

Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Lebenszykluskosten von Straßen in Asphaltbauweise

DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl. -Ing. Jan Birbaum

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Ulf Zander
Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner

verteidigt am 15.07.2016

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2016

KURZFASSUNG

Die Abschätzung der wirtschaftlichen Gesamtbilanz von Straßenbefestigungen ist ein Grundanliegen der Straßenbaulastträger und wird mit der Etablierung neuer Vertragsformen (Funktionsbauverträge und PPP-Modelle) voraussichtlich weiter an Bedeutung gewinnen. Die Berechnung von Lebenszykluskosten von Straßen auf Grundlage von konkreten Substanzmerkmalen ist mit der Einführung der rechnerischen Dimensionierung und den in den RSO Asphalt beschriebenen bzw. im Zuge der Erstellung erarbeiteten Verfahren mittlerweile möglich und wurde in einem Forschungsprojekt der BAST bereits einer Erstanwendung unterzogen.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die vorhandenen Erkenntnisse zur substanzbezogenen Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Straßen zu analysieren, zusammenzuführen und um wichtige Einflussfaktoren zu erweitern. Es wird ein Verfahren erarbeitet, das eine Abschätzung der Lebenszykluskosten verschiedener Straßenkategorien (Autobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen) in Abhängigkeit von geeigneten Eingangsparametern ermöglicht. Dabei werden auch derzeit nicht adäquat berücksichtigte Einflussfaktoren – beispielsweise die sonstigen Anlagenteile – in die Betrachtungen einbezogen.

In einer umfassenden Literaturrecherche wurde zunächst der nationale und internationale Stand der Technik zum Themenkomplex „Lebenszykluskosten und Zustandsentwicklung von Straßen“ dargelegt und analysiert. Hieraus konnten bereits vorhandene Grundlagen für die weiteren Berechnungen ausgemacht werden. Im Anschluss wurden für Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen repräsentative Streckenabschnitte erarbeitet. Diese definieren neben dem Regelquerschnitt und der Dicke sowie der Schichtenfolge des Oberbaus auch die Ausstattung mit sonstigen Anlagenteilen.

Auf Grundlage der repräsentativen Streckenabschnitte und individueller Erhaltungsstrategien wurden unter Verwendung von zuvor kalkulierten Kosten für die Leistungen am Oberbau und den sonstigen Anlagenteilen Lebenszykluskosten für die verschiedenen Straßenkategorien berechnet. Diese ergeben sich aus der Verrechnung der Summe der askontierten Kosten für die Herstellung und Erhaltung der Straßenbefestigung mit dem verbleibenden Restwert zum Bewertungszeitpunkt.

Die berechneten Lebenszykluskosten wurden in einem weiteren Schritt im Hinblick auf die verschiedenen Einflussgrößen analysiert und funktionell beschrieben. Durch die Erarbeitung verschiedener Regressionsfunktionen, können die Lebenszykluskosten von Asphaltstraßen in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen entweder relativ – in Form von einer prozentualen Entwicklung – oder absolut in Form von tatsächlichen Kosten berechnet und bewertet werden.

Die in dieser Arbeit gewonnenen allgemeinen Zusammenhänge zur Entwicklung der Lebenszykluskosten ergeben in Kombination mit dem Forschungsprojekt „Grundlagen für die Beurteilung der dimensionierungsrelevanten Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von Oberbaubefestigungen aus Asphalt“ eine solide Basis für weiterführende Untersuchungen.

ABSTRACT

To assess the overall costs of pavements is a major concern of road administrations and a necessity to establish new types of contracts like Public Private Partnerships (PPP), for example. The estimation of life-cycle costs based on specific material parameters like the stiffness or fatigue-resistance became possible by implementing the RDO Asphalt into the existing standards and regulations. Furthermore, the RSO Asphalt provide a procedure to assess the profitability of asphalt pavements in accordance to the given material parameters.

The aim of this thesis is to calculate and assess the financial requirements for the maintenance of different road categories during the whole life-cycle of an asphaltic road. Therefore, important factors and parameters were added to existing procedures based on the structural substance of roads.

In a literature research the national and international state of the art concerning the topic of life-cycle-cost analysis and the behavior of asphalt roads under traffic were shown and analyzed. So it was possible to determine existing essentials for further calculations. Subsequently representative road sections for the German Autobahnen, Bundesstraßen and Landesstraßen were worked out. They define the cross sections, the thickness and number of layers as well as further components like guardrails or road signs for each road category.

On the basis of these representative road sections and individual maintenance strategies, the life-cycle costs were calculated based on estimated costs for the construction of the road and for maintenance activities. The life-cycle costs are defined as the sum of the costs for the construction and the maintenance of the road minus the salvage value at the end of the life-cycle.

The calculated life-cycle costs have been analyzed and functionally emulated. With these regression functions it is possible to estimate the life-cycle costs for asphalt pavements as a percentage development or as real costs.

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | IV |
| TABELLENVERZEICHNIS..... | XI |
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS..... | XV |
| | |
| 1 EINLEITUNG..... | 1 |
| 1.1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG | 1 |
| 1.2 METHODISCHES VORGEHEN | 2 |
| | |
| 2 LEBENSZYKLUSBETRACHTUNGEN VON STRASSEN IN DER LITERATUR | 4 |
| 2.1 LEBENSZYKLUSBETRACHTUNGEN IN DER NATIONALEN FORSCHUNG | 4 |
| 2.1.1 Erstellung einer Ablauffähigen Folge von Algorithmen für die Planung von Erhaltungsmassnahmen und der Mittelverwendung im Rahmen eines PMS..... | 7 |
| 2.1.2 Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit und bautechnischen Bewährung von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt und Beton auf bestehenden Bundesautobahnen (2005)..... | 7 |
| 2.1.3 Katalogisierung von beschreibenden Grössen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und der Wirkung von Erhaltungsmassnahmen (2005)..... | 11 |
| 2.1.4 Vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Asphaltbefestigungen nach langjähriger Verkehrsnutzung (2008)..... | 14 |
| 2.1.5 Methodenstudie zur Life-Cycle Bewertung von Strassenbefestigungen (2011)..... | 15 |
| 2.1.6 Grundlagen für die Beurteilung der dimensionierungsrelevanten Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von Oberbaubefestigungen aus Asphalt (2014)..... | 17 |
| 2.2 NATIONALE REGELWERKE | 20 |
| 2.2.1 Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Strassen (EWS 97) | 20 |
| 2.2.2 Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmassnahmen an Strassenbefestigungen (RPE-Stra 01)..... | 21 |
| 2.2.3 Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RSO 2014)..... | 24 |
| 2.3 INTERNATIONALE LEBENSZYKLUSBETRACHTUNGEN | 26 |
| 2.3.1 Vereinigte Staaten von Amerika (USA) | 27 |
| 2.3.2 England..... | 31 |
| 2.3.3 Schweden..... | 33 |
| 2.4 FAZIT DER LITERATURANALYSE | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | EINGANGSPARAMETER FÜR DIE BERECHNUNG DER LEBENSZYKLUSKOSTEN | 35 |
| 3.1 | DEFINITION CHARAKTERISTISCHER STRASSENABSCHNITTE | 36 |
| 3.1.1 | Autobahnen | 37 |
| 3.1.1.1 | Querschnitt | 38 |
| 3.1.1.2 | Oberbau | 38 |
| 3.1.1.3 | Passive Schutzeinrichtungen und Leitpfosten | 40 |
| 3.1.1.4 | Horizontale und vertikale Verkehrszeichen..... | 44 |
| 3.1.2 | Bundesstrassen | 47 |
| 3.1.2.1 | Querschnitt | 48 |
| 3.1.2.2 | Oberbau | 51 |
| 3.1.2.3 | Passive Schutzeinrichtungen und Leitpfosten | 52 |
| 3.1.2.4 | Horizontale und vertikale Verkehrszeichen..... | 53 |
| 3.1.3 | Landestrassen | 55 |
| 3.1.3.1 | Querschnitt | 55 |
| 3.1.3.2 | Oberbau | 56 |
| 3.1.3.3 | Passive Schutzeinrichtungen und Leitpfosten | 56 |
| 3.1.3.4 | Horizontale und vertikale Verkehrszeichen..... | 57 |
| 3.2 | VERKEHR | 57 |
| 3.3 | KOSTEN..... | 58 |
| 3.3.1 | Mischgut..... | 59 |
| 3.3.2 | Herstellkosten und Ausbaukosten der Schichten des Oberbaus | 62 |
| 3.3.3 | Herstellkosten für passive Schutzeinrichtungen..... | 64 |
| 3.3.4 | Herstellkosten für Leitpfosten | 65 |
| 3.3.5 | Herstellkosten für Verkehrszeichen..... | 66 |
| 3.3.6 | Kosten für das Einrichten und Vorhalten der Baustelle..... | 68 |
| 3.3.7 | Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle..... | 70 |
| 3.3.7.1 | Autobahnen..... | 71 |
| 3.3.7.2 | Bundes- und Landesstrassen..... | 75 |
| 3.3.8 | Kosten von Erhaltungsmaßnahmen am Oberbau..... | 76 |
| 3.3.8.1 | Autobahnen..... | 78 |
| 3.3.8.2 | Bundesstrassen..... | 81 |
| 3.3.8.3 | Landestrassen | 82 |
| 3.3.9 | Nutzungsdauern der Schichten des Oberbaus | 85 |
| 3.3.9.1 | Autobahnen..... | 85 |
| 3.3.10 | Bundes- und Landesstrassen | 90 |
| 4 | LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSEN IN ASPHALTBAUWEISE | 91 |
| 4.1 | BESCHREIBUNG DES BEWERTUNGSVERFAHRENS | 91 |
| 4.1.1 | Erhaltungsstrategie | 91 |
| 4.1.2 | Wertentwicklung der Schichten des Oberbaus..... | 93 |

