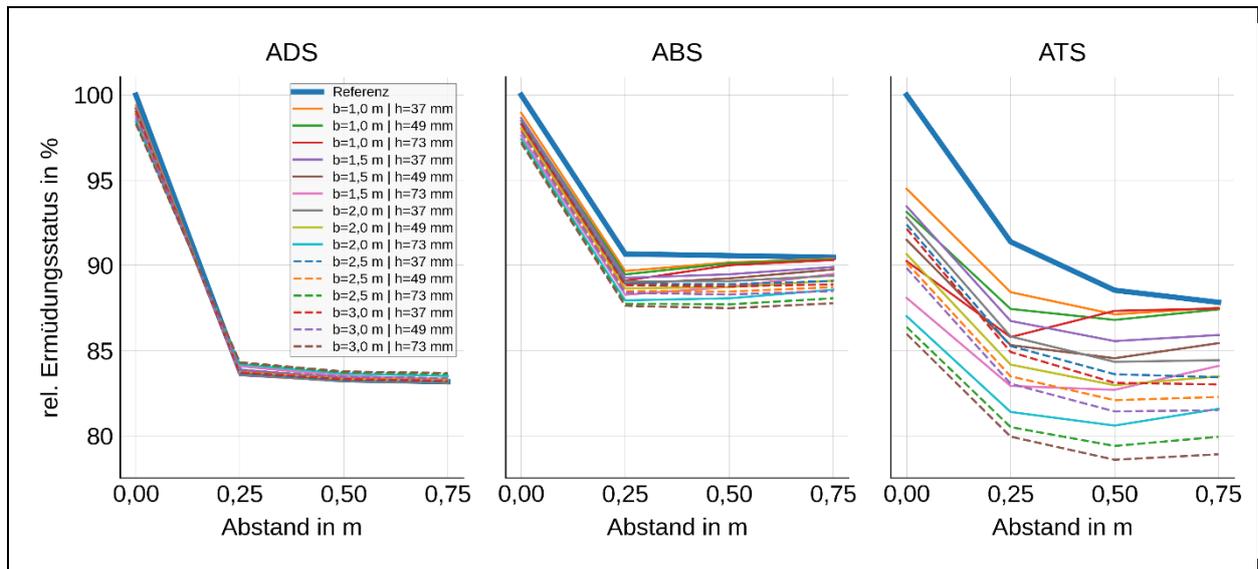


Bild 4-34: Auswirkung unterschiedlicher Geometrie der Voute auf den rel. Ermüdungsstatus der Asphalttragschichten, Bezugsgröße: Ermüdungsstatus für das Referenzmodell (keine Voute), Randabstand des Lasteintragungspunktes 0,0 m

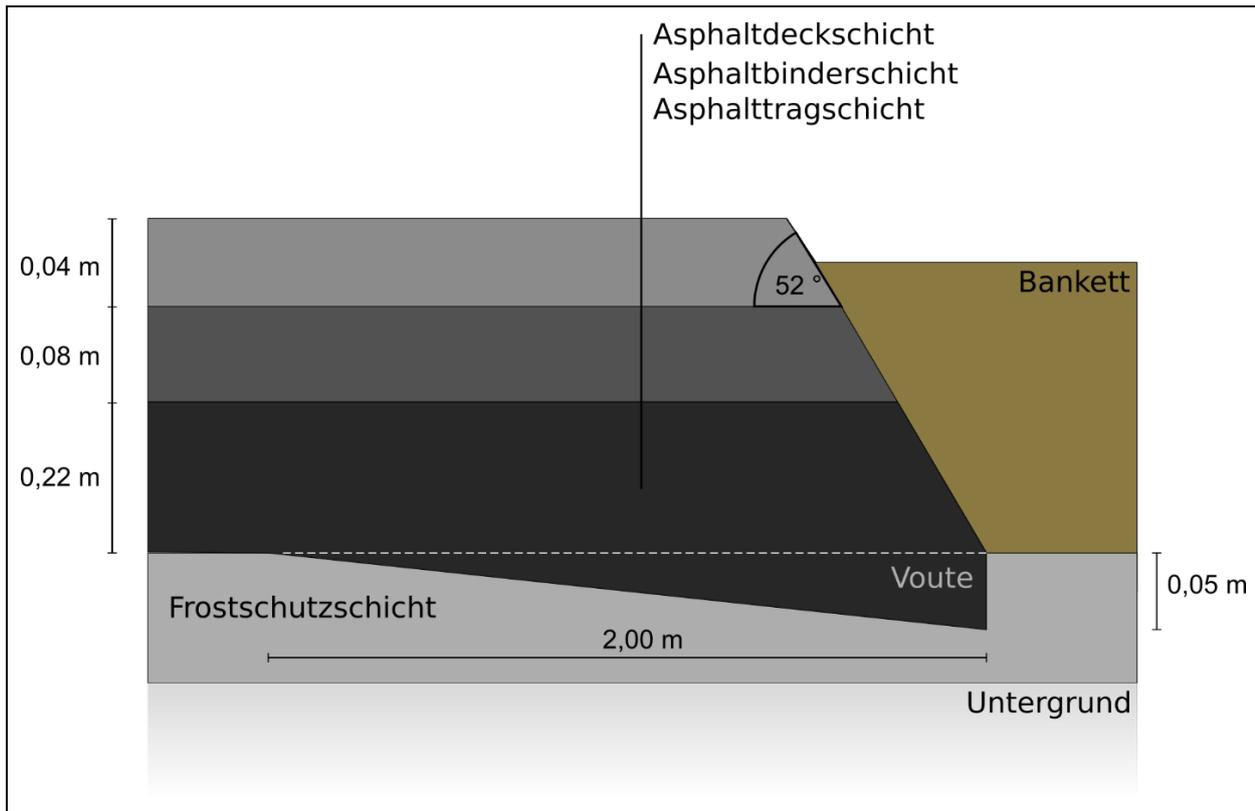


Bild 4-35: Asphaltbefestigung mit Voute in der Asphalttragschicht

4.5.3 Randeinfassung

Eine Randeinfassung der Asphaltbefestigung kann als Widerlager horizontale Kräfte aufnehmen und damit die Beanspruchung im Randbereich reduzieren. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die in Bild 4-36 und Bild 4-37 dargestellten Varianten einer Randeinfassung modelliert und deren Einfluss auf die Ermüdung der Asphaltschichten für unterschiedliche Positionen des Lasteintrages untersucht. Bild 4-38 Spalte 3 zeigt den Einfluss dieser Varianten auf den Ermüdungsstatus im Vergleich zur Ausführung ohne konstruktive Maßnahmen (siehe Bild 4-19; Referenzmodell). Der untersuchte Betonbalken führt zu höherer Beanspruchung bei Befahrung des Fahrbahnrandes und ist als konstruktive Maßnahme ungeeignet. Um die gewünschte Reduzierung der Beanspruchungen im Randbereich zu erzielen, muss die Randeinfassung als unverschiebliches Widerlager ausgebildet werden. Eine praktikable und effektive Ausführungsvariante ist die in Bild 4-37 gezeigte Konstruktion mit einem L-Element aus Beton, diese kombiniert ein horizontales Widerlager mit einer Unterstützung der Asphalttragschicht. Beides hat positiven Einfluss auf die Beanspruchung in den Asphaltschichten. Unplausibel ist der Anstieg des Ermüdungsstatus in der Deckschicht bei unmittelbarer Randbefahrung.

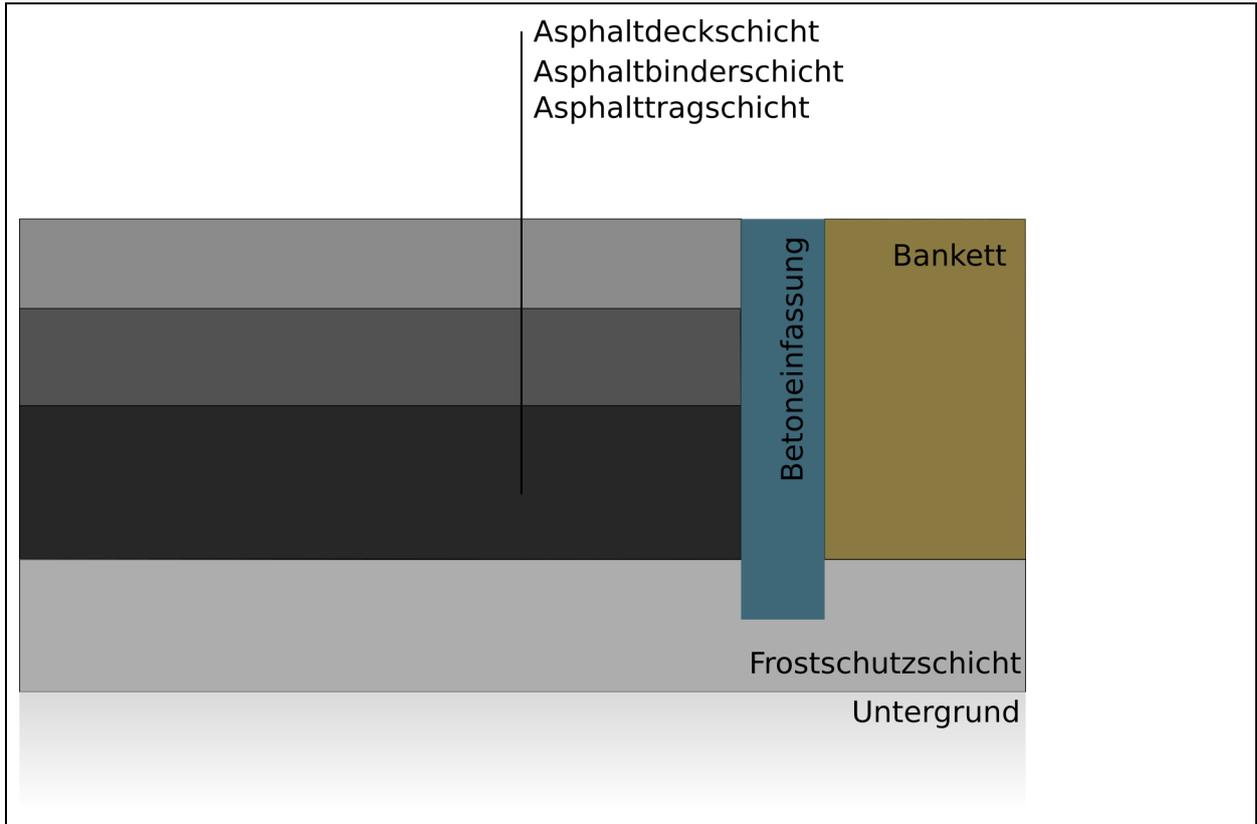


Bild 4-36: Randeinfassung mit Betonbalken

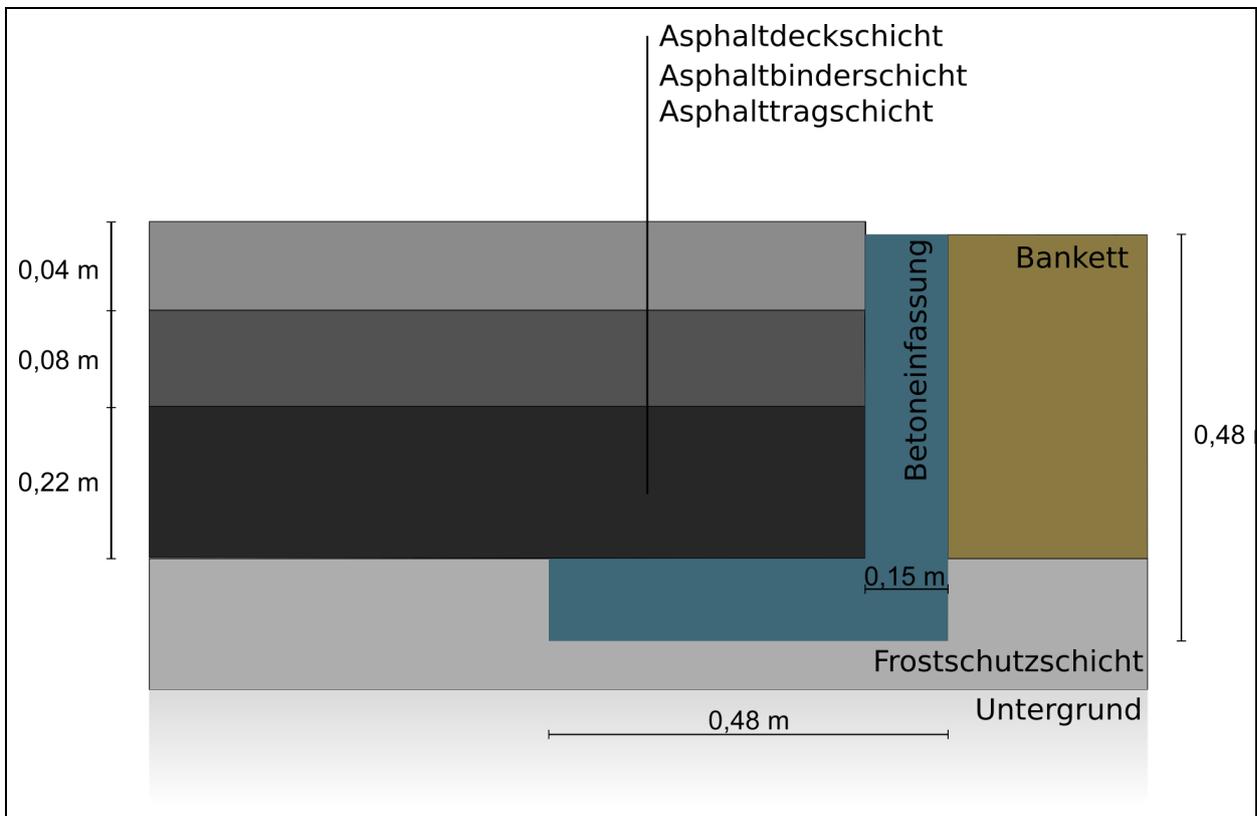


Bild 4-37: Randeinfassung mit L- Element aus Beton

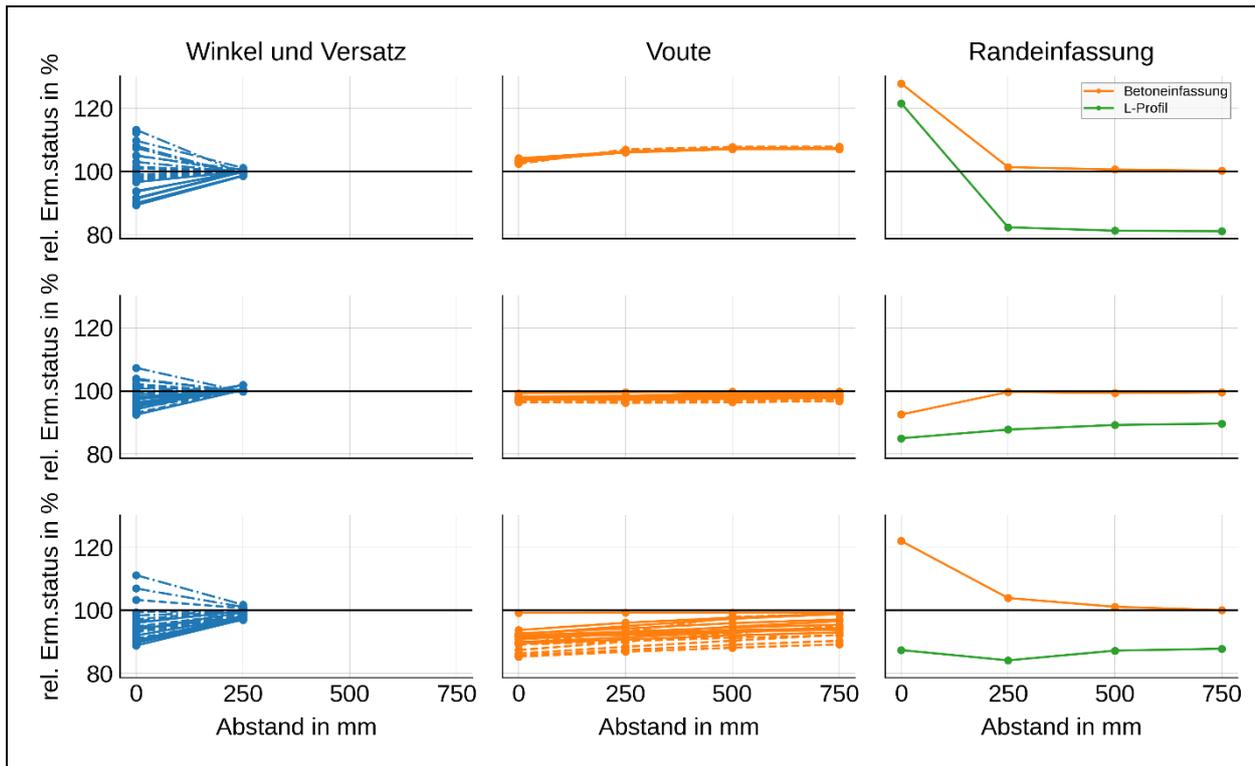


Bild 4-38: Gegenüberstellung der Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen, Zeile 1: ADS, Zeile 2: ABS, Zeile 3: ATS, Bezugsgröße ist der Ermüdungsstatus des Referenzmodells beim Lasteintrag im jeweiligen Abstand zum Rand

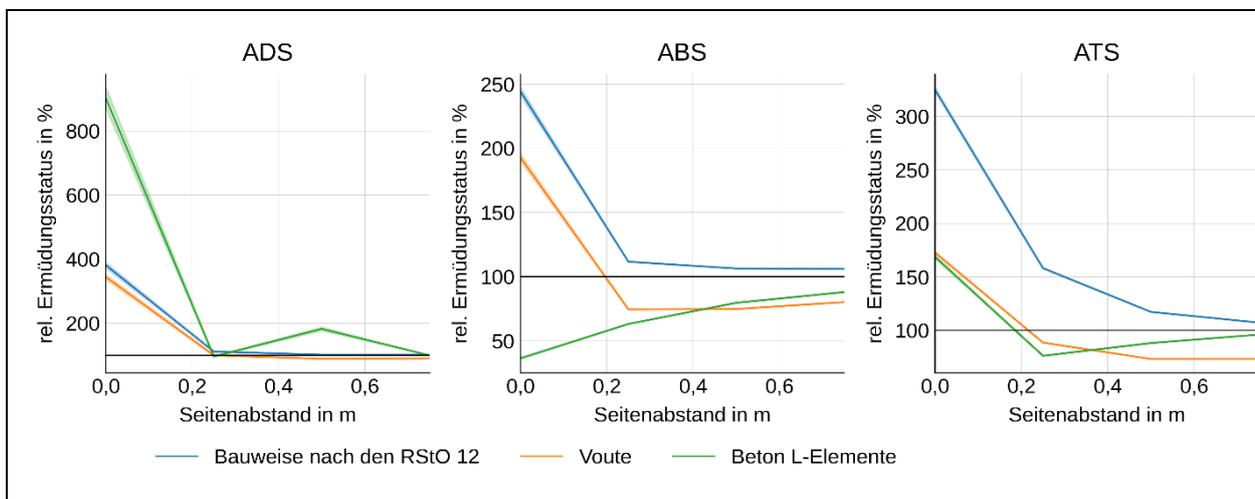


Bild 4-39: Gegenüberstellung der Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen, Bezugsgröße ist der Ermüdungsstatus des Referenzmodells beim Lasteintrag im Abstand von 3,5 m zum Rand

4.6 Untersuchung konstruktiver Maßnahmen mit dem probabilistischen Berechnungsansatz

In Auswertung der Ergebnisse aus Abschnitt 4.5 wurden für die Befestigungsvarianten:

- Variante mit Voute in der Asphalttragschicht gem. Bild 4-35
- Variante mit Randeinfassung mit L – Element aus Beton gem. Bild 4-37

und dem

- Befestigungsaufbau nach RStO Tafel1 Zeile1 (Referenzmodell) gem. Bild 4-19

Ausfallwahrscheinlichkeiten mit dem probabilistischen Berechnungsansatz ermittelt.

Die Berechnungen wurden für Verkehrsbelastungen nach Tab. 3-5 bzw. zugehörige Achsübergänge durchgeführt und ausgewertet. Im Folgenden ist eine zusammenfassende Auswertung dieser Berechnungen dargestellt. Die Diagramme zu den einzelnen Nutzungsdauerprognosen sind im Anhang 1 abgelegt.

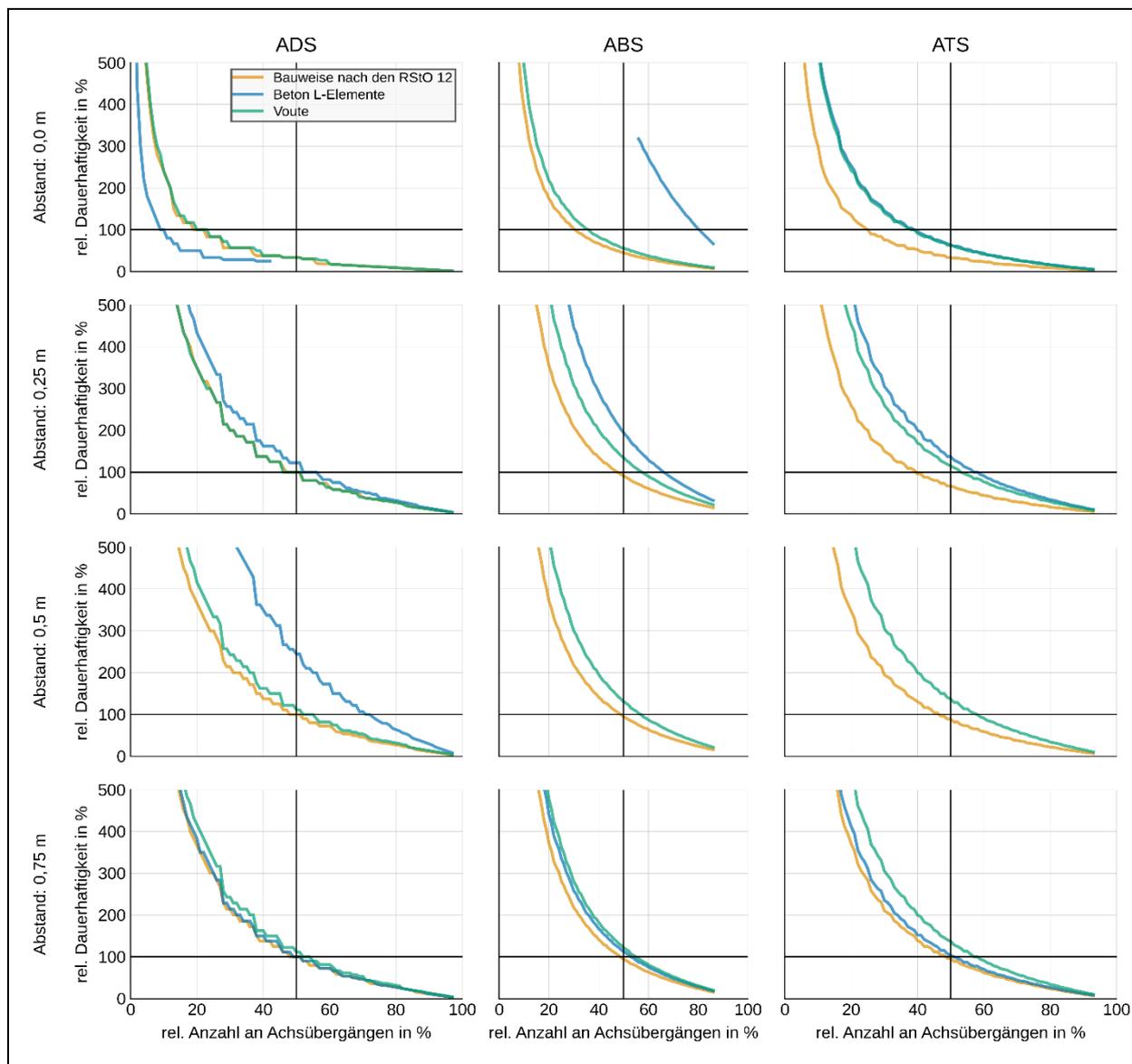


Bild 4-40: Nutzungsdauer des Seitenstreifens in % mit Bezug auf die Nutzungsdauer des Hauptfahrstreifens in Abhängigkeit von anteiliger Verkehrsbelastung auf dem Seitenstreifen bezogen auf die Gesamtbelastung

Bild 4-40 zeigt für verschiedene Bauweisen und Laststellungen die relative Nutzungsdauer (rel. Dauerhaftigkeit) des Seitenstreifens in Bezug auf die Nutzungsdauer der Hauptfahrstreifens in Abhängigkeit von anteiliger Verkehrsbelastung auf dem Seitenstreifen. Die in der horizontalen Achse aufgetragene relative Anzahl an Achsübergängen entspricht der prozentualen Verkehrsbelastung auf den Seitenstreifen in % bezogen auf den Gesamtverkehr.

Die Untersuchung der Konstruktionsvarianten Beton L – Element und Voute lieferten für die Asphaltbinderschicht und die Asphalttragschicht beim Randabstand von 0,5 m nahezu übereinstimmende Ergebnisse. In den Grafiken der Zeile 3 Spalten 3 und 4 ist deshalb nur eine grüne Linie erkennbar.

Die unmittelbare Befahrung des Randbereiches führt bei der Konstruktionsvariante Beton L – Element zu extrem hohen Beanspruchungen in der Asphaltbinderschicht (blaue Linie Grafik

Zeile 1 Spalte 2). Sobald in dieser Konstellation eine geringe Anzahl Fahrzeuge auf dem Seitenstreifen fährt, liegen die Berechnungsergebnisse weit außerhalb des gewählten Darstellungsgebietes. Die blaue Linie in der Grafik entspricht der Interpolation der Berechnungsergebnisse, welche innerhalb des dargestellten Bereiches liegen.

Hinsichtlich der Beschränkung der Nutzungszeit des Seitenstreifens zur Erlangung gleicher Nutzungszeit verglichen zum Hauptfahrstreifen können anhand dieser Zusammenstellung folgende Prognosen getroffen werden.

Bei einem Lasteintrag im Abstand von mindestens 0,5 m zum Rand (Bild 4-40, Zeile 3) und gleicher Verkehrsbelastung auf Hauptfahrstreifen und Seitenstreifen (Anzahl relative Achsübergänge = 50 %) sind die Nutzungsdauerprognosen der RStO-Variante (Referenz, orange) für alle Asphalttragschichten des Seitenstreifens geringfügig geringer als für den Hauptfahrstreifen. Die Asphalttragschicht der Varianten Voute und Beton L-Elemente (Bild 4-40, Spalte 3, Zeile 3, grün, blaue Linie identisch zur grünen) hat jedoch im Seitenstreifen eine höhere Nutzungszeit als im Hauptfahrstreifen. Mit einem Mindestabstand von 0,5 m zum Rand ist demnach eine dauerhafte Nutzung möglich.

Mit einem Lasteintrag im Abstand von weniger als 0,5 m zum Rand (Bild 4-40, Übergang Zeile 3 zu Zeile 2) darf bei der RStO-Variante weniger als 40 % des Gesamtverkehrs auf dem Seitenstreifen liegen, um gleiche Nutzungszeiten der Asphalttragschicht im Haupt- und Seitenfahrstreifen zu erzielen. Das heißt, in diesem Fall ist nur eine temporäre Nutzung des Seitenstreifens zulässig. Durch konstruktive Maßnahmen (Voute oder L-Element) kann die Nutzungszeit der Asphalttragschicht so erhöht werden, dass eine dauerhafte Nutzung möglich wird. Die Ausführungsvariante mit L-Element und Voute in der Asphalttragschicht erzielen eine vergleichbare Verbesserung der Nutzungsdauer.

Eine Befahrung des Seitenstreifens mit einem Randabstand von weniger als 0,25 m führt bereits bei einer geringen Zahl von Achsübergängen zu hoher Schädigung der Asphaltdeck- und -tragschicht. und ist nicht zu empfehlen.

Die schadensfreie Nutzungszeit einer Asphalttragschicht hängt maßgebend von deren Qualität ab. Bild 4-41 zeigt die Streuungsbreite der Nutzungszeit infolge Streuung der Materialeigenschaften. Die kräftigen Linien repräsentieren den Mittelwert der schadensfreien Nutzungszeit, die schlechteste / beste Materialkombination markiert die untere / obere Flächenbegrenzung. In dieser Darstellung bzw. Auswertung bleibt die relative Häufigkeit der Materialkombinationen unberücksichtigt.

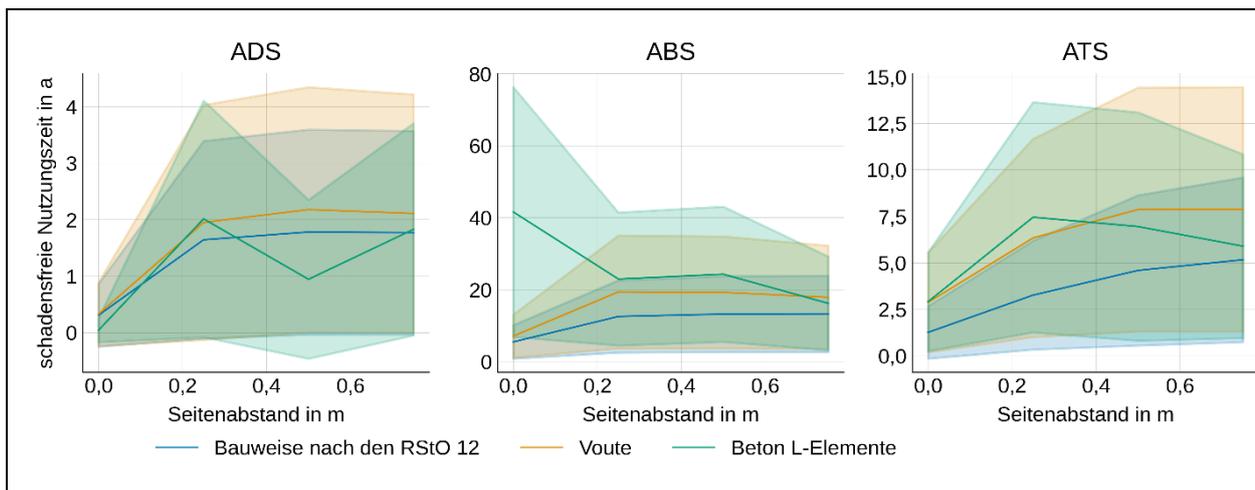


Bild 4-41: Streuungsbreite der Nutzungszeit infolge Streuung der Materialeigenschaften

4.7 Schlussfolgerungen

4.7.1 Bestandsstrecken

Eine Seitenstreifenfreigabe ist, unabhängig von der Art der Nutzung (dauerhaft oder tageszeitlich beschränkt) nur unter den im ARS 20/2002 beschriebenen Voraussetzungen möglich. Dazu gehören folgende Mindestbreiten der Fahrstreifen:

- 3,50 m für alle planmäßig vom Schwerverkehr benutzten Fahr- oder Seitenstreifen
- 3,25 m für alle übrigen Fahrstreifen

Die Seitenstreifen müssen in jedem Fall konstruktiv dem schweren LkW-Verkehr standhalten, ein Befahren des äußeren Randes ist zu verhindern.

Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse dieses Projektes und der den Berechnungen zugrundeliegenden Eingangsgrößen und Parameter ist für die Regelquerschnitte nach [RAA 2008] unter der Maßgabe der gleichen Nutzungsdauer für Hauptfahrstreifen- und Seitenstreifen eine Seitenstreifennutzung nach Tab. 4-10 möglich. Diese Einordnung setzt voraus, dass die erforderliche Ummarkierung möglich ist. Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Beanspruchung und folglich auch die Nutzungsdauer bei einem Randabstand von mindestens 0,5 m gleich der Referenzvariante (3,5 m Randabstand) ist.

Regelquerschnitt [RAA 2008]	Randbreite nach Ummarkierung	angenommener Randabstand des Lasteintrags	mögliche Seitenstreifenfreigabe
RQ 43,5	0,75 m	1,25 m	dauerhaft
RQ 36	0,75 m	1,25 m	dauerhaft
RQ 31	1,25 m	1,75 m	dauerhaft
RQ 28	-	-	temporär
RQ 38,5	-	-	nicht zulässig
RQ 31,5	-	-	nicht zulässig
RQ 25	-	-	nicht zulässig

Tab. 4-10: Einordnung einer möglichen Seitenstreifennutzung für Regelquerschnitte nach [RAA 2008] bei gleicher Nutzungsdauer für Hauptfahr- und Seitenstreifen

Regelquerschnitt [RAS Q 96]	maximale Randbreite nach Ummarkierung	angenommener Randabstand des Lasteintrags	mögliche Seitenstreifenfreigabe
RQ 35,5	0,25 m	0,75 m	dauerhaft
RQ 29,5	0,75 m	1,25 m	dauerhaft
RQ 33	-	-	nicht zulässig
RQ 26	-	-	nicht zulässig
RQ 20	-	-	nicht zulässig
RQ 35,5	-	-	nicht zulässig

Tab. 4-11: Einordnung einer möglichen Seitenstreifennutzung für Regelquerschnitte nach [RAS Q 96] bei gleicher Nutzungsdauer für Hauptfahr- und Seitenstreifen (ohne konstruktive Maßnahmen)

Wird der Randabstand von 0,5 m unterschritten, ist bis zum einem Randabstand von mindestens 0,25 m nur eine temporäre Seitenstreifenfreigabe möglich. Der zulässige Anteil des Schwerverkehrs auf dem Seitenstreifen ergibt sich dabei in Abhängigkeit vom realisierbaren Randabstand aus Bild 4-40. Im Ergebnis der Berechnungen können mit einem minimalen Randabstand von 0,25 m ca. 40 % des Schwerlastverkehrs über den Seitenstreifen geführt werden. Eine Unterschreitung von 0,25 m Randabstand bzw. direkte Befahrung des Randes führt, insbesondere für die ADS, zu erheblicher Reduzierung der Nutzungszeit und ist planmäßig nicht vorzusehen. Diese Prognosen basieren auf der Untersuchung eines fiktiven homogenen Streckenabschnittes mit gleichen Bedingungen über den gesamten Fahrbahnquerschnitt.

4.7.2 Neubaustrecken

Die reduzierte Nutzungszeit infolge Randbefahrung ist maßgeblich auf die Schädigung der Asphalttragschicht zurückzuführen. Mit einer größeren Dicke der Asphalttragschicht im Randbereich zum Beispiel in Form einer Voute kann die Nutzungszeit erhöht werden. Breite und Dicke der Voute können in Abhängigkeit von prognostizierter Beanspruchung und Materialeigenschaften mit dem in den [RDO Asphalt 09] beschriebenen Verfahren bei Anwendung der Methode der Finiten Elemente dimensioniert werden. Bei diesen Dimensionierungs- bzw. Prognoserechnungen müssen spezifische Sicherheitsbeiwerte und -faktoren für den Randbereich bestimmt werden (Kalibrierung des Verfahrens). Bei diesem Befestigungsaufbau ist gegenüber der Regelbauweise folgendes zu berücksichtigen:

- erhöhter Aufwand bei profulgerechter Herstellung von Erdplanum, Tragschicht ohne Bindemittel und Asphalttragschicht
- ggf. erhöhter Aufwand bei der Entwässerung des Planums
- fehlende Erfahrung bei der baupraktischen Umsetzung.

Alternativ dazu kann die Nutzungszeit durch einen Randstreifen mit größerer Dicke der Asphalttragschicht erhöht werden. Auch bei dieser Variante sind die vorgenannten Besonderheiten zu beachten.

In Bezug auf die im Abschnitt 4.5 untersuchten konstruktiven Maßnahmen ist die Herstellung einer Voute in der Asphalttragschicht die Vorzugsvariante zur Verbesserung der Nutzungszeit. Im Abschnitt 4.5 und 4.6 untersuchte Randeinfassungen bringen, im Verhältnis zum Herstellungsaufwand und Platzbedarf, nur geringen Nutzen und sind deshalb nicht zu empfehlen.

Mit Verweis auf vorgenanntes und auch aus sicherheitstechnischer Sicht ist zur Gewährleistung der Nutzungszeit einem ausreichenden Randabstand der Vorrang gegenüber konstruktiven Maßnahmen zu geben.

5 Untersuchungen Betonbauweise

5.1 Eingangsdaten

5.1.1 Plattengeometrien Hauptfahrstreifen

Bei Betonbefestigungen ist nicht nur von Interesse, an welcher Stelle die Last einwirkt, sondern auch, wie sich die Plattengeometrie insbesondere des Seitenstreifens darstellt.

Die Standardisierung [RStO 12] setzt mit ihrer belastungsklassenabhängigen Festlegung von Deckendicken gewisse Plattengeometrien voraus, für die die Dickenangaben zutreffend sind.

Bei Verwendung der in Tafel 2 der [RStO 12] angegebenen Deckendicken sind die zugrunde gelegten Plattengeometrien für die Belastungsklassen Bk3,2 bis Bk100 wie folgt zu berücksichtigen:

- Plattenbreite im Hauptfahrstreifen 4,0 bis 4,5 m
- Plattenlänge im Hauptfahrstreifen 5,0 m

Es erfolgt somit nur eine grobe Festlegung für die Plattengeometrien des Hauptfahrstreifens. Die übrigen Fahrstreifen, die teilweise auch einen Randbereich aufweisen, finden keine Berücksichtigung.

Bei der rechnerischen Dimensionierung [RDO Beton 09] sind die Abmessungen der Platten variierbar (Bild 5-1). Dabei ist in vielen Fällen die gewählte Plattenlänge und -breite des Hauptfahrstreifens für die Plattendicke maßgebend. Die Plattenlänge (L_P) ist für alle Fahrstreifen gleich zu wählen, wobei ein Versatz der Querfugen nicht zugelassen wird. Aus Bild 5-1 wird deutlich, dass sich im Seitenstreifen deutlich ungünstigere Plattengeometrien gegenüber dem bislang maßgebenden Hauptfahrstreifen ergeben.

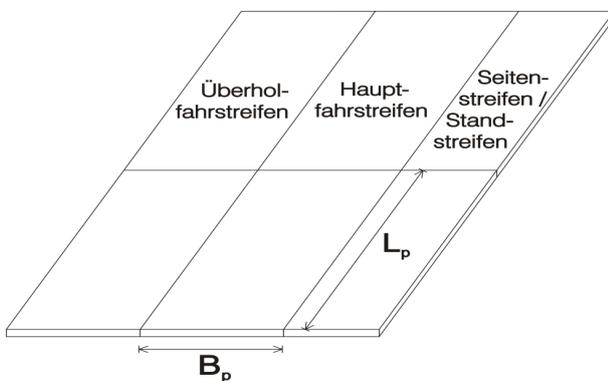


Bild 5-1: Plattengeometrien gemäß [RDO Beton]: Plattenlänge L_P und Plattenbreite B_P

Gemäß den [RDO Beton 09] ist die Plattengeometrie in folgender Weise zu berücksichtigen:

- Es erfolgt eine Unterscheidung in quadratische und rechteckige Platten.
- Die Mindestplattenbreite bzw. -plattenlänge beträgt 1,20 m.
- Als quadratisch dürfen auch Platten mit den Abmessungen $0,90 \text{ m} < L_P, B_P < 1,20 \text{ m}$ näherungsweise mit $L_P, B_P = 1,20 \text{ m}$ dimensioniert definiert werden.
- Das Verhältnis Plattenlänge zu Plattenbreite sowie Plattenbreite zu Plattenlänge muss L_P/B_P oder $B_P/L_P < 2,5$ sowie L_P/B_P oder $B_P/L_P > 0,4$ sein.
- Die größte Plattenlänge wird aus Gründen des Anstiegs zusätzlicher reibungsbedingter Zugkräfte und der nicht mehr zu gewährleistenden dauerhaften Verschleißbarkeit der Querfugen mit 7,50 m festgelegt. Diese Plattenlänge führt bereits zu großen Plattendicken.

- Das Dimensionierungsverfahren gilt für Fahrstreifen – einschließlich Randstreifen, die für Fahrzeuge im Richtungsverkehr vorgesehen sind –, bei Plattenbreiten $\leq 4,50$ m. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Längsfugen des maßgebenden Plattenstreifens außerhalb der Längsmarkierung angeordnet werden. Bei der Dimensionierung für Befestigungen von Plätzen u. ä. kann es unter Beachtung der zu erwartenden Lastkonstellationen und Fahrtrichtungen sinnvoll sein, die genannte Breite zu überschreiten.
- Fahrstreifenbreite und Plattenbreite stimmen in der Regel nicht überein.
- Bei der Ermittlung der auf die Längsfuge bzw. Längskante entfallenden Wiederholungen der Befahrung im Richtungsverkehr, ist das streifenbreiten- und abstandsabhängige, auf den Rand einwirkende Momentenkollektiv zu berücksichtigen.