| | | |
|---------------------|--|------------|
| 4.1.2.1 | Schichten ohne Bindemittel..... | 93 |
| 4.1.2.2 | Asphalttragschicht | 95 |
| 4.1.2.3 | Asphaltbinderschicht..... | 95 |
| 4.1.2.4 | Asphaltdeckschicht | 96 |
| 4.1.3 | Wertentwicklung der sonstigen Anlagenteile..... | 97 |
| 4.1.4 | Berechnung der Lebenszykluskosten..... | 98 |
| 4.2 | AUTOBAHNEN | 99 |
| 4.2.1 | Lebenszykluskosten..... | 99 |
| 4.2.2 | Einfluss der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 104 |
| 4.2.3 | Einfluss der Verzinsung..... | 111 |
| 4.2.4 | Einfluss Der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile | 113 |
| 4.3 | BUNDESSTRASSEN..... | 115 |
| 4.3.1 | Lebenszykluskosten..... | 115 |
| 4.3.2 | Einfluss der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 118 |
| 4.3.3 | Einfluss der Kosten Für die Sicherung der Arbeitsstelle | 121 |
| 4.3.4 | Einfluss der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile..... | 123 |
| 4.4 | LANDESSTRASSEN | 125 |
| 4.4.1 | Lebenszykluskosten..... | 125 |
| 4.4.2 | Einfluss der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 126 |
| 4.4.3 | Einfluss der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle | 132 |
| 4.4.4 | Einfluss der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile..... | 133 |
| 4.4.5 | Vergleich der Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnungen zwischen den Strassenkategorien | 135 |
| 4.5 | VERGLEICH DER ERGEBNISSE DER LEBENSZYKLUSKOSTENBERECHNUNGEN MIT DEN LITERATURANGABEN | 140 |
| 5 | SCHLUSSBETRACHTUNG..... | 145 |
| 5.1 | LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSENBEFESTIGUNGEN..... | 145 |
| 5.1.1 | Einfluss der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 145 |
| 5.1.2 | Einfluss der Nutzungsdauer und Kosten der Asphaltdeckschicht | 150 |
| 5.1.3 | Einfluss des Einbaus..... | 152 |
| 5.2 | FAZIT | 153 |
| 5.3 | WEITERER FORSCHUNGSBEDARF..... | 154 |
| 6 | LITERATURVERZEICHNIS..... | 156 |
| ANHANG | | 160 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 2-1: | Ausgewählte Verhaltensfunktionen | 9 |
| Abbildung 2-2: | Ertragbare Achsübergänge bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums | 10 |
| Abbildung 2-3: | Verhaltensfunktionen für die Spurrinntiefe verschiedener verhaltenshomogener Gruppen der Asphaltbauweise auf dem Hauptfahrstreifen (FS1) und den restlichen Fahrstreifen (FSR) | 12 |
| Abbildung 2-4: | Verhaltensfunktionen für das Unebenheitsmaß AUN verschiedener verhaltenshomogener Gruppen der Betonbauweise auf dem Hauptfahrstreifen (FS1) und den restlichen Fahrstreifen (FSR) | 13 |
| Abbildung 2-5: | Verlauf der Ermüdungsstatus-Werte der Oberbaubefestigungen aus Laborasphalt..... | 18 |
| Abbildung 2-6: | Standard-Verhaltensfunktionen für die Allgemeine Unebenheit, die Spurrinnen sowie Risse/Schäden gemäß den RPE-Stra 01..... | 24 |
| Abbildung 2-7: | Ablaufschema zur Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen nach den RSO..... | 25 |
| Abbildung 2-8: | Empfehlungen für mögliche Erhaltungsstrategien (PenDOT) - Auszug | 28 |
| Abbildung 2-9: | Einfluss der Rauheit auf die Betriebskosten der Fahrzeuge (Neuseeland) | 30 |
| Abbildung 2-10: | Beispiel für ein Flussdiagramm zur Darstellung der Aufwendungen während des Betrachtungszeitraums (links allgemein, rechts mit Werten) | 30 |
| Abbildung 2-11: | Schematischer Bewertungsablauf von COBA | 32 |
| Abbildung 3-1: | Schematischer Ablauf des monetären Bewertungsverfahrens | 35 |
| Abbildung 3-2: | Gewählte Regelquerschnitte für Autobahnen gemäß RAA | 38 |
| Abbildung 3-3: | Verteilung von Verkehrsstärken auf das Autobahnnetz im Jahr 2000 (Auswertung der BAST)..... | 39 |
| Abbildung 3-4: | Verteilung von Verkehrsstärken auf das Autobahnnetz im Jahr 2015 (Prognose auf Grundlage der Auswertung der BAST) | 39 |
| Abbildung 3-5: | Oberbau aus Asphalt für die Bk100 gemäß Tafel 1: Zeile 1, Spalte 1 der RStO 12 | 40 |
| Abbildung 3-6: | Prozentuale Verteilung der auf Autobahnen verbauten Schutzsysteme aus Stahl..... | 41 |
| Abbildung 3-7: | Stahlschutzplankensysteme nach DIN EN 1317..... | 42 |
| Abbildung 3-8: | Prozentuale Verteilung der auf Autobahnen aufgetragenen Materialien für Straßenmarkierungen..... | 45 |
| Abbildung 3-9: | Markierung einer Fahrbahn mit befestigtem Mittelstreifen..... | 46 |
| Abbildung 3-10: | Verteilung der DTV-Werte für Bundesstraßen im Jahr 2013 (auf Grundlage von Messungen der BAST)..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3-11: Verteilung des Schwerverkehrsanteils (SV) für Bundesstraßen im Jahr 2013 (auf Grundlage von Messungen der BAST)..... | 49 |
| Abbildung 3-12: Länge der Entwurfsklassen nach RAL bezogen auf die Entwurfsklasse [69] ... | 49 |
| Abbildung 3-13: Streckenlänge und Summenlinie der vorhandenen Querschnitte (links) und der Querschnitte nach den RAL (rechts)..... | 50 |
| Abbildung 3-14: Gewählter Regelquerschnitt für Bundesstraßen gemäß RAL..... | 50 |
| Abbildung 3-15: Oberbau aus Asphalt für die Bk10 gemäß Tafel 1: Zeile 1, Spalte 1 den RStO 12..... | 51 |
| Abbildung 3-16: Prozentuale Verteilung der auf Bundesstraßen verbauten Schutzsysteme aus Stahl | 52 |
| Abbildung 3-17: Prozentuale Verteilung der auf Bundesstraßen aufgebrauchten Materialien für Straßenmarkierungen..... | 53 |
| Abbildung 3-18: Markierung einer Bundesstraße mit einer bebauten Breite von 7,5 m bis 9,0 m..... | 54 |
| Abbildung 3-19: Gewählter Querschnitt für Landesstraßen nach den RAL..... | 55 |
| Abbildung 3-20: Oberbau aus Asphalt für die Bk1,8 gemäß Tafel 1: Zeile 1, Spalte 1 den RStO 12..... | 56 |
| Abbildung 3-21: Kostenbestandteile für den Neubau und die Erhaltung von Schichten des Straßenoberbaus..... | 58 |
| Abbildung 3-22: Herstellkosten und Nutzungsdauern für vertikale Verkehrszeichen (Auszug)..... | 67 |
| Abbildung 3-23: Erneuerungskosten von Straßenmarkierungen (links) und Nutzungsdauern (rechts)..... | 67 |
| Abbildung 3-24: Entwicklung des Baupreisindex für den Sektor Straße (https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Konjunkturindikatoren/Preise/bpr210.html , abgerufen am 02.02.2015)..... | 69 |
| Abbildung 3-25: Entwicklung der Kosten für die Baustelleneinrichtung in Abhängigkeit von der Dauer der Maßnahme (inkl. WüG+AGK) | 70 |
| Abbildung 3-26: Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 2-streifigen Richtungsfahrbahnen (hochgerechnet auf Stand Ende 2014)..... | 73 |
| Abbildung 3-27: Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 3-streifigen Richtungsfahrbahnen (hochgerechnet auf Stand Ende 2014)..... | 74 |
| Abbildung 3-28: Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Bundes- und Landesstraßen..... | 76 |
| Abbildung 3-29: Schichtenspezifische Kosten [€/m ²] für Erhaltungsmaßnahmen auf Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn..... | 79 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 3-30: Vergleich der Kostenanteile einer Erhaltungsmaßnahme (Aufbringen einer Dünnen Deckschicht in Heißbauweise) wenn diese die gesamte Richtungsfahrbahn oder nur den Haupt- bzw. Überholfahrstreifen umfasst | 80 |
| Abbildung 3-31: Schichtenspezifische Kosten [€/m ²] für Erhaltungsmaßnahmen auf Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn..... | 81 |
| Abbildung 3-32: Schichtenspezifische Kosten für Erhaltungsmaßnahmen auf Bundesstraßen.... | 82 |
| Abbildung 3-33: Schichtenspezifische Kosten für die Erhaltungsmaßnahmen auf Landesstraßen | 83 |
| Abbildung 3-34: Vergleich der Kostenanteile einer Erhaltungsmaßnahme (Aufbringen einer Dünnen Deckschicht in Heißbauweise) zwischen Bundes- und Landesstraßen | 84 |
| Abbildung 3-35: Vorüberlegung zur Verteilung der B-Zahl auf die Fahrstreifen einer Autobahn mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn | 86 |
| Abbildung 3-36: Vorüberlegung zur Verteilung des DTV auf die Fahrstreifen einer Autobahn mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn | 87 |
| Abbildung 3-37: Gewählte Nutzungsdauer der Schichten des Oberbaus von Autobahnen je nach Fahrstreifen..... | 89 |
| Abbildung 3-38: Gewählte Nutzungsdauer der Schichten des Oberbaus von Bundes- und Landesstraßen | 90 |
| Abbildung 4-1: Beispiel für eine Folge von Erhaltungsmaßnahmen während des Lebenszyklus | 92 |
| Abbildung 4-2: Beispiel für die Wertentwicklung von Schichten ohne Bindemittel (SoB) ohne Verzinsung (links) und mit Verzinsung von 3 % (rechts)..... | 94 |
| Abbildung 4-3: Beispiel für den Zusammenhang zwischen Wertverlust und Wertsteigerung durch Verzinsung | 94 |
| Abbildung 4-4: Beispiel für die Wertentwicklung einer Asphalttragschicht ohne Verzinsung (links) und mit Verzinsung von 3 % (rechts) | 95 |
| Abbildung 4-5: Beispiel für die Wertentwicklung einer Asphaltbinderschicht ohne Verzinsung (links) und mit Verzinsung von 3 % (rechts) | 96 |
| Abbildung 4-6: Beispiel für die Wertentwicklung einer Asphaltdeckschicht ohne Verzinsung (links) und mit Verzinsung von 3 % (rechts) | 97 |
| Abbildung 4-7: Beispiel für die Wertentwicklung der passiven Schutzeinrichtungen, Leitpfosten und vertikalen Verkehrszeichen (links) sowie der horizontalen Verkehrszeichen (rechts) inklusive einer Verzinsung von 3 % | 98 |
| Abbildung 4-8: Zusammenhang zwischen Kosten, Restwert und Lebenszykluskosten (LZK) | 99 |
| Abbildung 4-9: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren im Hauptfahrstreifen..... | 101 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4-10: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 20 Jahren im Hauptfahrstreifen | 101 |
| Abbildung 4-11: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren im Hauptfahrstreifen | 102 |
| Abbildung 4-12: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 40 Jahren im Hauptfahrstreifen | 102 |
| Abbildung 4-13: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren im Hauptfahrstreifen | 103 |
| Abbildung 4-14: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 65 Jahren im Hauptfahrstreifen | 103 |
| Abbildung 4-15: Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 104 |
| Abbildung 4-16: Relative Entwicklung der Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 106 |
| Abbildung 4-17: Relative Entwicklung der Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 107 |
| Abbildung 4-18: Mittels Schätzverfahren berechnete jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 109 |
| Abbildung 4-19: Mittels Schätzverfahren berechnete jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 109 |
| Abbildung 4-20: Einfluss der Verzinsung auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn ohne Berücksichtigung der Kosten für die sonstigen Anlagenteile | 112 |
| Abbildung 4-21: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn | 114 |
| Abbildung 4-22: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn | 114 |
| Abbildung 4-23: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Kosten für die sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 114 |
| Abbildung 4-24: Entwicklung der Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 118 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4-25: Erhaltungsstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren..... | 116 |
| Abbildung 4-26: Erhaltungsstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 20 Jahren..... | 116 |
| Abbildung 4-27: Erhaltungsstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren..... | 116 |
| Abbildung 4-28: Erhaltungsstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 40 Jahren..... | 117 |
| Abbildung 4-29: Erhaltungsstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren..... | 117 |
| Abbildung 4-30: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 65 Jahren..... | 117 |
| Abbildung 4-31: Entwicklung der Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht $f_{B,j}(NDATS,i)$ | 119 |
| Abbildung 4-32: Mittels Schätzverfahren berechnete jährliche Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 121 |
| Abbildung 4-33: Auswirkungen der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen ohne Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile..... | 122 |
| Abbildung 4-34: Auswirkungen der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen mit Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile..... | 122 |
| Abbildung 4-35: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Art der Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 123 |
| Abbildung 4-36: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen (Vollsperrung) | 124 |
| Abbildung 4-37: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen (halbseitige Sperrung)..... | 124 |
| Abbildung 4-38: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Kosten für die sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 125 |
| Abbildung 4-39: Erhaltungsstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren..... | 127 |
| Abbildung 4-40: Erhaltungsstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 20 Jahren..... | 127 |
| Abbildung 4-41: Erhaltungsstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren..... | 127 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4-42: Erhaltungsstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 40 Jahren | 128 |
| Abbildung 4-43: Erhaltungsstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren | 128 |
| Abbildung 4-44: Erhaltungsstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 65 Jahren | 128 |
| Abbildung 4-45: Entwicklung der Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 129 |
| Abbildung 4-46: Entwicklung der Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 129 |
| Abbildung 4-47: Mittels Schätzverfahren berechnete jährliche Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 131 |
| Abbildung 4-48: Auswirkungen der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen ohne Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile | 132 |
| Abbildung 4-49: Auswirkungen der Kosten der Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen mit Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile | 132 |
| Abbildung 4-50: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Art der Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 133 |
| Abbildung 4-51: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen (Vollsperrung) | 134 |
| Abbildung 4-52: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen (halbseitige Sperrung)..... | 134 |
| Abbildung 4-53: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Kosten für die sonstigen Anlageneile auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht | 135 |
| Abbildung 4-54: Vergleich der absoluten jährlichen Lebenszykluskosten [€/m ²] der Straßenkategorien in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht..... | 136 |
| Abbildung 4-55: Relative Lebenszykluskosten verschiedener bezogen auf die jährlichen Lebenszykluskosten [€/m ²] von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn | 137 |
| Abbildung 4-56: Vergleich der Entwicklung der Lebenszykluskosten verschiedener Straßenkategorien anhand der ermittelten Sigmoid-Funktionen..... | 138 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4-57: Relative Erhöhung der Lebenszykluskosten verschiedener Straßenkategorien bei Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile..... | 139 |
| Abbildung 4-58: Relative Erhöhung der Lebenszykluskosten von Bundes- und Landesstraßen, wenn eine Sicherung der Arbeitsstelle eingerichtet und vorgehalten werden muss | 139 |
| Abbildung 4-59: Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn bei einer Diskontierung von 3 % und ohne Verzinsung in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht.. | 143 |
| Abbildung 4-60: Beispiel für eine Erhaltungsstrategie gemäß dem Merkblatt über den Finanzbedarf von Straßen in den Gemeinden | 144 |
| Abbildung 5-1: Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten von Autobahnen ausgehend von einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich der sonstigen Anlagenteile) | 146 |
| Abbildung 5-2: Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten von Bundesstraßen ausgehend von einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich der sonstigen Anlagenteile) | 147 |
| Abbildung 5-3: Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten von Landesstraßen ausgehend von einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren..... | 149 |
| Abbildung 5-4: Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten der Straßenbefestigung in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht (in Anlehnung an [5]) | 150 |
| Abbildung 5-5: Einfluss der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen | 151 |
| Abbildung 5-6: Einfluss der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen (Flächendiagramm) | 151 |
| Abbildung 5-7: Einfluss einer von der Dimensionierung abweichenden Nutzungsdauer am Bohrkern auf die jährlichen Lebenszykluskosten | 153 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|---------------|--|----|
| Tabelle 2-1: | Empfohlene Eingreifzeitpunkte nach]..... | 10 |
| Tabelle 2-2: | Abgrenzung ausgewählter verhaltenshomogener Gruppen der Asphaltbauweise | 12 |
| Tabelle 2-3: | Abgrenzung ausgewählter verhaltenshomogener Gruppen der Betonbau..... | 13 |
| Tabelle 2-4: | Begriffssystematik der Straßenerhaltung gemäß den RPE-Stra 01 | 22 |
| Tabelle 2-5: | Anhaltswerte zur Abschätzung des Zeitraums zwischen dem Neubau bzw. der letzten Erhaltung und dem Eingreifzeitpunkt (Außerortsstraßen) | 22 |
| Tabelle 2-6: | Anhaltswerte zur Abschätzung des Zeitraums zwischen der letztmaligen Durchführung einer Instandsetzungsmaßnahme und dem Eingreifzeitpunkt (Außerortsstraßen) | 23 |
| Tabelle 3-1: | Parameter des Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der Lebenszykluskosten einer Straßenbefestigung | 36 |
| Tabelle 3-2: | Gewählte Asphaltmischgüter für die Schichten des gebundenen Oberbaus von Autobahnen..... | 40 |
| Tabelle 3-3: | Strichbreiten der Längsmarkierungen | 46 |
| Tabelle 3-4: | Länge von Strichen und Lücken bei unterbrochenen Längsmarkierungen | 46 |
| Tabelle 3-5: | Gewählte Asphaltmischgüter für die Schichten des gebundenen Oberbaus von Bundesstraßen | 51 |
| Tabelle 3-6: | Gewählte Asphaltmischgüter für die Schichten des gebundenen Oberbaus von Landesstraßen..... | 56 |
| Tabelle 3-7: | Gewählte Eingangsparameter zur Berechnung der B-Zahl in Abhängigkeit von der Straßenkategorie..... | 58 |
| Tabelle 3-8: | Asphaltmischgutpreise im Bundesland Nordrhein-Westfalen..... | 59 |
| Tabelle 3-9: | Preise für die Gesteinskorngemische der ungebundenen Schichten im Bundesland Nordrhein-Westfalen..... | 60 |
| Tabelle 3-10: | Zusammenhang zwischen Asphaltmischgutpreisen und dem jeweiligen Bundesland (bezogen auf Nordrhein-Westfalen)..... | 61 |
| Tabelle 3-11: | Zusammenhang zwischen den Preisen der Gesteinskorngemische und dem jeweiligen Bundesland (bezogen auf Nordrhein-Westfalen)..... | 61 |
| Tabelle 3-12: | Herstellkosten der ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus in [€/m ³] ... | 62 |
| Tabelle 3-13: | Herstellkosten der Asphaltsschichten des Straßenoberbaus in [€/t] | 63 |
| Tabelle 3-14: | Ausbaukosten der Asphaltsschichten des Straßenoberbaus | 64 |
| Tabelle 3-15: | Ausbaukosten der Schichten ohne Bindemittel | 64 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 3-16: | Kosten und Nutzungsdauern für die Erneuerung von passiven Schutzeinrichtungen | 65 |
| Tabelle 3-17: | Kosten für das Abbauen, Lagern und Wiedereinbauen der Schutzeinrichtungen | 65 |
| Tabelle 3-18: | Für die Berechnung der Lebenszykluskosten festgelegte Kosten und Nutzungsdauern für Straßenmarkierungen | 68 |
| Tabelle 3-19: | Parameter zur Ermittlung der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn [77] (Parameter mittels BPI erhöht)..... | 72 |
| Tabelle 3-20: | Parameter zur Ermittlung der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn (Parameter mittels BPI erhöht) | 75 |
| Tabelle 3-21: | Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf einbahnigen Querschnitten in Abhängigkeit von der Dauer der Maßnahme (inkl. WuG + AGK)..... | 76 |
| Tabelle 3-22: | Definition des Umfangs der Erhaltungsmaßnahmen..... | 77 |
| Tabelle 3-23: | Nach Schichten getrennte Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn (RQ 31) | 79 |
| Tabelle 3-24: | Nach Schichten getrennte Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn (RQ 36) | 80 |
| Tabelle 3-25: | Nach Schichten getrennte Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Bundesstraßen (RQ 11) | 82 |
| Tabelle 3-26: | Nach Schichten getrennte Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Landesstraßen | 83 |
| Tabelle 4-1: | Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn | 100 |
| Tabelle 4-2: | Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn | 100 |
| Tabelle 4-3: | Parameter der Sigmoid-Funktionen für Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn | 106 |
| Tabelle 4-4: | Parameter der Sigmoid-Funktionen für Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn | 106 |
| Tabelle 4-5: | Relativvergleich zwischen den tatsächlich berechneten und mittels Sigmoid-Funktionen prognostizierten Lebenszykluskosten von Autobahnen, normiert auf die Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren | 108 |
| Tabelle 4-6: | Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (Faktor $LZKA_{j,ND(ATS)=30}$)..... | 110 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 4-7: | Berechnete Einbaudicke der Asphalttragschichten bei verschiedenen Nutzungsdauern | 110 |
| Tabelle 4-8: | Jährliche Lebenszykluskosten von Bundesstraßen ohne Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile..... | 115 |
| Tabelle 4-9: | Jährliche Lebenszykluskosten von Bundesstraßen mit Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile..... | 115 |
| Tabelle 4-10: | Parameter der Sigmoid-Funktionen für Bundesstraßen | 119 |
| Tabelle 4-11: | Relativvergleich zwischen den tatsächlich berechneten und mittels Sigmoid-Funktionen prognostizierten Lebenszykluskosten von Bundesstraßen, normiert auf die Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren | 120 |
| Tabelle 4-12: | Jährliche Lebenszykluskosten von Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (Faktor $LZKB_{j,ND(ATS)=30}$)..... | 120 |
| Tabelle 4-13: | Jährliche Lebenszykluskosten von Landesstraßen ohne Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile..... | 125 |
| Tabelle 4-14: | Jährliche Lebenszykluskosten von Landesstraßen mit Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile..... | 126 |
| Tabelle 4-15: | Parameter der Sigmoid-Funktionen für Landesstraßen..... | 129 |
| Tabelle 4-16: | Relativvergleich zwischen den tatsächlich berechneten und mittels Sigmoid-Funktionen prognostizierten Lebenszykluskosten von Landesstraßen, normiert auf die Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren | 130 |
| Tabelle 4-17: | Jährliche Lebenszykluskosten von Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (Faktor $LZKL_{j,ND(ATS)=30}$)..... | 131 |
| Tabelle 4-18: | Vergleich des jährlichen Finanzbedarfs | 141 |
| Tabelle 5-1: | Prozentuale Entwicklung der Lebenszykluskosten von Autobahnen, bezogen auf eine übliche Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich der sonstigen Anlagenteile)..... | 147 |
| Tabelle 5-2: | Prozentuale Entwicklung der Lebenszykluskosten von Bundesstraßen, bezogen auf eine übliche Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich sonstiger Anlagenteile)..... | 148 |
| Tabelle 5-3: | Prozentuale Entwicklung der Lebenszykluskosten von Landesstraßen, bezogen auf eine übliche Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich sonstiger Anlagenteile)..... | 149 |
| Tabelle 5-4: | Lebenszykluskostenveränderung bei Veränderung der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht pro Jahr | 149 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Tabelle 5-5: | Einfluss der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen | 152 |
|--------------|---|-----|

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|------------|--|
| ABi..... | Asphaltbinderschicht |
| ADS..... | Asphaltdeckschicht |
| AGK..... | Allgemeine Geschäftskosten |
| ARS..... | Allgemeines Rundschreiben Straßenbau |
| ATS..... | Asphalttragschicht |
| AUN..... | allgemeine Unebenheit [-] |
| B..... | Verkehrsbelastung [äquiv. 10-t Äü] |
| BASt..... | Bundesanstalt für Straßenwesen |
| Bk..... | Belastungsklasse gemäß den RStO 12 |
| BMV..... | Bundesministerium für Verkehr (heute: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung-BMVBS) |
| BMVBS..... | Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung |
| BPI..... | Baupreisindex |
| DDSP..... | Doppelte Distanzschutzplanke |
| DSP..... | Doppelte Schutzplanke |
| DTV..... | Durchschnittliche Tägliche Verkehrsstärke [Kfz/24h] |
| EDSP..... | Einfache Distanzschutzplanke |
| EKL..... | Entwurfsklasse |
| ESP..... | Einfache Schutzplanke |
| FGSV..... | Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen |
| GND..... | Gesamtnutzungsdauer [a] |
| HAPMS..... | Highways Agency Pavement Management System |
| HFS..... | Hauptfahrstreifen |
| HK..... | Herstellkosten |
| Kfz..... | Kraftfahrzeug(e) |
| KT..... | Kalendertag(e) |
| LCCA..... | Life Cycle Cost Analysis |
| LSA..... | Lichtsignalanlage |
| LTPP..... | Long-Term Pavement Performance Program |
| LZK..... | Lebenszykluskosten |
| Pkw..... | Personenkraftwagen |
| PMS..... | Pavement Management System |
| PPP..... | Public Private Partnership |
| rFS..... | restliche Fahrstreifen |
| RND..... | Restnutzungsdauer [a] |
| RQ..... | Regelquerschnitt |
| RW..... | Restwert [€] |
| SA..... | sonstige Anlagenteile |
| SHRP..... | Strategic Highway Research Program |
| SOS..... | Schemes Options System |
| SPT..... | Spurrinntiefe [mm] oder [-] |
| StVO..... | Straßenverkehrsordnung |