Um Aussagen zur Geometrie des Seitenstreifens zu erhalten ist es von Bedeutung, die Regelquerschnitte hinsichtlich möglicher Plattenbreiten zu untersuchen. Dabei sind nicht nur die aktuellen Regelquerschnitte nach [RAA 2008] zu betrachten sondern auch die Regelquerschnitte die gemäß [RAS-Q 96] geplant und ausgeführt wurden. Letztere sind insbesondere für Seitenstreifenfreigaben und Verkehrsführungen bei älteren Bestandsstrecken von Bedeutung. Die jeweiligen Plattenlängen sind im Regelfall mit 5,00 m anzunehmen.

Zur Festlegung der Lage der Längsfugen und somit der Plattenbreiten ist zu beachten, dass Fugen außerhalb der Rollspuren und nicht unter der Markierung liegen sollten. Im Regelfall wird eine Platte pro Fahrstreifen festgelegt. In den folgenden Tabellen sind die möglichen (sinnvollen) Plattenbreiten des Seitenstreifens den jeweiligen Regelquerschnitten zugeordnet. Zudem wird aufgeführt, ob die im Regelquerschnitt vorhandene befestigte Breite überhaupt für eine Freigabe des Seitenstreifens ausreicht, ohne im Vorfeld eine seitliche Verbreiterung vorzusehen.

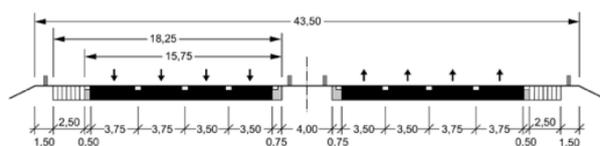
Die Plattenbreiten wurden in einem 0,25 m Raster festgelegt, was auf die Anordnung der Dübelsetzgeräte an den Betonfertigern zurückzuführen ist, die nur in diesem Raster Dübel einbauen können.

Regelquerschnitte nach RAA 2008

Mögliche Plattenbreiten Seitenstreifen

Gesamtbreite der Fahrbahn theoretisch ausreichend für TSF

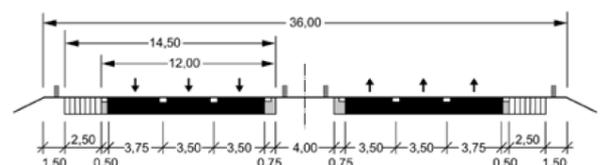
RQ 43,5 (EKA1)



2,50 m*
3,00 m (Fuge direkt an Markierung)
3,25 m (unwahrscheinlich)

ja

RQ 36 (EKA1)



2,50 m*
3,00 m (Fuge direkt an Markierung)
3,25 m (unwahrscheinlich)

ja

Tab. 5-1: Regelquerschnitte nach [RAA 2008] und mögliche Plattenbreiten im Seitenstreifen

Regelquerschnitte nach RAA 2008

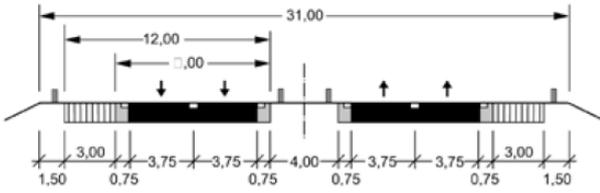
Mögliche Plattenbreiten Seitenstreifen

Gesamtbreite der Fahrbahn theoretisch ausreichend für TSF

RQ 31 (EKA1)

3,25 m*
3,00 m

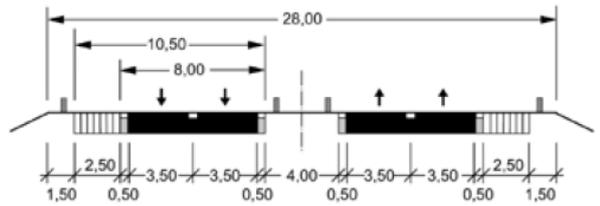
ja



RQ 28 (EKA2)

2,50 m

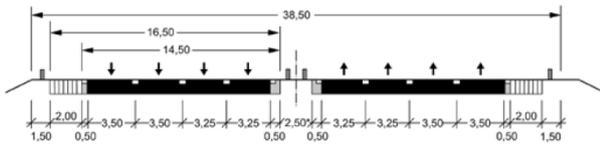
nein



RQ 38,5 (EKA3)

2,00 m

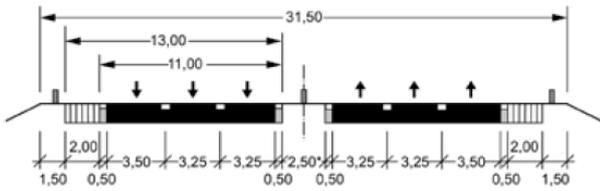
nein



RQ 31,5 (EKA3)

2,00 m

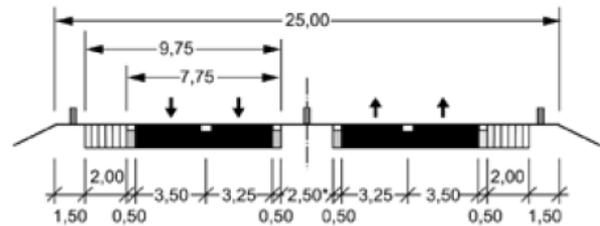
nein



RQ 25 (EKA3)

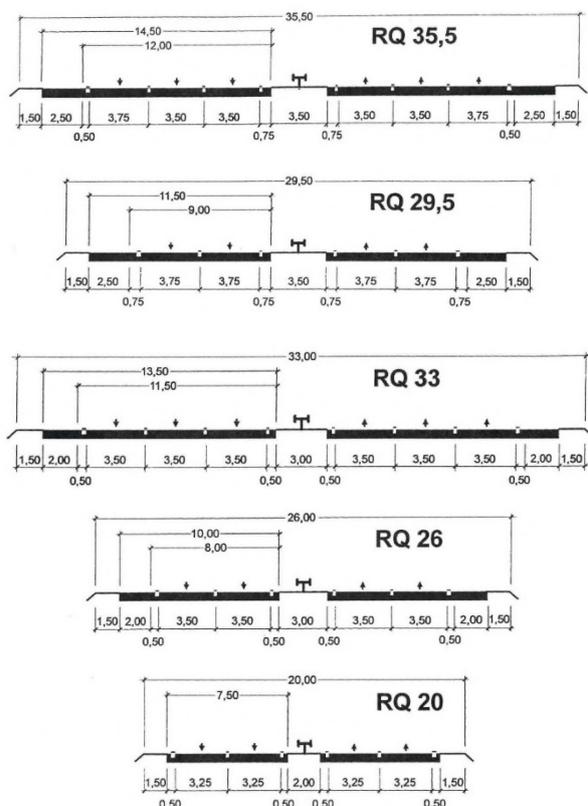
2,00 m

nein



Tab. 5-1 (Fortsetzung): Regelquerschnitte nach [RAA 2008] und mögliche Plattenbreiten im Seitenstreifen

Regelquerschnitte nach RAS Q 96



Mögliche Plattenbreiten
Seitenstreifen

Gesamtbreite der
Fahrbahn ausrei-
chend für TSF

Entspricht RQ 36 (EKA1-
RAA 08) ja

2,50 m ja
2,75 m*

2,00 m nein
2,50 m (Fuge direkt an
Markierung)
2,75 m (unwahrscheinlich)

2,00 m nein
2,50 m (Fuge direkt an
Markierung)
2,75 m

Kein Seitenstreifen vor- nein
handen

Tab. 5-2: Regelquerschnitte nach [RAS-Q 96] und mögliche Plattenbreiten im Seitenstreifen

Es wird deutlich, dass bei herkömmlicher Bauweise die Plattenbreite des Seitenstreifens zwischen 2,00 und 3,25 m liegen wird.

Für die Berechnungen werden die zu erwartenden Plattengeometrien der Seitenstreifen wie folgt herangezogen:

- Plattenbreite im Seitenstreifen 2,0 | 2,5 | 3,0 und 3,25 m
- Plattenlänge im Seitenstreifen 5,0 m

5.1.2 Deckendicke

Für die FEM-Berechnungen wird die Deckendicke für das jeweilige Plattensystem entsprechend dem Dimensionierungsergebnis für eine B-Zahl von 100 Millionen äquivalenten 10-t-Achsübergängen im Hauptfahrstreifen angesetzt. Diese Deckendicke entspricht dem Dimensionierungsergebnis RDO Beton, mit deren Sicherheitskonzept die weiteren FEM-Berechnungen ausgewertet werden.

5.1.3 Materialparameter der Betondecke

Die Parameter der Betondecken werden analog zur Straßenbetonklasse StC 30/37 - 3,3 der RDO Beton gewählt, um die Ergebnisse der FEM Berechnungen im Sicherheitskonzept der RDO Beton bewerten zu können. StC 30/37 - 3,3 ist die Straßenbetonklasse mit den niedrigsten Anforderungen unter den in der Praxis häufig anzutreffende Straßenbetonklassen. Sie stellt keinen Worst-Case sondern einen häufig in der Praxis anzutreffenden Fall dar.

- Wärmedehnzahl $\alpha_{cT} = 11,5 \cdot 10^{-6}/K$
- Elastizitätsmodul $E = 39.000 \text{ N/mm}^2$
- Querdehnzahl $\mu = 0,2$
- Spaltzugfestigkeit $3,3 \text{ MPa}$
- Dichte $2,4 \text{ kN/m}^3$

5.1.4 Unterlage

Im Rahmen des Forschungsvorhabens der BAST [FE 08.0253/2017/ERB] „Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundlegende Erneuerung auf dem duraBAST“ wurden systematische Vergleichsrechnungen durchgeführt, welche zu dem Ergebnis führten, dass der Volumenblock der Unterlage nicht dicker als 75 cm modelliert werden muss.

Auch wenn, wie bereits oben bemerkt, die für die Auflagerung der Betonplatten verwendeten Baustoffe oftmals in weiten Beanspruchungsbereichen kein elastisches Verhalten zeigen, muss doch davon ausgegangen werden, dass bei geringem Beanspruchungsniveau eine elastische Belastungsreaktion erfolgt. Es kann vorausgesetzt werden, dass die Fahrbahnaufbauten so dimensioniert sind, dass dieses geringe Beanspruchungsniveau nicht überschritten wird. Andernfalls würde jeder Lastübergang zu einer Veränderung (plastischen Verformung) der Fahrbahn führen. Dass auch die Annahme eines linearen Materialverhaltens in diesem Beanspruchungsbereich zulässig ist, kann vermutet werden, ist aber nicht belegt.

Die Kalibrierung eines Berechnungsmodells mit 75 cm modellierter Unterlage an FWD-Messwerten, welche im Zuge der Bearbeitung von FE 08.0253/2017/ERB durchgeführt wurde, ergab, dass bei einer Schottertragschicht mit einem E-Modul von 115 MPa und bei einer Asphalttragschicht von 220 MPa gerechnet werden kann.

- Wärmedehnzahl $\alpha_{cT} = 0,0002/K$
- Elastizitätsmodul STS $E = 115 \text{ N/mm}^2$ bei 0,75m Modellierung
- Querdehnzahl $\mu = 0,5$
- Dichte $2,4 \text{ kN/m}^3$
- 50 cm umlaufender Überstand im Standardfall (kleinere Überstände bei Bedarf im Einzelfall)

5.1.5 Dübel und Anker

Die Dübel und Anker werden aus Stahl hergestellt.

- Wärmedehnzahl $\alpha_{cT} = 12 \cdot 10^{-6}/K$
- Elastizitätsmodul $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$
- Querdehnzahl $\mu = 0,3$
- Dichte $7,8 \text{ kN/m}^3$

5.1.6 Temperaturbelastung

Als Temperaturbelastung wird der Ermüdungsgradient der RDO Beton verwendet.

5.2 Vergleichende semiprobabilistische Dimensionierung von Hauptfahrstreifen und Seitenstreifen nach den RDO Beton

Die RDO Beton betrachten bei der Dimensionierung nur eine konkrete Platte mit ihrer Geometrie und Lagerungsbedingungen (Tragschicht, vorhandene Dübel/Anker zu den Nachbarplatten), die mit einer Radlast und einem Temperaturgradienten belastet wird.

In Tab. 5-3 werden die Dimensionierungsergebnisse (in mm) für die B-Zahlen 32, 100 und 150 Millionen im Hauptfahrstreifen dargestellt (Spalte „Ohne SFS Freigabe“). Dabei sind die Plattenbreiten im Hauptfahrstreifen mit 4,00 und 4,50 m sowie die Unterlage als Asphalt- und Schottertragschicht variiert worden. Die Spaltzugfestigkeit f_{ctk} ist mit 3,3 MPa und der Wärmedehnkoeffizient des Betons α_T mit $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ angesetzt.

Wie in Abschnitt 3.1 dargelegt, teilt sich der Schwerverkehr bei einer Seitenstreifenfreigabe auf den Hauptfahrstreifen und den Seitenstreifen auf. Die Dimensionierungsberechnungen erfolgten daher ebenfalls getrennt für die einzelnen Streifen unter Berücksichtigung des freien Plattenrandes im Seitenstreifen. Die Ergebnisse sind in den Spalten „Mit SFS Freigabe“ getrennt nach betrachtetem Streifen und Plattenbreite aufgeführt.

Trag-schicht	Ohne SFS Freigabe			Mit SFS Freigabe							
	B-Zahl	HFS Plattenbreite		B-Zahl	HFS Plattenbreite		B-Zahl	SFS (ohne Anker) Plattenbreite			
		4,00m	4,50m		4,00m	4,50m		2,00m	2,50m	3,00m	3,25m
ATS	B=32 Mio.	267	282	B=22 Mio.	264	273	B=10 Mio.	290	290	290	290
STS		274	290		271	287		313	301	298	298
ATS	B=100 Mio.	276	294	B=70 Mio.	273	291	B=30 Mio.	292	290	290	290
STS		282	299		280	296		335	319	314	314
ATS	B=150 Mio.	279	298	B=100 Mio.	276	294	B=50 Mio.	279	290	290	290
STS		285	302		282	299		345	330	324	324

Tab. 5-3: Vergleich der Dimensionierungsergebnisse mit und ohne Seitenstreifenfreigabe für die Haupt- und Seitenfahrstreifen bei 5,00 m Plattenlänge (Angabe der Deckendicken in mm), $f_{ctk} = 3,3 \text{ MPa}$ und $\alpha_{CT} = 11,5 \times 10^{-6}/K$

Erwartungsgemäß verringern sich bei Seitenstreifenfreigabe die Dimensionierungsergebnisse im Hauptfahrstreifen, da sich die B-Zahl im Hauptfahrstreifen reduziert. Die Dimensionierungsergebnisse für die vier untersuchten Plattenbreiten im Seitenfahrstreifen sind hingegen differenzierter, da der freie Plattenrand und die Plattengeometrien einen großen Einfluss auf die Dimensionierungsergebnisse haben.

In den RDO Beton werden Nachweise zum quasidynamischen Grenzzustand der Tragfähigkeit, quasidynamischen Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sowie zur Ermüdung jeweils an Längs- und Querfuge geführt. Während im Hauptfahrstreifen auf Autobahnen typischerweise der Ermüdungsnachweis maßgebend ist, wird für schmalere Platten mit freiem Plattenrand der quasidynamische Grenzzustand der Tragfähigkeit oftmals maßgebend, sodass eine Beurteilung der ertragbaren Lastwechsel bei Seitenstreifenfreigabe nicht direkt aus den RDO Beton abgeleitet werden kann.

5.3 Methode zur Projektion der Dimensionierungsergebnisse mit den RDO Beton auf die FEM-Berechnungsergebnisse

Das Aufstellen von Zusammenhängen zwischen ertragbaren Lastwechseln im Hauptfahrstreifen und Randbereich unter Variation des Lasteinleitungspunktes erfordert die Auswertung der differenzierten FEM-Berechnungsergebnisse. Dabei müssen die aufgrund von unterschiedlichen Laststellungen variierenden Spannungsniveaus miteinander verglichen werden, um diese im Anschluss hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die ertragbaren Lastwechsel zu bewerten. Infolge der

größeren Modelltiefe von FEM Berechnungen gegenüber dem Vorgehen der RDO Beton können die Ermüdungskurven aus den RDO Beton nicht direkt übernommen werden.

Es wird ein gemeinsamer Referenzpunkt benötigt, um das Sicherheitsniveau der RDO Beton auf die FEM Berechnungen übertragen zu können. Als gemeinsamer Referenzpunkt wird die Berechnung im Hauptfahrstreifen ohne Seitenstreifenfreigabe verwendet, da die RDO Beton vornehmlich für die Dimensionierung des Hauptfahrstreifens konzipiert wurde. Die Methodik des Vorgehens wird in Bild 5-2 dargestellt.

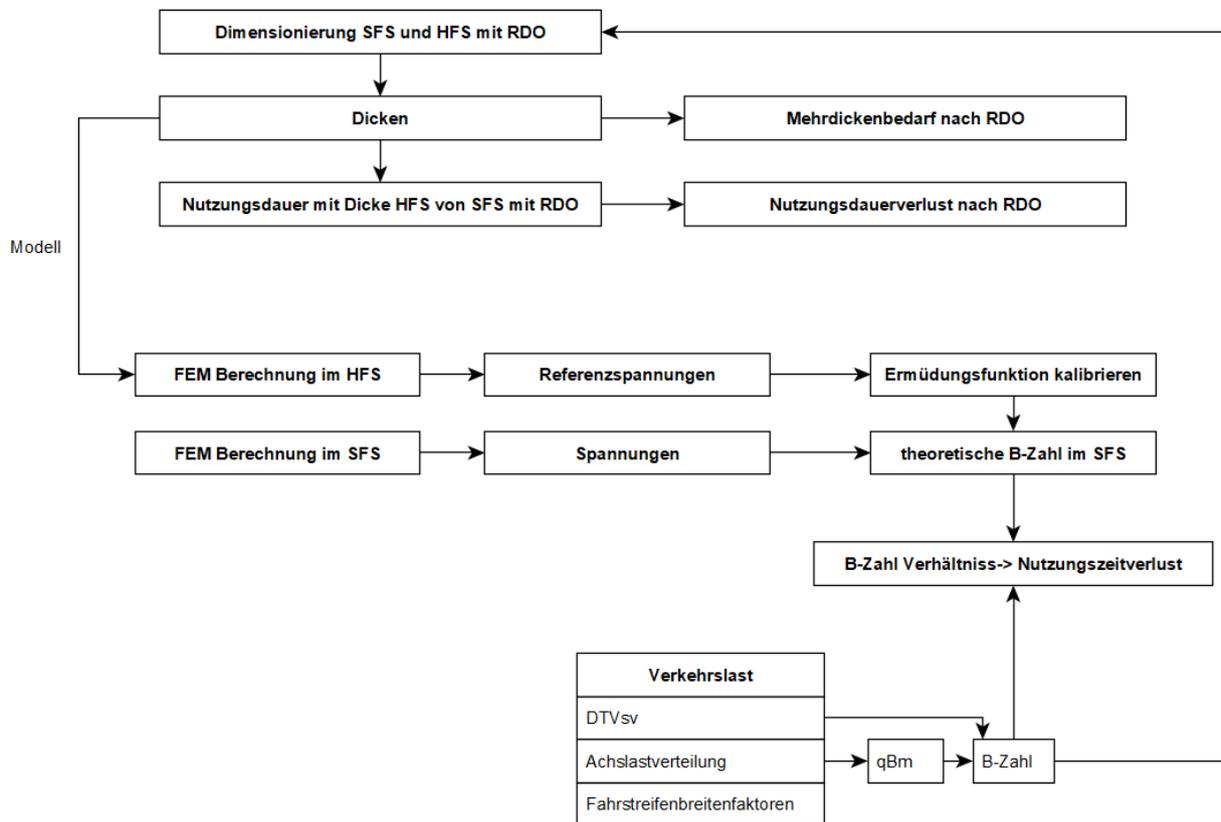


Bild 5-2: Ablauf zur Erstellung und Auswertung von FEM Berechnung mit Referenzierung zum Dimensionierungsergebnis im Hauptfahrstreifen ohne Seitenstreifenfreigabe entsprechend den RDO Beton

Die Finite Elemente Methode benötigt zur Berechnung von Spannungsergebnissen neben den Eingangsdaten der RDO Beton eine Deckendicke. Hierfür werden die Deckendicken bei nicht erfolgter Seitenstreifenfreigabe gemäß Tab. 5-3 Spalte „Ohne SFS Freigabe“ verwendet.

Aus den Variationen von:

- 2 Plattenbreiten im Hauptfahrstreifen (4,00 und 4,50 m),
- 2 Tragschichten (ATS, STS) und
- 3 B-Zahlen (32, 100, 150 Mio.)

ergeben sich 12 Basisvarianten für die FEM Berechnungen.

Jede dieser Basisvarianten wird mit:

- 12 Laststellungen (4 im HFS und 8 im SFS),
- 2 Achslasten (10 und 16 Tonnen) und
- 4 SFS-Breiten (2,0 m, 2,5 m, 3,0 m und 3,5 m)

kombiniert, sodass insgesamt 1.152 FEM Berechnungen, die mittels bereits vorhandenen In-house-Toolsets und der Open Source Software CalculiX, durchgeführt wurden, wobei immer 96 FEM-Rechnungen einer der 12 Basisvarianten zugeordnet sind.

5.3.1 Laststellungen und Modellierung

Als Temperaturgradient wurde der Gradient für den Ermüdungsnachweis der RDO Beton verwendet. Des Weiteren wurden der Elastizitätsmodul mit 39.000 N/mm^2 und die Querdehnzahl des Betons zu $0,2$ angenommen. Die Plattenlänge beträgt analog zu den Dimensionierungsrechnungen nach RDO Beton $5,00 \text{ m}$ (Siehe auch Abschnitt 5.1).

Im Gegensatz zu den RDO Beton wurde keine Einzelradlast, sondern die 3-fach Achse des Fahrzeugtyps 98 mit 10 und 16 Tonnen Achslast als Verkehrslast angesetzt. Die 4 Laststellungen in Hauptfahrstreifen und die 8 Laststellung im Seitenstreifen sind in Bild 5-3 und Bild 5-4 dargestellt.

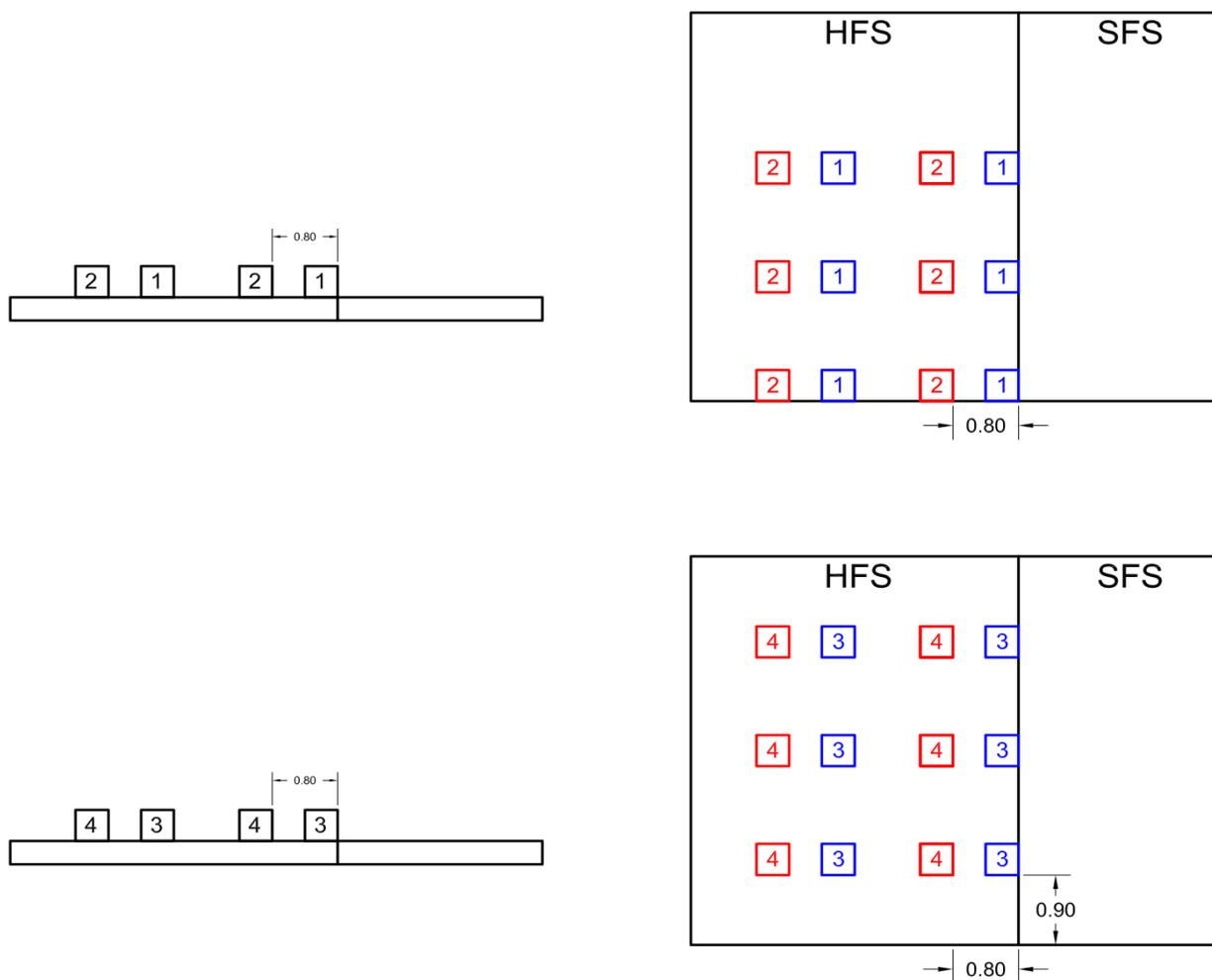


Bild 5-3: Darstellung der 4 Laststellungen (Nr. 1 bis 4) auf Platten im Hauptfahrstreifen

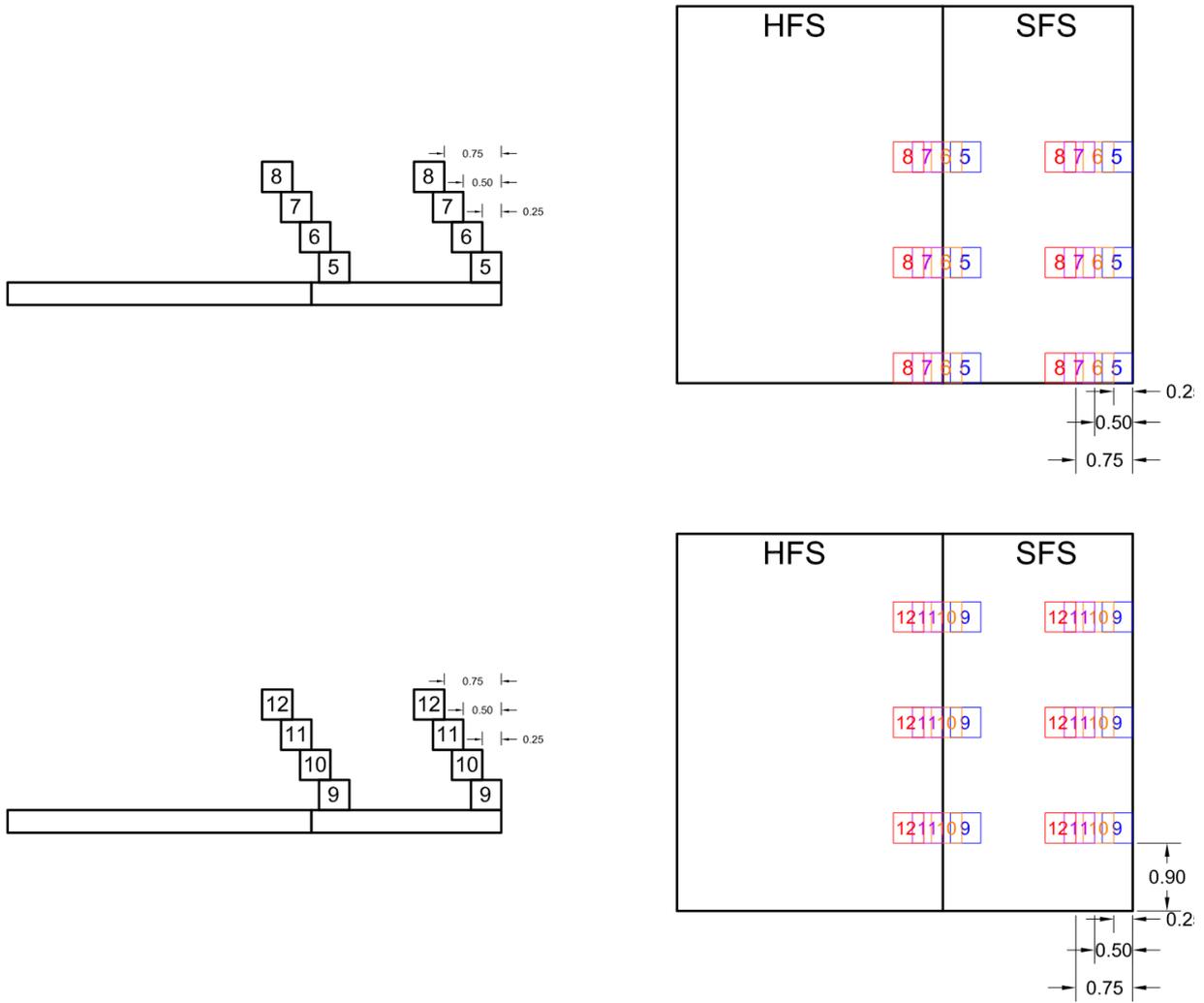


Bild 5-4: Darstellung der 8 Laststellungen (Nr. 5 bis 12) auf Platten im Seitenfahrstreifen

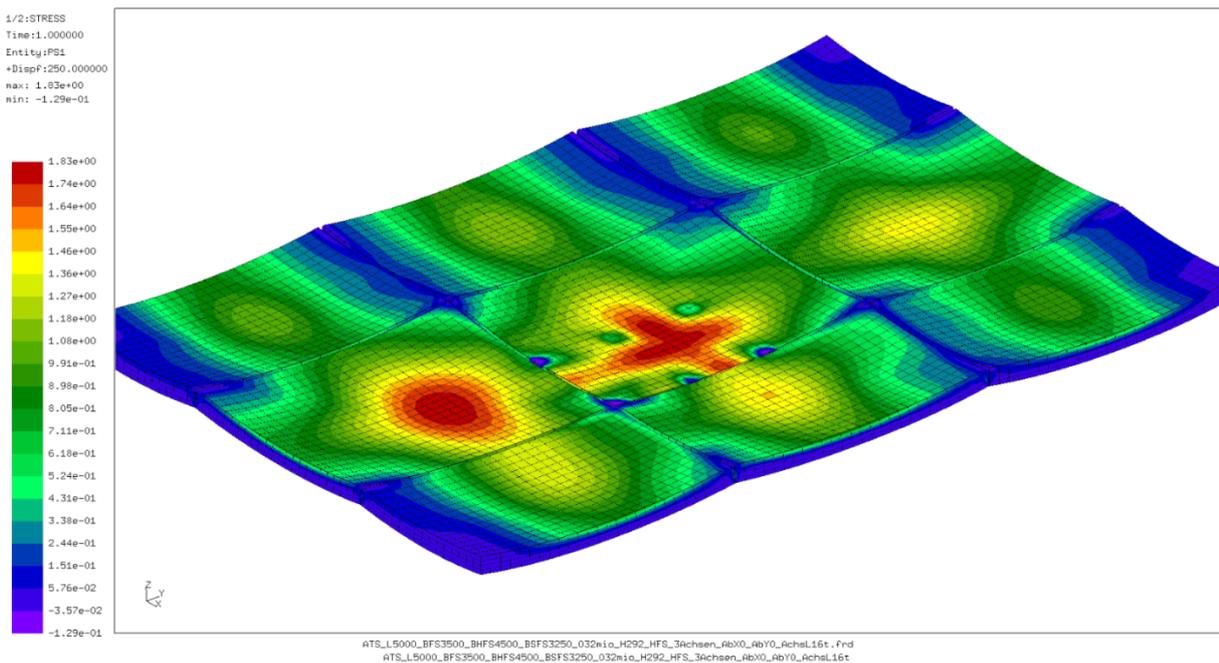


Bild 5-5: Plot der größten Hauptspannungen im 9-Plattenmodell, Fahrzeugtyp 98 im HFS an der Plattenecke

Die Finite Elemente Modelle des Plattensystems umfassen ein mittels Schwindansatz vorverformtes 9-Plattensystem (siehe Bild 5-5). Dieses besteht aus den Platten quer zu Fahrbahn im Seitenfahrstreifen, im Hauptfahrstreifen sowie im ersten Überholfahrstreifen und jeweils 3 Platten in Fahrtrichtung. Die Tragschicht ist mit einem Überstand von 0,5 m umlaufend modelliert. Das gesamte Modell besteht aus 20-Knoten Elementen mit quadratischen Verschiebungsansätzen.

Die Interaktion zwischen den Platten sowie zwischen den Platten und der Tragschicht sind mittels Kontaktformulierung umgesetzt. Dies ist notwendig, um realistische Interaktionen und daraus resultierend Spannungs-Verzerrungs-Ergebnisse in den Simulationen erreichen zu können. Die Verkehrslast wird ebenfalls mit Hilfe einer Kontaktformulierung aufgebracht, um eine freie und vernetzungsunabhängige Positionierung der Achslasten zu gewährleisten.

5.3.2 Aufstellen von Zusammenhängen zwischen ertragbaren Lastwechseln im Hauptfahrstreifen und Randbereich unter Variation des Lasteinleitungspunktes - Methode für den Übertrag der Ermüdungsfunktion der RDO Beton

Die Bewertung unterschiedlicher Spannungsergebnisse der FEM Berechnungen im Haupt- und im Seitenstreifen für unterschiedliche Laststellungen erfordert einen Ermüdungsansatz. Die Ermüdungskurven aus den RDO Beton sind qualitativ korrekt, sind jedoch für die Systematik der RDO Beton mit Spaltzugfestigkeiten und den Spannungsergebnissen aus der semi-probabilistischen Berechnungsmethodik ermittelt. Die Finite Elemente Methode bildet die mechanischen Phänomene jedoch viel differenzierter ab, sodass die Ermüdungskurven der RDO Beton für die Bewertung der FEM-Spannungen kalibriert werden müssen.

Dies erfolgt für jede der Basisvarianten (siehe Abschnitt 5.3), die im Hauptfahrstreifen die jeweils angesetzte B-Zahl mit dem Sicherheitsniveau der RDO Beton überstehen. Wird nun das Plattensystem mit der nach den RDO Beton bestimmten Deckendicke als FE-Modell nachgebildet, bildet die mit den 4 Laststellungen im Hauptfahrstreifen errechnete maßgebende Hauptspannung das Spannungsniveau ab, bei dem die ursprünglich geforderte B-Zahl mit dem Sicherheitsniveau der RDO Beton erreicht wird. Werden nun für die 8 Laststellungen im Seitenfahrstreifen höhere Hauptspannungsniveaus erreicht, liegt eine höhere Auslastung der Konstruktion vor und es kommt zum Abfall der ertragbaren Lastwechsel im Seitenfahrstreifen.

Die Ermüdungskurven sollten so kalibriert werden, dass dem Auslastungsgrad jeder Basisvariante (die Hauptspannung für die maßgebende Laststellung im Hauptfahrstreifen dividiert durch die Festigkeit) die ursprünglich in der RDO Berechnung geforderte B-Zahl zugeordnet ist.

In den RDO Beton wird der Ermüdungsfaktor $\gamma_{c,fat}$ mit der Formel 5-1 ermittelt. Sie stellt die Ermüdungsfunktion dar, die für die Bewertung der FEM-Berechnungen kalibriert werden muss.

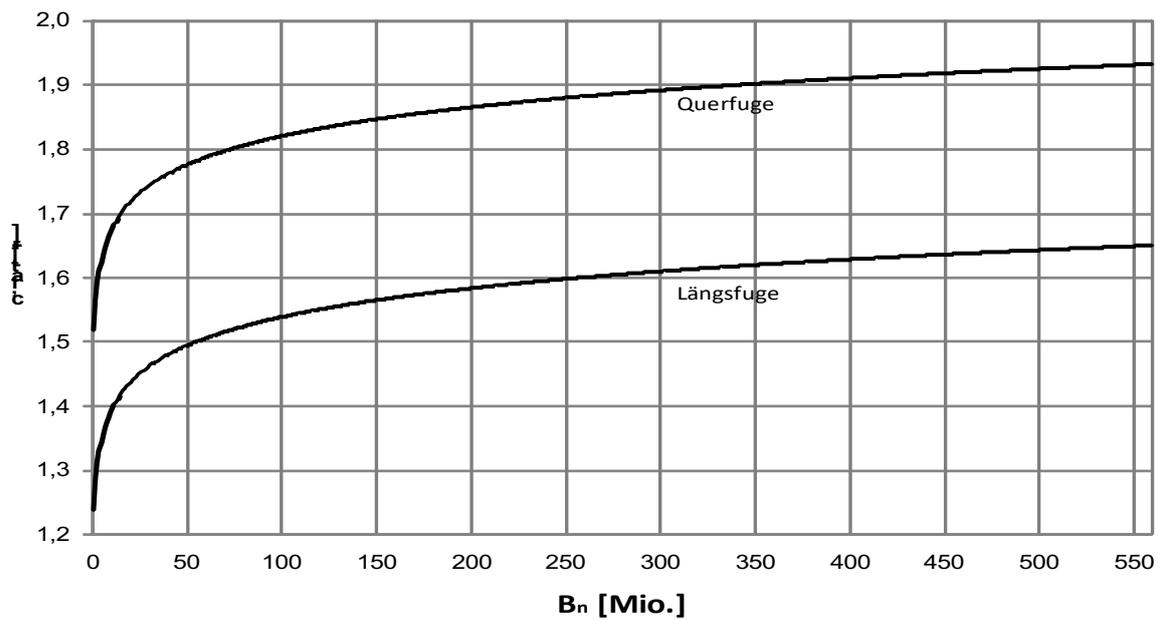


Bild 5-6: Entwicklung des Ermüdungsfaktors $\gamma_{c,fat}$ über die Summe äquivalenter Lastübergänge B_n am Beispiel für Querverteilung des Verkehrs bei Plattenbreiten $> 3,75$ m

$$\gamma_{c,fat} = 0,15 \times \log(\gamma_q \times B_n) + 0,748 \times e^{-0,1365} \quad \text{Formel 5-1}$$

$\gamma_{c,fat}$ Ermüdungsfaktor

B_n Anzahl der äquivalenten Bezugsachslasten während der normativen Nutzungsdauer

$\gamma_{q,L}$ Querverteilungsfaktor für den Nachweis an der Längsfuge

$\gamma_{q,Q}$ Querverteilungsfaktor für den Nachweis an der Querfuge

Die maßgebende Hauptspannung f_d (FEM Berechnung) der 4 Laststellungen im Hauptfahrstreifen dividiert durch die Spaltzugfestigkeit $f_{ctk,cyl} == f_d^0$ liefert den Auslastungsgrad m_b , für den die B-Zahl B_n erreicht wird.

$$m_b = f_d/f_d^0 \text{ mit } m_b = 1/\gamma_{c,fat} \text{ und } \gamma_{c,fat} = f_d^0/f_d \quad \text{Formel 5-2}$$

m_b Auslastungsgrad

$\gamma_{c,fat}$ Ermüdungsfaktor

f_d Berechnungsfestigkeit == FEM Hauptspannung die für B-Zahlniveau ertragen wird

f_d^0 Grundwert der Berechnungsfestigkeit == Spaltzugfestigkeit

Somit kann die Gleichung für den Ermüdungsfaktor $\gamma_{c,fat}$ nach γ_q , der nun als Kalibrierfaktor verwendet wird, umgestellt werden, sodass Formel 5-3 gilt.

$$\gamma_{q,FEM} = \frac{10^{\frac{\gamma_{c,fat} - 0,748 \times e^{-0,1365}}{0,15}}}{B_n} \quad \text{Formel 5-3}$$

Setzt man den so gewonnenen Kalibrierfaktor $\gamma_{q,FEM}$ in die Gleichung für den Ermüdungsfaktor ein (Formel 5-4), erhält man eine auf den Referenzpunkt kalibrierte Ermüdungskurve für die FEM-Berechnungen, die am Referenzpunkt exakt das gleiche Sicherheitsniveau wie die RDO Beton besitzt.

$$\gamma_{c,fat} = 0,15 \times \log(\gamma_{q,FEM} \times B_n) + 0,748 \times e^{-0,1365} \quad \text{Formel 5-4}$$

5.4 FEM-Spannungsberechnungen und Vergleich

Wie bereits im Abschnitt 5.3.1 erörtert, werden für jede Variante des 9 Plattensystems (Bild 5-5) 12 verschiedene Laststellungen (4 im Hauptfahrstreifen siehe Bild 5-3 und im Seitenfahrstreifen siehe Bild 5-4) untersucht.