| | |
|-----------|--|
| TJ..... | Terrajoule |
| TL..... | Technische Lieferbedingungen |
| TU | Technische Universität |
| ÜFS..... | Überholfahrstreifen |
| W..... | Wert [€] |
| WuG | Wagnis und Gewinn |
| ZEB | Zustandserfassung und -bewertung |
| ZTV | Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien |

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Laut dem statistischen Bundesamt beträgt die Gesamtlänge des überörtlichen Straßennetzes in Deutschland rund 230.400 km, wovon rund 12.900 km auf Bundesautobahnen und etwa 39.400 km auf Bundesstraßen entfallen [1]. Ein Straßennetz in ausreichender Qualität zur Verfügung zu stellen und vorzuhalten, ist eine Aufgabe der Daseinsvorsorge, deren Umsetzung der Bund bzw. die jeweiligen Baulastträger sicherzustellen haben. Dementsprechend ist die Abschätzung der monetären Gesamtbilanz von Straßenbefestigungen ein Grundanliegen der Straßenbaulastträger. Ihr vordringliches Ziel besteht darin, die Kosten für die Erstellung und die Erhaltung der Verkehrsverbindungen mit Blick auf die Kosten über den Lebenszyklus hinweg so gering wie möglich zu halten.

Lebenszykluskostenbetrachtungen (auch Life-Cycle-Cost Analysen genannt) berücksichtigen nicht nur die reinen Herstellkosten, sondern nach Möglichkeit alle während der Nutzungsdauer einer Straße anfallenden Aufwendungen, z.B. für die Erhaltung. Anders als im Pavement Management System (PMS), das das Ziel verfolgt, das Anlagevermögen Straße entsprechend der Erhaltungsziele technisch und wirtschaftlich sinnvoll zu verwalten, zielt eine Life-Cycle-Cost Analyse eher auf die optimale Wahl von langfristig wirtschaftlichen baulichen Lösungen im Einzelfall ab. Dementsprechend sind solche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dezidierter als im PMS und insbesondere im Zuge neuer Vertragsformen (Public Private Partnership oder Funktionsbauverträge) sinnvoll bzw. notwendig. Bei entsprechenden Vertragsmodellen übernimmt der Auftragnehmer langfristig und lebenszyklusübergreifend Verantwortung für das Bauwerk Straße. Neben dem Neubau wird auch die Erhaltung über einen definierten Zeitraum Vertragsgegenstand, sodass der Auftragnehmer die in der Zukunft anfallenden Kosten hinreichend genau prognostizieren muss, um ein wirtschaftliches Gesamtkonzept zu erarbeiten.

Die oben genannten neuen Vertragsformen, aber ebenso die stetig verknappenden fossilen Ressourcen, haben in den vergangenen Jahren maßgeblich dazu beigetragen, auch im Bereich des Straßenbaus verstärkt nach innovativen Baumaterialien und Bauweisen zu suchen. Solche Innovationen lassen sich mit der Empirie der RStO [2] nicht realisieren. Erst mit der Einführung der RDO Asphalt 09 [3] wurde eine rechnerische Dimensionierung unter Berücksichtigung individueller Materialkennwerte möglich. Trotz der sich hieraus ergebenden Möglichkeiten, blieb der gesamte Bereich der monetären Bewertung von Asphaltstraßenbefestigungen – wenn auch von immenser wirtschaftlicher Bedeutung – in den Regelwerken lange unberücksichtigt.

Um diesem Defizit entgegenzuwirken, wurde aufbauend auf den Ergebnissen der rechnerischen Dimensionierung mit den RSO [4] ein Verfahren erarbeitet, um die verbleibende Restsubstanz einer Asphalttragschicht unter Verwendung spezifischer Materialkennwerte hinreichend genau zu prognostizieren und hierauf aufbauend auch den restlichen asphaltgebundenen Oberbau monetär zu bewerten.

Jedoch ist derzeit nur unzureichend erforscht, was sich aufgrund der ermittelten Gesamt- oder Restnutzungsdauer einer Asphalttragschicht für wirtschaftlich sinnvolle Erhaltungsstrategien –

bezogen auf die Art, den Umfang sowie die Abfolge der verfügbaren Erhaltungsmaßnahmen an den über der Asphalttragschicht liegenden Schichten – ergeben. Die Art und Abfolge von Maßnahmen sind bei Lebenszyklusbetrachtungen von besonderer Bedeutung, da die Restnutzungsdauern der einzelnen Schichten aufgrund der fortwährenden Erhaltung während der Betriebsphase einer Straßenbefestigung in der Regel nicht identisch sind. Die verbleibende Restnutzungsdauer der tiefer im Oberbau liegenden Schichten begrenzt die realisierbare Restnutzungsdauer der darüber liegenden Schichten. Dementsprechend sind bei einer nicht abgestimmten Erhaltungsstrategie teilweise auch solche Schichten von Erhaltungsmaßnahmen betroffen, die ihre maximale Nutzungsdauer noch nicht erreicht haben.

Erste weiterführende Untersuchungen bezüglich dieses Sachverhaltes wurden in dem Forschungsprojekt „GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG DER DIMENSIONIERUNGSRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN UND DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON OBERBAUBEFESTIGUNGEN AUS ASPHALT“ [5] durchgeführt. Diese beschränkten sich jedoch zunächst auf die Straßenkategorie der Autobahnen und legten vereinfachte Annahmen beispielsweise bezüglich der Baustellenabmessungen oder der Sicherung der Arbeitsstelle zugrunde. Weiterhin wurden die sonstigen Anlagenteile einer Straße – also beispielsweise die passiven Schutzeinrichtungen oder die Verkehrszeichen – vernachlässigt.

Hier setzt die vorliegende Forschungsarbeit an. Die Lebenszykluskosten von Autobahnen, aber auch von Bundes- und Landesstraßen werden dezidiert und unter Einbeziehung relevanter sonstiger Anlagenteile ermittelt und ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Kostenberechnungen werden anschließend als Grundlage bzw. Eingangsgrößen verwendet, um ein Verfahren zu erarbeiten, Lebenszykluskosten verschiedener Straßenkategorien möglichst allgemeingültig und in Abhängigkeit von geeigneten Einflussfaktoren abschätzen zu können.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass in dieser Arbeit nicht alle potenziell relevanten Einflussfaktoren im Detail untersucht werden können. Beispielsweise muss im Hinblick auf die Auswirkungen der Mischgutzusammensetzung (Bindemittelgehalt, Bitumensorte, usw.) auf den weiteren Forschungsbedarf verwiesen werden.