In den folgenden Grafiken sind jeweils 6 Linien zu 12 Einzelwerten abgebildet. Jede der 16 Grafiken (Bild 5-7 bis Bild 5-22) beinhaltet 72 Einzelwerte für maßgebende Hauptspannungen aus FEM-Berechnungen, die mittels der bereits vorhandenen Inhouse-Toolsets und der Open Source Software CalculiX ermittelt wurden. Für alle 72 Einzelwerte einer Grafik sind die Tragschicht sowie die Plattenlängen und -breiten konstant. Die jeweilige Kombination steht als Kurzform im Diagrammtitel über der Legende z.B.:

- ATS L=5000 BÜFS=3500 BHFS=4000 BSFS=2000

steht für

- Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm.

Die 6 Linien ergeben sich, da 2 Achslasten (10 Tonnen durchgehende Linien, 16 Tonnen gestrichelte Linien) und 3 Deckendicken untersucht wurden. Die 3 Deckendicken resultieren aus den 3 Dimensionierungsergebnissen entsprechend den RDO Beton für die 3 untersuchten B-Zahlen im Hauptfahrstreifen (32 Millionen = blau, 100 Millionen = rot, 32 Millionen = gelb).

Jede der Linien hat 12 Einzelwerte der Hauptspannungen (Ordinate) die den 12 Laststellungen auf der Abszisse zugeordnet sind. Die Verbindung der 12 Einzelwerte jeder Linie soll keine

Trends oder funktionalen Zusammenhänge verdeutlichen, sondern lediglich die Lesbarkeit hinsichtlich der Grafiken erhöhen, da alle Werte einer Linie aus dem exakt gleichen FE-Modell mit verschiedenen Laststellungen hervorgehen.

Die ersten 4 Einzelwerte jeder Linie sind die maßgebenden Hauptspannungen für die 4 Lastfälle im Hauptfahrstreifen (Bild 5-3). Sie geben die Bewertungsgrundlage für die Interpretation der 8 letzten Einzelwerte jeder Linie. Dies erfolgt unter Anwendung der in Kapitel 5.3 erörterten Vorgehensweise.

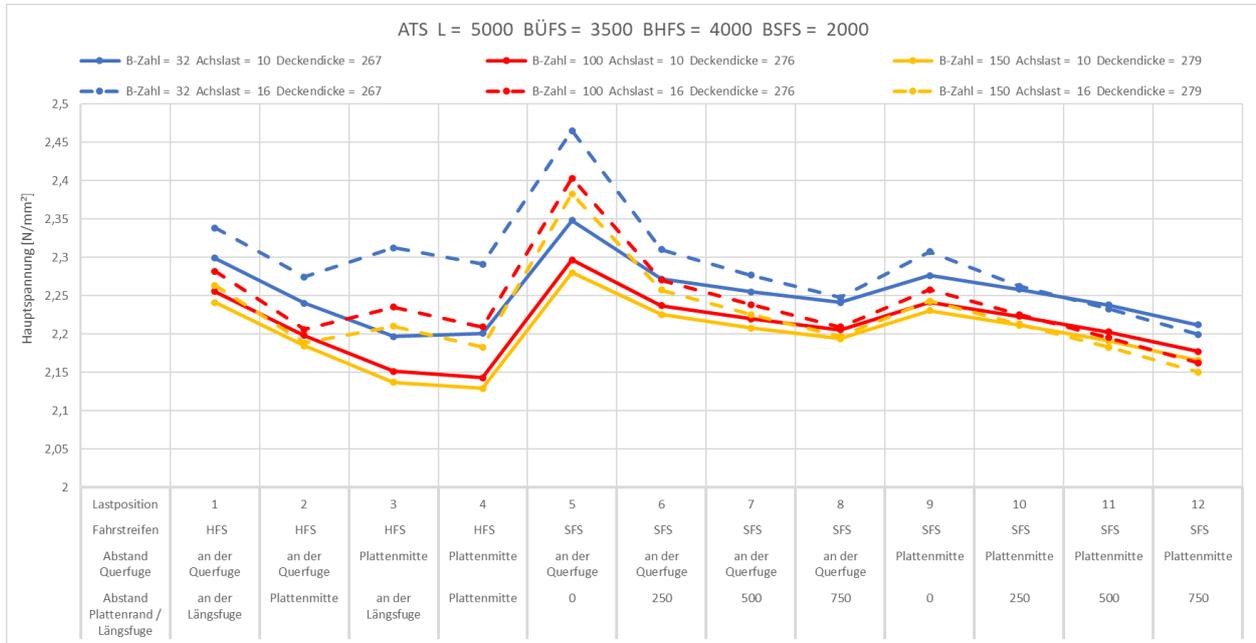


Bild 5-7: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000mm

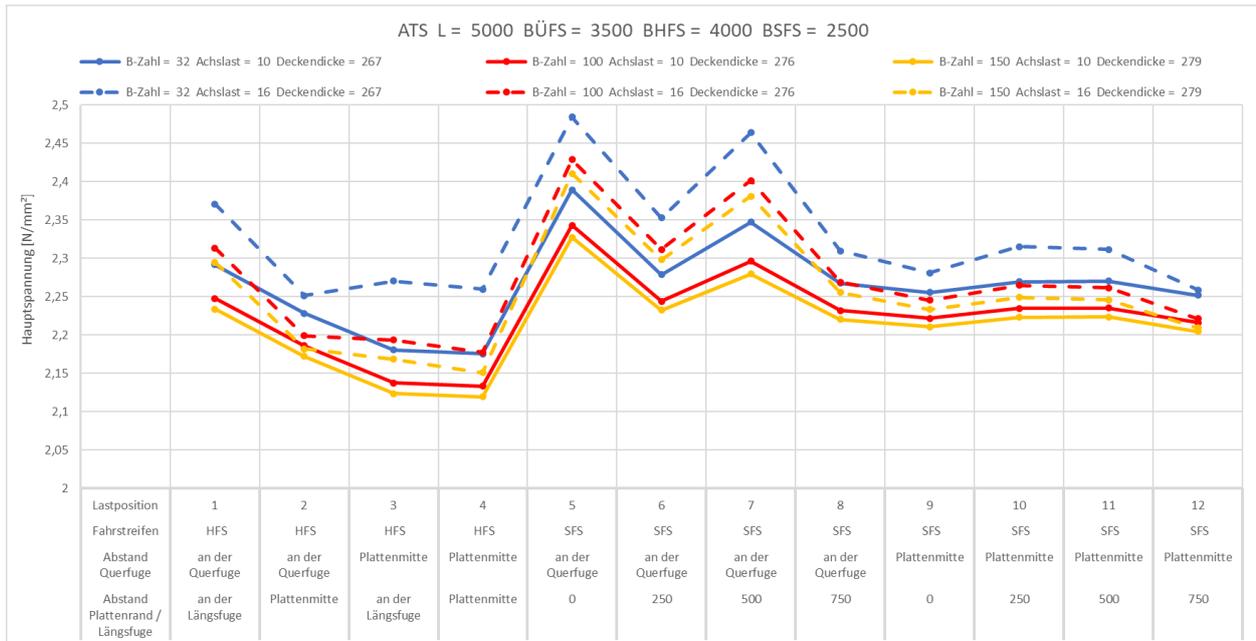


Bild 5-8: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500mm

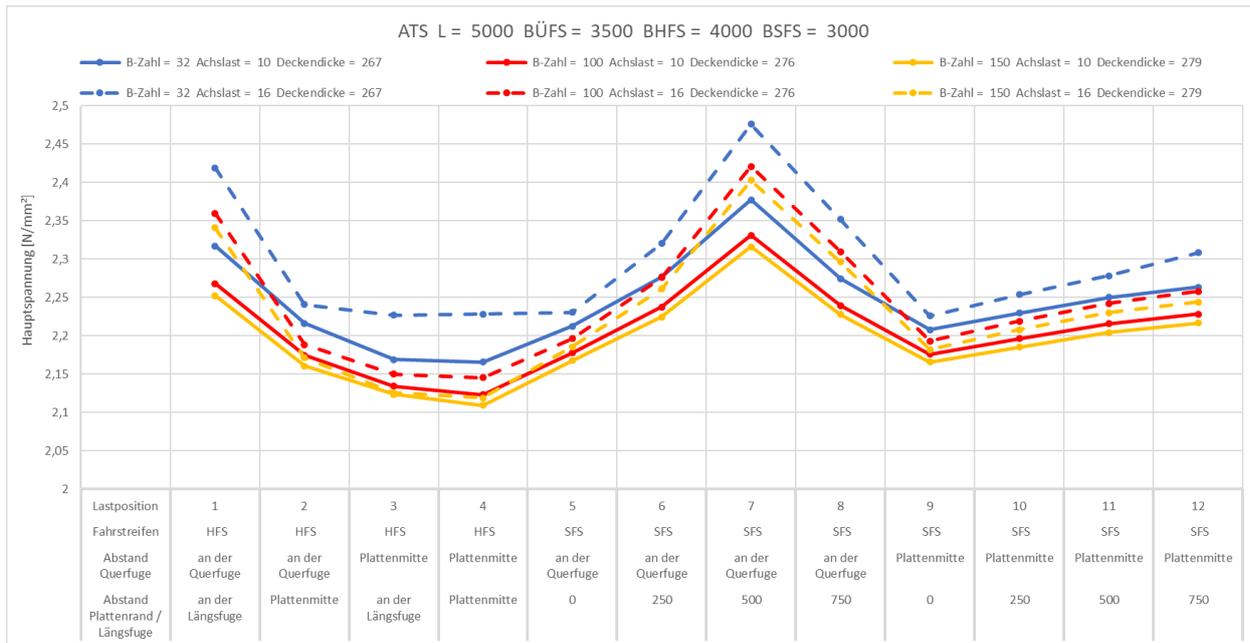


Bild 5-9: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm

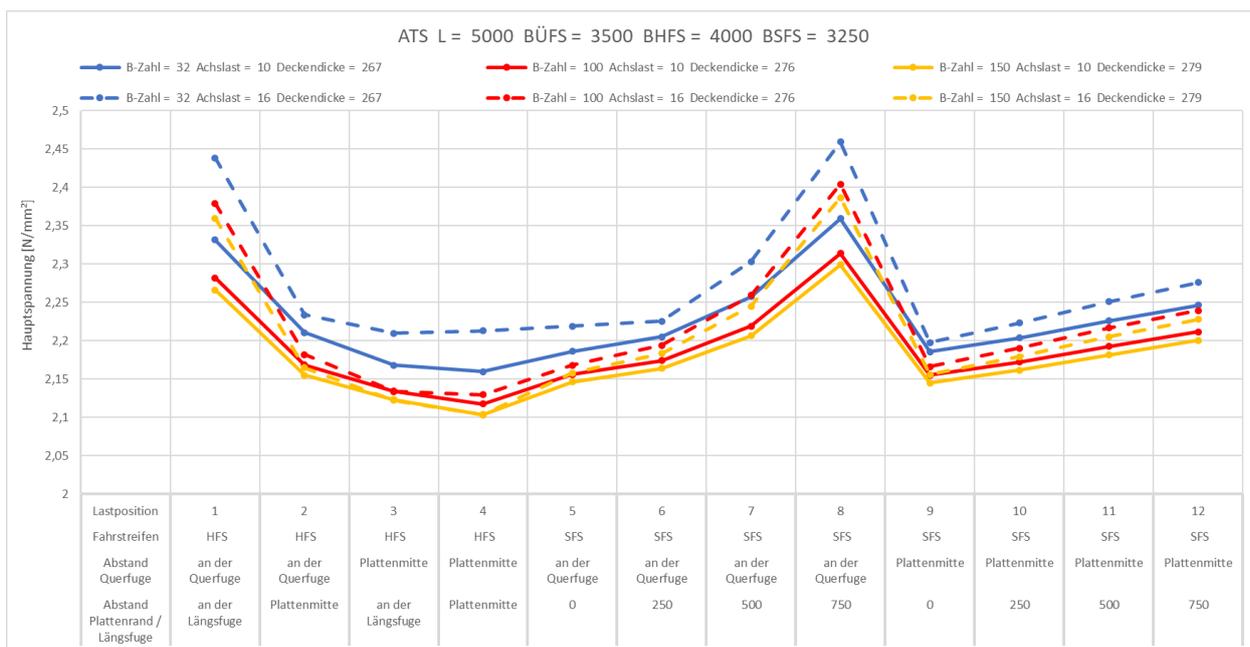


Bild 5-10: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm

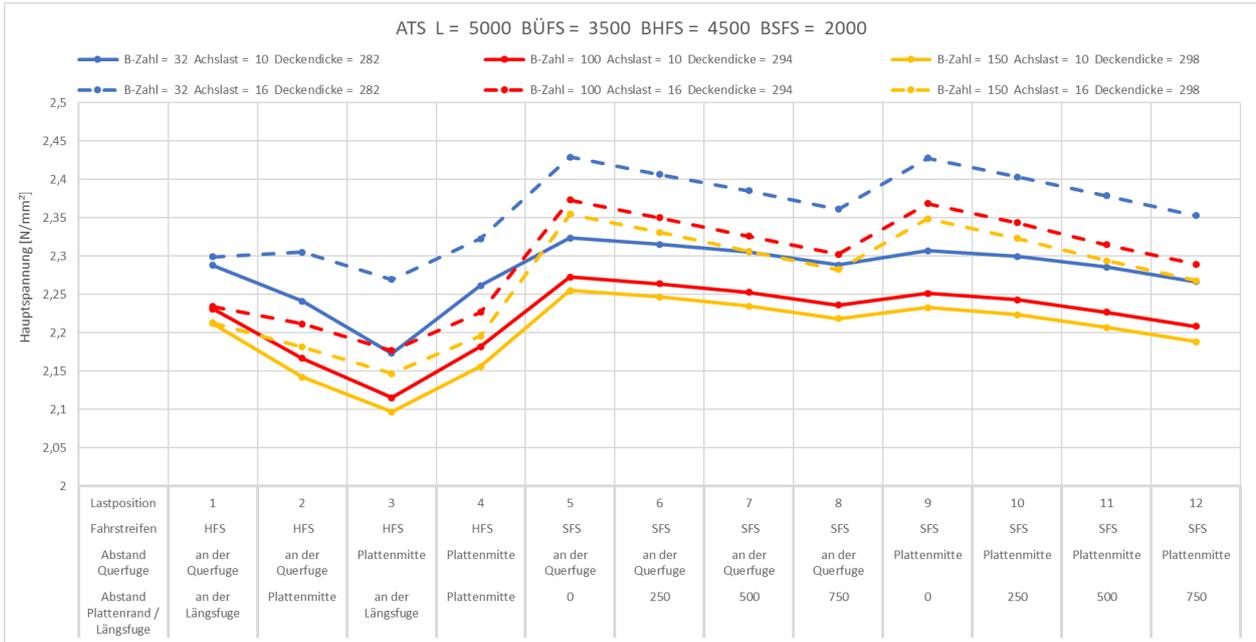


Bild 5-11: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

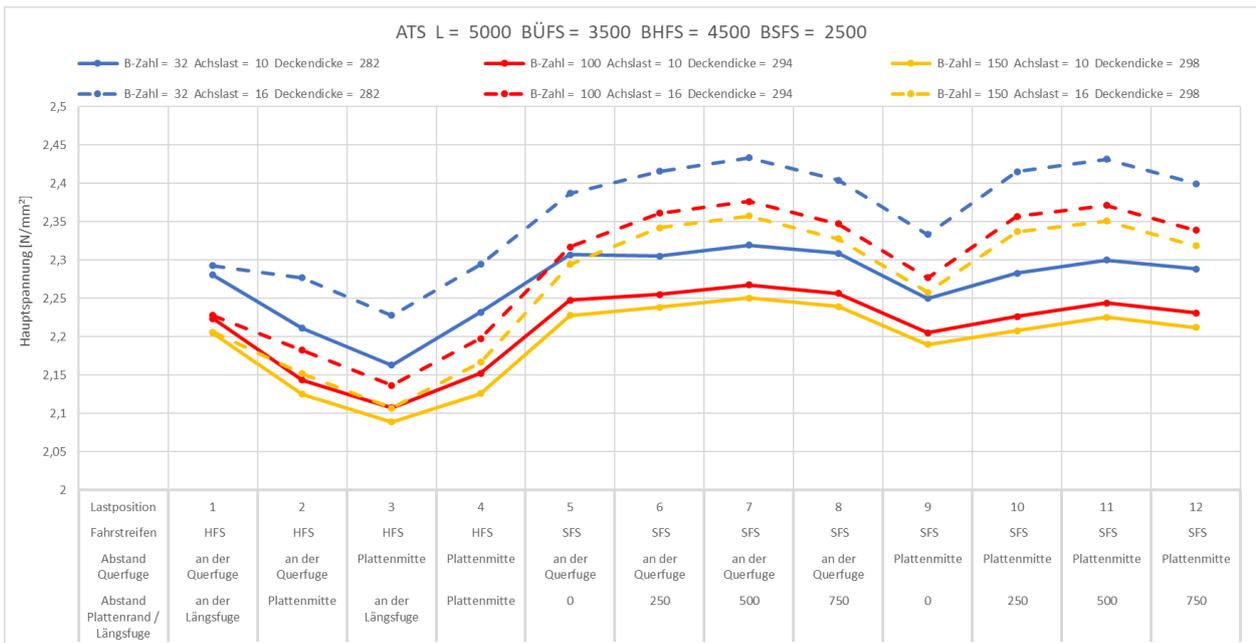


Bild 5-12: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

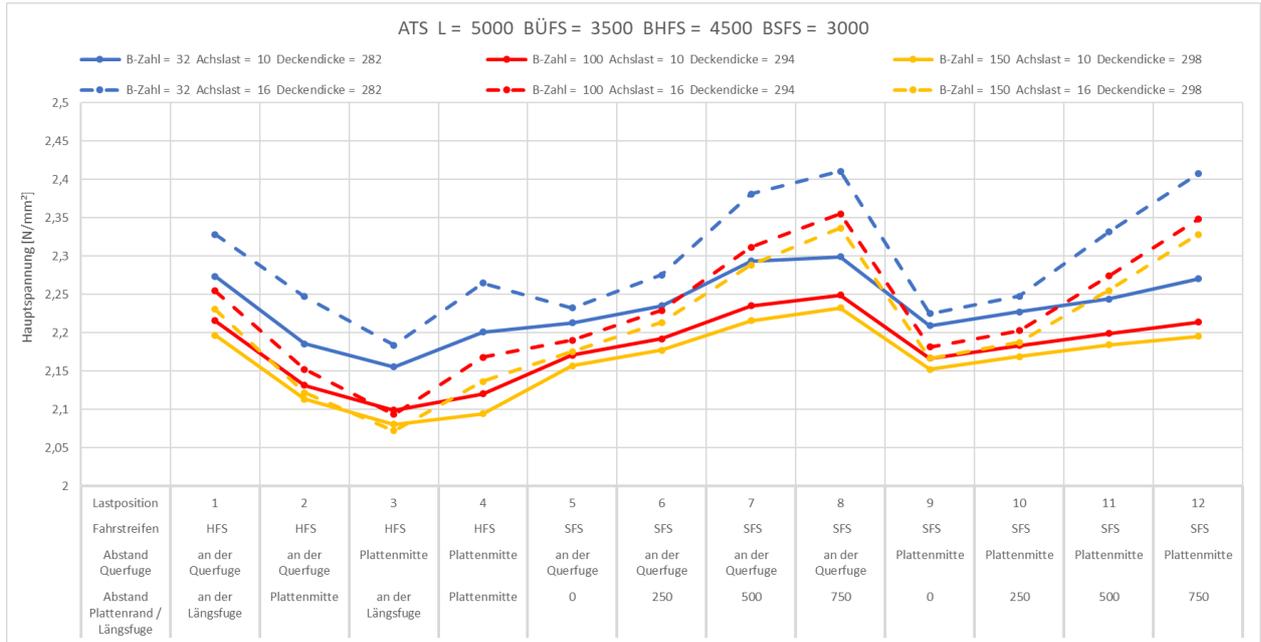


Bild 5-13: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm

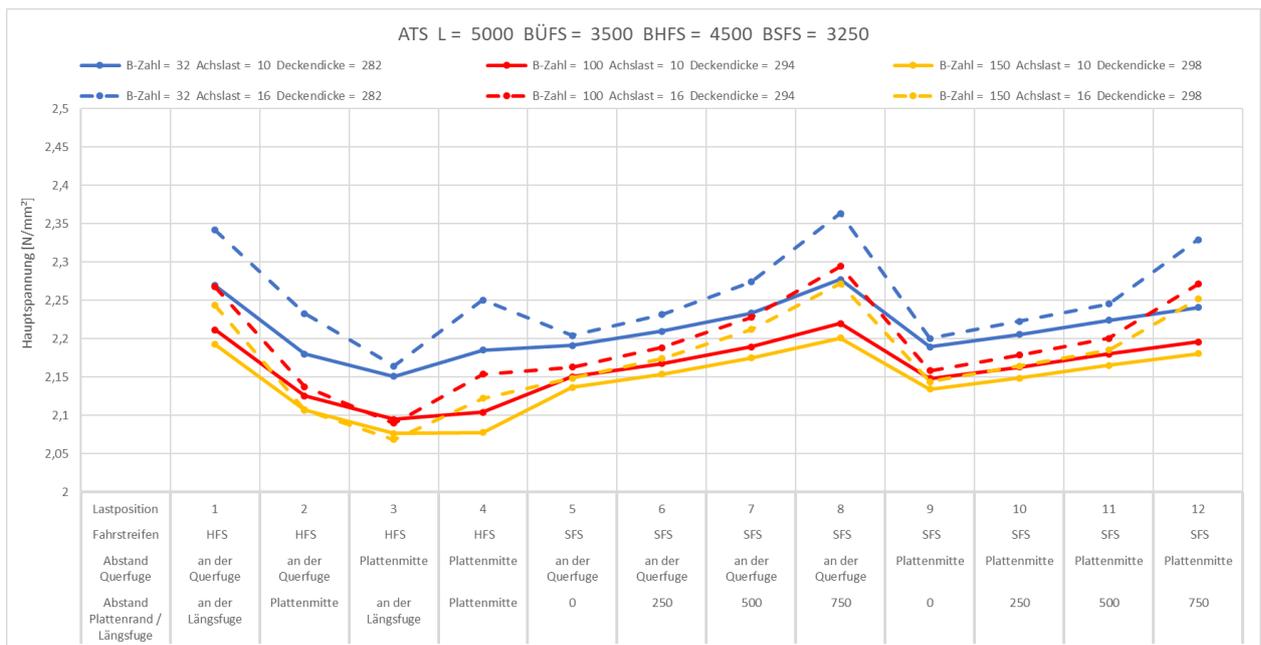


Bild 5-14: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm

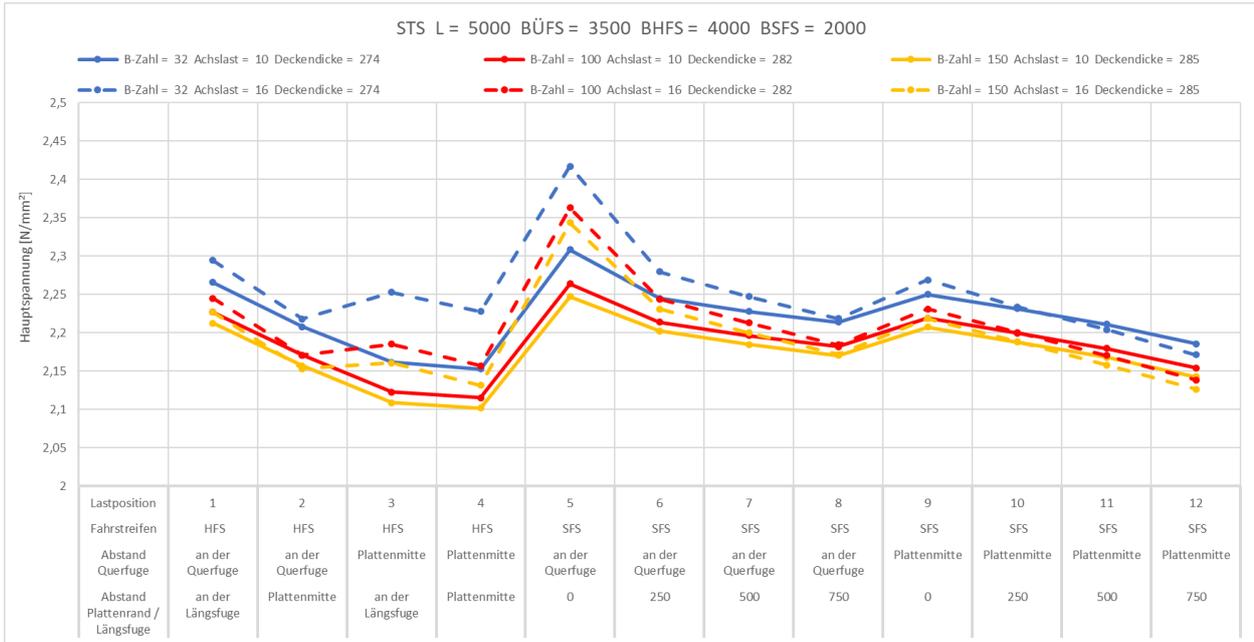


Bild 5-15: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

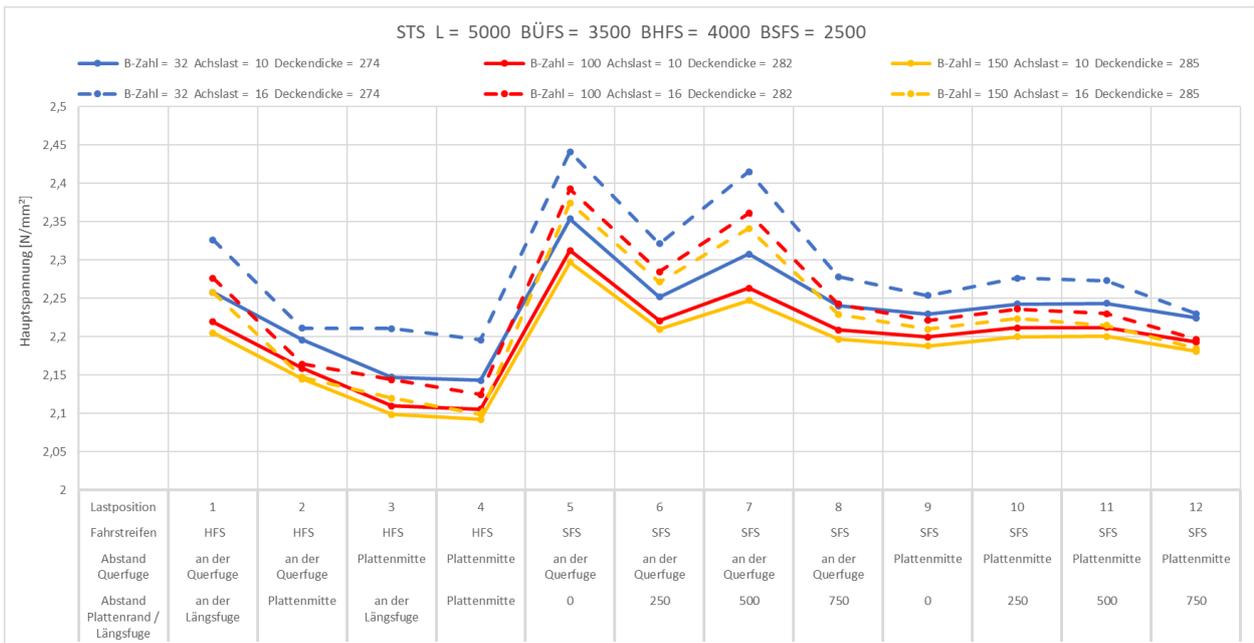


Bild 5-16: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

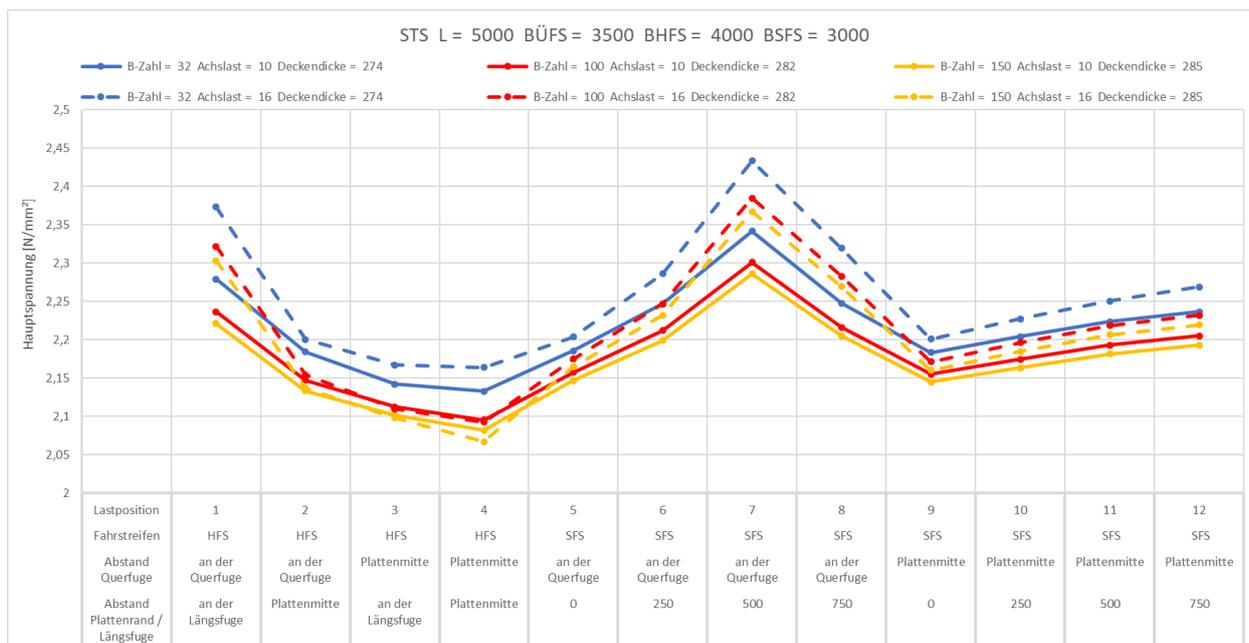


Bild 5-17: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrtstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrtstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrtstreifen=3000 mm

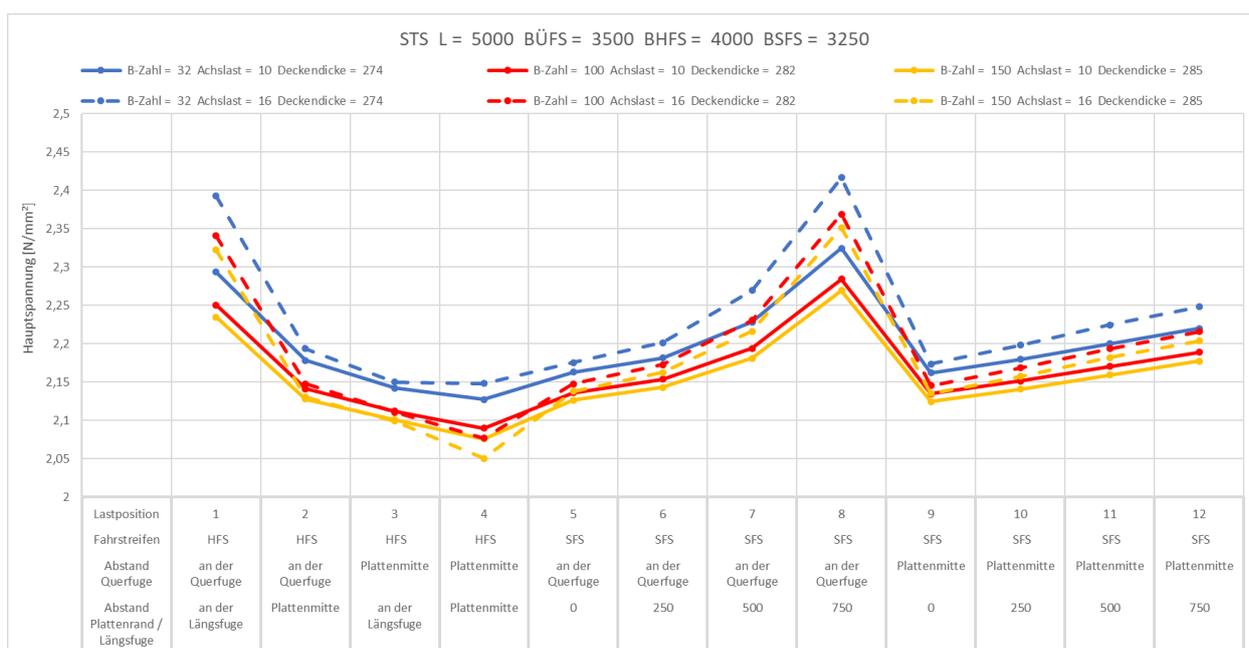


Bild 5-18: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrtstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrtstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrtstreifen=3250 mm

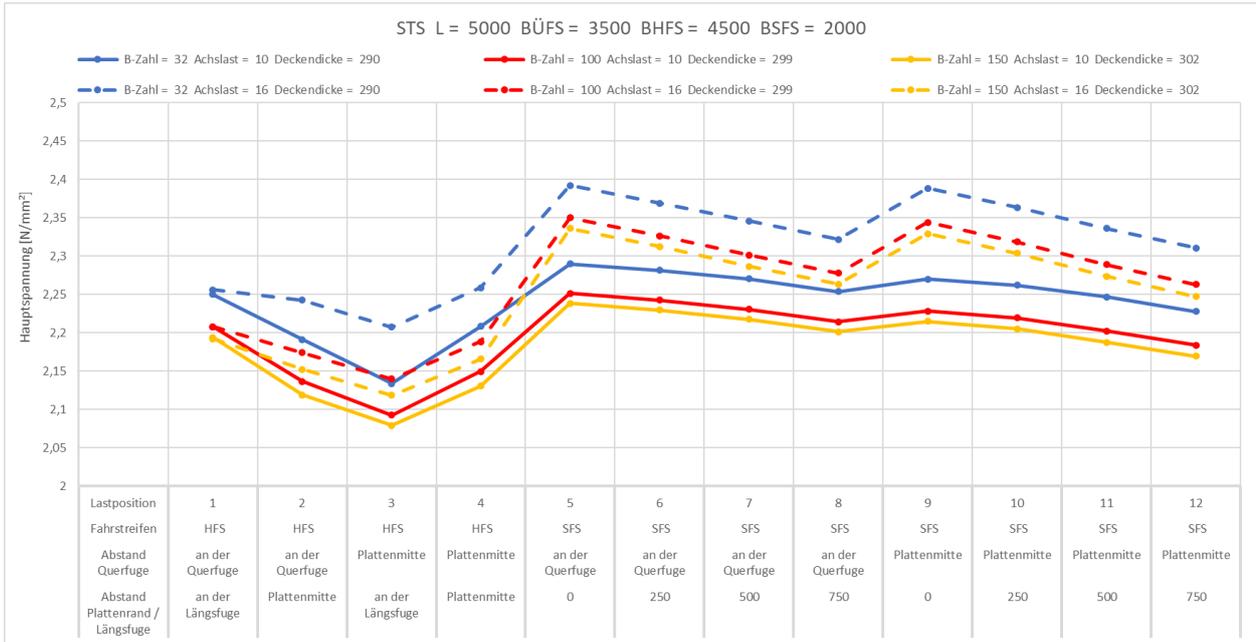


Bild 5-19: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

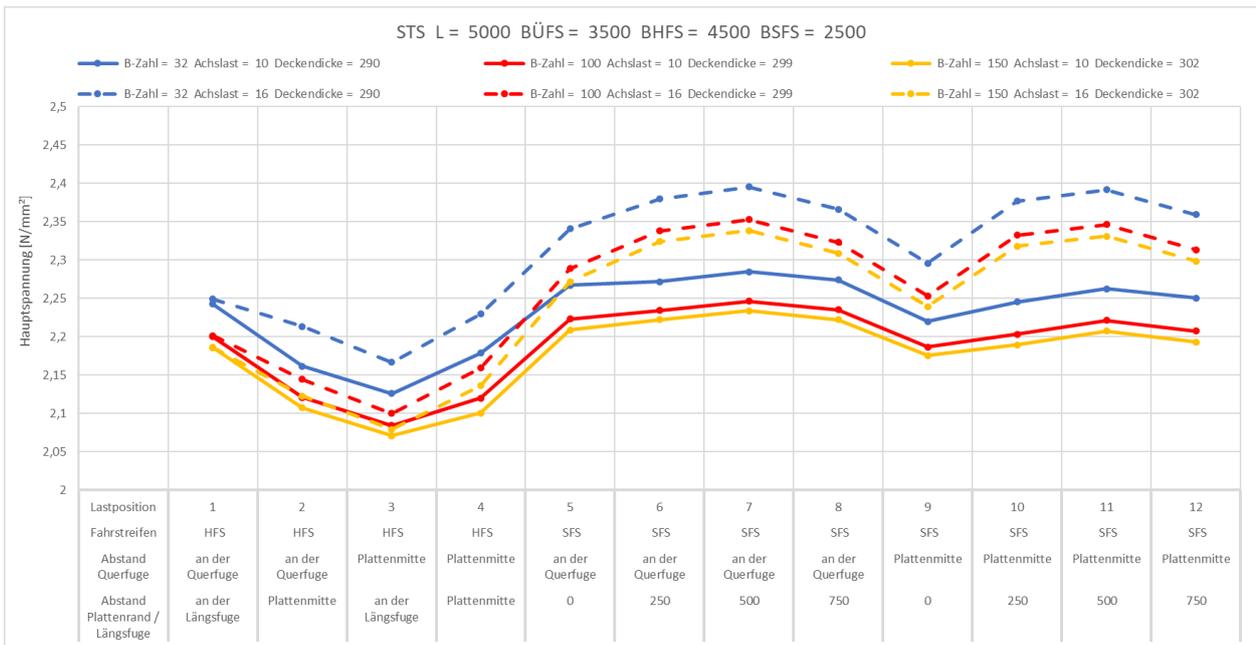


Bild 5-20: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

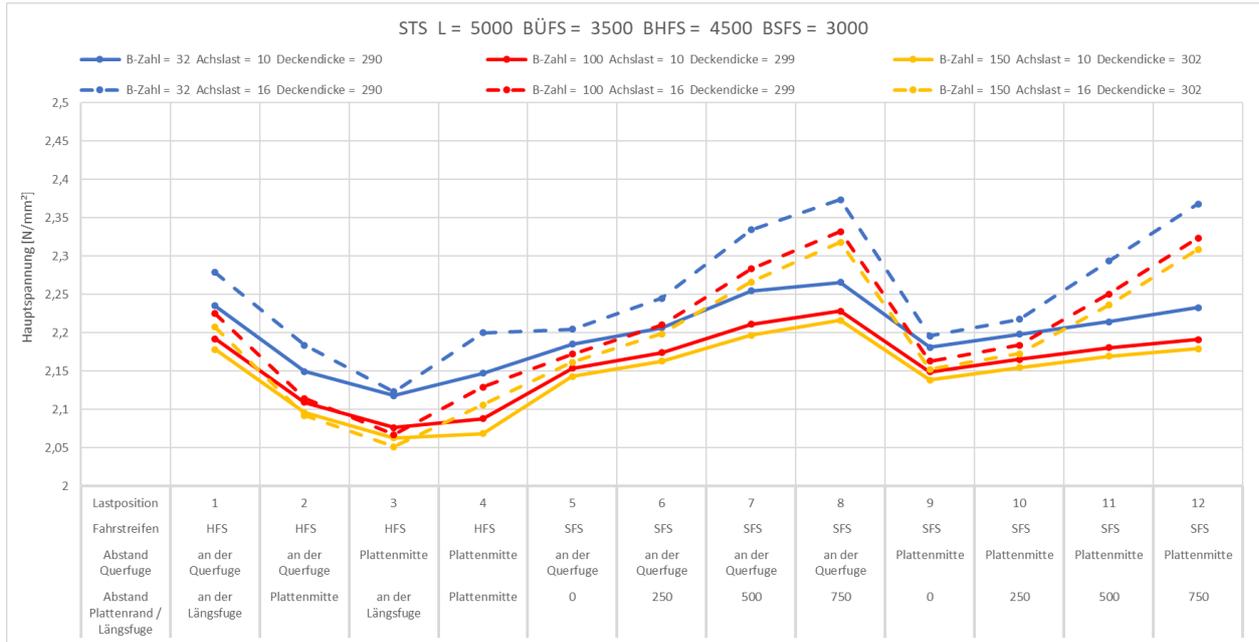


Bild 5-21: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm

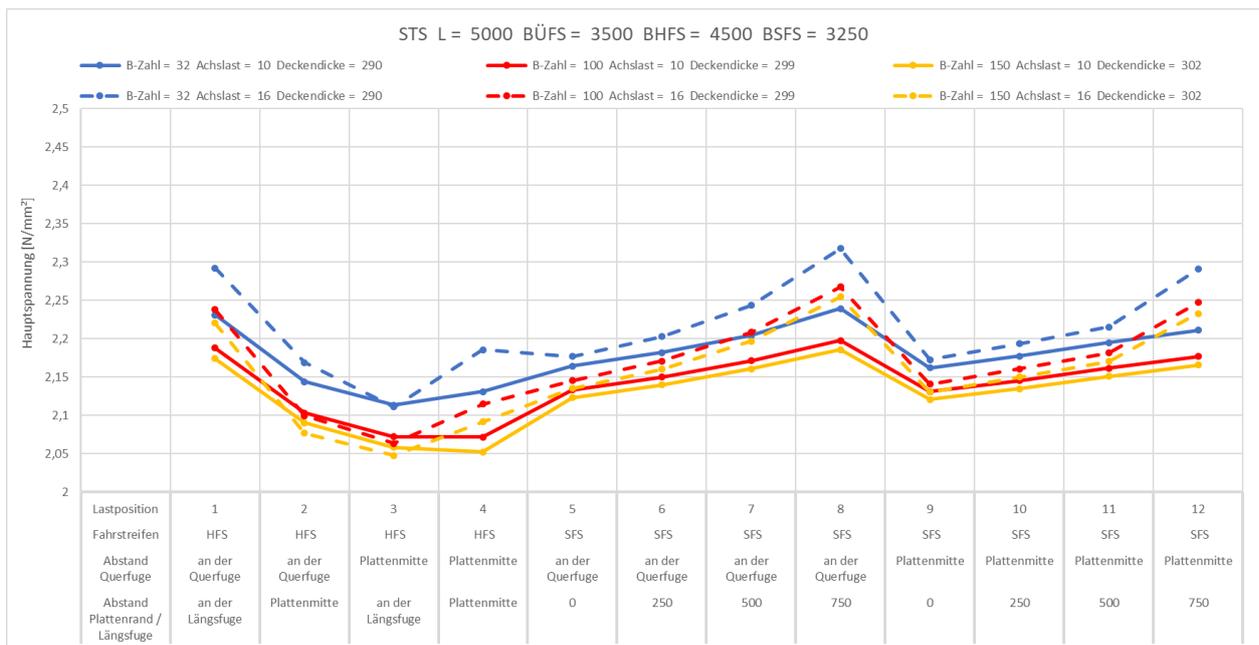


Bild 5-22: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm

Die Breite der Platten im Seitenstreifen hat einen großen Einfluss auf die Sensibilität der maßgebenden Hauptspannungen bei Seitenstreifenfreigabe hinsichtlich des Abstands zum freien Plattenrand. Zu beachten ist hierbei, dass bei schmalen Platten im Seitenstreifen die Fahrzeuge (immer oder bereits bei Befahrung in geringem Abstand zum Fahrbahnrand) gleichzeitig auf der Platte im Seitenstreifen und auf der Platte im Hauptfahrstreifen fahren (siehe Bild 5-23).

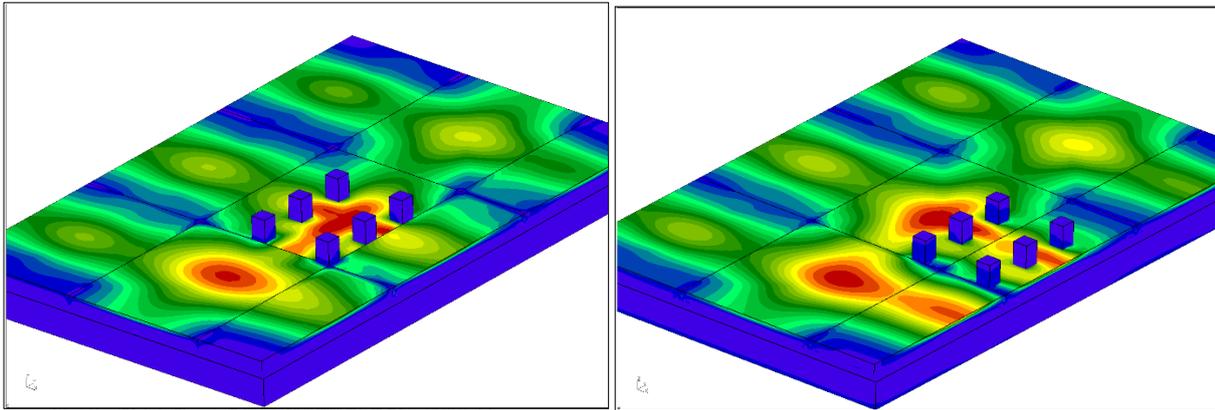


Bild 5-23: Unterschiedliche Belastungsszenarien bei Seitenstreifenfreigabe und schmalen Platten im Seitenstreifen

Des Weiteren hat die Breite des Seitenstreifens einen Einfluss auf eine maßgebende Hauptspannung bei Belastung des Hauptfahrstreifens und umgekehrt.

Bedingt durch die Geometrie der Laststellung des Fahrzeugtyps 98 hat die Positionierung in Fahrtrichtung auf 5 Meter langen Platten einen weniger starken Einfluss auf das Berechnungsergebnis, solange sich alle 3 Achsen der Laststellung auf einer Platte befinden.

Je nach Geometrie des Plattensystems werden die im Hauptfahrstreifen auftretenden maßgebenden Hauptspannungen bei Belastung des Seitenstreifens überschritten (z. B. Bild 5-21).

Auf den ersten Blick erscheinen die Spannungsüberschreitungen von geringer Bedeutung. Insbesondere im Ermüdungsbereich jenseits der klassischen Dauerfestigkeit (>2 Mio. Lastwechsel) leiten sich hieraus jedoch merkliche Verringerungen der ertragbaren Lastwechsel und damit der B-Zahl ab.

Die Auswertung der Auswirkungen hinsichtlich der B-Zahl und Erarbeitung sinnvoller Maßnahmen erfolgen in den folgenden Kapiteln.

5.5 Auswirkungen der Randbefahrung auf die ertragbaren Lastwechselzahlen

Wie bereits im Kapitel 5.4 aufgezeigt, treten bei Randbefahrung höhere Spannungen als im Hauptfahrstreifen auf. Mit Hilfe der Ermüdungsfunktion aus Kapitel 5.3.2 können diese Spannungsvariationen auf reduzierte B-Zahlen projiziert werden.

5.5.1 Projektion der Spannungen auf die ertragbaren B-Zahlen

Analog zu Kapitel 5.4 sind in jeder Grafik sechs Kurven dargestellt. Jede dieser Kurven repräsentiert eine Plattendicke, die entsprechend der jeweiligen B-Zahl (blau = 32, rot = 100 und gelb = 150 Mio.) mit dem Verfahren der RDO Beton berechnet wurde. Jede dieser Dicken wurde im FEM Modell mit Achslasten (durchgehende Linie = 3x10 t, unterbrochene Linie = 3x16 t) belastet. Diese Lasten wurden auf 12 Lastpositionen (siehe Abszisse) aufgebracht, um die größte Zugspannung im Plattensystem zu berechnen.

In den folgenden Grafiken werden die zugehörigen projizierten B-Zahlen erfasst. Dabei ist zu beachten, dass es sich um eine logarithmische Darstellung handelt. Die Auswertung und Interpretation erfolgen in Kapitel 5.5.2.

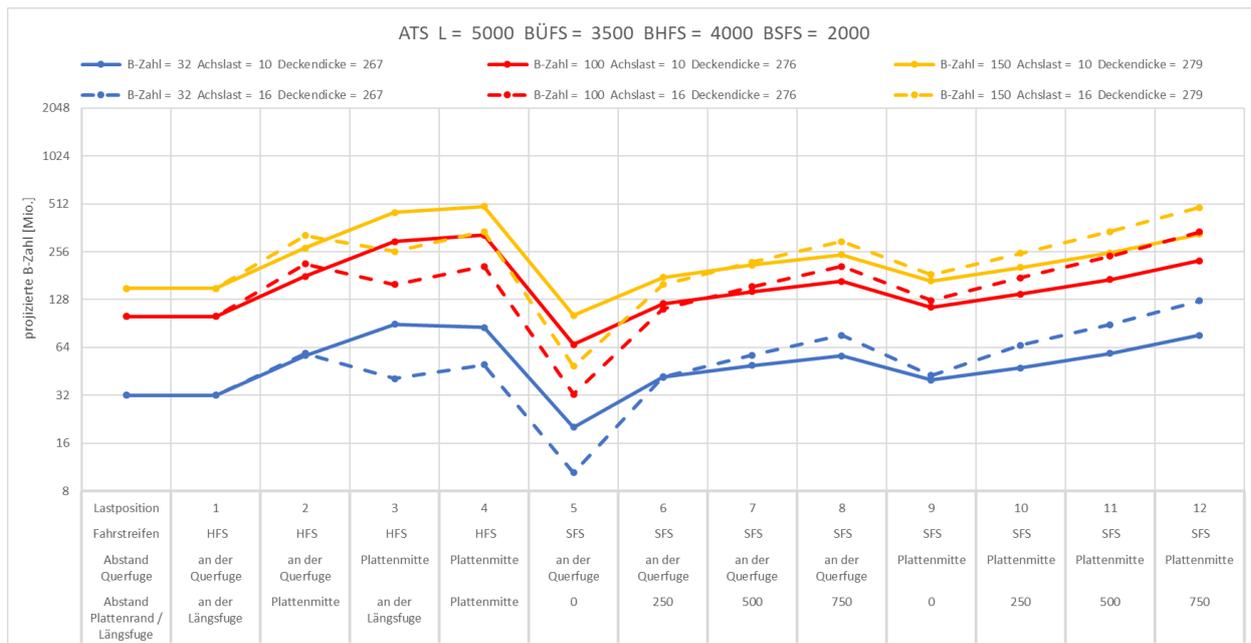


Bild 5-24: Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

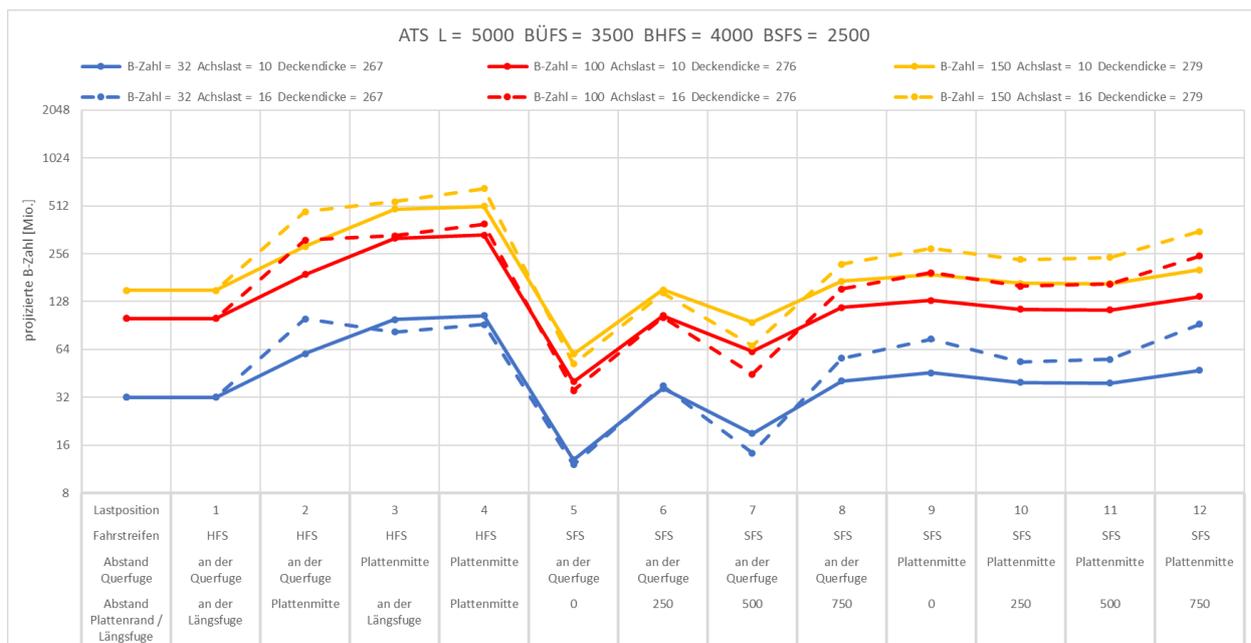


Bild 5-25: Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

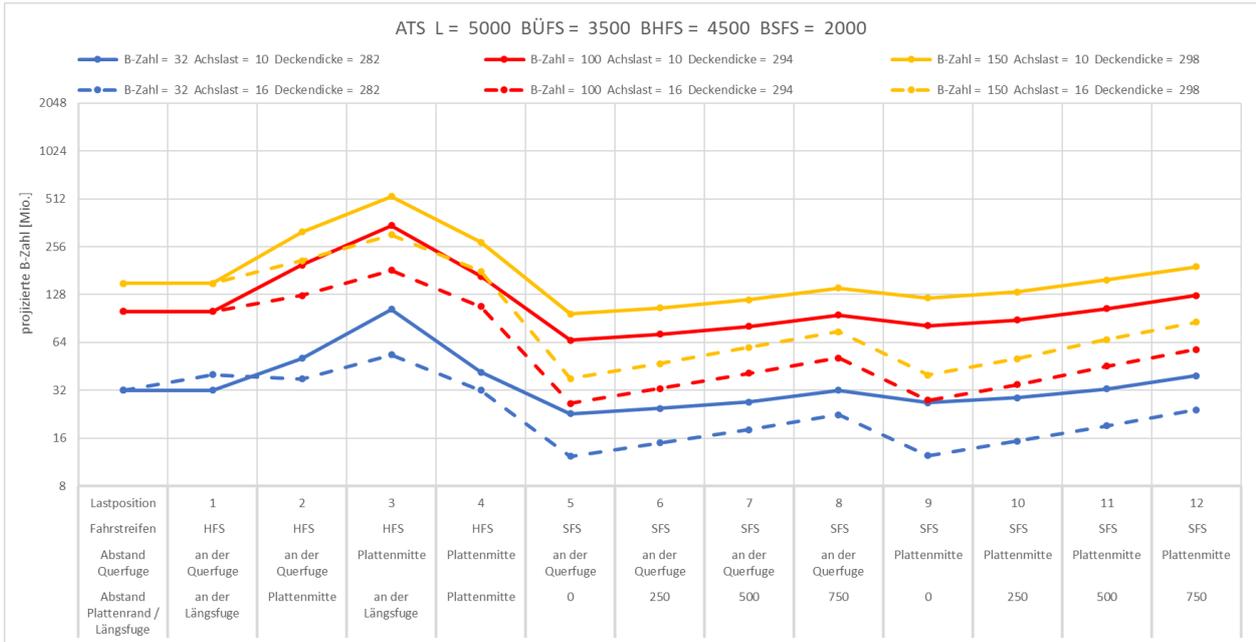


Bild 5-26: Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

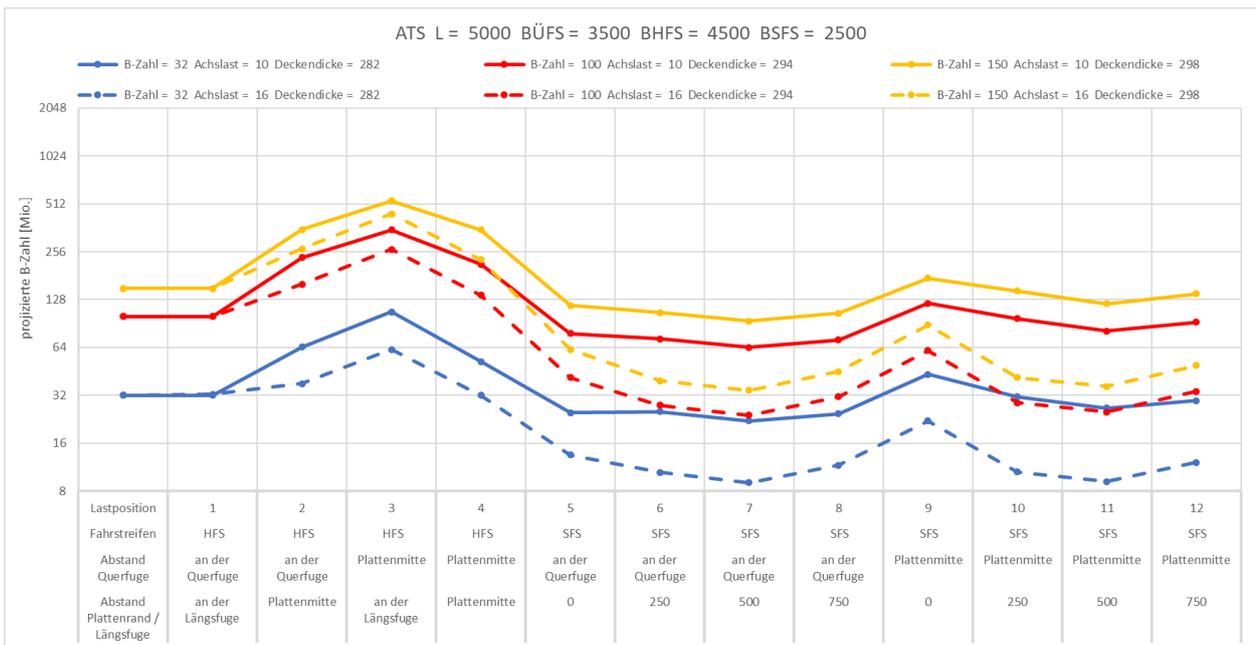


Bild 5-27: Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

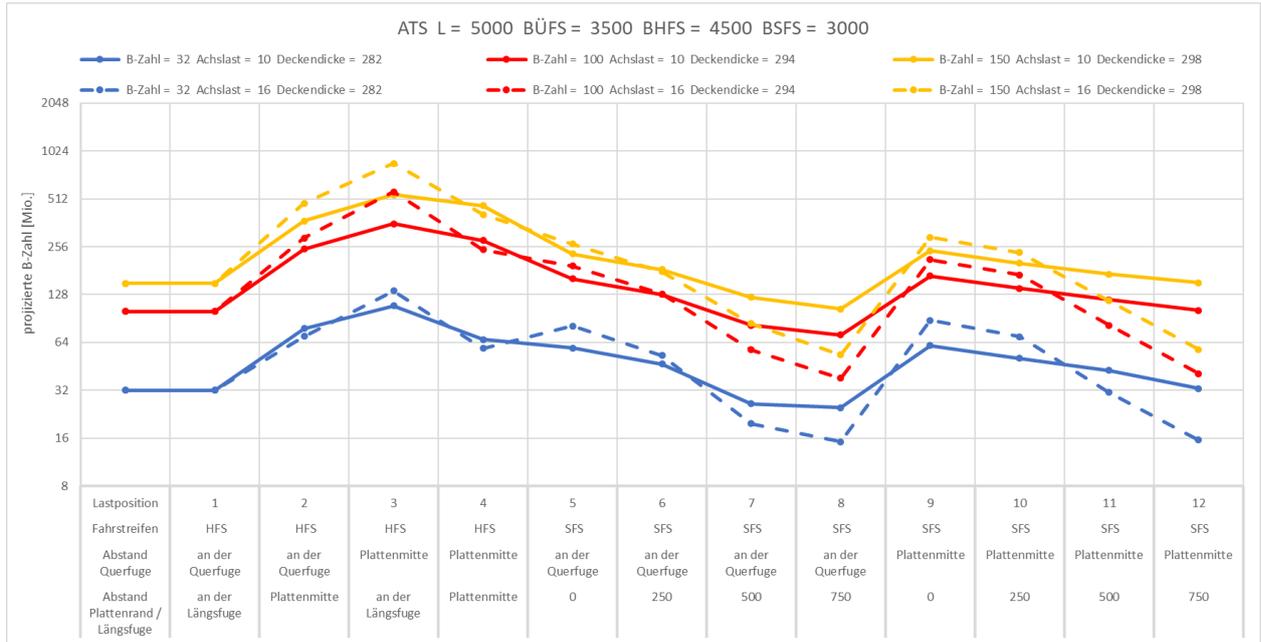


Bild 5-28: Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm

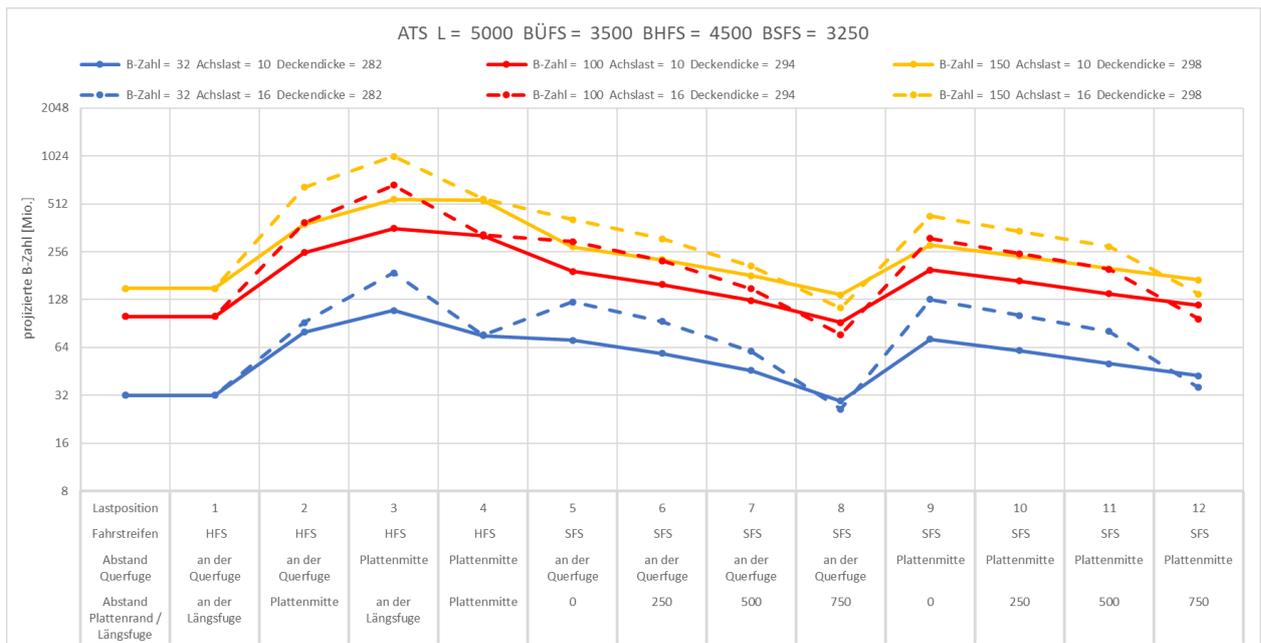


Bild 5-29: Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm

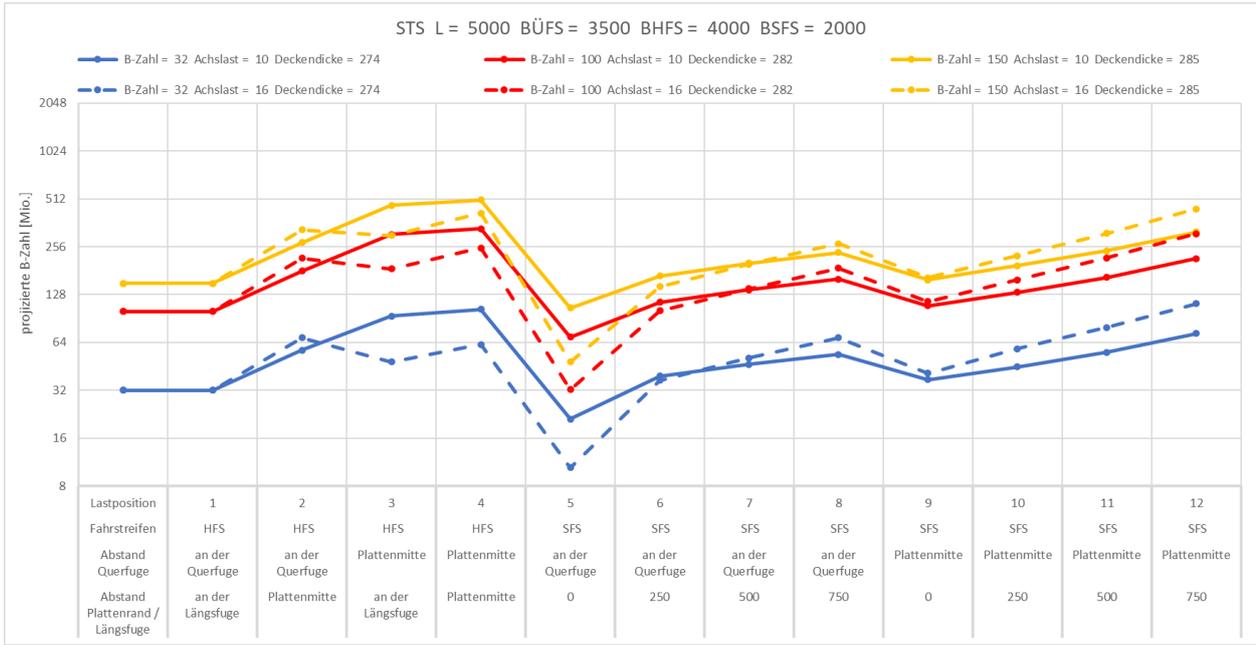


Bild 5-30: Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

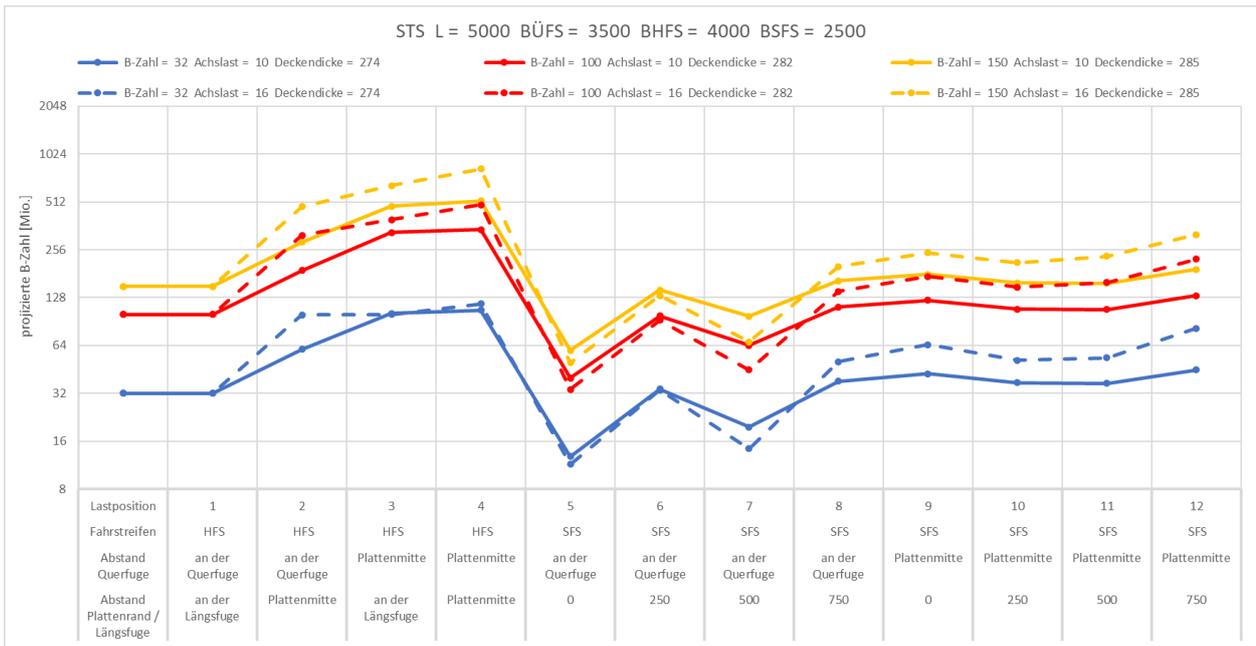


Bild 5-31: Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

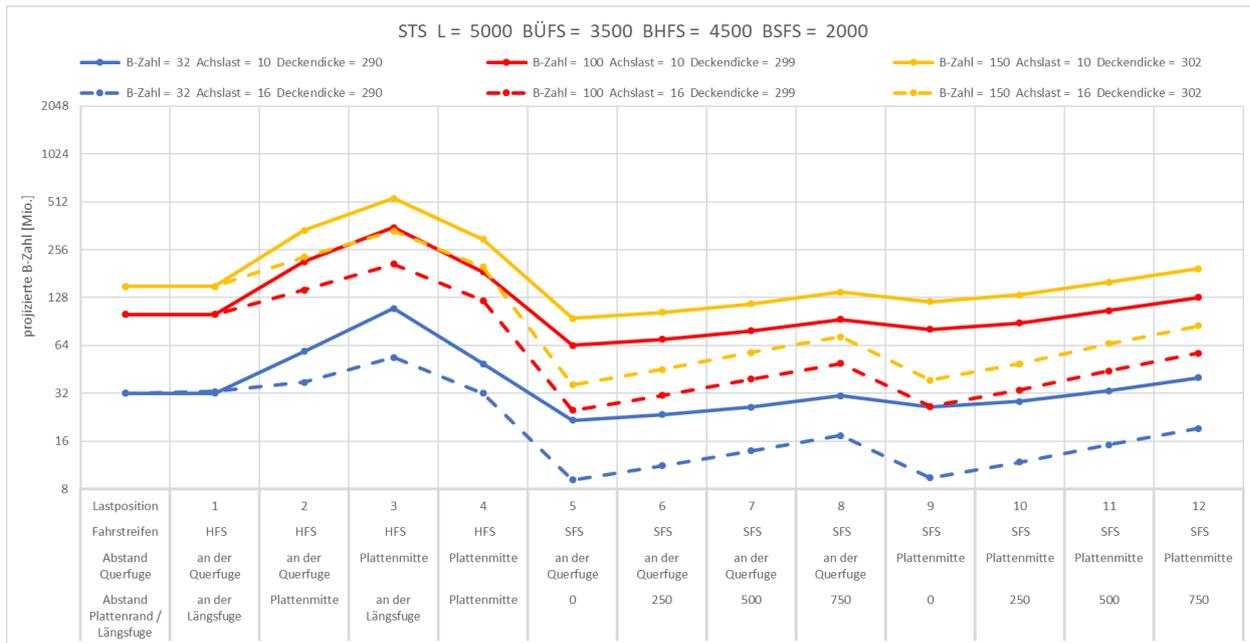


Bild 5-32: Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

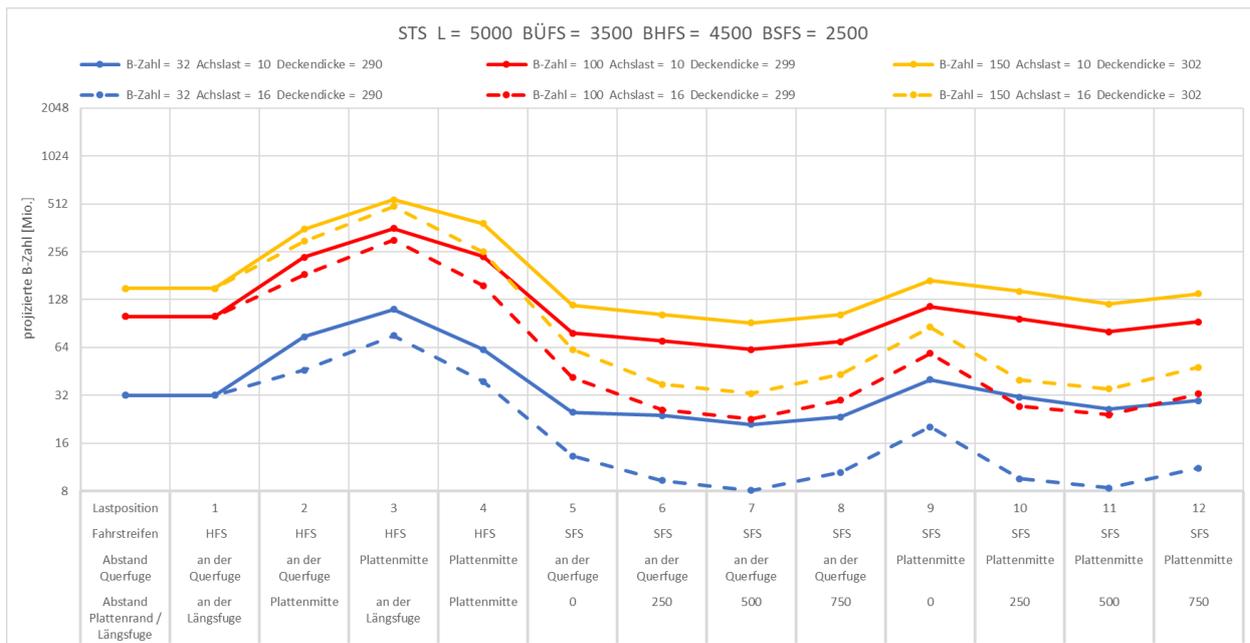


Bild 5-33: Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

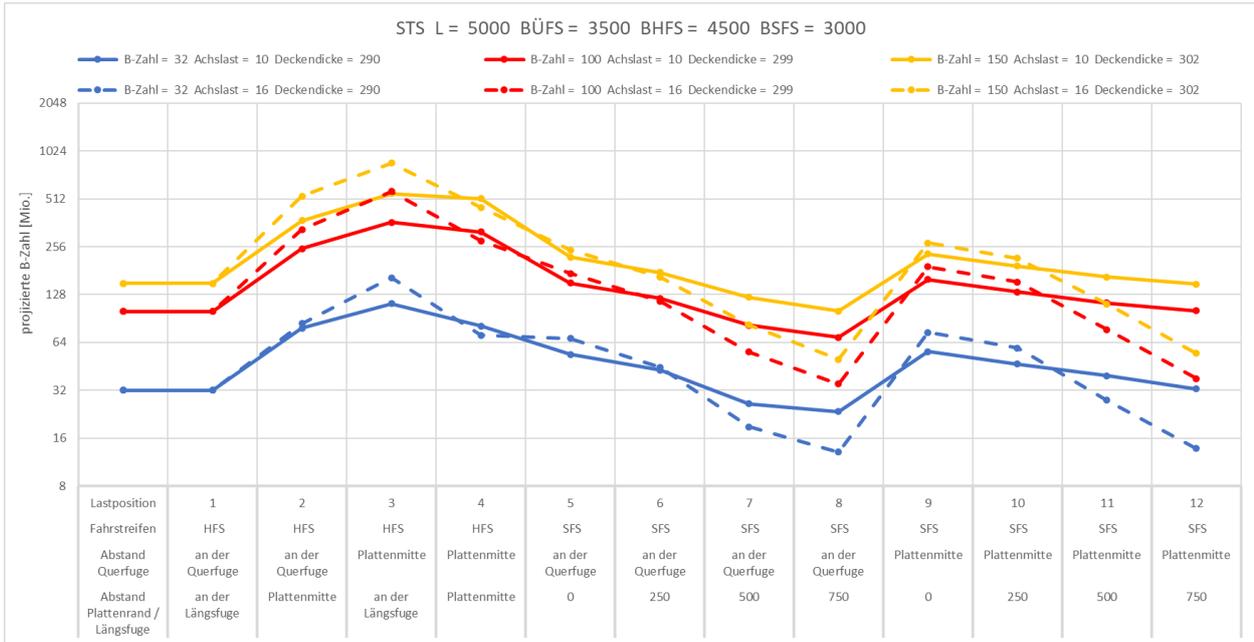


Bild 5-34: Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm

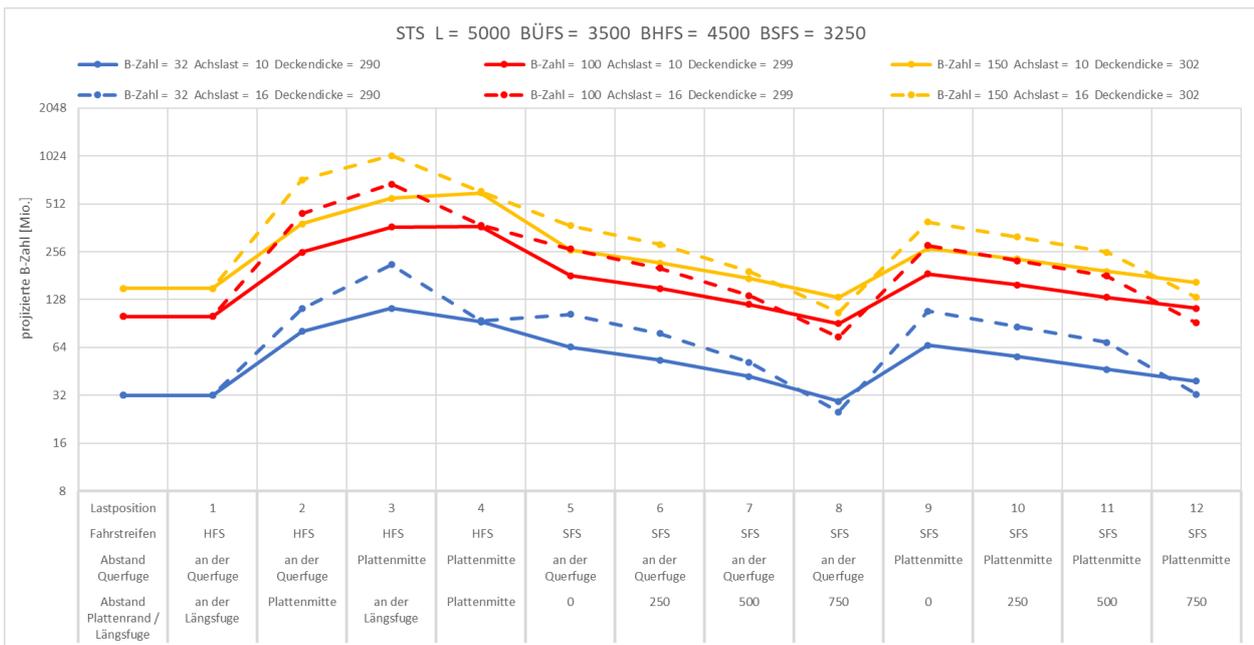


Bild 5-35: Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm

5.5.2 Auswertung der Projektion der Spannungen auf die ertragbaren B-Zahlen

Die Auswertungen der projizierten B-Zahlen zeigen zunächst, dass eine pauschale Abhängigkeit der reduzierten B-Zahl vom eingehaltenen Randabstand der Befahrung vom freien Fahrbahnrand nicht gegeben ist. Normiert man die B-Zahlen zur ertragbaren Lastwechselzahl im Hauptfahrstreifen, kann dies sehr gut dargestellt werden (siehe Bild 5-36 bis Bild 5-47).