1.2 METHODISCHES VORGEHEN

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei wesentliche Hauptteile. Nach einer allgemeinen Einführung wird zunächst eine umfangreiche Literaturanalyse durchgeführt, um den aktuellen Stand der Technik bezüglich der Zustandsentwicklung von Schichten des Oberbaus sowie Lebenszyklusbetrachtungen von Straßen darzulegen (Kapitel 2). Maßgebliches Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, die bereits vorhanden Grundlagen für die weiteren Berechnungen zu erfassen und wichtige Einflussfaktoren auf die Lebenszykluskosten einer Straße zu detektieren. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und kritischen Bewertung der bisherigen Regelwerke und Forschungsarbeiten.

Der zweite Hauptteil hat die Ermittlung der Eingangsparameter für die weiteren Lebenszykluskostenberechnungen zum Gegenstand (Kapitel 3). Ein elementarer Bestandteil ist dabei die Definition von charakteristischen Streckenabschnitten für Autobahnen sowie Bundes- und Landesstraßen. Dies umfasst sowohl die Festlegung eines geeigneten Querschnitts als auch die Vorgabe eines für die Verkehrsbelastung ausreichend dimensionierten Oberbaus sowie die Ausstattung mit sonstigen Anlagenteilen. Den sonstigen Anlagenteilen wird in dieser Arbeit eine besondere Bedeutung zugesprochen, da deren Erhaltung und die entstehenden Kosten in der Literatur und den etablierten Management Systemen zumeist nur rudimentär und in Form von nicht näher definierten Zuschlagfaktoren berücksichtigt werden. In einem weiteren Schritt werden für alle Tätigkeiten im Rahmen von Neubau- oder Erhaltungsmaßnahmen möglichst repräsentative Kosten ermittelt sowie Nutzungsdauern für die einzelnen Schichten des Straßenoberbaus und der sonstigen Anlagenteile festgelegt. Letztere werden für die Asphalttragschicht mehrfach variiert, da die in Kapitel 2.1.6 näher dargelegten Ergebnisse des Forschungsprojekts „GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG DER DIMENSIONIERUNGSRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN UND DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON OBERBAUBEFESTIGUNGEN AUS ASPHALT“ [5] zeigten, dass besonders dieser Parameter den signifikantesten Einfluss auf die resultierenden Lebenszykluskosten hat.

Der dritte Hauptteil umfasst die eigentlichen Lebenszykluskostenberechnungen der verschiedenen Straßenkategorien (Kapitel 4). Hierzu werden anhand der zuvor festgelegten Nutzungsdauern Erhaltungsstrategien mit definierten Maßnahmenteilen, -folgen und -zeitpunkten erarbeitet und wirtschaftlich bewertet.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden im Anschluss ausgewertet und bewertet.

2 LEBENSZYKLUSBETRACHTUNGEN VON STRASSEN IN DER LITERATUR

2.1 LEBENSZYKLUSBETRACHTUNGEN IN DER NATIONALEN FORSCHUNG

Während Life-Cycle Analysen im Ausland schon seit geraumer Zeit bei größeren Straßenbauprojekten Anwendung finden, haben entsprechende Ansätze in Deutschland erst in den vergangenen 10 Jahren stark an Bedeutung gewonnen, was in hohem Maße auf die Etablierung von Funktionsbauverträgen und PPP-Modellen zurückzuführen ist. Dabei liegen erste Ansätze für Verfahren zur Bauweisenbewertung bereits mehr als 50 Jahre zurück [6] und wurden in den 80er Jahren durch SCHMUCK [7] und MOOSMAYER [8] gedanklich weiterentwickelt. Jedoch konnten erst mit der Einführung der turnusmäßigen Zustandserfassung und -bewertung und der Absicherung von Ausfallverteilungen für die verschiedenen Bauweisen [9], [10], [11] sowie über die detaillierte Auswertung von 170 Langzeitbeobachtungsstrecken der Bundesanstalt für Straßenwesen [12], [13], [14] Erkenntnisse zu signifikanten Einflussgrößen auf das Langzeitverhalten erarbeitet werden, denen ein allgemein gültiger Ansatz innewohnt und die auf die Zukunft bewährter Bauweisen übertragen werden konnten.

Mit dem Allgemeinen Rundschreiben Nr. 5/1996 [15] wurde ein erster Versuch unternommen, ein Kriterium bzw. einen Richtwert festzulegen, um die Wirtschaftlichkeit verschiedener Bauweisen gegeneinander zu werten. Mangels ausreichend gesicherter Erkenntnisse wurde zunächst vorgegeben, dass ein Angebot mit Splittmastixasphalt 5 Mark/m² unter der Wertsumme eines Vergleichsangebots in Beton- oder Gussasphaltbauweise liegen muss, um als wirtschaftlich gleichwertig zu gelten. Bereits bei Veröffentlichung des ARS wurde festgelegt, dass dieser Ansatz ersetzt werden sollte, sobald weitere Untersuchungen zum Bauweisenvergleich vorliegen, die wiederum vom damaligen Bundesministerium für Verkehr (BMV) zugesagt wurden. Auf Initiative der Industrie erfolgte deshalb eine Überprüfung durch STEINHOFF UND PÄTZOLD [16]. Nach kritischer Wertung des Gutachtens seitens des BMV und der BASt wurde der 5-Mark Erlass nach AES 5/1996 zwar nicht verworfen, jedoch Änderungen im folgenden ARS 35/1998 [17] vorgenommen. Dies betraf besonders den Verzicht auf eine belastungsabhängige Beschränkung von Deckschichten aus SMA.

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Auswertungen wurde im Jahr 2000 ein Forschungsprojekt mit dem Titel „UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRTSCHAFTLICHKEIT UND BAUTECHNISCHEN BEWÄHRUNG VON FAHRBAHNBESTÄTIGUNGEN AUS ASPHALT UND BETON AUF BESTEHENDEN BUNDESAUTOBAHNEN“ [18] entworfen und 2005 abgeschlossen. Dieses Projekt gilt heute als Einstieg der Forschung in die Bauweisenbewertung anhand von Lebenszykluskosten. Es wurde eine Systematik entwickelt, mit der ein Kosten-Nutzen-Vergleich unterschiedlicher Bauweisen durchgeführt werden kann. Insgesamt ist die in diesem Forschungsprojekt entwickelte Systematik in der Lage, die unterschiedlichen Bauweisen der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) [2] der Asphalt- und Betonbauweisen erwartungskonform hinsichtlich ihres Gebrauchsverhaltens zu beurteilen. Umfangreiche Folgerechnungen durch ZANDER [19] führten letztlich zum ARS 5/2005 [20] (Fortentwicklung des ARS 35/1998), das von einer wirt-

schaftlichen Gleichwertigkeit ausgeht, wenn die Wertsumme des Angebots mit SMA 1,80 €/m² unter der Wertsumme eines Vergleichsangebots in Beton- oder Gussasphaltbauweise liegt.

HINSCH ET. AL. [21] untersuchten in dem parallel zu [18] realisierten Projekt „KATALOGISIERUNG VON BESCHREIBENDEN GRÖSSEN FÜR DAS GEBRAUCHSVERHALTEN VON FAHRBAHNBESTÄTIGUNGEN UND DIE WIRKUNG VON ERHALTUNGSMASSNAHMEN“ die Verhaltensfunktionen sowie die Rücksetzwerte zur Beurteilung der Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen im Pavement Management System (PMS), um diese ggf. zu aktualisieren und anzupassen. Der Fokus des Projektes lag dabei nicht auf der Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung der Gesamtwirtschaftlichkeit von Straßenbefestigungen, sondern Zustandsentwicklungen verschiedener Bauweisen mit zugehörigen Verhaltensmodellen sowie Rücksetzwerte systematisch zu erfassen und zu erweitern. Die Ergebnisse haben deshalb auch für Life-Cycle-Bewertungen Relevanz, da u.a. Verhaltensfunktionen für verschiedene Zustandsgrößen in Abhängigkeit von der ertragenen Verkehrsbelastung erarbeitet wurden.

Das 2008 abgeschlossene Forschungsprojekt „VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER RESTSUBSTANZ VON ASPHALTBESTÄTIGUNGEN NACH LANGJÄHRIGER VERKEHRSNUTZUNG“ [22] stellt erstmals ein Verfahren zur Verfügung, das eine monetäre Bewertung der rechnerisch ermittelten Restnutzungsdauer einer Asphalttragschicht – also der tatsächlich verbleibenden Substanz – ermöglicht. Damit distanziert man sich von der Annahme fester Nutzungsdauern und berechnet stattdessen einen Ermüdungsstatus der Asphalttragschicht in Abhängigkeit von der prognostizierten Verkehrsbelastung, dem Klima sowie materialspezifischen Kennwerten (Steifigkeiten, Ermüdung, Tragfähigkeiten) des Straßenoberbaus.

Ein auf dem Dickenäquivalenzprinzip gemäß Arbeitspapier Substanzwert-Bestand [23] beruhender Ansatz wurde in dem 2010 abgeschlossenen Forschungsprojekt „ERARBEITUNG EINES PROTOTYPEN EINES TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHEN KOSTENMINIMIERUNGSMODULS FÜR DAS ERHALTUNGSMANAGEMENT (PMS)“ [24] von RÜBENSAM ET. AL. erarbeitet. Gedanklich entfernte man sich zugunsten eines für das PMS ausreichend pragmatischen Ansatzes auf Grundlage des nicht mehr zeitgemäßen AP Substanzwert-Bestand wieder von Verfahren (z.B. [22] oder [4]), die Lebenszyklusbetrachtungen auf Grundlage von Substanzen vornehmen. Die entwickelte Methode erscheint deshalb für hinreichend genaue Betrachtungen auf Objektebene nicht geeignet und wird deshalb im Folgenden auch nicht weiter verfolgt.

RESSEL ET. AL. entwickelten 2011 in dem Forschungsprojekt „METHODENSTUDIE ZUR LIFE-CYCLE BEWERTUNG VON STRASSENBESTÄTIGUNGEN“ [25] ein monetäres Bewertungsverfahren, das eine softwaregestützte Kalkulation der Gesamtwirtschaftlichkeit von Straßenbefestigungen u.a. unter Berücksichtigung der Erhaltungsstrategie sowie der Nutzerkosten zulässt (Software „LCD – Life-Cycle Analyse an Straßenkonstruktionen in Deutschland“). Es wurde dabei zur Substanzbewertung nicht auf die Ergebnisse des Vorgängerprojekts [22] zurückgegriffen, sondern auf das nicht mehr zeitgemäße Dickenäquivalenzprinzip. Der Versuch, eine nicht-monetäre und damit preisunabhängige Verfahrensweise zu entwickeln, die sich ausschließlich am zu erwartenden Erhaltungsaufwand orientiert, wurde nicht zu Ende geführt.