Es wird ersichtlich, dass je nach konkretem Fall zunächst mit einer Reduktion der ertragbaren B-Zahl zwischen 10 und 80 % zu rechnen ist. Betrachtet man nur die Lastfälle mit 10 t Achsen, die i.d.R. für die Ermüdung herangezogen werden und auf die sich die angegebenen B-Zahlen im Hauptfahrstreifen (von 32, 100 und 150 Mio. Überrollungen) beziehen, kann von einer B-Zahl-

Reduktion zwischen 10 und 60 % ausgegangen werden. Wird zusätzlich von einer ungünstigeren Lagerung mit resultierenden Stoßfaktoren ausgegangen, kann anhand der Lastfälle mit Achslasten von 16 t von einer Reduktion der ertragbaren B-Zahl zwischen 25 und 80 % ausgegangen werden.

Dieser Wertebereich deckt sich mit den Erfahrungen aus der Praxis. Es ist herauszustellen, dass die Projektion der erwartbaren B-Zahlen direkt mittels der Ermüdungsfunktion aus den RDO Beton erfolgen konnte, ohne weitere Anpassungen bzw. modellimplizierte Kalibrierung vorzunehmen. Dies sei aufgrund der sehr großen Sensibilität der Ermüdungsfunktion im Bereich großer Lastwechselzahlen herausgestellt.

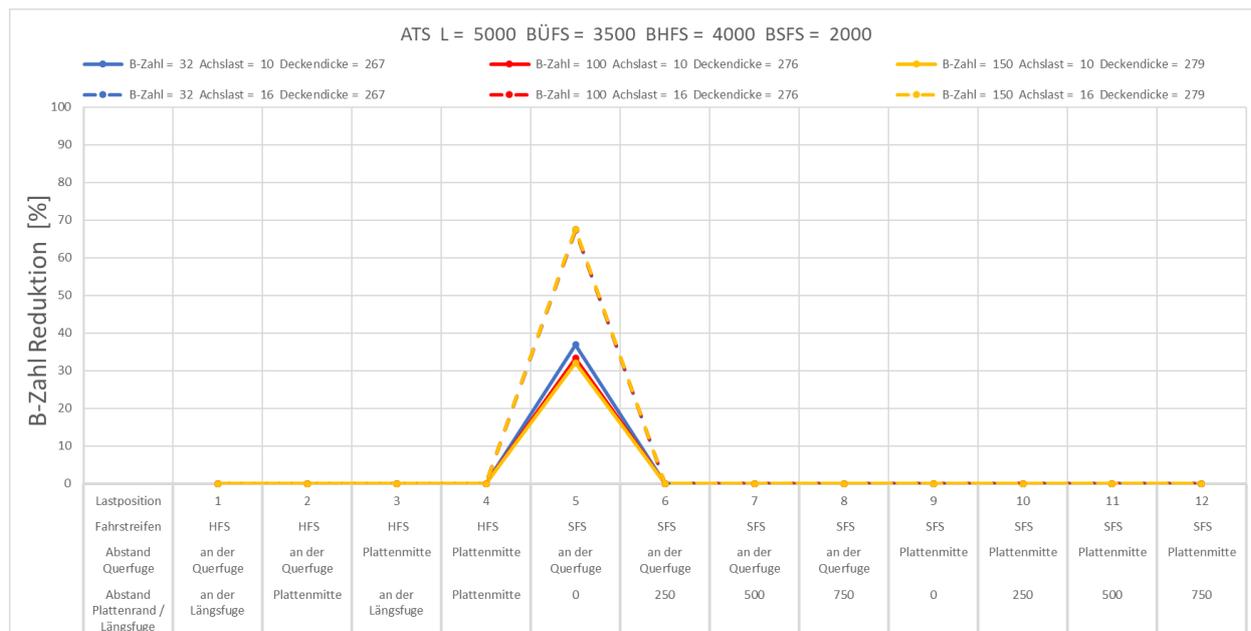


Bild 5-36: Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

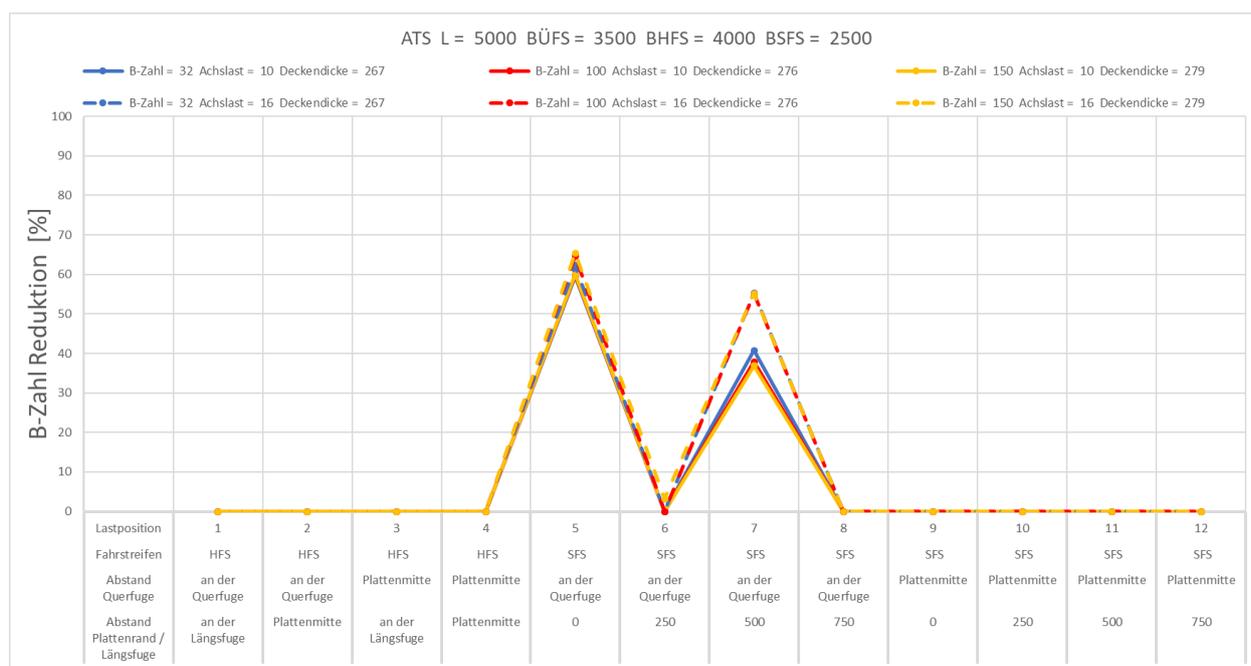


Bild 5-37: Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm



Bild 5-38: Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

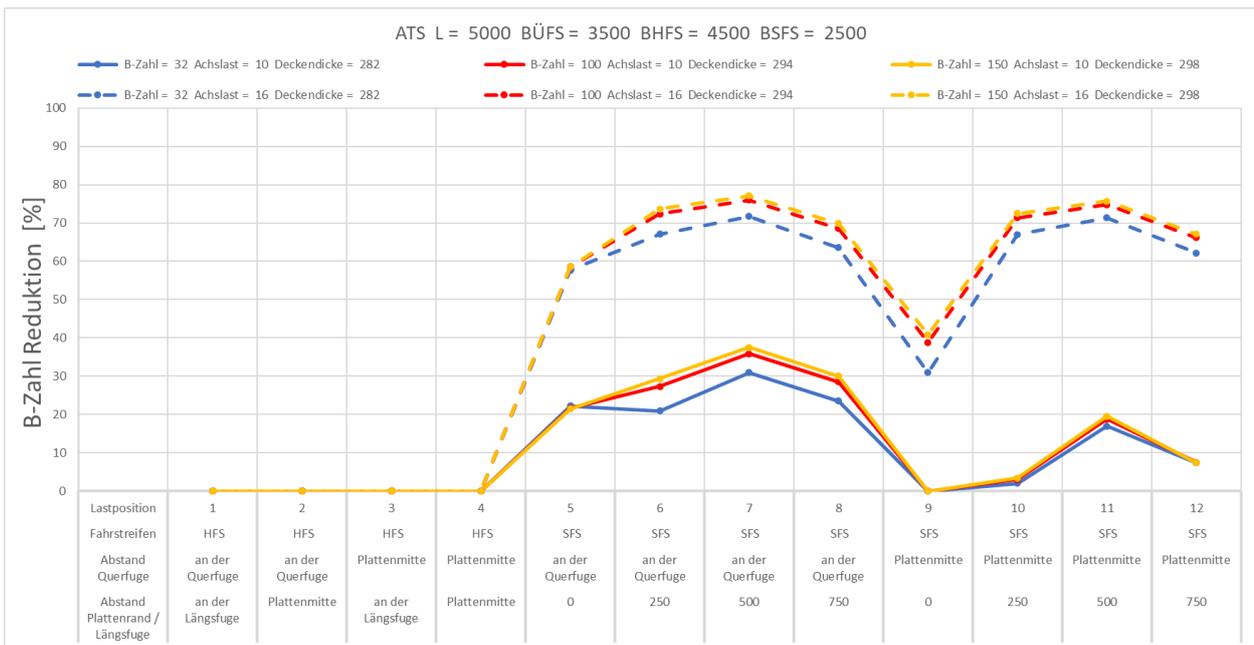


Bild 5-39: Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

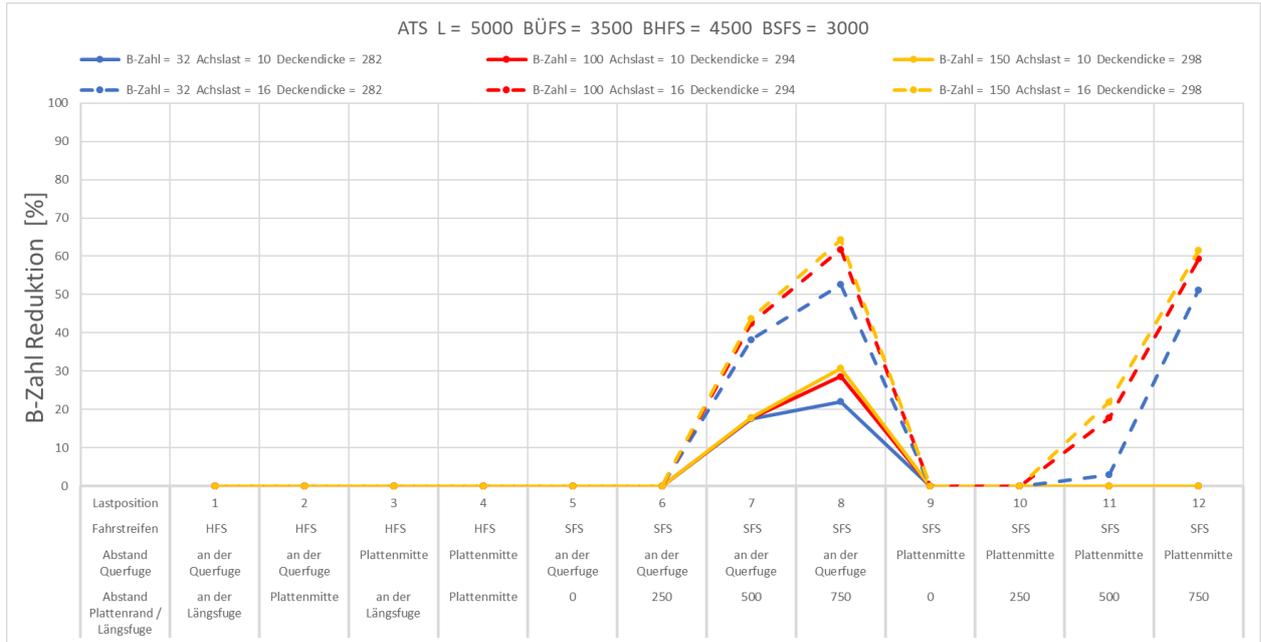


Bild 5-40: Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm

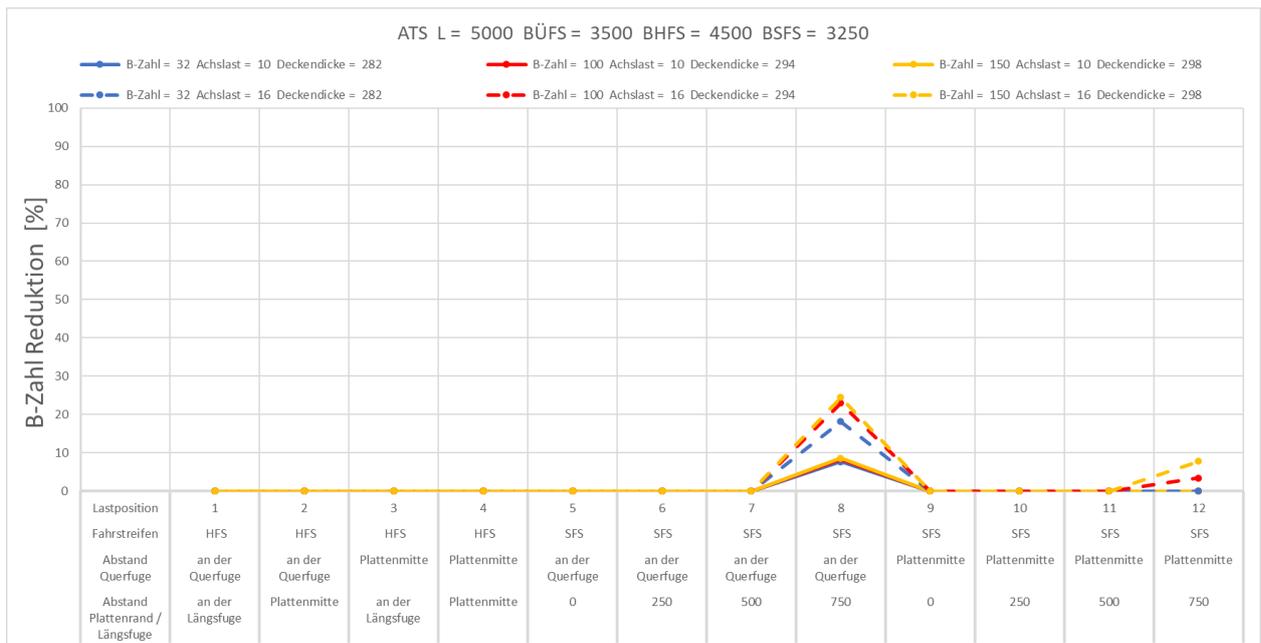


Bild 5-41: Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm

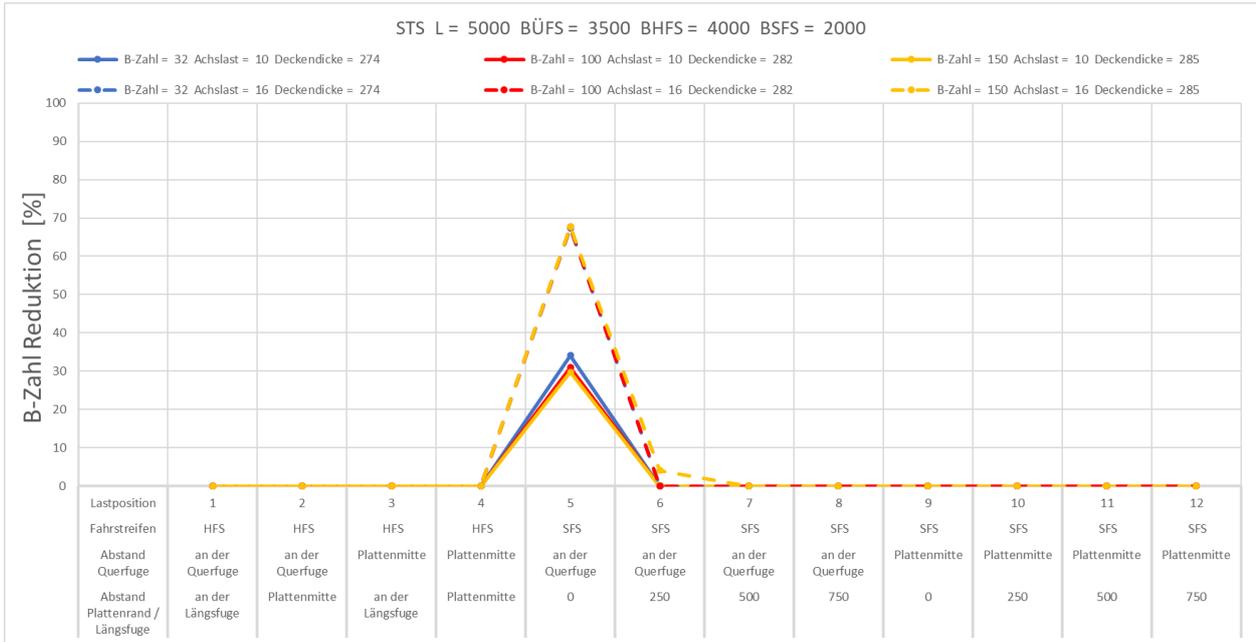


Bild 5-42: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

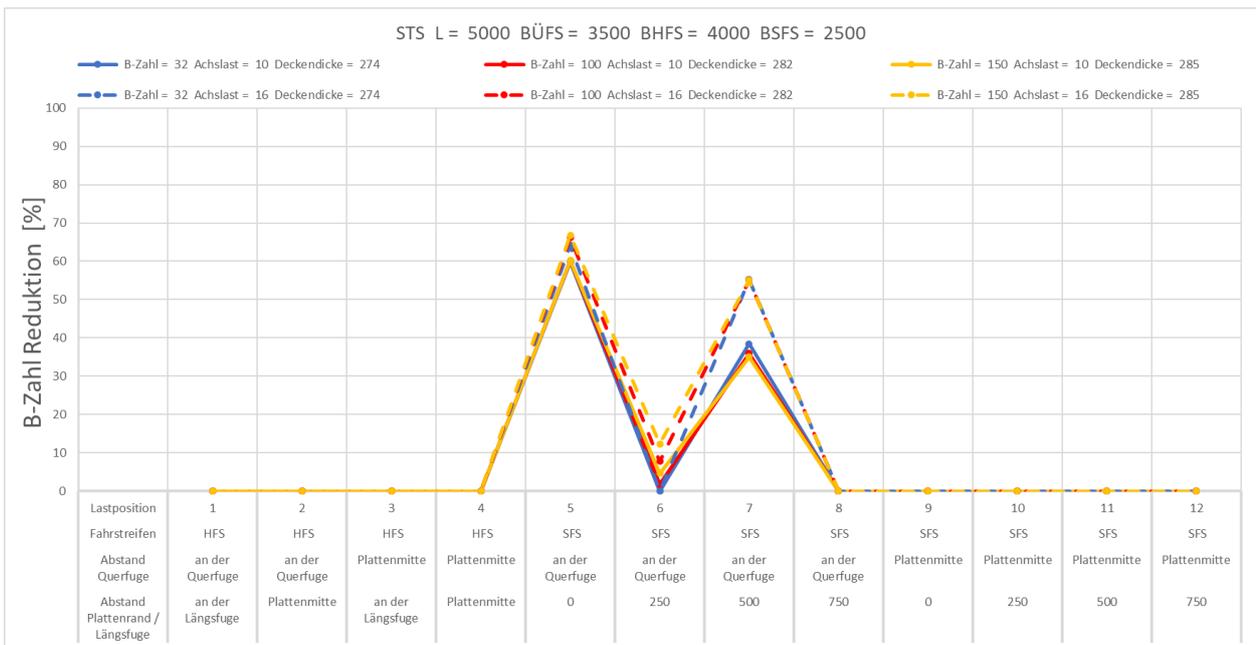


Bild 5-43: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

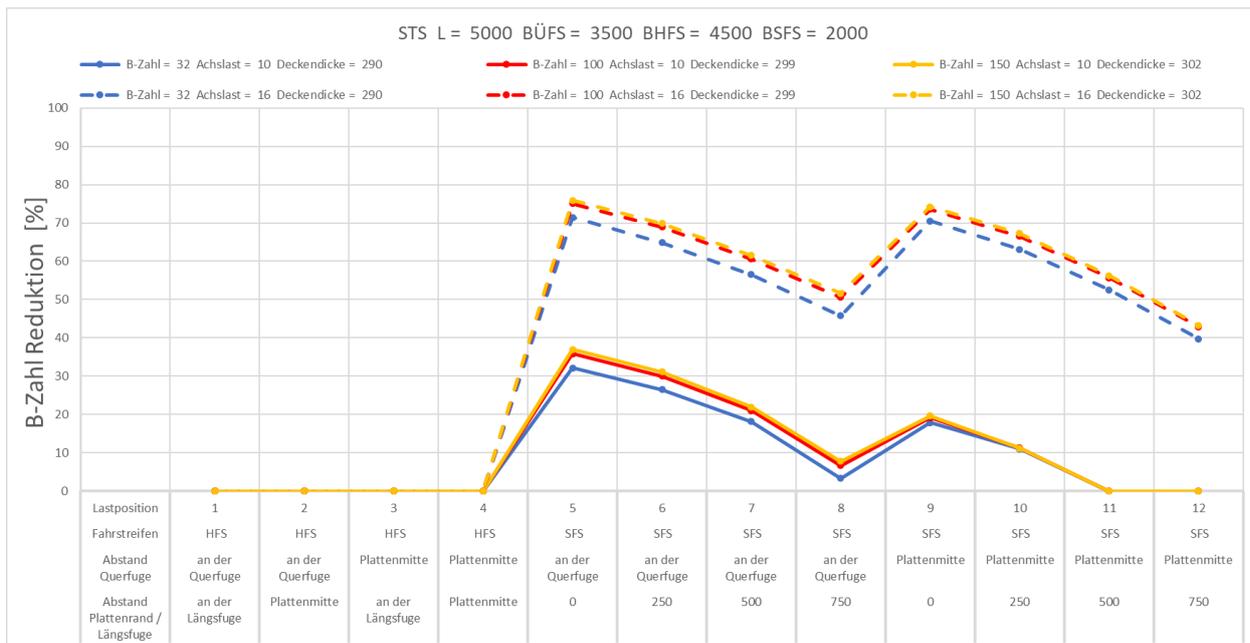


Bild 5-44: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

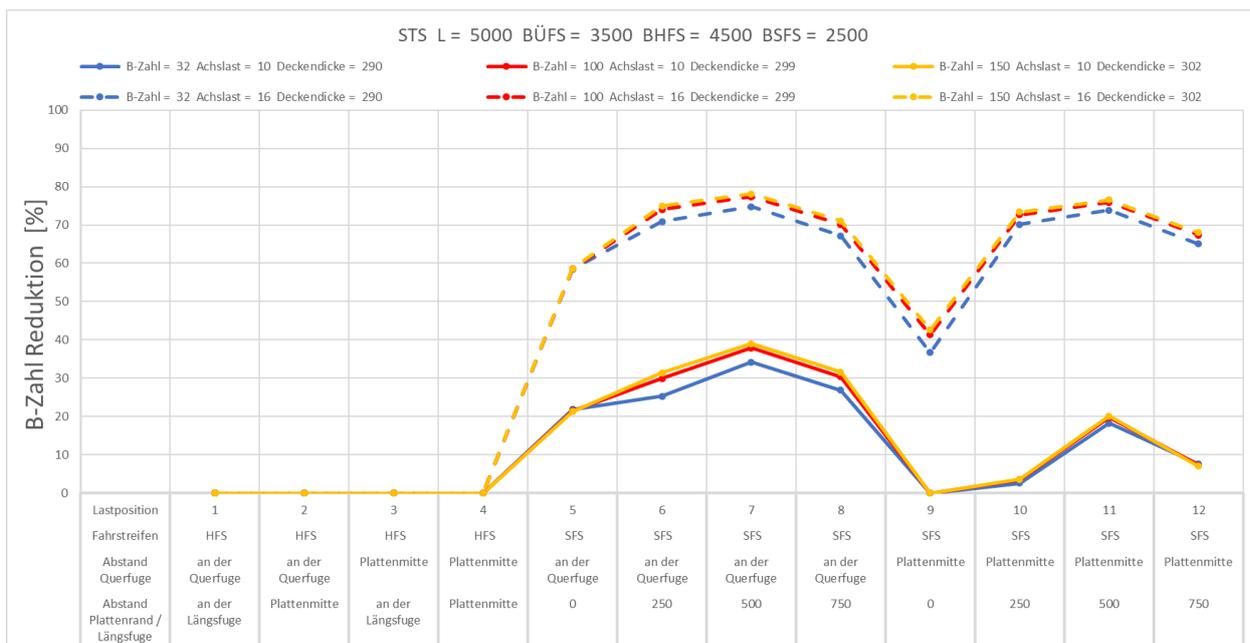


Bild 5-45: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

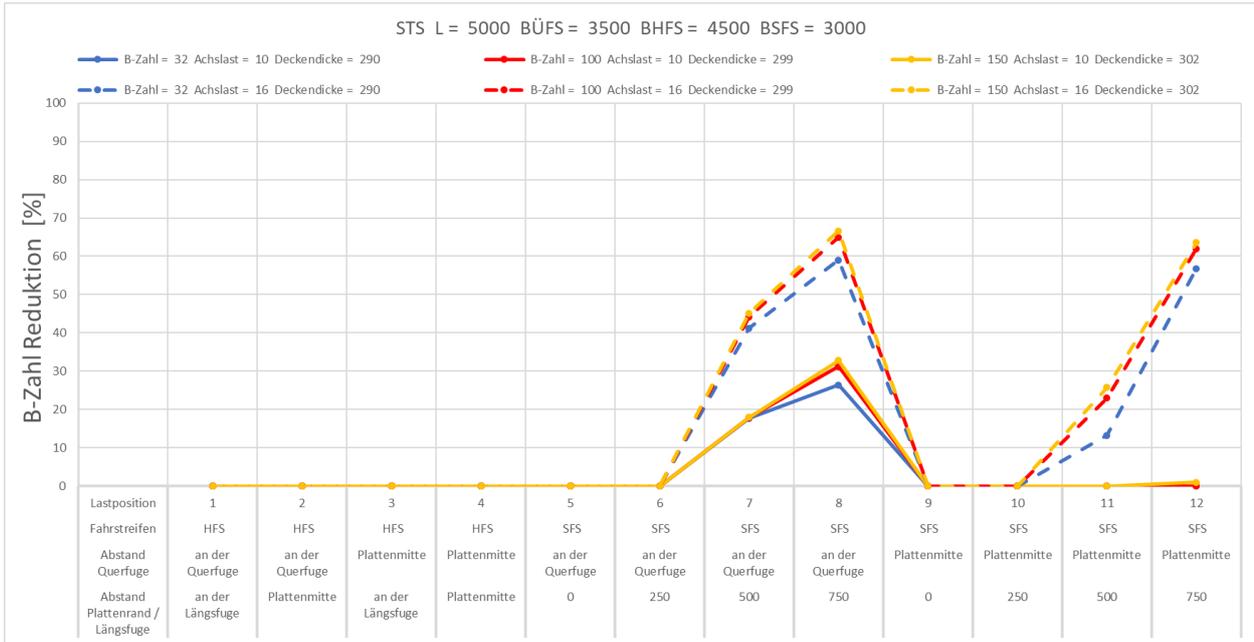


Bild 5-46: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrtstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrtstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrtstreifen=3000 mm

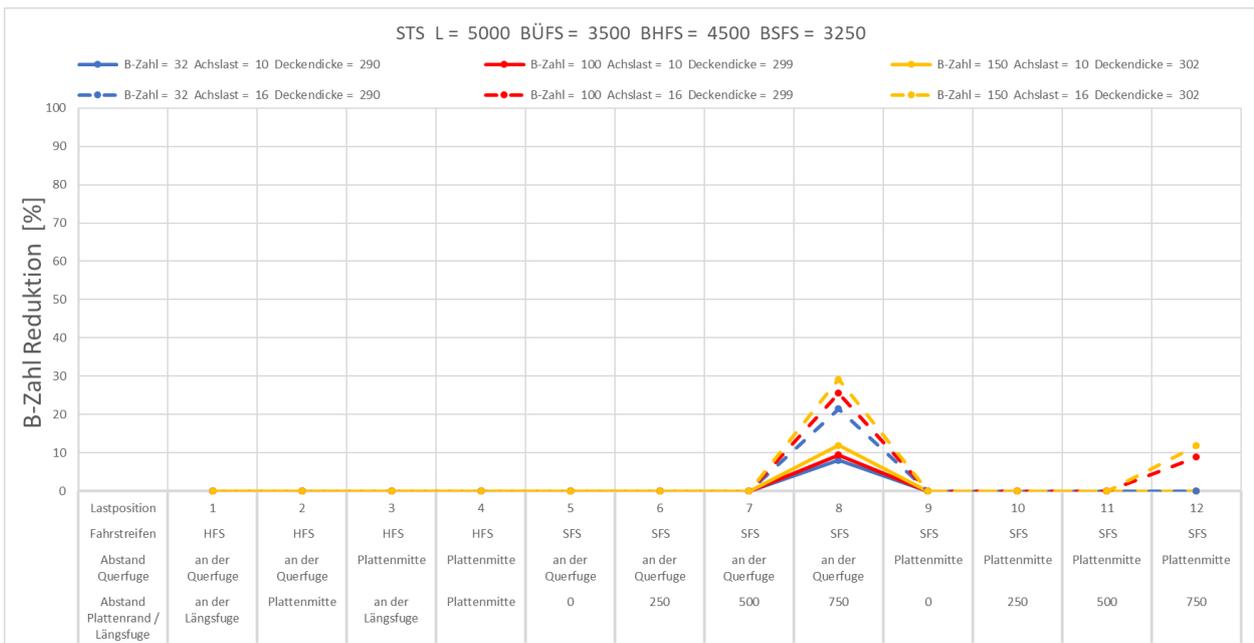


Bild 5-47: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrtstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrtstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrtstreifen=3250 mm

5.5.3 Schlussfolgerungen für Bestandsstrecken bzgl. der Befahrung von Randbereichen

Sollen Bestandsstrecken in Randbereichen befahren werden, ist der während der Nutzungsdauer vorgesehene Anteil des Schwerverkehrs, der über den Randbereich (den Seitenstreifen) geführt werden soll, von übergeordneter Bedeutung.

Die Auswertungen in Kapitel 5.5.2 zeigen, dass bei guter Lagerung der Platten bis zu 20 % des im Lebenszyklus des Oberbaus vorgesehenen Schwerverkehrs über den Seitenstreifen geführt werden kann.

Des Weiteren zeigen Auswertungen, dass bei ungestörter, zum Hauptfahrstreifen äquivalenter Lagerung bis 40 % des im Lebenszyklus des Oberbaus vorgesehenen Schwerverkehrs über den Seitenstreifen geleitet werden kann.

Aufgrund nicht modellierbarer, potentieller Erosion der Tragschichten in den Randbereichen infolge der höheren Exposition im Bankettbereich wird empfohlen, bis zu maximal 10 % des im Lebenszyklus des Oberbaus vorgesehenen Schwerverkehrs, bei augenscheinlich gutem Zustand des Seitenstreifens, über diesen ohne weitere Prüfung zu führen.

Sollen 10-20 % des im Lebenszyklus des Oberbaus vorgesehenen Schwerverkehrs über den Seitenstreifen geleitet werden, ist eine Bewertung der Lagerungsbedingungen und der Zustand der Tragschichten im Seitenstreifen vorzunehmen.

Sollen mehr als 20 % des im Lebenszyklus des Oberbaus vorgesehenen Schwerverkehrs über den Seitenstreifen geleitet werden, ist eine Substanzbewertung in Seitenstreifen und Hauptfahrstreifen wiederholt vorzunehmen, da neben der Degradation des Seitenstreifens auch die längere Nutzungsdauer des Hauptfahrstreifens infolge reduzierter Lastwechselzahlen in die Bewertung mit einfließen sollten.

Werden im Rahmen der Untersuchung der Bestandsstrecken eine Mehrdicke im Seitenstreifen von 2,5 cm gegenüber einer Dimensionierung mit RDO Beton sowie gute Auflagerungsbedingungen im Seitenstreifen festgestellt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Randbefahrung ohne Minderung der normativen Nutzungsdauer erfolgen kann. Der Zustand der Seitenstreifen und deren Lagerungsbedingungen ist jeweils nach 20 % der vorgesehenen Lastwechsel zu überprüfen.

5.6 Schlussfolgerungen für Neubauten bei vorgesehener Befahrung von Randbereichen

5.6.1 Änderung der Plattengeometrie

Eine Erhöhung der Deckendicke um 2,5 cm reduziert für alle hier berechneten Varianten die Spannungen im Seitenstreifen so weit, dass von einer unverminderten Lebensdauer im Seitenstreifen ausgegangen werden kann. Dabei wird jedoch auch die Lebensdauer im Hauptfahrstreifen signifikant erhöht, sodass eine gezielte Dimensionierung hinsichtlich der angestrebten Aufteilung des Schwerverkehrs erfolgen sollte.

Ebenfalls kann die Plattenlänge reduziert werden, um das Spannungsniveau und damit den Auslastungsgrad zu senken. Dies resultiert in geringeren B-Zahl Reduktionen bzw. keinen B-Zahl Reduktionen gegenüber dem Ausgangssystem (siehe Vergleich von 5,0 m und 3,5 m langen Platten in Bild 5-48 bis Bild 5-51).

Da nur Teile des Schwerverkehrs über den Seitenstreifen geleitet werden, kann (bei Sicherstellung der Lagerungsbedingungen) auf die Erhöhung der Deckendicke teilweise verzichtet werden. Auch in diesem Fall ist die ggf. resultierende erhöhte Nutzungsdauer im Hauptfahrstreifen zu beachten.

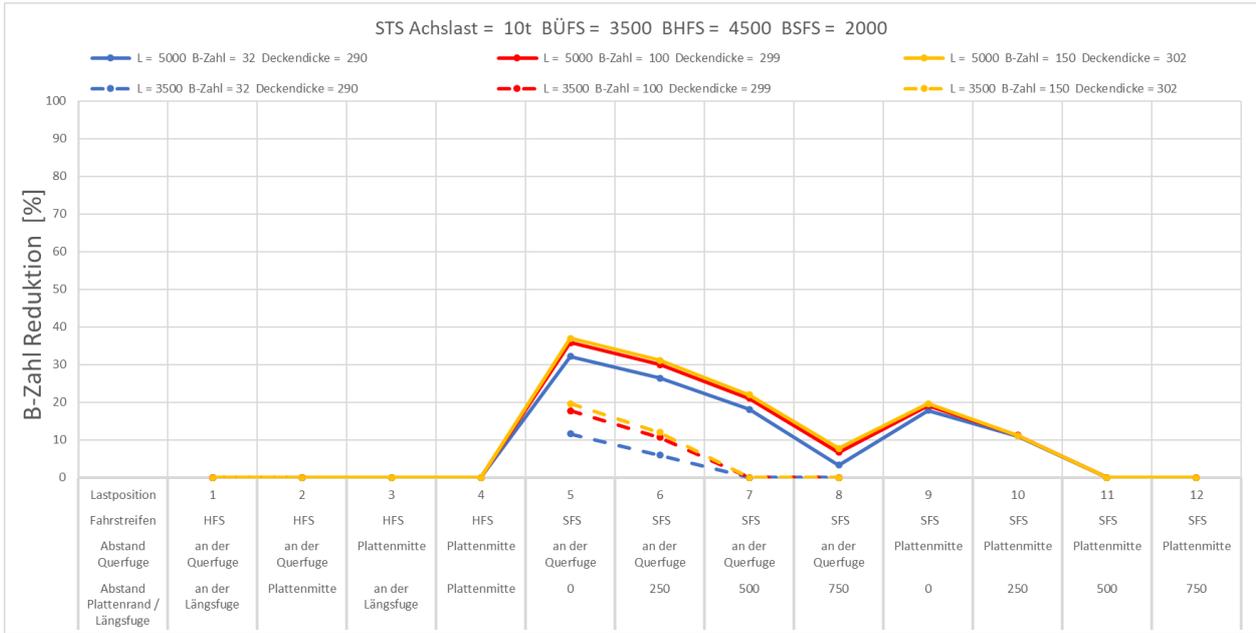


Bild 5-48: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm

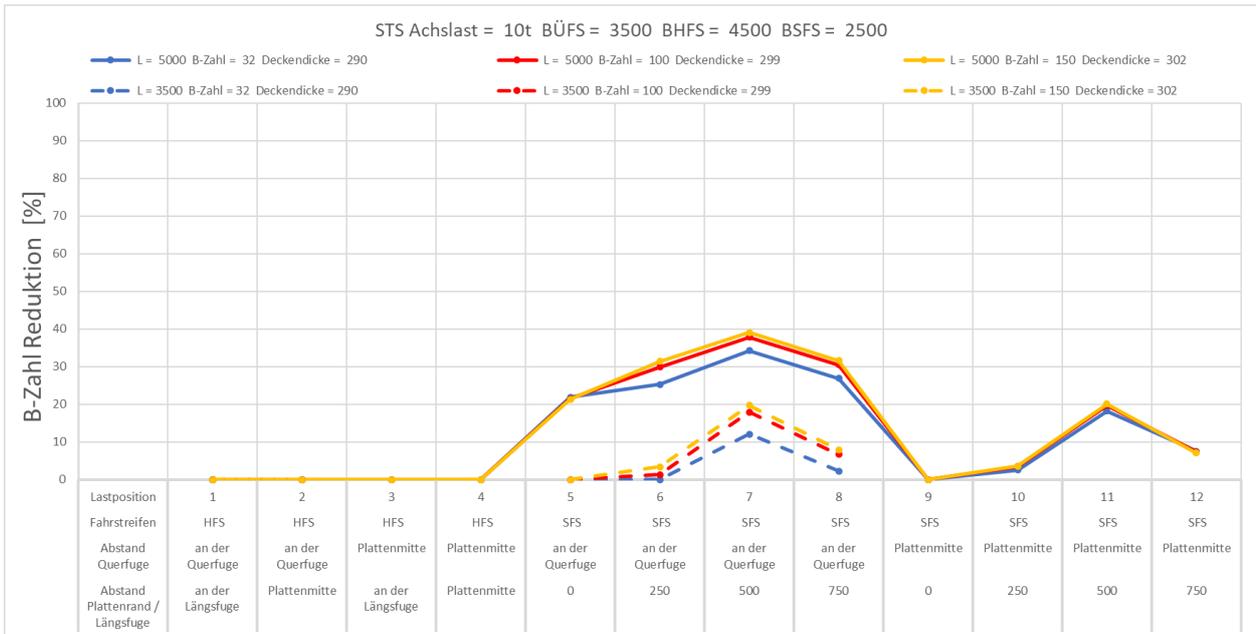


Bild 5-49: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm

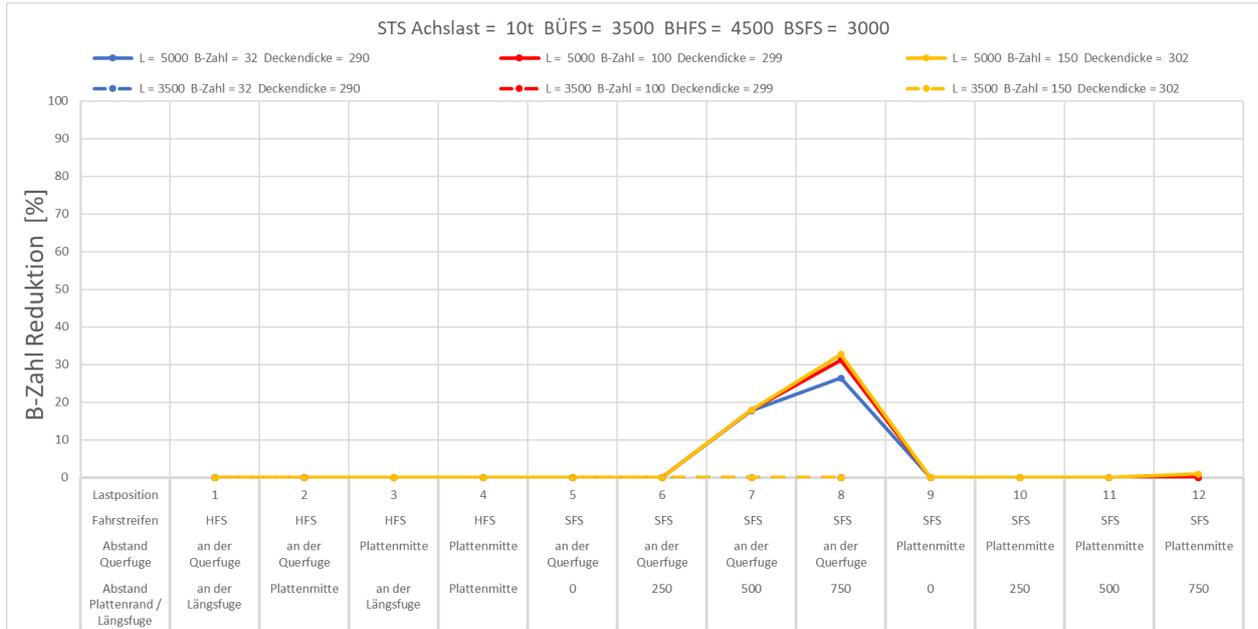


Bild 5-50: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm

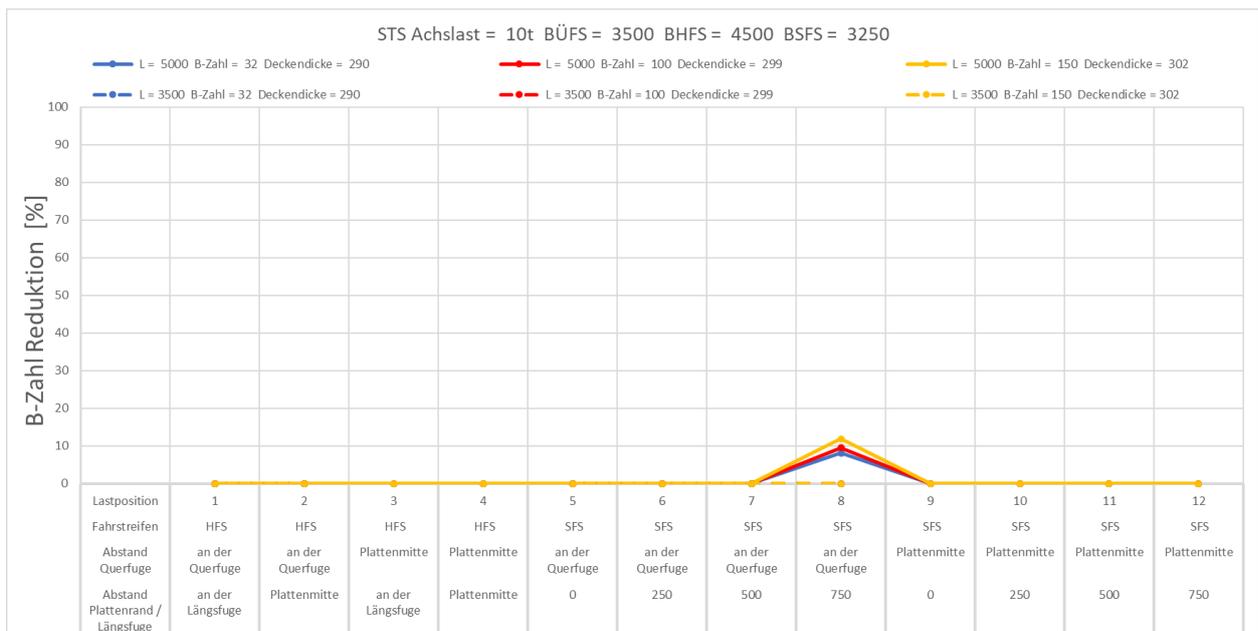


Bild 5-51: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm

5.6.2 Ausbildung einer Voute zum Fahrbahnrand

Eine konstruktive Variante, etwaige erhöhte Randspannungen zu verringern, besteht in der Ausbildung einer Voute. Dabei wird ein Teil der äußeren Platten zum freien Rand hin keilförmig dicker ausgebildet. Nach den vorliegenden Berechnungen müsste die Randplatte am Ende mindestens 3 cm dicker sein als die regulären Platten. In der Praxis würde das bedeuten, dass die Oberseite der Tragschicht im Randbereich entsprechend abgeknickt hergestellt werden müsste. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass die Querneigung der Fahrbahn unterschiedlich ausgebildet ist, das heißt, z. B. im Bereich von Linkskurven zum Mittelstreifen hin abfällt und in Verwindungsbe-

reichen kontinuierlich wechselt. Durch ein Abknicken der Tragschicht würden somit Bereiche entstehen, bei denen die Entwässerung der Tragschicht nicht oder nur noch unzureichend gegeben ist.