WERMUTH stellte 2012 in seiner Dissertation „LEBENSKOSTENPLANUNG FÜR DEN STRASSEN-OBERBAU MITTELS MARKOV-PROZESS VOR DEM HINTERGRUND DES PUBLIC PRIVATE PARTNERSHIPS“ [26] einen Ansatz zur Prognose der Lebenskosten eines Straßenoberbaus auf Grundlage stochastischer Prozesse (besonders dem Markov-Prozess) vor. Das Verfahren beruht also nicht auf dem Prinzip der rechnerischen Dimensionierung oder festen Nutzungsdauern, sondern ermittelt Ausfallzeitpunkte anhand von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die sich aus der Analyse und Strukturierung der Oberflächenmerkmale mehrerer ZEB-Kampagnen ableiten. Ab Berichtslegung im Jahr 2012 bis heute wurde aufgrund fehlender Daten jedoch keine Kalibrierung des entwickelten Modells an den tatsächlichen Zustandsmerkmalen durchgeführt, was die Anwendbarkeit derzeit noch deutlich einschränkt.

In dem 2014 abgeschlossenen Forschungsprojekt „GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG DER DIMENSIONIERUNGSRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN UND DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON OBERBAUBEFESTIGUNGEN AUS ASPHALT“ [5] wurden die Auswirkungen zulässiger Schwankungen in der Mischgutzusammensetzung von Asphalt unter anderem unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Es wurden die Life-Cycle Kosten zahlreicher Straßenoberbauten unter Einbeziehung verschiedener Randbedingungen – z.B. der Verkehrsbelastung, der Erhaltungsstrategien sowie der Nutzungsdauern der gebundenen Schichten – während eines definierten Betrachtungszeitraums umfangreich untersucht. Hierzu wurde am Institut für Straßenwesen der Universität Siegen ein auf dem Grundprinzip der RSO basierendes Bewertungsverfahren erarbeitet und getestet. Sowohl das Bewertungsverfahren selbst als auch die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind von großer Bedeutung für die vorliegende Arbeit und werden deshalb im Folgenden eingehend behandelt.

Um die Bestimmung und monetäre Bewertung der Substanz einer Asphalttragschicht, aber auch der anderen Schichten des Straßenoberbaus in ein Regelwerk der FGSV zu überführen, wurden auf Grundlage eines erweiterten Verfahrens ab 2011 begonnen, die „RICHTLINIEN ZUR BEWERTUNG DER STRUKTURELLEN SUBSTANZ DER OBERBAUS VON VERKEHRSFLÄCHEN IN ASPHALTBAUWEISE (RSO Asphalt)“ [4] zu erarbeiten.¹ Das Bewertungsverfahren betrachtet jede Schicht des Straßenoberbaus separat und ermittelt in Abhängigkeit von der bautechnisch zu erwartenden Restnutzungsdauer einen monetären Wert auf der Grundlage definierter Herstellungskosten oder tatsächlicher Neubaukosten. Durch die Möglichkeit, während der Nutzungsdauer des Straßenoberbaus anfallende Erhaltungsmaßnahmen in Ansatz zu bringen, eignet sich das Verfahren gut für eine Bewertung der Lebenszykluskosten.

Im Folgenden werden die maßgeblichen Forschungsprojekte zu diesem Themengebiet noch einmal detaillierter vorgestellt, um im Anschluss deren Eignung zur Beantwortung der vorliegenden Forschungsfragen zu klären.

¹ Zum Zeitpunkt dieser Arbeit befanden sich die RSO noch im Entwurf.

2.1.1 ERSTELLUNG EINER ABLAUFFÄHIGEN FOLGE VON ALGORITHMEN FÜR DIE PLANUNG VON ERHALTUNGSMASSNAHMEN UND DER MITTELVERWENDUNG IM RAHMEN EINES PMS

Im Rahmen der Konzeption des Pavement Management Systems (PMS) führte MAERSCHALK [27] umfangreiche Untersuchungen durch, um den vorhandenen Kenntnisstand zum Management der Straßenerhaltung zusammenzufassen, ihn in für ein PMS geeignete Algorithmen zu überführen und das Managementsystem in Detailpunkten weiterzuentwickeln.

Bedeutung für Lebenszyklusbetrachtungen von Straßenbefestigungen hat das Forschungsprojekt vor allem durch die Erarbeitung von Standardverhaltensfunktionen, die erstmals eine Prognose der Zustandsentwicklung für die Zustandswerte Längsunebenheit, Querunebenheit und Risse/Oberflächenschäden in Abhängigkeit von der Zeit ermöglichten. Durch die Wahl der Koeffizienten kann dabei frei bestimmt werden, wie sich die Zustandswerte entwickeln (langsam, mittel, schnell, sehr schnell). Zusätzlich wurden Rücksetzwerte vorgeschlagen, die die Zustandsverbesserung nach einer Maßnahme beschreiben.

Da die Verhaltensfunktionen in die „RICHTLINIEN FÜR DIE PLANUNG VON ERHALTUNGSMASSNAHMEN AN STRASSENBEFESTIGUNGEN (RPE-Stra 01)“ [28] übernommen wurden (siehe Kapitel 2.2.2), kann diesen auch heute noch eine gewisse Gültigkeit zugesprochen werden. Jedoch weisen die Verhaltensfunktionen Defizite auf. Dies betrifft beispielsweise die Abhängigkeit der Zustandsentwicklung von der Nutzungsdauer in Jahren und nicht von der Verkehrsbelastung in Achsen, was die Anwendung in einem substanzabhängigen Bewertungsverfahren zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit erschwert. Vom heutigen Standpunkt aus betrachtet, muss man zudem die sich aus den Verhaltensfunktionen ergebenden Nutzungsdauern einzelner Schichten als nicht praxisgerecht ansehen.

Weiterhin muss generell davon ausgegangen werden, dass sich die Wirkung einer Erhaltungsmaßnahme nicht alleine durch die Festlegung von Rücksetzwerten abbilden lässt. Mit Ausnahme der grundhaften Erneuerung wird die Langzeitwirkung von durch Erhaltungsmaßnahmen verbesserten Schichten auch durch die im Aufbau verbleibenden Schichten beeinflusst, die aufgrund von Klima und Verkehr eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Vorschädigung aufweisen. Es muss dementsprechend eine vom Neubau bzw. der grundhaften Erneuerung abweichende Zustandsentwicklung unterstellt werden. Verhaltensfunktionen zur Beschreibung des Folgeverhaltens nach einer Maßnahme, denen eine Allgemeingültigkeit innewohnt, konnten in dem Forschungsprojekt nicht erarbeitet werden. Auch derzeit liegen diesbezüglich noch keine befriedigenden Erkenntnisse vor.

2.1.2 UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRTSCHAFTLICHKEIT UND BAUTECHNISCHEN BEWÄHRUNG VON FAHRBAHNBEFESTIGUNGEN AUS ASPHALT UND BETON AUF BESTEHENDEN BUNDESAUTOBAHNEN (2005)

Im Jahr 2005 veröffentlichten RÜBENSAM ET. AL. [18] Kriterien für einen wirtschaftlichen Vergleich der konkurrierenden Bauweisen mit einer Decke aus Beton, bzw. mit einer Deckschicht aus Gussasphalt oder Splittmastixasphalt nach den Allgemeinen Rundschreiben Nr. 5/1996 [15] und

35/1998 [17]. Entsprechende Festlegungen – besonders der 5-Mark-Erlass – wurden kritisch hinterfragt und bezüglich ihrer weiteren Gültigkeit geprüft. Hierzu wurden durch eine Befragung von Fachleuten sowie die systematische Auswertung bundesweit repräsentativer Autobahnabschnitte wichtige Erkenntnisse zum Langzeitverhalten verschiedener Bauweisen in Abhängigkeit von relevanten Einflussgrößen über den gesamten Lebenszyklus gewonnen.

In einer ersten Befragungsrunde wurden die Fachleute gebeten, verschiedene Einflussgrößen auf das Langzeitverhalten verschiedener Bauweisen (Deckschicht aus Splittmastix- oder Gussasphalt bzw. Betondecke) in Bezug auf ihre Relevanz für das Zustandsverhalten abzuschätzen. Die befragten Personen sahen einstimmig u.a. die Achslasten – also Menge und Zusammensetzung des Verkehrs – als maßgeblichen Einflussfaktor auf die Ermüdung und die Verformung eines Splittmastixasphalts. Dieselbe Einschätzung wurde für Deckschichten aus Gussasphalt und Betondecken getroffen. Dies legt für das weitere Vorgehen nahe, Zustandsentwicklungen – beispielsweise in Form von Verhaltensfunktionen – in Abhängigkeit von der über die Nutzungsdauer nicht konstanten Verkehrsbelastung zu beschreiben.

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, mit welchen Kriterien das Gebrauchsverhalten einer Bauweise beschrieben werden kann. Hieraus lässt sich ableiten, welche Zustandsmerkmale für die Bestimmung des Nutzungsausfalls einer Deckschicht bzw. Betondecke – beispielsweise durch das Überschreiten definierter Grenz- oder Warnwerte – herangezogen werden können. Auch hierzu wurden zunächst Fachleute um eine bauweisenspezifische Auskunft gebeten. Laut den Aussagen der Befragten war das Merkmal der Querunebenheit (Spurrinntiefe SPT [mm]) bei einer Deckschicht aus Asphalt das maßgebende Versagenkriterium, bei Betondecken hingegen vordringlich die Längsunebenheit, beschrieben durch das Unebenheitsmaß AUN [cm³] oder den Längsunebenheitsindex LWI.

Aufgrund der obigen und weiterer Erkenntnisse wurden durch die Auswertung mehrerer ZEB-Kampagnen Verhaltenskurven für verschiedene bauweisenspezifische Merkmalsgrößen in Abhängigkeit von der kumulierten Verkehrsbelastung – ausgedrückt durch äquivalente 10-t Achsübergänge – hergeleitet (Abbildung 2-1). Die Abhängigkeit der Zustandsentwicklung von der Verkehrsmenge unterscheidet die Verhaltensfunktionen von denen der RPE-Stra [28] (entwickelt von MAERSCHALK [27]), die eine reine Zeitabhängigkeit aufweisen. Die in Abbildung 2-1 dargestellten Verhaltensfunktionen beziehen sich weiterhin auf homogene Erhaltungsabschnitte (bzw. Länge des Bauloses) und liegen deshalb deutlich unter den Warn- oder Schwellenwerten gemäß den ZTV BEA [29] und ZTV BEB [30], die sich auf Einzelwerte der 100 m Abschnitte beziehen. Dies macht die Definition von Ausfallkriterien notwendig, die von RÜBENSAM für die Spurrinntiefe mit 6 mm und die Längsunebenheit mit 1,8 cm³ festgelegt wurden. Diese Größen waren zum Zeitpunkt des Schlussberichts allerdings noch nicht ausreichend statistisch abgesichert.