Aus den genannten Gründen wurde die Variante einer Voutenausbildung verworfen.

5.6.3 Anbindung an Betonschutzwände

Als weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Randbereiches wurde eine Verankerung der Betondecke mit einem Fundament für eine Betonschutzwand in Betracht gezogen. Es wird angenommen, dass durch die feste Verbindung ein Spannungsabtrag in das tiefer gegründete Fundament der Betonschutzwand stattfindet und dadurch der Randbereich entlastet wird. Dafür wird konstruktiv das Fundament direkt an Betondecke, Tragschicht und Frostschuttschicht gesetzt. Die Betondecke wird mit Anker am Fundament befestigt (siehe Bild 5-52).

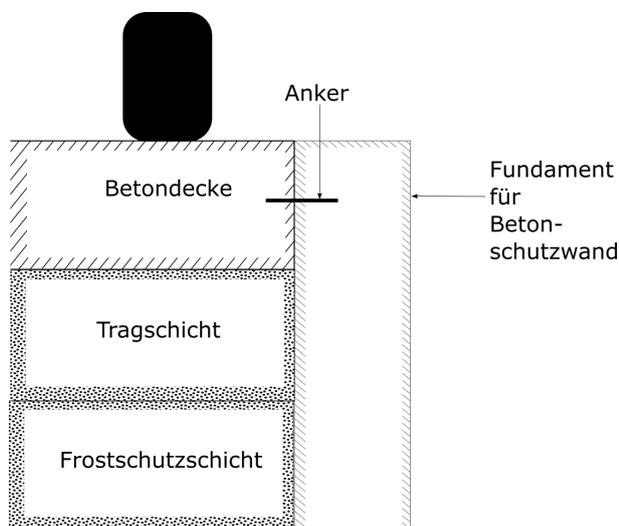


Bild 5-52: Konstruktive Ausbildung

Die Bewertung der Konstruktion hinsichtlich der Befahrbarkeit des Randbereiches erfolgt über die Modellierung mittels Finite-Element-Methode. Als Grundlage für das Modell dient der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Ansatz. Die Abbildung der zusätzlichen Verankerung erfolgt durch den Einbau des Ankers mittels eines Balkenelements. Der Anker wird außerhalb der Betonplatte starr verankert in vertikaler Richtung und in Fahrtrichtung durch vorgeschriebene Randbedingungen.

Zur Auswertung wurden 84 Berechnungsvarianten ausgewählt, welche bereits besonders niedrige äquivalente B-Zahlen bzw. eine niedrige Belastbarkeit aufweisen. Für jede Variante wird anschließend die höchste Hauptspannung in den befahrenen Betonplatten ermittelt. In Bild 5-53 sind die Spannungsdifferenzen im Vergleich mit den Simulationen ohne Fundament aufgetragen. Die Differenz ist farblich markiert.

Die bei Verankerung mit der Betonschutzwand entstehenden Lagerungsbedingungen können in Kombination mit den im Seitenstreifen vorhandenen Plattengeometrien zu erhöhten Spannungen am Plattenrand führen (siehe Bild 5-54). Im linken Bereich (grün) sind die Spannungen ca. 2 % (0,02 bis 0,05 MPa) niedriger (das Fundament mindert in diesen Fällen die Belastung). Im rechten Bereich (rot) von Bild 5-53 sind die Spannungen teilweise um mehr als 20 % erhöht (0,15 und 0,67 MPa). Dies tritt insbesondere bei randnaher Belastung der Betondecke auf.

Die Überführung des Plattenrands bei Freigabe des Randbereiches ist eine nicht selten auftretende Situation und nicht vermeidbar. Die Verringerung der Spannungen und eine potentielle Verlängerung des Nutzungszeitraums kann daher durch Wahl dieser Konstruktion nicht sichergestellt werden, da hohe Spannungsspitzen bei dieser Konstruktionsform auftreten können. Des

6 Vorschläge zur Einarbeitung in die Regelwerke

6.1 Asphaltbauweise

Bei Anwendung der [RStO 12] wird empfohlen, unter Punkt 3.5 Ergänzende Hinweise zur temporären Seitenstreifenfreigabe (TSF) folgendes zu ergänzen:

Ist bei Querschnitten in Asphaltbauweise eine temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) vorgesehen, sind in Abhängigkeit vom Abstand zwischen befestigtem Fahrbahnrand und Radspur (Randabstand) folgende Fälle zu unterscheiden:

- Beträgt der Abstand zwischen befestigtem Fahrbahnrand und Radspur (Randabstand) mindestens 0,5 m ist eine dauerhafte Seitenstreifenfreigabe möglich.
- Bei einem Randabstand von weniger als 0,5 m bis minimal 0,25 m ist für eine dauerhafte Seitenstreifenfreigabe der Befestigungsaufbau im Seitenstreifen eine Bauklasse höher als im Hauptfahrstreifen zu wählen. Alternativ ist eine temporäre Seitenstreifenfreigabe mit Verlagerung von maximal 40% des Schwerlastverkehrs möglich.
- Eine planmäßige Befahrung mit weniger als 0,25 m Randabstand ist nicht vorzusehen.

Bei Anwendung der [RDO Asphalt 09] werden folgende Ergänzungen empfohlen:

Abschnitt 6.1

- Für Querschnitte mit vorgesehener temporärer Seitenstreifenfreigabe (TSF) sind die Beanspruchungen bei einem Abstand zwischen befestigtem Fahrbahnrand und Radspur (Randabstand) von weniger als 0,5 m bis minimal 0,25 m auf Grundlage der Methode der Finiten Elemente zu berechnen. Das hierfür zu implementierende Modell des Oberbaus muss dabei den Randbereich der Straßenbefestigung einschließlich Bankett dreidimensional realitätsnah abbilden. Eine planmäßige Befahrung mit weniger als 0,25 m Randabstand ist nicht vorzusehen.

Abschnitt 7.1, dritter Anstrich

- Für Asphalttschichten ist der Ermüdungsnachweis (Rissbildung) an der Stelle der höchsten Biegezugbeanspruchung zu führen. Im Regelfall liegt dieser Punkt an der Unterseite der Asphalttragschicht. Im Fall der planmäßigen Randbefahrung (Abstand zwischen befestigtem Fahrbahnrand und Radspur weniger als 0,5 m bis minimal 0,25 m) ist die Stelle der höchsten Biegezugbeanspruchung im Zuge der Berechnungen zu ermitteln.

6.2 Betonbauweise

Bei Anwendung der [RStO 12] wird empfohlen, den Punkt 3.3. wie folgt zu ergänzen:

Soll bei Querschnitten mit Seitenstreifen eine temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) erfolgen, sind nachfolgende Aspekte zu beachten:

- Bei einer Verlagerung von bis zu 10 % des Schwerverkehrs im 30-jährigem Nutzungszeitraum auf den Seitenstreifen sind keine besonderen Maßnahmen erforderlich.
- Geht die Nutzung durch den Schwerverkehr darüber hinaus, sollte die Deckendicke im gesamten Querschnitt um 3 cm erhöht werden.
- Soll bei Bestandsstrecken eine TSF erfolgen, ist bei einer angenommenen Verlagerung von mehr als 20 % des Schwerverkehrs auf den Seitenstreifen die strukturelle Substanz des Oberbaus [RDO Beton E 22] in diesem Bereich zu prüfen.
- Ist im Seitenstreifen während der normativen Nutzungsdauer mit einer Verlagerung > 20% des Schwerverkehrs auf den Seitenstreifen zu rechnen, ist eine rechnerische Dimensionierung nach den RDO Beton durchzuführen.

Alternativ kann diese Ergänzung auch in Punkt 3.5 (siehe Abschnitt 6.1 Asphaltbauweise) aufgenommen werden.

Für die [RDO Beton E 22] werden folgende Ergänzungen vorgeschlagen:

Bei einer vorgesehenen randnahen Befahrung durch Fahrzeuge des Schwerverkehrs ist eine gesonderte rechnerische Dimensionierung/Nachrechnung erforderlich. Dabei ist von erhöhten Querverteilungsfaktoren, insbesondere für die Längskante auszugehen.

Bei Bestandsstrecken kann mit dem Verfahren der [RSO Beton E 22] eine Nachrechnung erfolgen, wobei der Zustand des Oberbaus zuvor erfasst werden sollte.

7 Zusammenfassung

7.1 Asphaltbauweise

Unter Einbeziehung der Untersuchungsergebnisse dieses Projektes ist für die Regelquerschnitte nach [RAA 2008] unter der Maßgabe gleicher Nutzungsdauer für Hauptfahrstreifen- und Seitenstreifen eine dauerhafte Seitenstreifennutzung nach Tab. 4-10 möglich. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die erforderliche Ummarkierung möglich ist. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Beanspruchung und folglich auch die Nutzungsdauer bei einem Randabstand von mindestens 0,5 m gleich der Referenzvariante (3,5 m Randabstand) ist.

Wird der Randabstand von 0,5 m unterschritten, ist nur eine temporäre Seitenstreifenfreigabe möglich. Der zulässige Anteil des Schwerverkehrs auf dem Seitenstreifen ergibt sich dabei in Abhängigkeit vom realisierbaren Randabstand aus Bild 4-40. Im Ergebnis dieser Berechnungen können bei einem Randabstand von mindestens 0,25 m ca. 40 % des Schwerlastverkehrs über den Seitenstreifen geführt werden.

Mit einer größeren Dicke der Asphalttragschicht im Randbereich, zum Beispiel in Form einer Voute, kann dieser Anteil erhöht werden. Breite und Dicke der Voute können in Abhängigkeit von prognostizierter Beanspruchung und Materialeigenschaften mit dem in den [RDO Asphalt 09] beschriebenen Verfahren bei Anwendung der Methode der Finiten Elemente dimensioniert werden. Bei diesen Dimensionierungs- bzw. Prognoserechnungen müssen spezifische Sicherheitsbeiwerte und -faktoren für den Randbereich bestimmt werden (Kalibrierung des Verfahrens). Alternativ zu einer Voute in der Asphalttragschicht kann die Nutzungszeit durch einen Randstreifen mit größerer Dicke der Asphalttragschicht erhöht werden. Auch bei dieser Variante sind Besonderheiten bezüglich Entwässerung des Planums und profilgerechter Schichtenherstellung zu beachten.

In Bezug auf die im Abschnitt 4.5 untersuchten konstruktiven Maßnahmen ist der Herstellung einer Voute in der Asphalttragschicht die Vorzugsvariante zur Verbesserung der Nutzungszeit. Im Abschnitt 4.5 und 4.6 untersuchte Randeinfassungen bringen, im Verhältnis zum Herstellungsaufwand und Platzbedarf, nur geringen Nutzen und sind deshalb nicht zu empfehlen.

Mit Verweis auf vorgenanntes und auch aus sicherheitstechnischer Sicht ist zur Gewährleistung der Nutzungszeit einem ausreichenden Randabstand der Vorrang gegenüber konstruktiven Maßnahmen zu geben.

Eine direkte Befahrung des Randes führt, insbesondere für die Asphaltdeckschicht, zu erheblicher Reduzierung der Nutzungszeit und ist planmäßig nicht vorzusehen.

Diese Prognosen basieren auf der Untersuchung eines fiktiven, homogenen Streckenabschnittes mit gleichen Bedingungen über den gesamten Fahrbahnquerschnitt. Für den konkreten Nutzungsfall einer Bestandsstrecke wird grundsätzliche eine, im Hinblick auf die Sondernutzung modifizierte, Substanzbewertung nach den [RSO Asphalt 14] empfohlen.

Bei Planung von Neubaustrecken oder grundhaften Erneuerung ist das jeweilige Nutzungskonzept im Zuge der Dimensionierung nach den [RDO Asphalt 09] zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 4.2)

7.2 Betonbauweise:

Eine temporäre Seitenstreifenfreigabe ist prinzipiell in Abhängigkeit von vorhandener Querschnittsbreite der Regelquerschnitte nach [RAA 2008] bzw. [RAS Q 96] entsprechend Tab. 5-1 und Tab. 5-2 möglich (Ummarkierung vorausgesetzt). Bei der Betonbauweise ergeben sich die maßgebenden Hauptspannungen in Abhängigkeit von der Position der Lasteintragung (Abstand zum Plattenrand) und von der vorhandenen Plattengeometrie im Seitenstreifen. Die Berechnungen haben gezeigt, dass die höchsten Spannungen aber nicht immer dann auftreten, wenn die Last direkt am Plattenrand aufgebracht wird. Aus diesem Grund ist eine pauschale Aussage hinsichtlich einer dauerhaften bzw. temporären Nutzung in Abhängigkeit des Randabstandes der Befahrung wie bei der Asphaltbauweise nicht möglich. Vielmehr ist die Verkehrsbelastung auf dem Seitenstreifen und somit die Belastung der Platten des Seitenstreifens sowie der Zustand der Tragschicht von Bedeutung.

Bei der temporären Nutzung von Randbereichen sind daher grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Planung der temporären Nutzung bei Neubaustrecken oder grundhaften Erneuerung

Es wurde gezeigt, dass bei Sicherstellung der dauerhaften Lagerung sowie mit gezielter Steuerung des Schwerverkehrsanteils auf dem Seitenstreifen und einer bedarfsgerechten Erhöhung der Deckendicke, eine Nutzung des Seitenstreifens bei unveränderter normativer Nutzungsdauer erfolgen kann.

Für diesen Fall wird eine zusätzliche rechnerische Dimensionierung für den Seitenstreifen nach den [RDO Beton E 22] empfohlen. Dabei ist für die Verkehrsbelastung der Fall zu betrachten, dass der maximal denkbare Anteil des Schwerverkehrs auf den Seitenstreifen wechselt. Optimierungspotential besteht in der Wahl der Plattengeometrie und der Lage der Längsfugen in Relation zur Fahrbahnmarkierung. Mit Anpassung/Optimierung der Plattengeometrie im Seitenstreifen ergeben sich ggf. auch andere Plattengeometrien über den gesamten Querschnitt.

2. Möglichkeit der Umwidmung von Bestandsstrecken ohne baulichen Eingriff.

Bei der Nutzung der Randbereiche von Bestandsstrecken wird grundsätzlich eine Nachrechnung nach dem Verfahren der [RSO Beton E 22] empfohlen. Dabei sind die angetroffenen Randbedingungen, wie die Schichtenfolge und Schichtdicken des Oberbaus, Plattengeometrie und die mechanischen Betonparameter zu berücksichtigen. Ebenso spielt der Zustand des Oberbaus, insbesondere der Betondecke, eine wesentliche Rolle.

Bei einer Verlagerung von weniger als 10% des im Nutzungszeitraum vorgesehenen Schwerverkehrs ist die Seitenstreifennutzung unproblematisch, wenn der Zustand der Betondecke als gut bezeichnet werden kann (Ausfallrate im Hauptfahrstreifen < 5% (siehe [RSO Beton E 22])).

Literatur

Richtlinien und Regelwerke	
[ARS 20/2002]	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 20/2002, Umnutzung des Standstreifens (Seitenstreifens) für den fließenden Verkehr, VkB1. 2002, S.691, Verkehrsblatt-Verlag Borgmann GmbH & Co. KG, Dortmund, 2002
[ASR A5.2 2018]	Technische Regeln für Arbeitsstätten, Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege auf Baustellen im Grenzbereich zum Straßenverkehr – Straßenbaustellen, ASR A5.2, Ausgabe Dezember 2018
[RAA 2008]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, RAA 2008, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, FGSV Verlag, Köln, 2008
[RAL 2012]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, RAL 2012, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2012
[RDO Asphalt 09]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, RDO Asphalt 09, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2009
[RDO Beton 09]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, RDO Beton 09, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, FGSV Verlag, Köln, 2009
[RDO Beton E 22]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, RDO Beton 22, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, FGSV Verlag, Köln, Entwurf 2022, unveröffentlicht
[RMS-1]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Markierung von Straßen, Teil 1: Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen, RMS-1, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, FGSV Verlag, Köln, 1993
[RMS-2]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Markierung von Straßen, Teil 2: Anwendung von Fahrbahnmarkierungen, RMS-2, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, FGSV-Verlag, Köln, 1980
[RSA 1995]	Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, 6. Verbesserte Auflage Oktober 2002, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 1995
[RSO Asphalt E 15]	Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise, RSO Asphalt 15, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, FGSV Verlag, Köln, Entwurf 2015, unveröffentlicht
[RSO Beton E 22]	Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen mit unbewehrter Betondecke, RSO Beton, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, FGSV Verlag, Entwurf 2022, unveröffentlicht
[RStO 2012]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, RStO 2012, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2012

[TP Asphalt Teil 24]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 24 Spaltzug-Schwellversuche – Beständigkeit gegen Ermüdung, Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen, FGSV Verlag, Köln, 2018
[TP Asphalt Teil 26]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 26 Spaltzug-Schwellversuche – Bestimmung der Steifigkeit, Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen, FGSV Verlag, Köln, 2018
[ZTV Asphalt-StB]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, ZTV Asphalt-StB. FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2007, Fassung 2013
Sonstige	
[ADtoPave 2020]	ADtoPave Version 2018.01.013, Alexander Zeißler, IDAV GmbH, Dresden
[BAST 2017]	Bundesanstalt für Straßenwesen: Anlagen zur Verkehrsbeeinflussung auf Bundesfernstraßen, verfügbar unter: https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v5-verkehrsbeeinflussungsanlagen.html , gefunden: 07.08.2019
[CLAU 2021]	Clauß, M.: Erweiterte Analyse der thermischen Zustände in Straßenbefestigungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Einflüsse und stoffspezifischer Materialparameter, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2021
[DAV 2001]	Schäfer, V.: Schichtenverbund, Nähte, Anschlüsse und Randausbildung, Leitfaden des Deutschen Asphaltverbandes, Deutscher Asphaltverband e.V., Bonn, 2001
[FE 02.0367/2013/EGB]	Aspekte für die temporäre Seitenstreifennutzung auf Autobahnen, 2. Zwischenbericht, laufendes Forschungsthema
[FE 08.0253/2017/ERB]	Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf der duraBAST“, laufendes Forschungsthema
[Geistefeldt, Riedl 2013]	Geistefeldt, J. / Riedl, C.: Bundesverkehrswegeplan 2015 – Machbarkeit und Wirksamkeit von Zwischenlösungen, Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, Bochum, 2013
[Kathmann, Schroeder 2017]	Kathmann, T. / Schroeder, S.: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz, FE 83.0028/2013, Schlussbericht, DTV-Verkehrsconsult GmbH, Aachen, 2017
[Neutag 2005]	Neutag, L.: Berücksichtigung verschiedener Alterungsstufen für die Ermüdung von Asphalttragschichtmischgut auf die analytische Bemessung im Rahmen von Funktionsbauverträgen/ Betreibermodellen, Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, 2005
[Numrich 2003]	Numerich, R.: Modellierung des nichtlinear-elastischen Verformungsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2003
[Oeser et al. 2015]	Oeser, M. / Wang, D. / Liu, P. / Wellner, F. / Reinhardt, U.: Verbesserung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen über ein Finite Elemente Modell, FE 04.0259/2012/NGB, Entwurf Schlussbericht, 2015
[Schäfer 2001]	Schäfer V.: asphalt Leitfaden Schichtenverbund, Nähte, Anschlüsse, Randausbildung, Deutscher Asphaltverband e.V., 2001

[Stöckner et al. 2019]	Stöckner, M. / Loba, S. / Brzuska, A / Wellner, F. / Blasl, A. / Sommer, V. / Krause, G. / Komma, C.: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums, FE 04.0207/2007/MGB, Schlussbericht, 2019
[Uhlig 2019]	Uhlig, W.: Grundlagen für Lastannahmen zur Dimensionierung von Straßenbefestigungen, Dissertation, TU Dresden, 2019
[Villaret et al. 2019]	Villaret, S. / Kiehne, A. / Riwe, A. / Villaret, K.: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe S: Straßenbau (127), Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2019
[Villaret et al. 2019]	Villaret, S. / Kathmann, T. / Ueckermann, A. / Riwe, A. / Oeser, M. / Schroeder, S. / Villaret, K.: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung, FE 04.0285/2014, laufendes Forschungsthema
[Vögele 2012]	Joseph Vögele AG, VÖGELE Einbaufilbel, Joseph Vögele AG 2012
[Wellner et al. 2007]	Wellner, F. / Leutner, R. / Oeser, M. / Weise, C. / Jähnig, J. / Lorenzl, H. / Schindler, K. / Mollenhauer, K. / Nolle, B. / Zander, U. / Rabe, R.: Nachhaltiger Straßenbau – Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen, Schlussbericht, Bergisch-Gladbach, 2007
[Wellner et al. 2015]	Wellner, F. / Hristov, B. / Wistuba, M. / Isailovic, I. / Büchler, S.: Zyklische Schersteifigkeits- und Scherermüdungsprüfung zur Bewertung und Optimierung des Schichtenverbundes in Straßenbefestigungen aus Asphalt, IGF- Vorhaben Nr. 17634 BG der Forschungsvereinigung Deutsches Asphaltinstitut (DAI) e.V., gefördert durch AIF/IGF und BMWI, 2015
[Wellner 2019]	Wellner, F.: „Vorlesungsskript zum Modul BIW 2-07“, Professur für Straßenbau, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden (2019)

Bilder

Bild 2-1: Ausschnitte aus dem Projektplan Verkehrstelematik 2015, links: Raum München, rechts: Raum (Mainz und) Frankfurt [Karte, Projektplan Verkehrstelematik, 2015]	18
Bild 2-2: Vertikale Druckbeanspruchung durch Verkehr, horizontale (Biege-) Druckbeanspruchung an der Oberseite der Asphaltbefestigung durch Verkehr und Temperatur	19
Bild 2-3: Vertikale Druckbeanspruchung durch Verkehr, horizontale (Biege-) Zugbeanspruchung an der Unterseite der Asphalttragschicht durch Verkehr und Temperatur	19
Bild 2-4: Vertikale Kontaktdruckspannung (Rad – Asphaltdeckschicht) und mittlere vertikale Druckspannung in den Asphaltsschichten	20
Bild 2-5: Berechnungsbeispiel aus REFEM mit Zug- und Druckspannung in einer Asphaltbefestigung	20
Bild 2-6: Querrisse im Seitenstreifen [Foto Villaret]	21
Bild 3-1: Tagesganglinien Verkehr werktags Ø 2018 getrennt für PKW, LKW und Summe KFZ	24
Bild 3-2: DTV ^(SV) 2018 für den 1. Fahrstreifen der Zählstellen	26
Bild 3-3: Lasteintragungspunkte 3-fach Achse	28
Bild 4-1: Relative Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperatur, Temperaturzone 3 [RDO Asphalt 09]	30
Bild 4-2: Achslastkollektiv BAB Fernverkehr der RDO Asphalt 09 [RDO Asphalt 09]	30
Bild 4-3: Hauptkurven (links) und Ermüdungsfunktionen (rechts) Asphaltdeckschichtgemische; blau: Frisch, rot: Bestand	31
Bild 4-4: Hauptkurven (links) und Ermüdungsfunktionen (rechts) Asphaltbinderschichtgemische; blau: Frisch, rot: Bestand	31
Bild 4-5: Hauptkurven (links) und Ermüdungsfunktionen (rechts) Asphalttragschichtgemische; blau: Frisch, rot: Bestand	32
Bild 4-6: Ausgewählte Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische	33
Bild 4-7: Ausgewählte Hauptkurven der Asphaltbinderschichtgemische	33
Bild 4-8: Ausgewählte Hauptkurven der Asphalttragschichtgemische	34
Bild 4-9: Ausgewählte Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeckschichtgemische	35
Bild 4-10: Ausgewählte Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschichtgemische	35
Bild 4-11: Ausgewählte Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschichtgemische	36
Bild 4-12: Schichtdicken der Asphaltbefestigung für eine Bk100 nach den RStO 2012, Tafel 1, Zeile 1 [RStO 2012]	37
Bild 4-13: Beispielhafter Aufbau einer Befestigung [RStO 2012]	38
Bild 4-14: Klassenwahrscheinlichkeiten für die Klassenmittenfunktionen der temperaturabhängigen Steifigkeitsfunktionen aller Asphaltsschichten (links) und der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht (rechts)	39
Bild 4-15: Rücktransformierte Klassenmittenfunktion (Steifigkeit) der Asphaltdeckschicht ADS_8 für die Klassen 1, 2 und 3	40

Bild 4-16: Rücktransformierte Klassenmittenfunktion (Steifigkeit) der Asphaltbinderschicht ABS_2 für die Klassen 1, 2 und 3.....	40
Bild 4-17: Rücktransformierte Klassenmittenfunktion (Steifigkeit) der Asphalttragschicht ATS_5 für die Klassen 1, 2 und 3.....	41
Bild 4-18: Rücktransformierte Klassenmittenfunktion (Ermüdung) der Asphalttragschicht für die Klassen 1 bis 7	41
Bild 4-19: Befestigungsaufbau für BK 100 nach RSTO 2012 Tafel1, Zeile1, (Referenzmodell)	42
Bild 4-20: Modellaufbau des Referenzmodells: Asphaltdeckschicht: orange, Asphaltbinderschicht: grün, Asphalttragschicht: rot, Frostschutzschicht: braun, Bodenschicht: grau, Bankett: blau.....	43
Bild 4-21: Schematische Darstellung des Kernbereiches des FE-Modells	44
Bild 4-22: Elastische Dehnung im Kernbereich, oben: Seitenabstand Belastung 0,00 m, unten: Seitenabstand Belastung 0,75 m	45
Bild 4-23: Position des maßgebenden Nachweispunktes (Rot = DS; Blau = BS, grün = TS) in Abhängigkeit von der Straßenkonstruktion (Spalten: Bauweise nach RSt12, mit Voute, mit Beton L-Element) und Laststellung (Zeilen: 0 m ,0,25m 0,5 m, 0,75 m, 3,5 m),	47
Bild 4-24: Vergleichsrechnung für das Referenzmodell, Position des Lasteintrages und Lage des Nachweispunktes	48
Bild 4-25: Gegenüberstellung der für gleiche Beanspruchung im Nachweispunkt berechneten Dehnungen	48
Bild 4-26: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichung zwischen den Berechnungen mit ABAQUS / ADtoPave.....	48
Bild 4-27: Gegenüberstellung der ABAQUS / ADtoPave bestimmten Ausfallwahrscheinlichkeit für die Asphalttragschicht des Refenzmodells	49
Bild 4-28: Entwicklung des Ermüdungsstatus in Abhängigkeit vom Abstand des Lasteintragungspunktes zum Fahrbahnrand	50
Bild 4-29: Entwicklung der Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Nutzungsdauer und Asphaltsschicht; Anzahl der jährlichen Achsübergänge: 1.000.000; Zeile 1 – 4: Randabstand Lasteintrag 0,00; 0,25; 0,5; 0,75 m	51
Bild 4-30: Position der maßgebenden Nachweispunkte in Abhängigkeit des Seitenabstandes, oben links: 0,00 m, oben rechts: 0,25 m, unten links: 0,50 m, unten rechts: 0,75 m	52
Bild 4-31: Befestigungsaufbau für BK 100 nach RSTO 2012 Tafel1, Zeile1, mit Böschungswinkel α und Versatz der Asphaltsschichten	54
Bild 4-32: Auswirkung unterschiedlicher Randausbildungen auf den rel. Ermüdungsstatus der Asphaltsschichten, von oben nach unten ADS, ABS ATS, Angaben zum Schichtenversatz in mm, Bezugsgröße: Ermüdungsstatus für das Referenzmodell (Asphaltsschichten liegen bündig übereinander, Böschungswinkel 52°) Randabstand des Lasteintragungspunktes 0,0 m	56
Bild 4-33: Abmessungen der untersuchten Varianten einer Voute in der ATS	57

Bild 4-34: Auswirkung unterschiedlicher Geometrie der Voute auf den rel. Ermüdungsstatus der Asphaltsschichten, Bezugsgröße: Ermüdungsstatus für das Referenzmodell (keine Voute), Randabstand des Lasteintragungspunktes 0,0 m.....	57
Bild 4-35: Asphaltbefestigung mit Voute in der Asphalttragschicht	58
Bild 4-36: Randeinfassung mit Betonbalken.....	59
Bild 4-37: Randeinfassung mit L- Element aus Beton	59
Bild 4-38: Gegenüberstellung der Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen, Zeile 1: ADS, Zeile 2: ABS, Zeile 3: ATS, Bezugsgröße ist der Ermüdungsstatus des Referenzmodells beim Lasteintrag im jeweiligen Abstand zum Rand.....	60
Bild 4-39: Gegenüberstellung der Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen, Bezugsgröße ist der Ermüdungsstatus des Referenzmodells beim Lasteintrag im Abstand von 3,5 m zum Rand.....	60
Bild 4-40: Nutzungsdauer des Seitenstreifens in % mit Bezug auf die Nutzungsdauer des Hauptfahrstreifens in Abhängigkeit der anteiligen Verkehrsbelastung auf dem Seitenstreifen bezogen auf die Gesamtbelastung	61
Bild 4-41: Streuungsbreite der Nutzungszeit infolge Streuung der Materialeigenschaften.....	62
Bild 5-1: Plattengeometrien gemäß [RDO Beton]: Plattenlänge LP und Plattenbreite BP.....	66
Bild 5-2: Ablauf zur Erstellung und Auswertung von FEM Berechnung mit Referenzierung zum Dimensionierungsergebnis im Hauptfahrstreifen ohne Seitenstreifenfreigabe entsprechend den RDO Beton.....	72
Bild 5-3: Darstellung der 4 Laststellungen (Nr. 1 bis 4) auf Platten im Hauptfahrstreifen.....	73
Bild 5-4: Darstellung der 8 Laststellungen (Nr. 5 bis 12) auf Platten im Seitenfahrstreifen	74
Bild 5-5: Plot der größten Hauptspannungen im 9-Plattenmodell, Fahrzeugtyp 98 im HFS an der Plattenecke	74
Bild 5-6: Entwicklung des Ermüdungsfaktors $\gamma_{c,fat}$ über die Summe äquivalenter Lastübergänge B_n am Beispiel für Querverteilung des Verkehrs bei Plattenbreiten $> 3,75$ m	76
Bild 5-7: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000mm	78
Bild 5-8: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500mm	78
Bild 5-9: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm	79
Bild 5-10: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm	79

- Bild 5-11: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm80
- Bild 5-12: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm80
- Bild 5-13: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm81
- Bild 5-14: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm81
- Bild 5-15: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm82
- Bild 5-16: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm82
- Bild 5-17: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm83
- Bild 5-18: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm83
- Bild 5-19: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm84
- Bild 5-20: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm84
- Bild 5-21: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm85
- Bild 5-22: Auswertung der maßgebenden Hauptspannungen der FEM-Berechnungen für
Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm,
Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm85
- Bild 5-23: Unterschiedliche Belastungsszenarien bei Seitenstreifenfreigabe und schmalen Platten im
Seitenstreifen86

Bild 5-24:Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2000 mm.....	87
Bild 5-25:Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2500 mm.....	87
Bild 5-26:Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2000 mm.....	88
Bild 5-27:Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2500 mm.....	88
Bild 5-28:Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=3000 mm.....	89
Bild 5-29:Projizierte B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=3250 mm.....	89
Bild 5-30:Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2000 mm.....	90
Bild 5-31:Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2500 mm.....	90
Bild 5-32:Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2000 mm.....	91
Bild 5-33:Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2500 mm.....	91
Bild 5-34:Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=3000 mm.....	92
Bild 5-35:Projizierte B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=3250 mm.....	92
Bild 5-36:Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahstreifen=2000 mm.....	93

Bild 5-37:Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm.....	93
Bild 5-38:Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm.....	94
Bild 5-39:Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm.....	94
Bild 5-40:Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm.....	95
Bild 5-41:Reduktion der B-Zahlen für Asphalttragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm.....	95
Bild 5-42:Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm.....	96
Bild 5-43:Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4000 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm.....	96
Bild 5-44:Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm.....	97
Bild 5-45:Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm.....	97
Bild 5-46:Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm.....	98
Bild 5-47: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm.....	98
Bild 5-48:Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2000 mm.....	100
Bild 5-49:Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=2500 mm.....	100

Bild 5-50: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3000 mm.....	101
Bild 5-51: Reduktion der B-Zahlen für Schottertragschicht, Plattenlänge=5000 mm, Plattenbreite im Überholfahrstreifen=3500 mm, Plattenbreite im Hauptfahrstreifen=4500 mm, Plattenbreite im Seitenfahrstreifen=3250 mm.....	101
Bild 5-52: Konstruktive Ausbildung	102
Bild 5-53: Spannungsvergleich mit und ohne Anbindung an ein Streifenfundament.....	103
Bild 5-54: Hauptspannungen der Betondecke bei Befahrung am Plattenrand.....	103

Tabellen

Tab. 2-1: Strichbreite.....	22
Tab. 3-1: Relevante B-Zahl auf Grundlage der DTV ^(SV) -Werte der Zählstelle.....	23
Tab. 3-2: Anteile Verkehrsbelastung auf Seiten- und Hauptfahrstreifen, resultierender Anteil DTV ^(SV) und B-Zahl.....	24
Tab. 3-3: Zählstellen 2018 mit Hinweis zu einer temporären Seitenstreifenfreigabe.....	25
Tab. 3-4: Angenommene B-Zahlen mit zugehörigem DTV ^(SV) und prozentualer Verteilung auf dem Seiten- und Hauptfahrstreifen mit einem Zuwachs des DTV ^(SV) von $p = 3\%$	27
Tab. 3-5: Angenommene B-Zahlen mit zugehörigem DTV ^(SV) und prozentualer Verteilung auf dem Seiten- und Hauptfahrstreifen mit einem Zuwachs des DTV ^(SV) von $p = 0\%$	27
Tab. 3-6: relevante Lasteintragungspunkte [RAA 2008; RSA; RMS-1].....	28
Tab. 4-1: dimensionierungsrelevante Parameter nach den RStO.....	29
Tab. 4-2: Stichprobenmenge je Schichtart.....	31
Tab. 4-3: Materialparameter der ausgewählten Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische, ermittelt mit den Funktionsansätzen der (FGSV TP Asphalt, Teil 26, 2018).....	32
Tab. 4-4: Materialparameter der ausgewählten Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische, ermittelt mit den Funktionsansätzen der (FGSV TP Asphalt, Teil 24, 2018).....	34
Tab. 4-5: Kombinationen aus Ermüdungsverhalten und Steifigkeit je Schichtart mit der jeweiligen rel. Anzahl.....	36
Tab. 4-6: Häufigste Materialkombination der jeweiligen Schicht.....	37
Tab. 4-7: Klassenanzahlen der Asphalttragschichtmaterialien.....	38
Tab. 4-8: Probabilistische Parameter für die Berechnung der Klassengrenzen, Parameter der Kalibrierasphalte.....	39
Tab. 4-9: Anzahl der Elemente und Einzelergebnisse aus Beanspruchungszuständen.....	46
Tab. 4-10: Einordnung einer möglichen Seitenstreifennutzung für Regelquerschnitte nach [RAA 2008] bei gleicher Nutzungsdauer für Hauptfahr- und Seitenstreifen.....	63
Tab. 4-11: Einordnung einer möglichen Seitenstreifennutzung für Regelquerschnitte nach [RAS Q 96] bei gleicher Nutzungsdauer für Hauptfahr- und Seitenstreifen (ohne konstruktive Maßnahmen)....	64
Tab. 5-1: Regelquerschnitte nach [RAA 2008] und mögliche Plattenbreiten im Seitenstreifen.....	67
Tab. 5-2: Regelquerschnitte nach [RAS-Q 96] und mögliche Plattenbreiten im Seitenstreifen.....	69
Tab. 5-3: Vergleich der Dimensionierungsergebnisse mit und ohne Seitenstreifenfreigabe für die Haupt- und Seitenfahrstreifen bei 5,00 m Plattenlänge (Angabe der Deckendicken in mm), $f_{ctk} = 3,3$ MPa und $\alpha_{cT} = 11,5 \times 10^{-6}/K$	71

Anhang

	Seite
Anlage 1: Diagramme zu probabilistischen Berechnungen für das Referenzmodell	121
Anlage 2: Diagramme zu probabilistischen Berechnungen für Variante mit Voute	128
Anlage 3: Diagramme zu probabilistischen Berechnungen für Variante mit L-Element	135

Anlage 1: Diagramme zu probabilistischen Berechnungen für das Referenzmodell

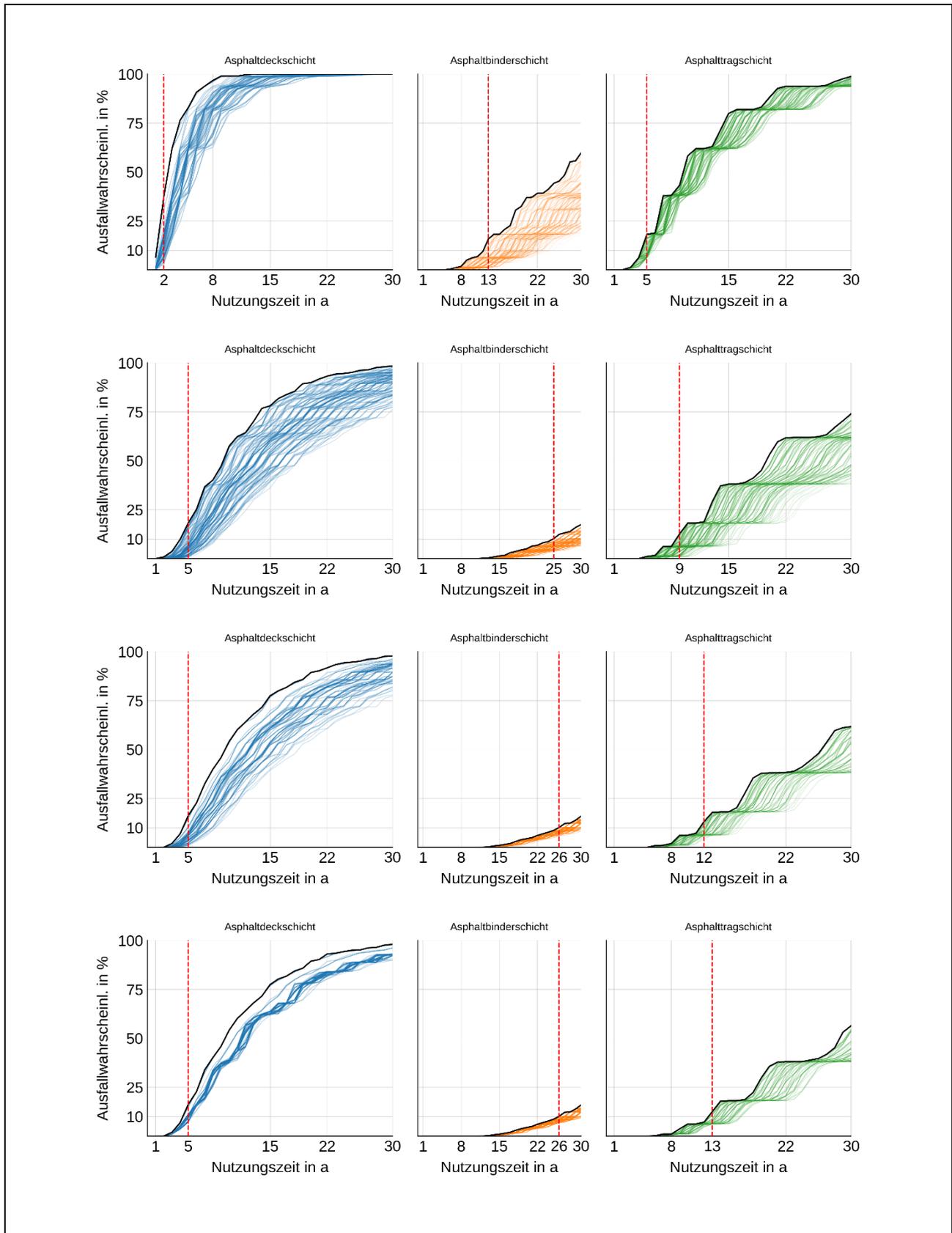


Bild A 1-1 Ausfallrate, Variante mit Voute, 10 Mio AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

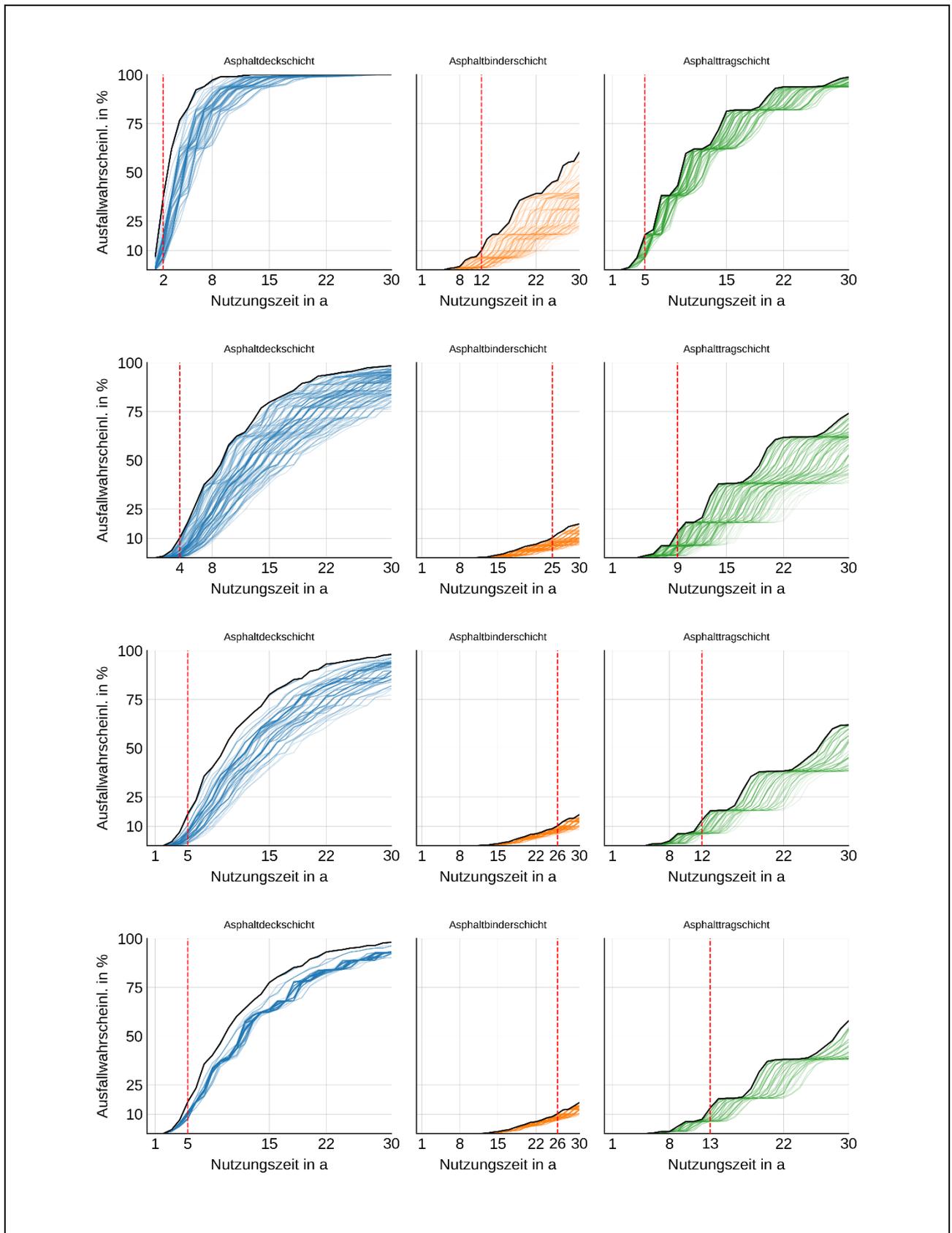


Bild A 1-2 Ausfallrate, Referenzmodell, 10.101.221 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

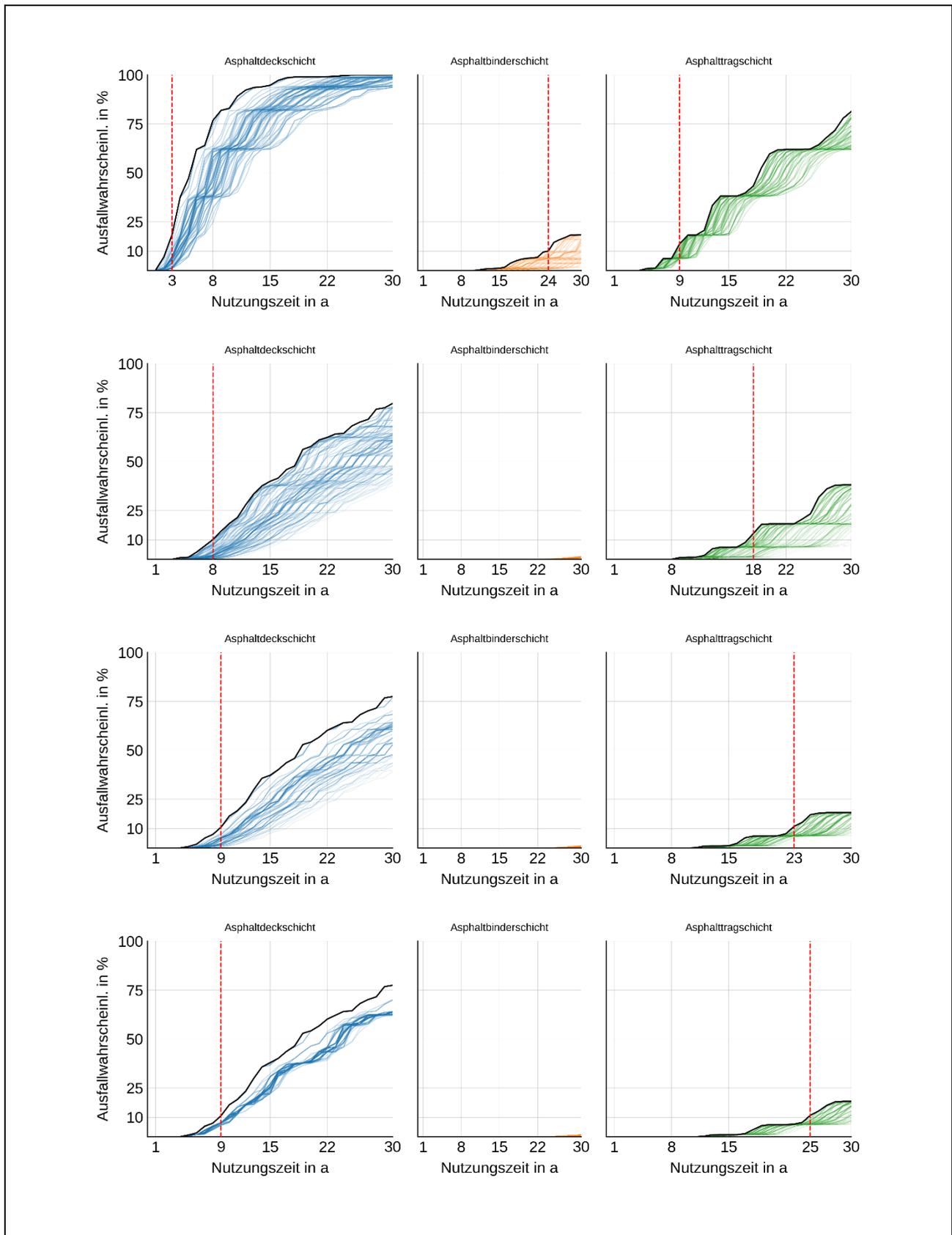


Bild A 1-3 Ausfallrate, Referenzmodell, 5.050.242 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

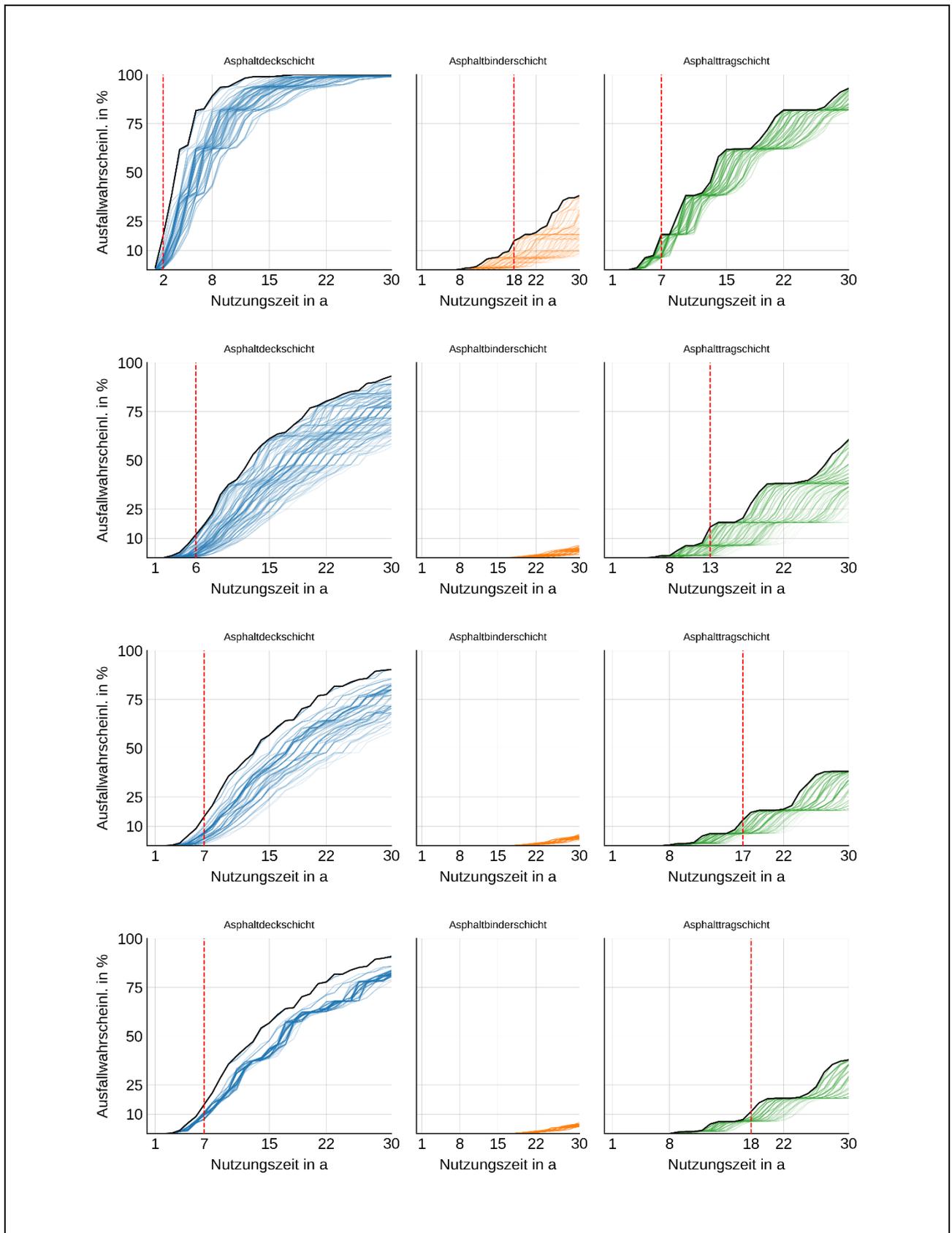


Bild A 1-4 Ausfallrate, Referenzmodell, 7.070.781 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

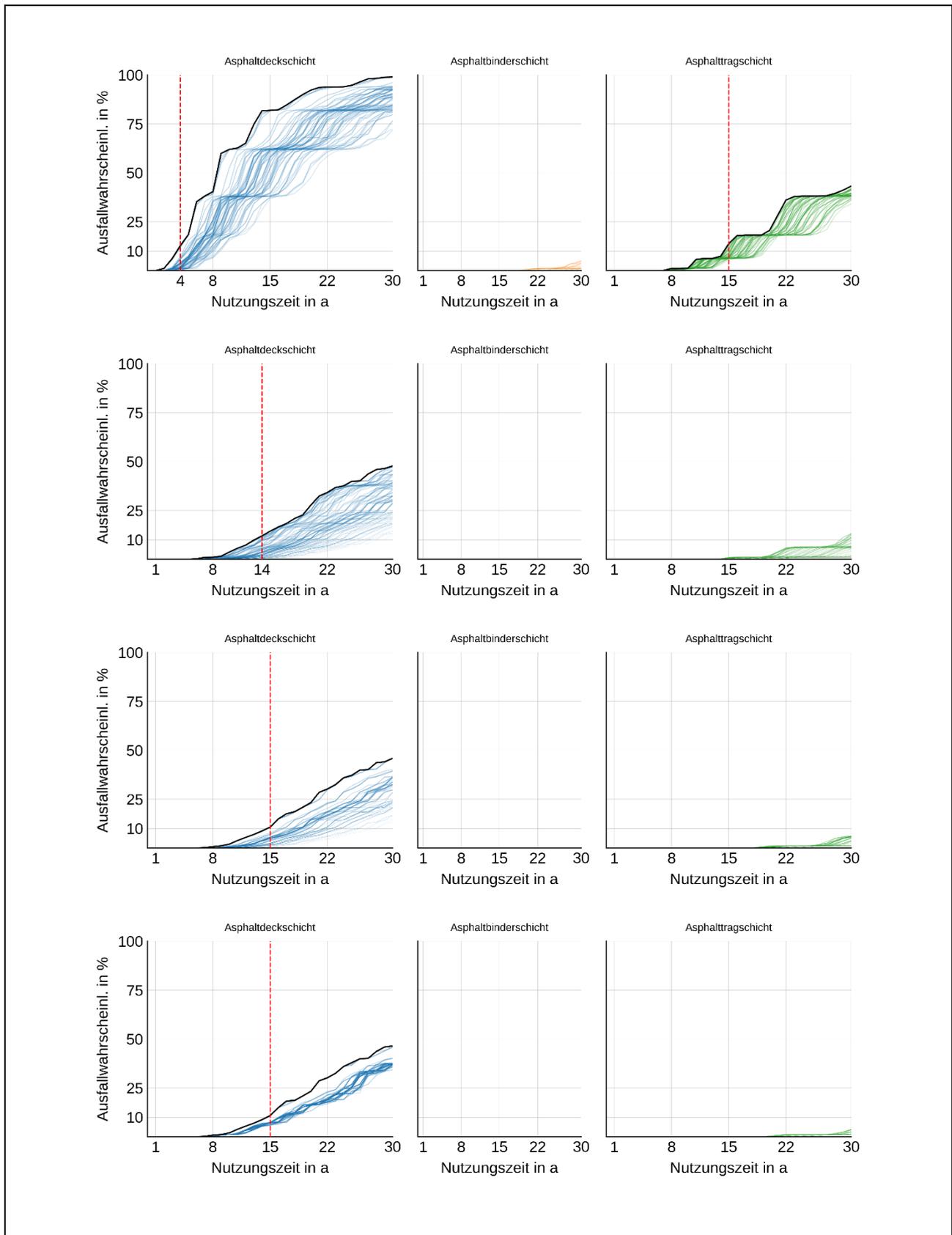


Bild A 1-5 Ausfallrate, Referenzmodell, 3.030.440 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

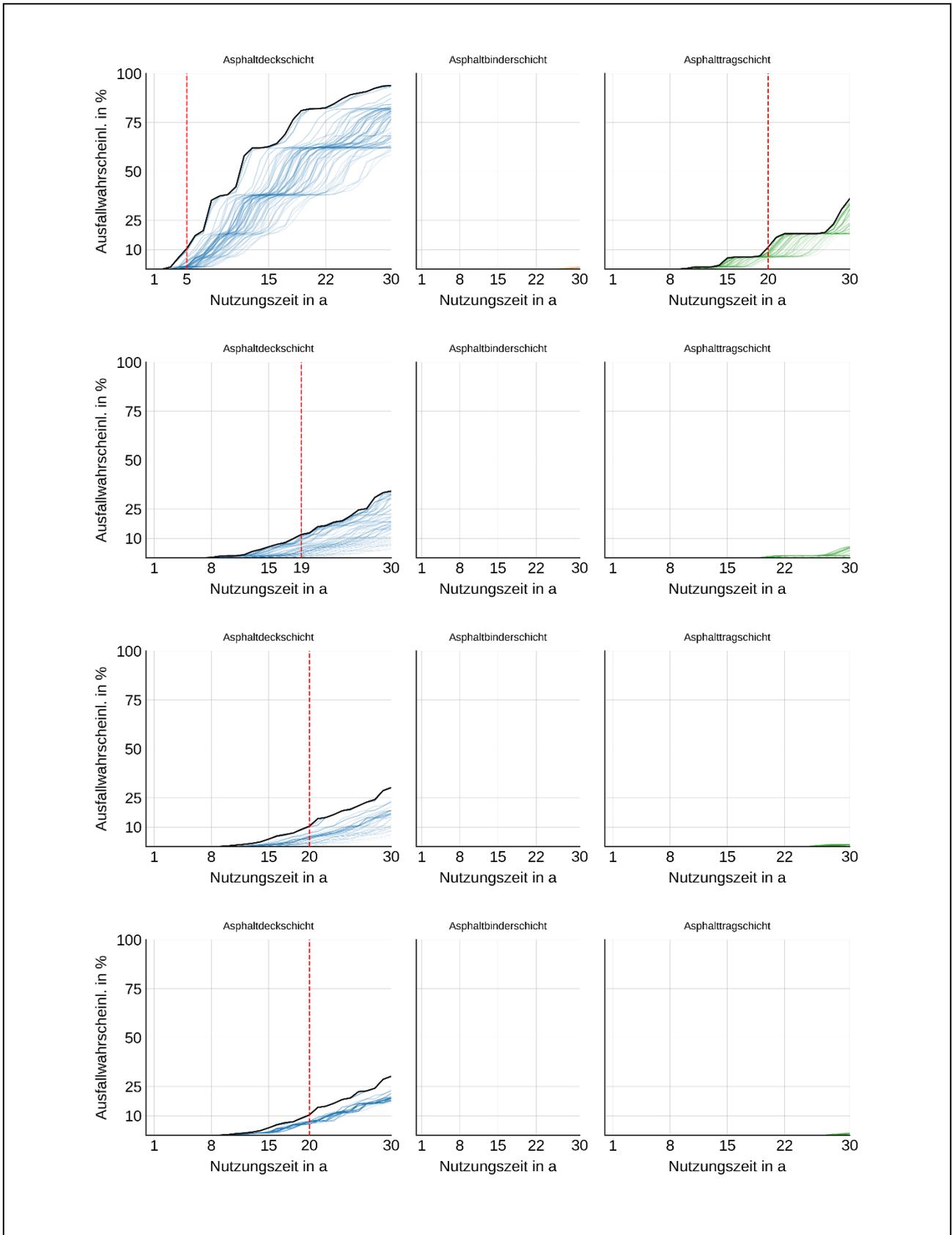


Bild A 1-6 Ausfallrate, Referenzmodell, 2.222.519 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

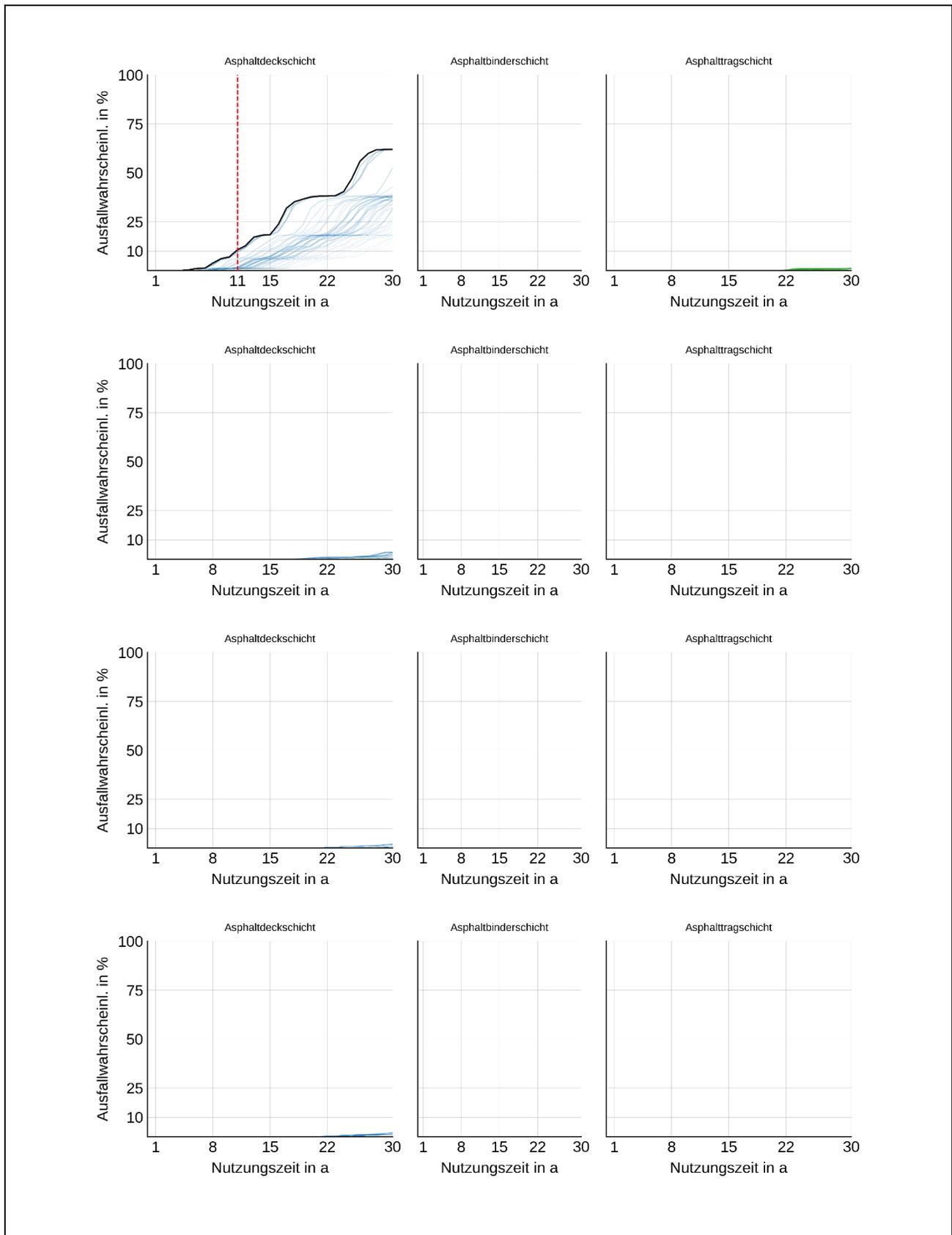


Bild A 1-7 Ausfallrate, Referenzmodell, 1.009.900 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

Anlage 2: Diagramme zu probabilistischen Berechnungen für Variante mit Voute

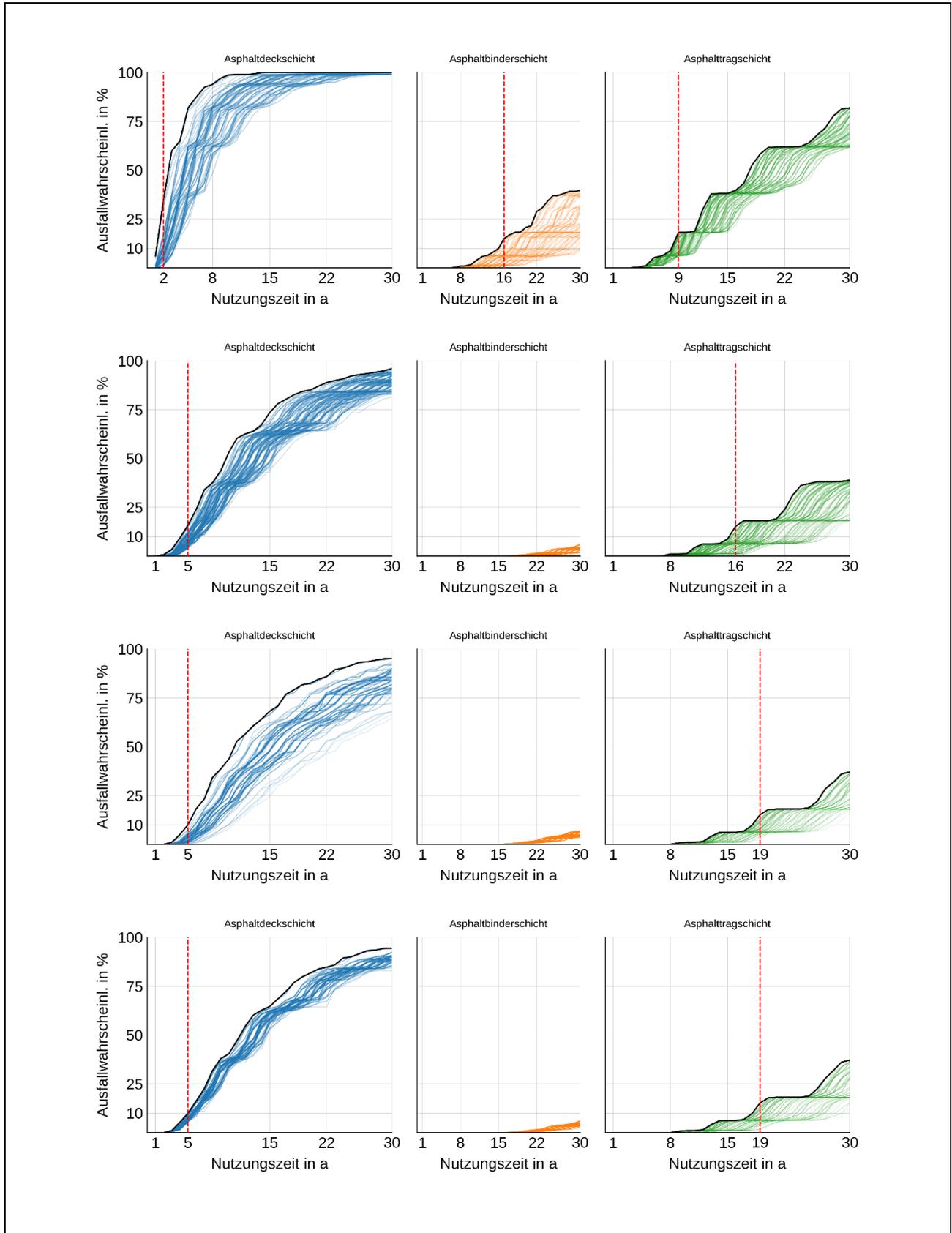


Bild A 2-1 Ausfallrate, Variante mit Voute, 10 Mio AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

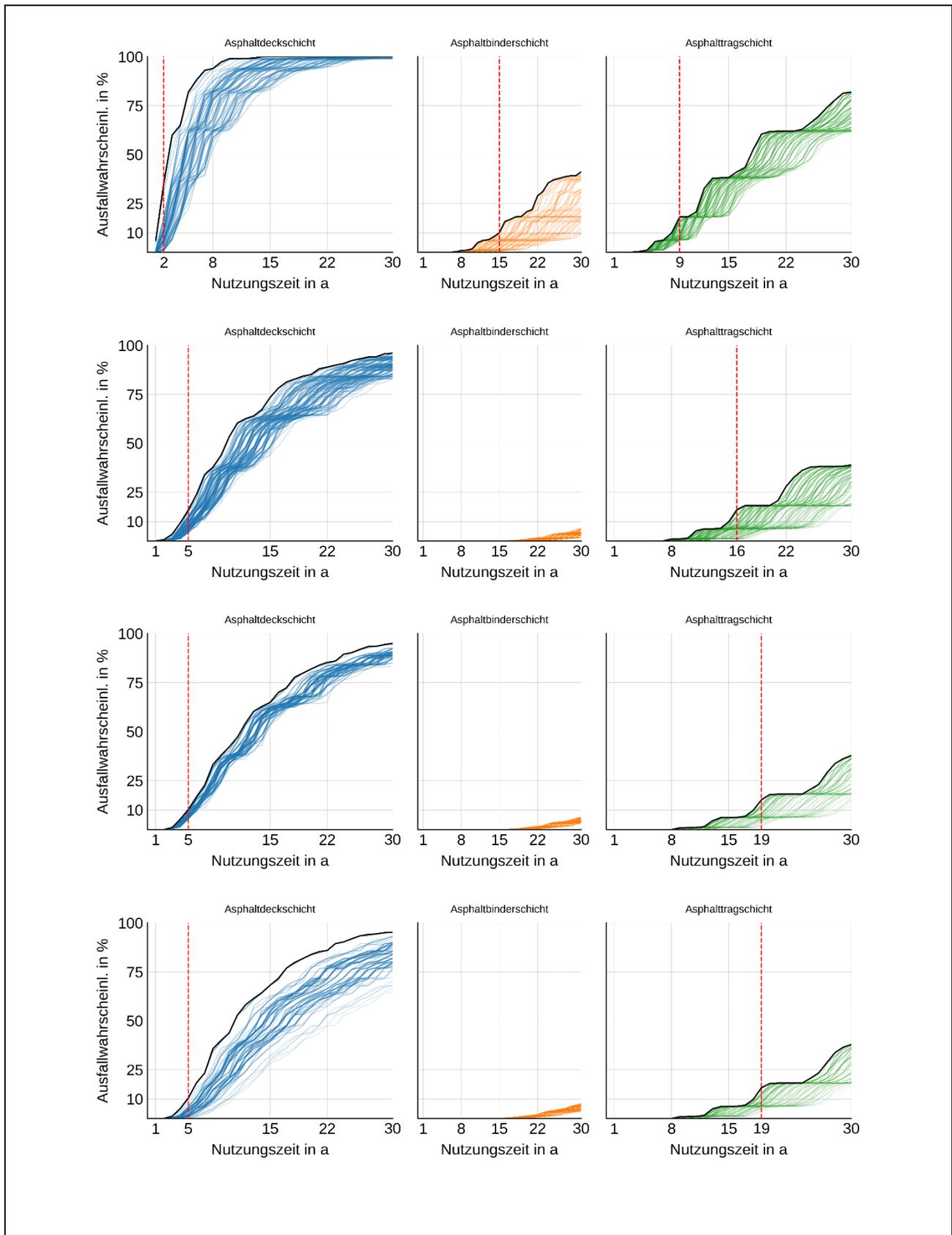


Bild A 2-2 Ausfallrate, Variante mit Voute, 10.101.221 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

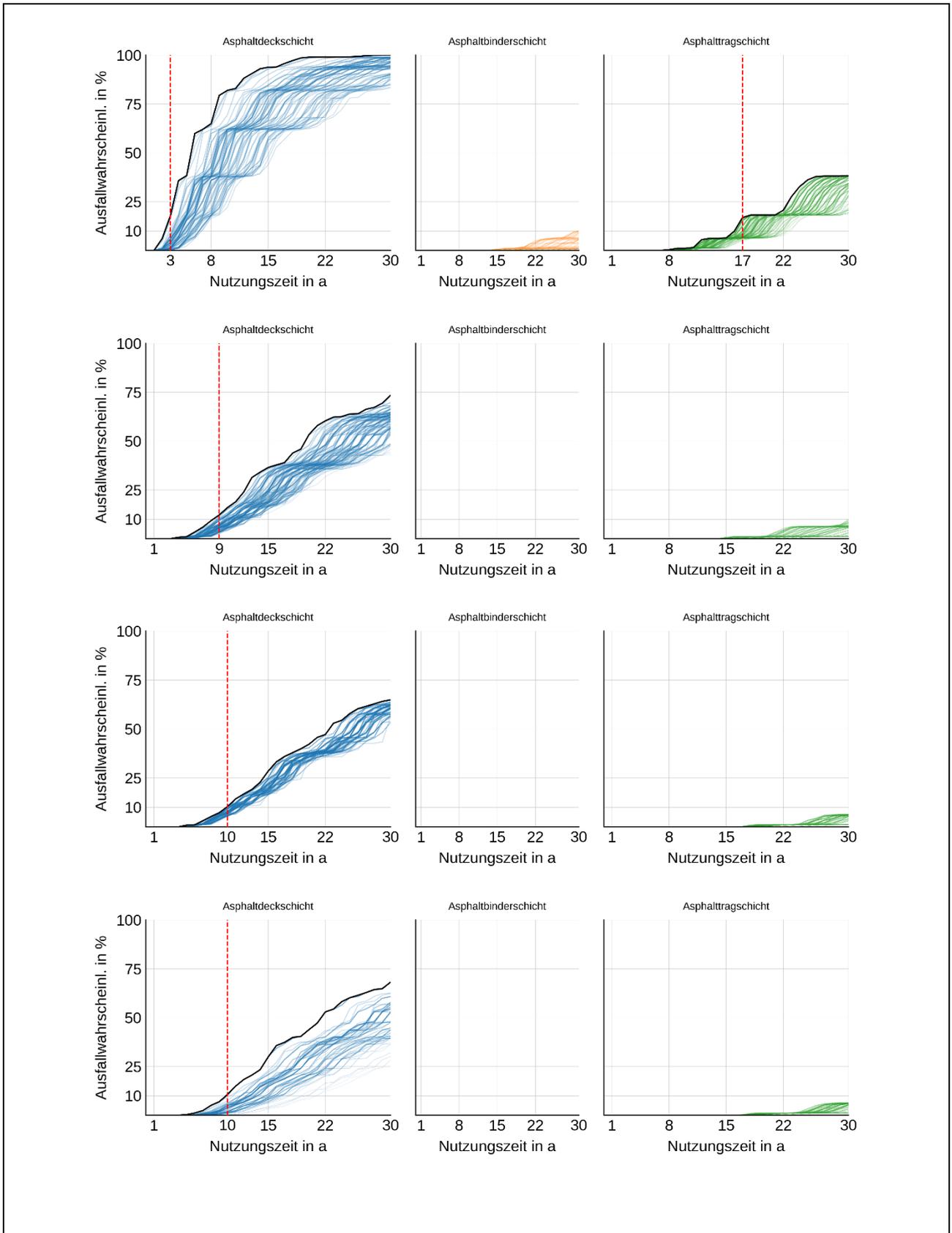


Bild A 2-3 Ausfallrate, Variante mit Voute, 5.050.242 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

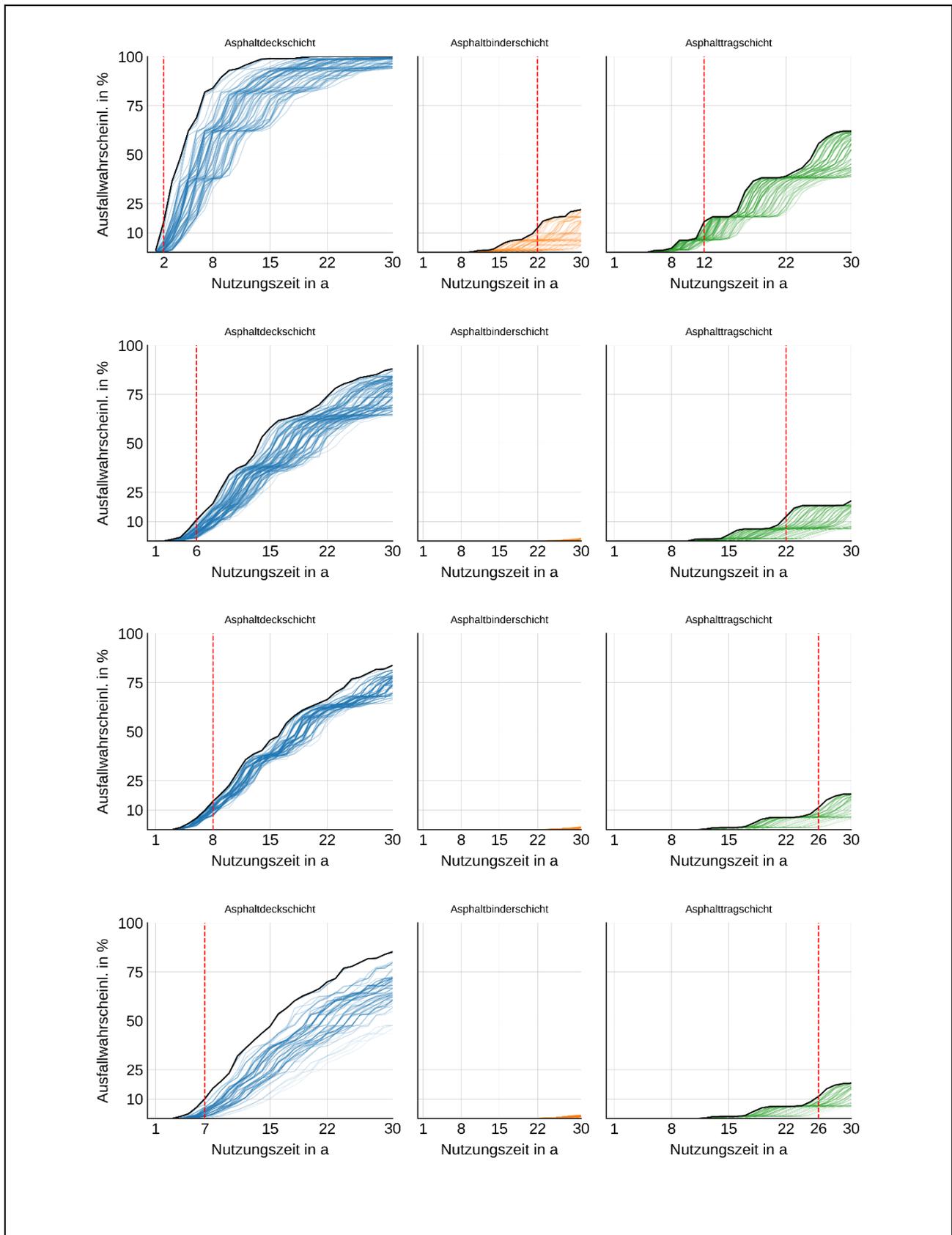


Bild A 2-4 Ausfallrate, Variante mit Voute, 7.070.781 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