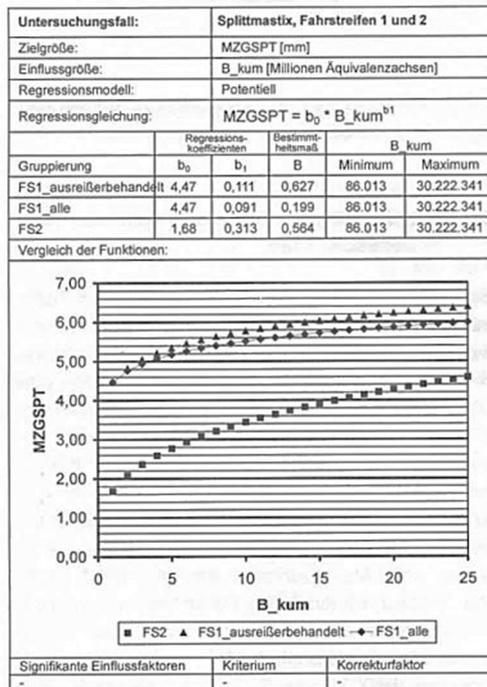


Abb. 32: Entwicklung der Spurrinntiefe bei Splittmastix

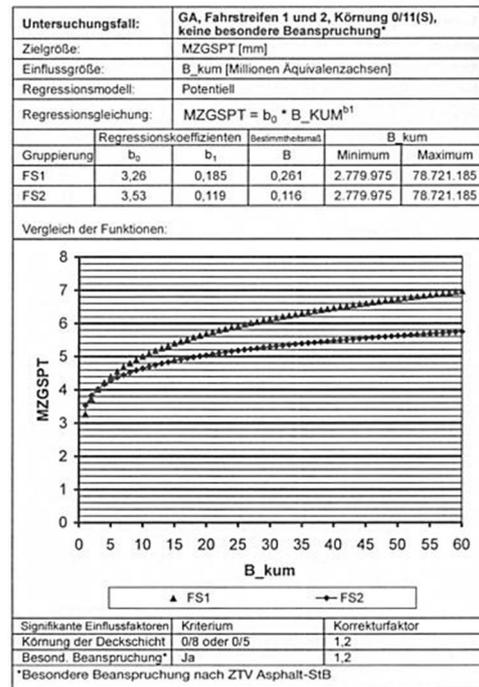


Abb. 29: Entwicklung der Spurrinntiefe bei Gussasphalt

Abbildung 2-1: Ausgewählte Verhaltensfunktionen [18]

In [31] wurden durch ZANDER die Ausfallkriterien zur Diskussion gestellt und nach eingehender Prüfung korrigiert. Statistisch ausreichend abgesicherte Definitionen bezüglich der Ausfallkriterien wurden jedoch erst mit dem Forschungsprojekt „ERARBEITUNG EINES VERFAHRENS ZUR BILDUNG VON ERHALTUNGSABSCHNITTEN FÜR DAS ERHALTUNGSMANAGEMENT (PMS) AUF BASIS VON ZUSTANDS- UND AUFBAUDATEN“ [32] erarbeitet, das die Verfahren zur Zusammenfassung maßnahmenbedürftiger Abschnitte auf Bundesautobahnen [33] und Bundesstraßen [34] unter Berücksichtigung zusätzlicher Fahrstreifen [35] weiterentwickelte und operationalisierte. Die empfohlenen Ausfallkriterien sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

Bei der Zusammenführung der in [32] empfohlenen Eingreifzeitpunkte (Tabelle 2-1) und der in [18] erarbeiteten Verhaltensfunktionen (Abbildung 2-1) ergeben sich jedoch Unstimmigkeiten. Aus den unterschiedlichen Grenzwerten für Fahrstreifen 1 und 2 resultieren bei Deckschichten aus Splittmastixasphalt und Gussasphalt sehr unterschiedliche ertragbare Achsübergänge. Bei Splittmastixasphalt wird beispielsweise der Eingreifzeitpunkt von 5 mm Spurrinntiefe (FS 2) bereits nach rund 33 Mio. äquivalente 10-t Achsübergängen erreicht. Da die Verhaltenskurven jedoch im weiteren Verlauf stark abflachen, wird ein Eingreifen für den ersten Fahrstreifen (7,5 mm) theoretisch erst nach etwa 106 Mio. äquivalenten 10-t Achsübergängen notwendig (entspricht etwa der Obergrenze der ertragbaren Achsübergänge der Asphalttragschicht für die Belastungskategorie Bk32 gemäß den RStO 12). Bei Deckschichten aus Gussasphalt ist diese Tendenz sogar noch stärker ausgeprägt.

Tabelle 2-1: Empfohlene Eingreifzeitpunkte nach [32]

| Zustandsgröße | Einheit | Asphalt | | Beton | |
|---------------|-----------------|---------|------|-------|------|
| | | FS 1 | FS 2 | FS 1 | FS 2 |
| ZGAUN* | cm ³ | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 1,5 |
| ZGSPT * | mm | 7,5 | 5,0 | 7,5 | 5,0 |
| ZGGRI* | - | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 |
| ZGRIO* | % | 15,0 | 15,0 | 40,0 | 25,0 |

*Mittelwert des Erhaltungsabschnitts
FS = Fahrstreifen

Dies wird auch in Abbildung 2-2 deutlich. Hier sind die ertragbaren Achsübergänge bis zum Erreichen der in Tabelle 2-1 festgelegten Ausfallkriterien (ZGSPT für Asphalt und ZGAUN für Beton) getrennt nach Fahrstreifen dargestellt. Neben den bereits erwähnten großen Abweichungen der Asphaltbauweisen je nach betrachteten Fahrstreifen, ist besonders der Vergleich zwischen Splittmastixasphalt und Gussasphalt kritisch zu betrachten. Dass letztere unabhängig vom Fahrstreifen weniger Achsübergänge ertragen kann als eine Deckschicht aus Splittmastixasphalt, ist nicht plausibel und würde die gesamte Gussasphaltbauweise aus wirtschaftlicher Sicht in Frage stellen.

Weiterhin erarbeitete RÜBENSAM ein Bewertungsverfahren, das einen einfachen gesamtwirtschaftlichen Vergleich konkurrierender Bauweisen (SMA, MA und Beton) erlaubt. Dabei können vom Neubau über die Erhaltung bis zum Nutzungsausfall alle maßnahmenbedingten Kosten angesetzt und auf einen Bezugszeitpunkt auf- bzw. abgezinst werden. Die Berücksichtigung von Nutzerkosten ist zwar vorgesehen, diese müssen jedoch vom Anwender separat ermittelt und angegeben werden.

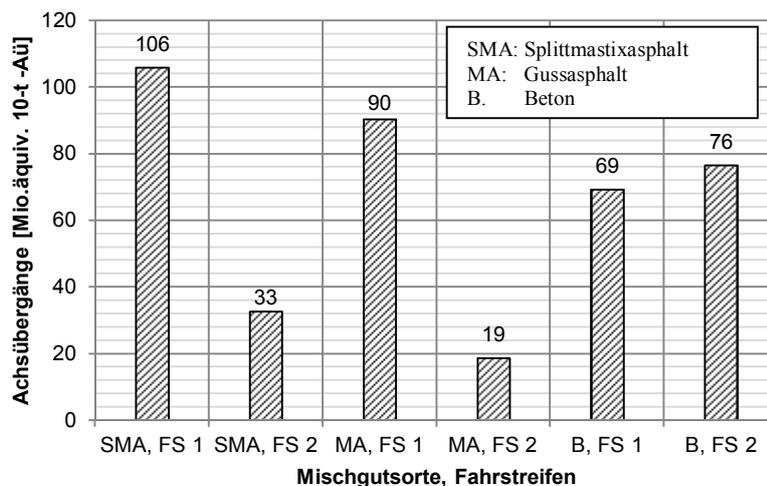


Abbildung 2-2: Ertragbare Achsübergänge bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums

Es ist bei dem Verfahren zu beachten, dass es sich in der Ursprungsform um einen reinen Bauweisenvergleich handelt. Durch die Anpassung der tatsächlichen Kosten mittels verschiedener empirischer Faktoren ist auch nur die Ermittlung von „fiktiven“ Kosten möglich. Es lässt sich demnach nur die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit einer Bauweise gegenüber einer anderen bestimmen, nicht jedoch tatsächliche Lebenszykluskosten abschätzen. Erste Tastversuche mit einem erweiterten Ansatz wurden in [5] durchgeführt. Es zeigte sich, dass zwar generell plausible – d.h. erwartungskonforme – Ergebnisse ausgewiesen werden können, diese jedoch weniger aussagekräftig sind als die anderer Methoden.

2.1.3 KATALOGISIERUNG VON BESCHREIBENDEN GRÖSSEN FÜR DAS GEBRAUCHSVERHALTEN VON FAHRBAHNBESTÄTIGUNGEN UND DER WIRKUNG VON ERHALTUNGSMASSNAHMEN (2005)

Das Forschungsprojekt „KATALOGISIERUNG VON BESCHREIBENDEN GRÖSSEN FÜR DAS GEBRAUCHSVERHALTEN VON FAHRBAHNBESTÄTIGUNGEN UND DIE WIRKUNG VON ERHALTUNGSMASSNAHMEN“ [21] hatte zum Ziel, die im PMS verwendeten Verhaltensfunktionen gemäß den RPE-Stra 01 unter Einbeziehung neuer Zustandsdaten (ZEB-Kampagne 2001/02) zu überprüfen. Die Erarbeitung einer Methodik bzw. eines Bewertungsverfahrens zur Life-Cycle Bewertung war dabei nicht Gegenstand des Projekts. Jedoch wurden aktualisierte Verhaltenskurven sowie Rücksetzwerte und Zustandsentwicklungen nach Erhaltungsmaßnahmen erarbeitet, die für Lebenszyklusbetrachtungen potenziell von Bedeutung sind.

Die für verschiedene Oberflächenmerkmale erarbeiteten bauweisenspezifischen Verhaltensfunktionen wurden getrennt nach verhaltenshomogenen Gruppen und den betrachteten Fahrstreifen (Hauptfahrstreifen und restliche Fahrstreifen) aufgestellt. Als verhaltenshomogen wird eine Gruppe dann angesehen, wenn sich die Zustandsmerkmale unter bestimmten Randbedingungen – hier: der Art der Deckschicht bzw. der Decke, der Art der Tragschicht(en), der Längsneigung und dem Bemessungsindex – näherungsweise gleich (homogen) entwickeln.