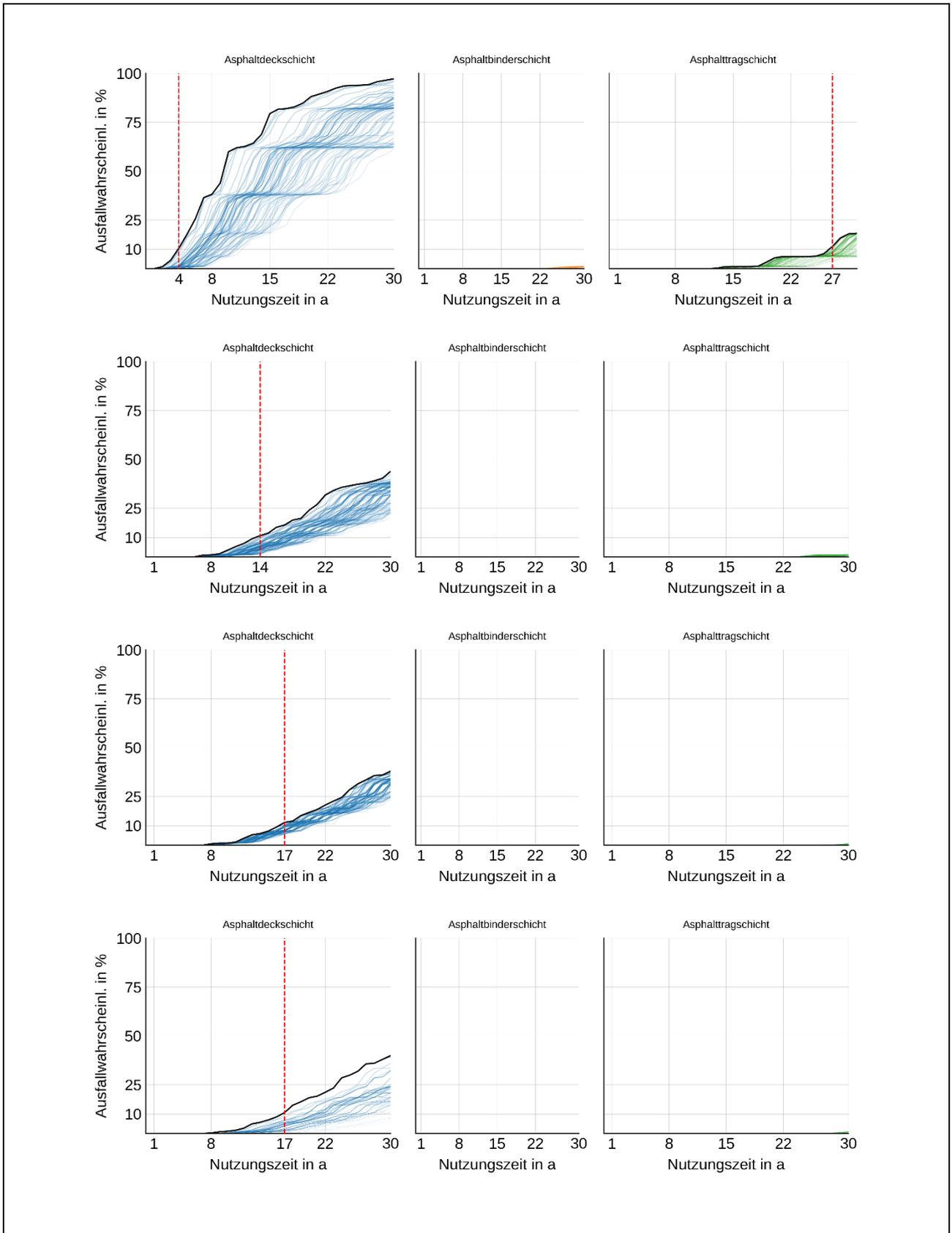


Bild A 2-5 Ausfallrate, Variante mit Voute, Abstand 3.030.440 AÜ/a 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

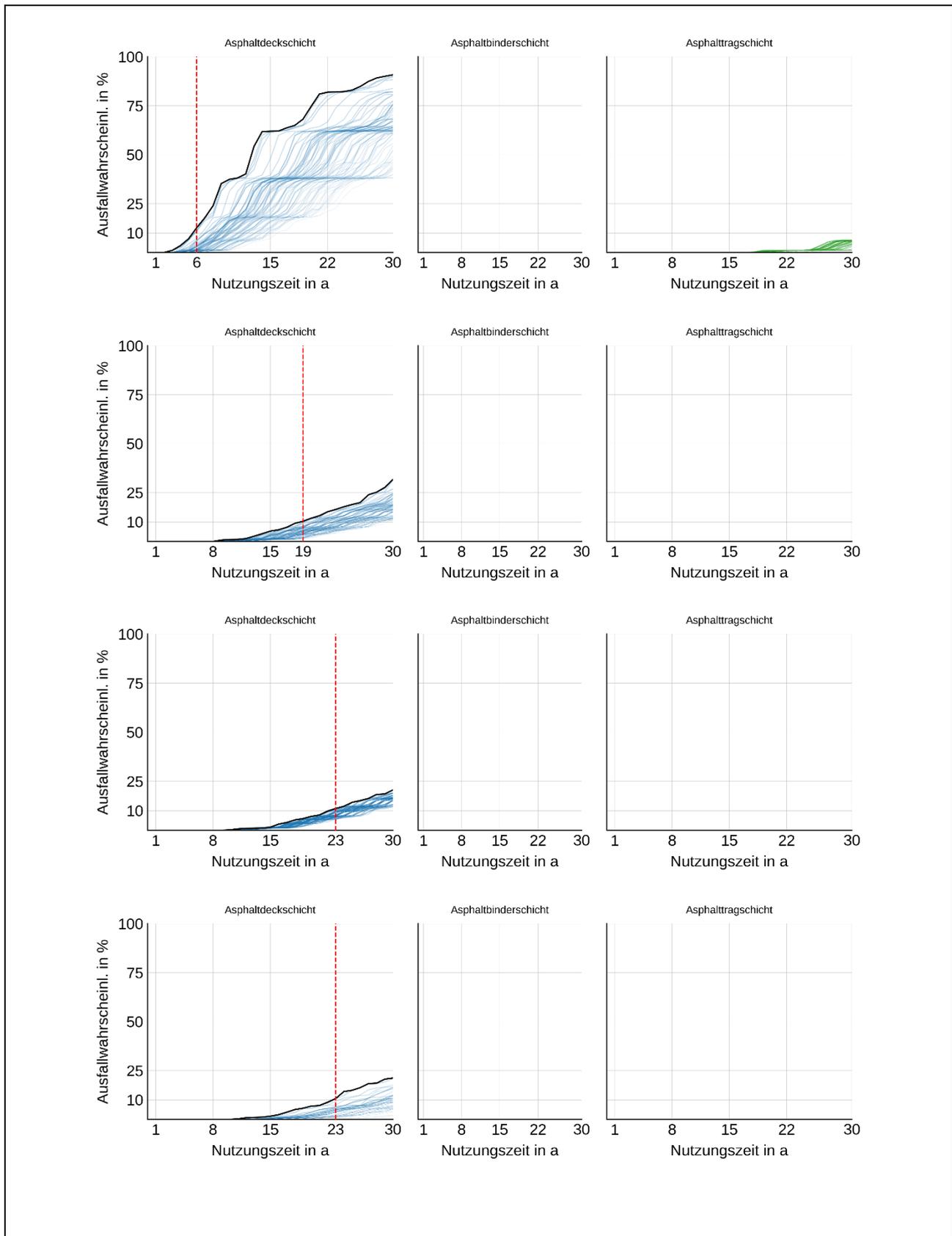


Bild A 2-6 Ausfallrate, Variante mit Voute, 2.222.519 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

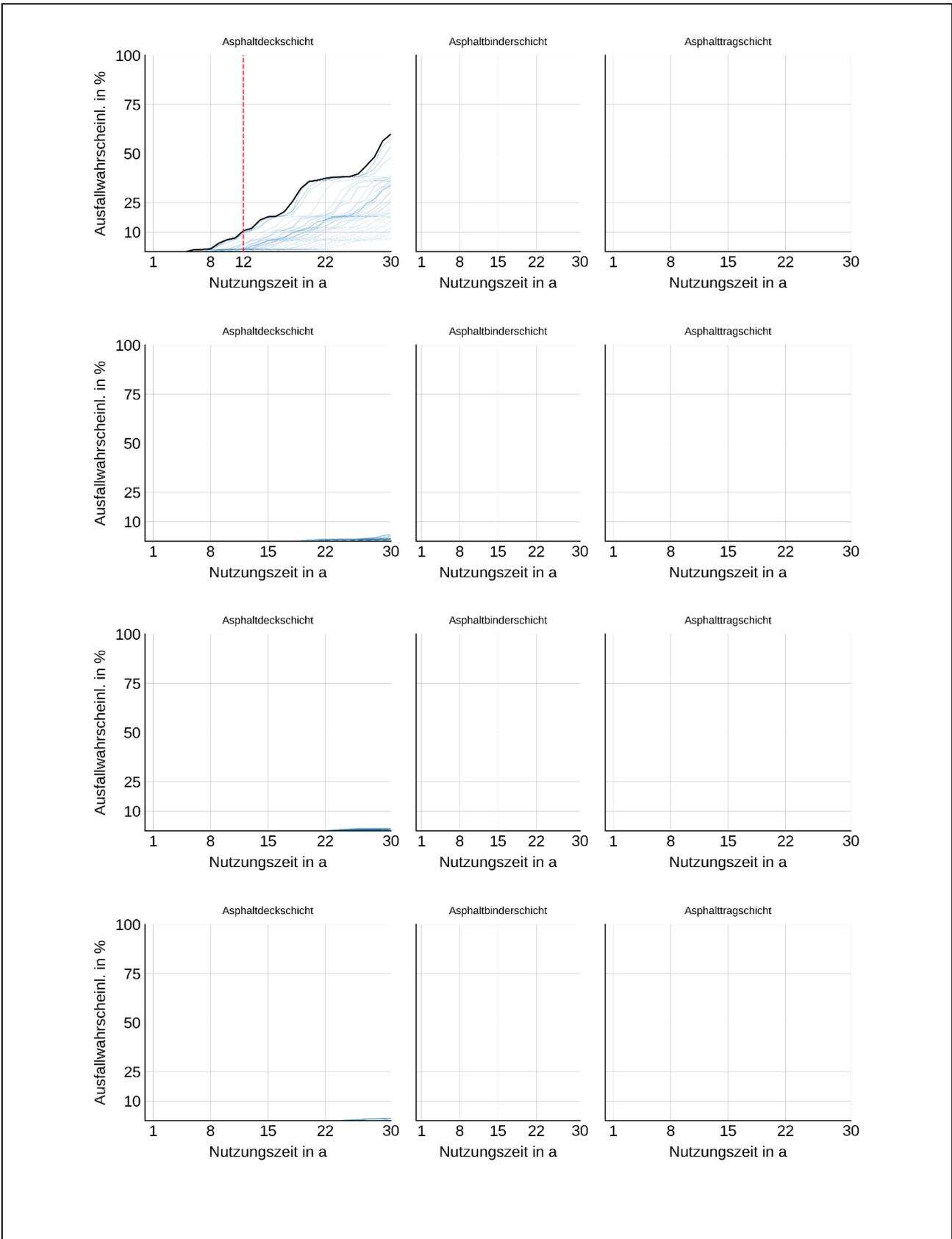


Bild A 2-7 Ausfallrate, Variante mit Voute, 1.009.900 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

Anlage 3: Diagramme zu probabilistischen Berechnungen für Variante mit L-Element

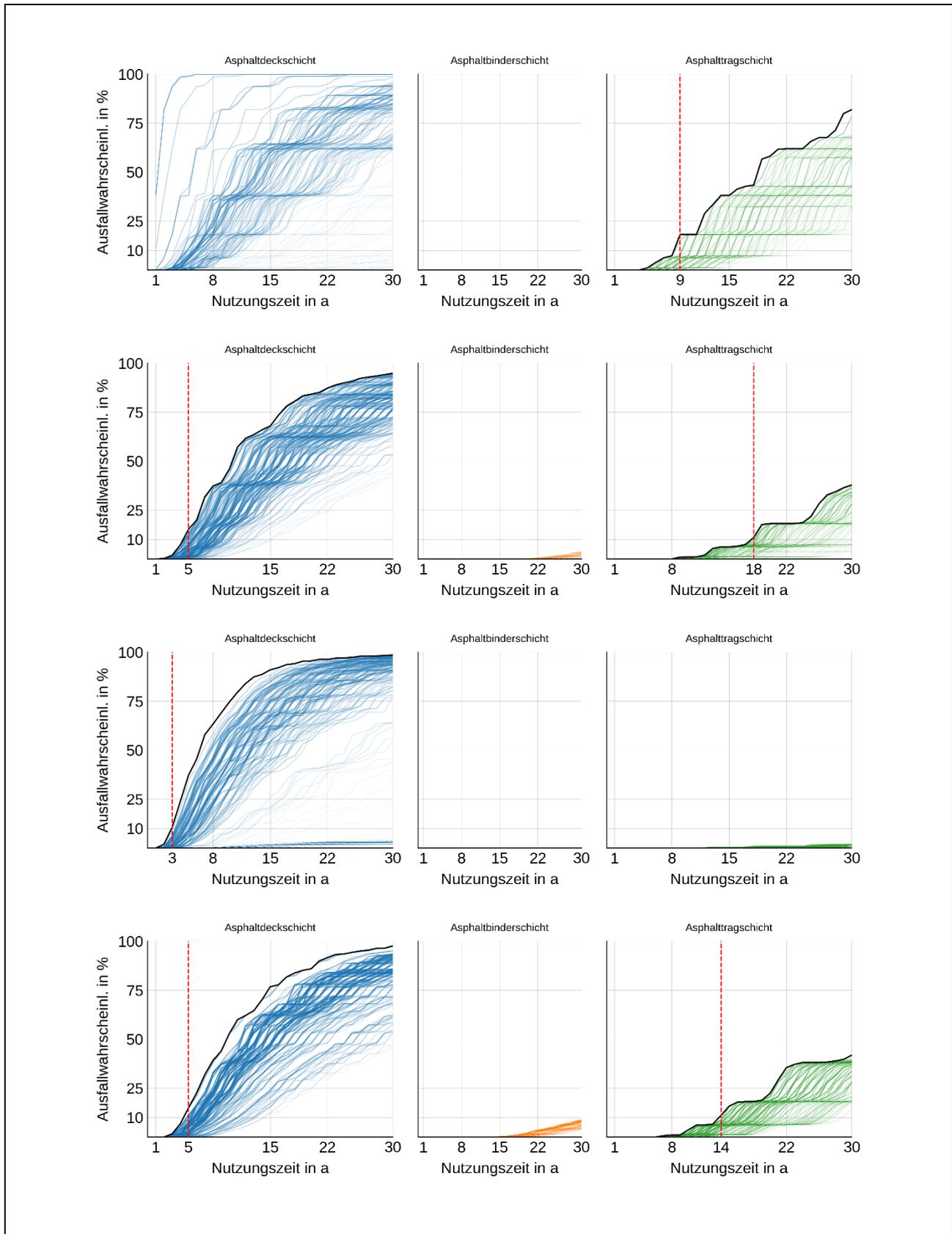


Bild A 3-1 Ausfallrate, Variante mit L-Element, 10 Mio AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

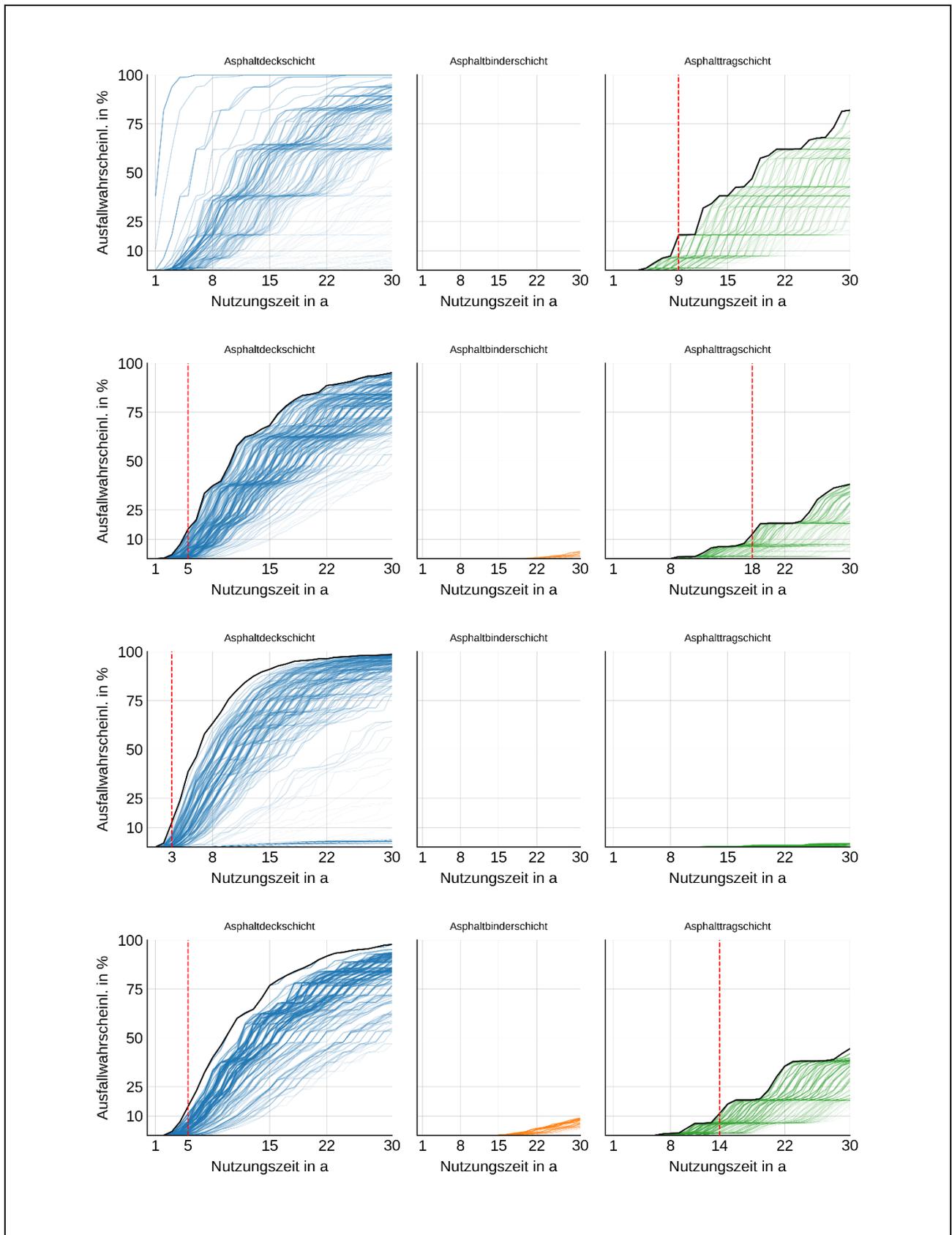


Bild A 3-2 Ausfallrate, Variante mit L-Element, 10.101.221 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

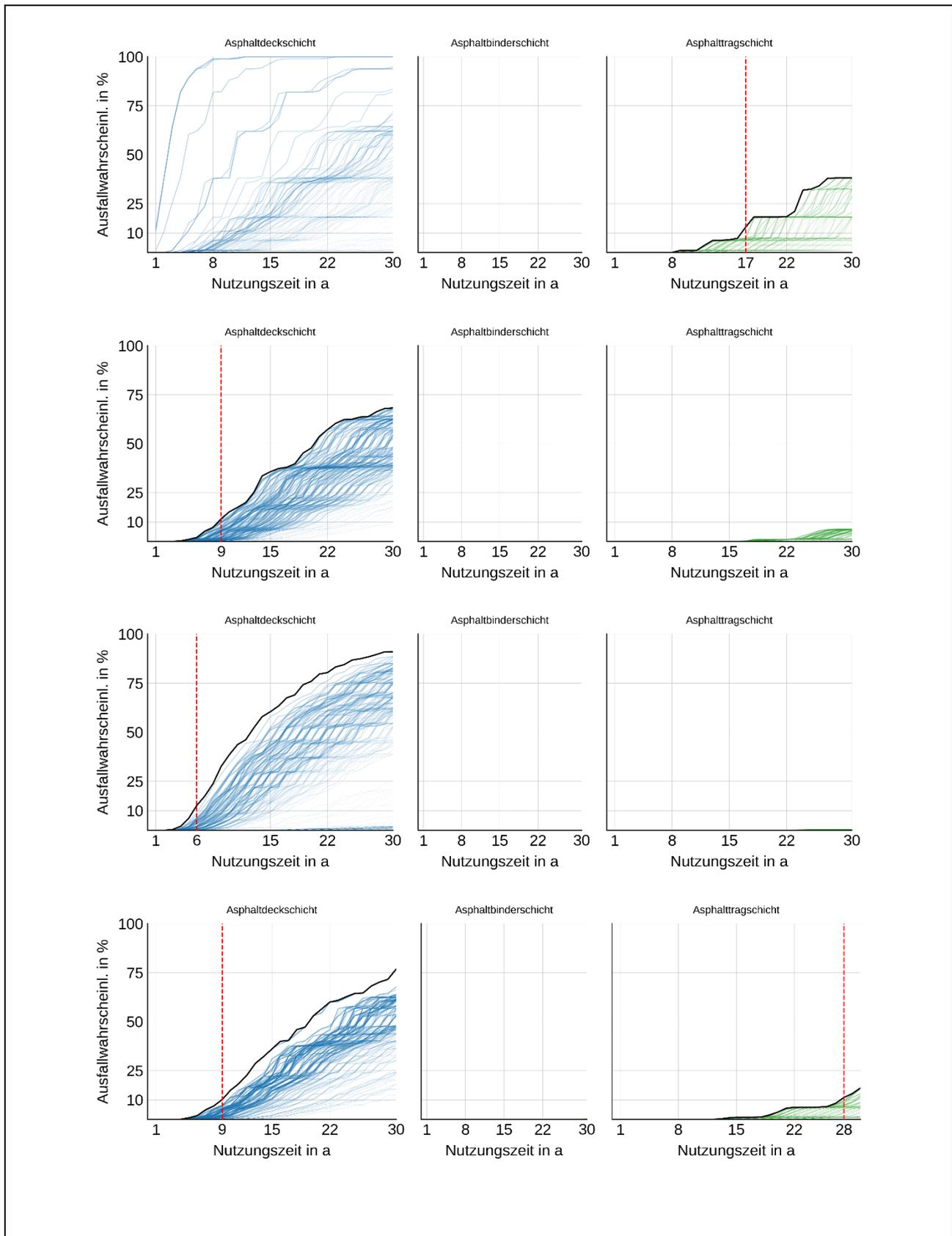


Bild A 3-3 Ausfallrate, Variante mit L-Element, 5.050.242 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

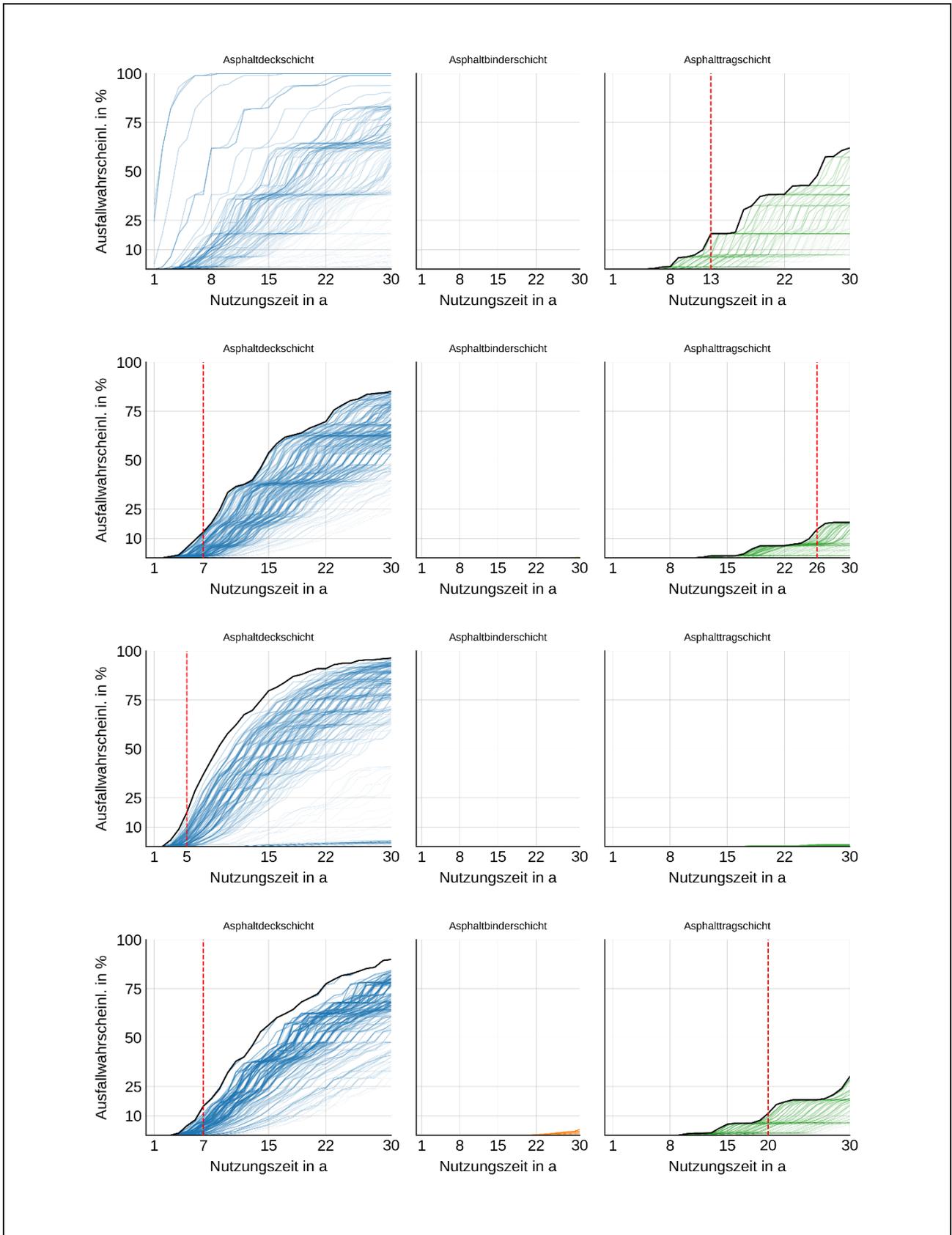


Bild A 3-4 Ausfallrate, Variante mit L-Element, 7.070.781 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

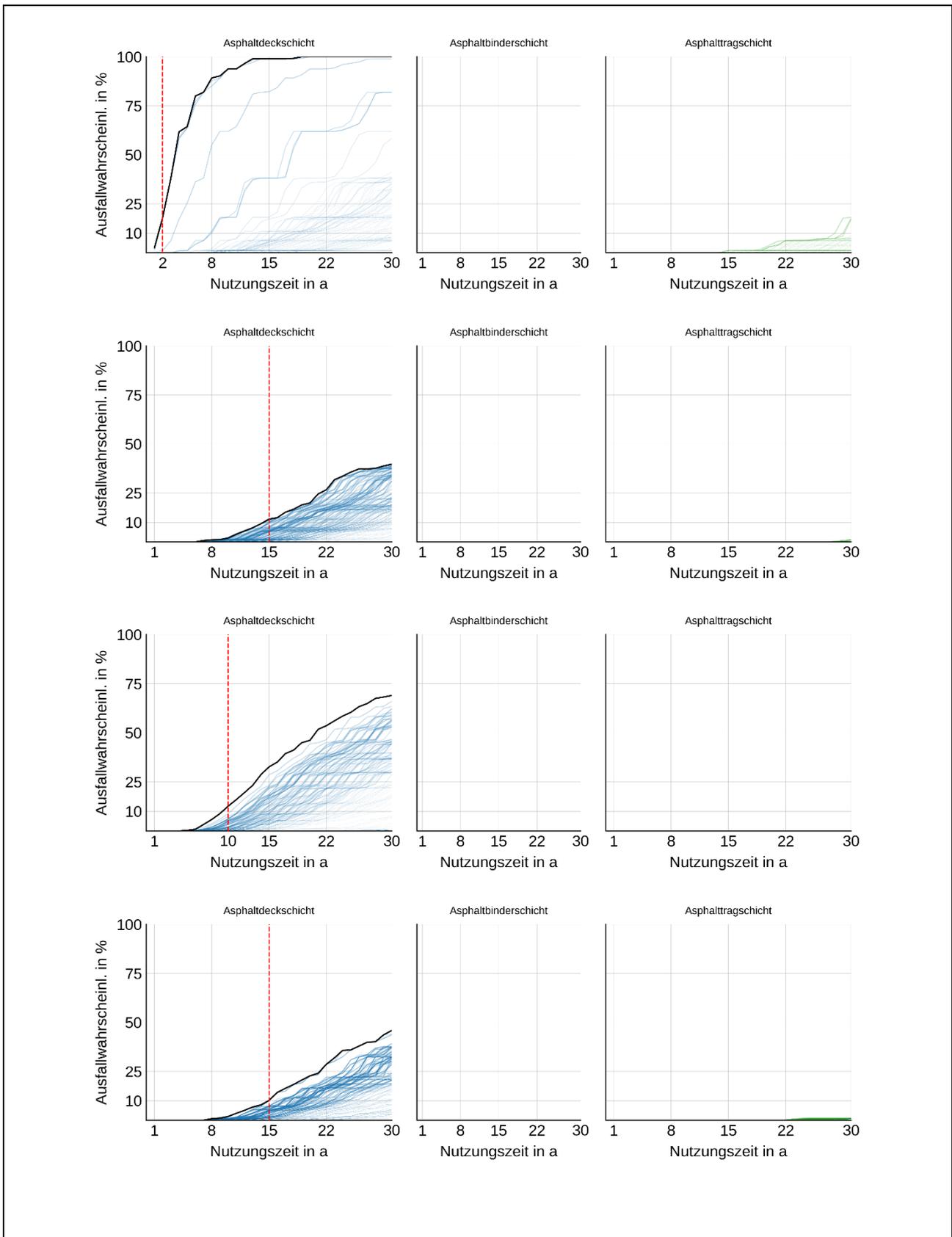


Bild A 3-5 Ausfallrate, Variante mit L-Element, 3.030.440 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

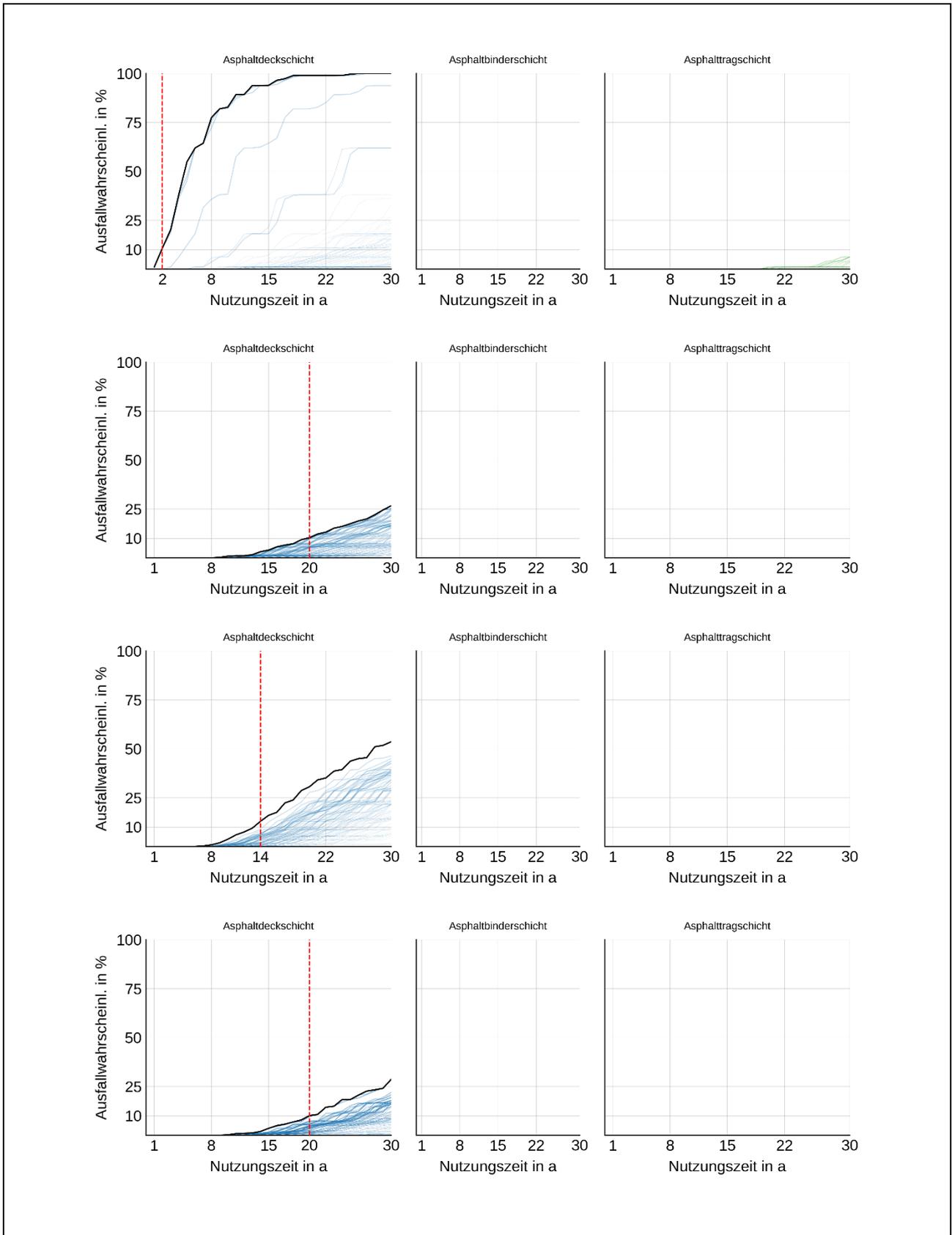


Bild A 3-6 Ausfallrate, Variante mit L-Element, 2.222.519 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

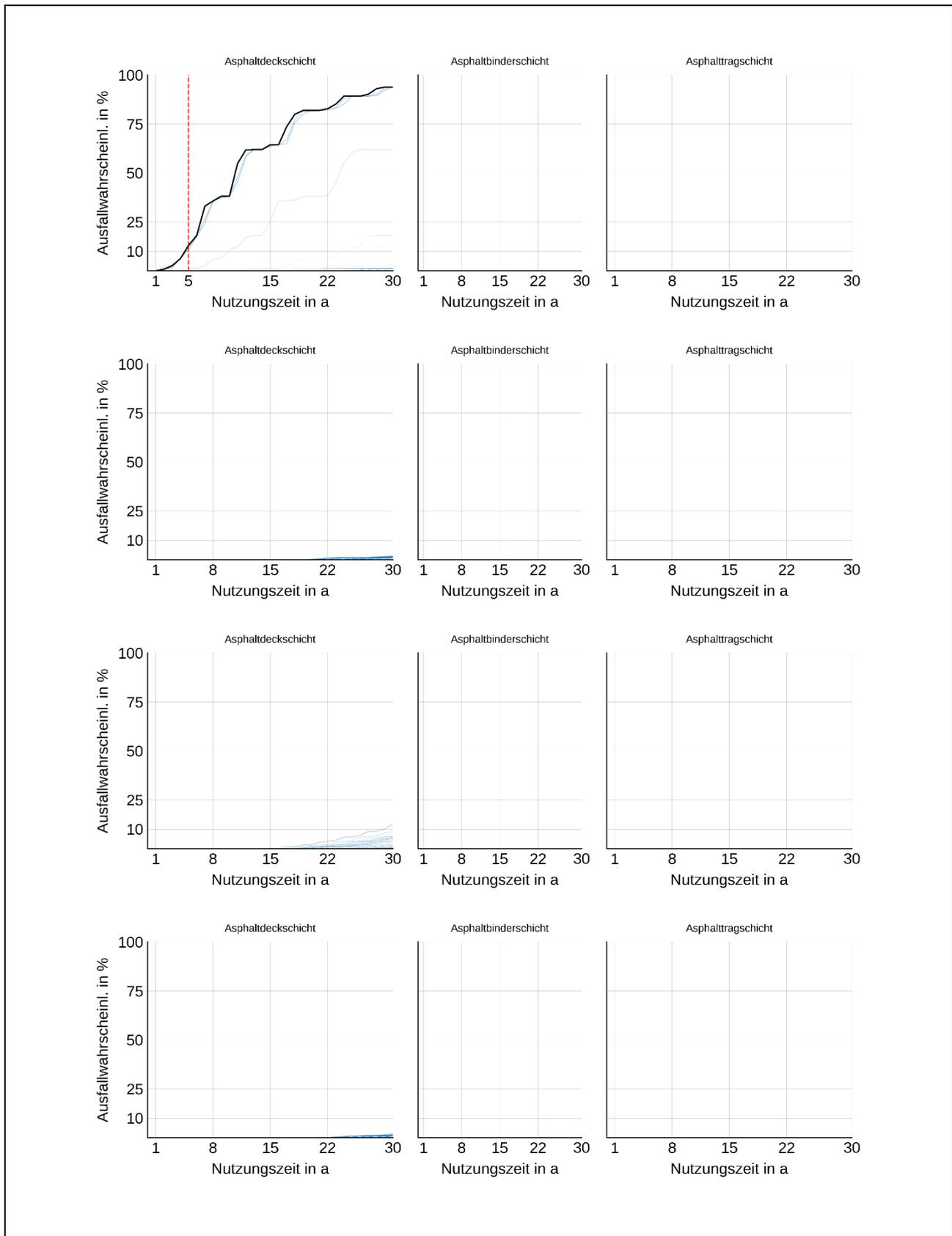


Bild A 3-7 Ausfallrate, Variante mit L-Element, 1.009.900 AÜ/a, Lasteintrag im Abstand 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 m vom Rand

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tiemann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

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

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

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

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

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

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergusmassen

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

S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

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

S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

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

S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkühl, Pfeifer € 14,50

2023

S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

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

S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen

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

S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalteinlagen

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen

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

S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärm- armer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton

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

S 186: Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

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

S 187: Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

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

S 188: Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörnitz

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

S 189: Optimierung der Zusammensetzung Offenporiger Asphalte zur Verbesserung des Nutzungsverhaltens

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

S 190: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an Bauweisen mit Betondecke der Belastungsklasse Bk100

Ressel, Engel, Ferraro, Alber, Garrecht, Mielich, Wellner, Kamratowsky, Kraft
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 191: Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteilen

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

S 192: Analyse von Auswertungs- und Bewertungsverfahren für die Anwendung des Traffic-Speed-Deflectometers auf Asphaltbefestigungen

Čičković, Bald, Middendorf

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

S 193: Materialsteifigkeit des Straßenbetons im Verlauf des Ermüdungsprozesses

Bolz, Wellner, Lindner, Schulze

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

S 194: Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen

Wellner, Sommer, Clauß, Spanier, Villaret, Tschernack, Villaret, Gebhardt

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

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.