Auffällig bei den Verhaltensfunktionen zur Beschreibung der Entwicklung der Spurrinnentiefe ist der nahezu lineare bis leicht progressive Verlauf (Abbildung 2-3). Es wird somit eine völlig andere Zustandsentwicklung als bei den Verläufen im PMS oder nach RÜBENSAM [18] unterstellt. Diese Tatsache führt dazu, dass der Warnwert von 10 mm für die Spurrinnentiefe selbst bei einem vollbemessenen Straßenoberbau auf dem Hauptfahrstreifen erst nach rund 61 Mio. äquivalenten 10-t Achsübergängen und auf den restlichen Fahrstreifen sogar erst nach etwa 79 Mio. äquivalenten 10-t Achsübergängen erreicht wird. Beide Aspekte – der Verlauf der Kurven und die ertragbaren äquivalenten Achsübergänge bis zum Erreichen des Warnwertes – erscheinen nicht plausibel. Ob die entsprechenden Kurven für die Ermittlung einer Nutzungsdauer der Deckschicht herangezogen werden können, erscheint vor diesem Hintergrund fraglich.

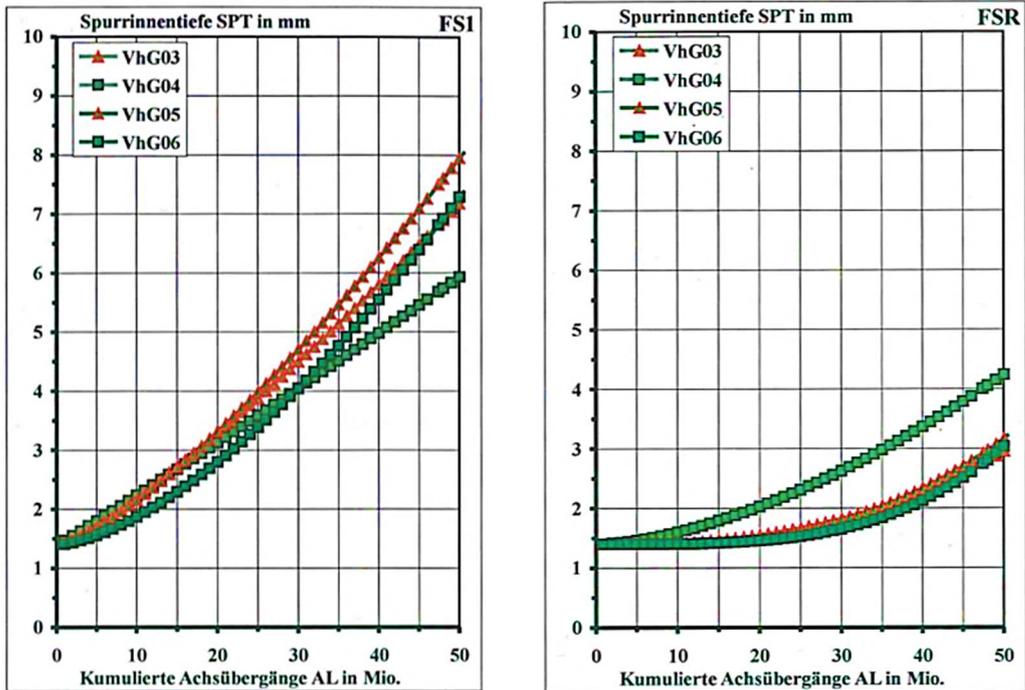


Abbildung 2-3: Verhaltensfunktionen für die Spurrinnentiefe verschiedener verhaltenshomogener Gruppen der Asphaltbauweise auf dem Hauptfahrstreifen (FS1) und den restlichen Fahrstreifen (FSR) [21]

Tabelle 2-2: Abgrenzung ausgewählter verhaltenshomogener Gruppen der Asphaltbauweise [21]

| VhG | Deckschicht | Tragschicht | Bemessung |
|-----|--------------|---|-----------|
| 03 | Splittmastix | überbauter Asphalt | < 1 |
| 04 | | | ≥ 1 |
| 05 | | Asphalttragschicht Asphalt + ungebundene Tragschicht Asphalt + hydraulisch geb. Tragschicht | < 1 |
| 06 | | | ≥ 1 |

Beim Unebenheitsmaß AUN wird in verschiedener Fachliteratur (z.B. [36] [37], [38]) bauweisenunabhängig zumeist von einem progressiven oder teilweise auch linearen Verlauf der Verhaltenskurven ausgegangen. Die in Abbildung 2-4 dargestellten Funktionen sind vor diesem Hintergrund also zunächst plausibel. Bei einem vollbemessenen Oberbau (VhG 9) wird auf dem Hauptfahrstreifen der Warnwert von 3 cm³ nach rund 54 Mio. äquivalenten 10-t Achsübergängen, auf den restlichen Fahrstreifen nach etwa 59 Mio. äquivalenten 10-t Achsübergängen erreicht.

Aufgrund der verfügbaren ZEB-Daten kann eine gesicherte Aussage zur Zustandsentwicklung jedoch nur bis zu einer maximalen Verkehrsbelastung von 50 Mio. äquiv. 10-t Achsübergängen vorgenommen werden. Dies entspricht laut RÜBENSAM einer Lebensdauer von etwa 23 Jahren. Eine Extrapolation ist aufgrund bekannter Funktionsparameter zwar möglich, jedoch kann die Qualität dieser Prognose nur schwer beurteilt werden.

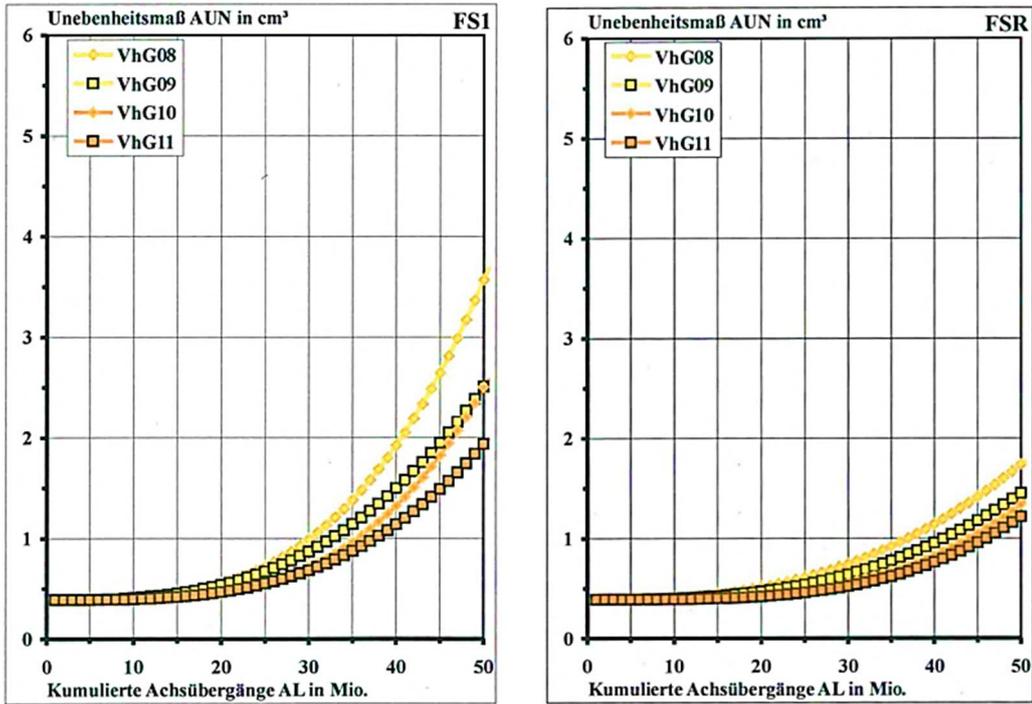


Abbildung 2-4: Verhaltensfunktionen für das Unebenheitsmaß AUN verschiedener verhaltenshomogener Gruppen der Betonbauweise auf dem Hauptfahrstreifen (FS1) und den restlichen Fahrstreifen (FSR) [21]

Tabelle 2-3: Abgrenzung ausgewählter verhaltenshomogener Gruppen der Betonbauweise [21]

| VhG | Tragschicht | Längsneigung | Bemessung |
|-----|--|-------------------------|----------------------|
| 08 | Asphalt + hyd. geb. Tragschicht Asphalt + ungebundene Tragschicht | $\leq -0,7 / \geq +0,7$ | $\geq 0,8$ bis < 1 |
| 09 | | | ≥ 1 |
| 10 | | $> -0,7$ bis $< +0,7$ | $\geq 0,8$ bis < 1 |
| 11 | | | ≥ 1 |

Weiterhin wurde versucht, aus den ZEB-Daten Rücksetzwerte abzuleiten, die die Ausprägung von Zustandsgrößen unmittelbar nach der Herstellung oder einer Erhaltungsmaßnahme beschreiben. Entsprechende Merkmale wurden zwar sowohl für Straßen in Asphalt- als auch Betonbauweise bestimmt, jedoch nur für Ebenheitsmerkmale (AUN, LWI, SPT, GRI). Substanzmerkmale wurden nicht näher untersucht, da davon ausgegangen wurde, dass diese Mängel darstellen, die im Rahmen der Gewährleistung beseitigt werden müssen.

2.1.4 VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER RESTSUBSTANZ VON ASPHALTBEFESTIGUNGEN NACH LANGJÄHRIGER VERKEHRSNUTZUNG (2008)

In dem Forschungsprojekt von RESSEL ET AL. [22] werden zwei Verfahren zur Bewertung der Substanz der Asphalttragschicht auf Basis der Restnutzungsdauer vorgestellt. Grundlage beider Ansätze ist die Bestimmung des Nutzungsausfallzeitpunktes (Makrorissbildung an der Unterseite der Asphalttragschicht) mittels rechnerischer Dimensionierung gemäß den RDO Asphalt. Hierzu wurden die dimensionierungsrelevanten Eingangsparameter (Steifigkeits-Temperaturfunktion sowie Ermüdungskurve) an Bohrkernen aus länger unter Verkehr liegenden Straßenbefestigungen ermittelt und hieraus eine Restsubstanz der Asphalttragschicht – ausgedrückt durch die Anzahl an noch ertragbaren äquivalenten 10-t Achsübergängen – bestimmt.

$$RW = \left(\frac{B_{\text{Kum_RND}}}{B_{\text{Kum_TV}} + B_{\text{Kum_RND}}} \right) \cdot 100$$

Gl. 1

mit:

RW Restsubstanzwert [%]

B_{Kum_TV} kumulierte äquivalente 10-t Achsübergänge während der Vertragslaufzeit
(bzw. bis zum Bewertungszeitpunkt)B_{Kum_RND} aus Laborversuchen ermittelte Anzahl kumulierte äquivalente
10-t Achsübergänge bis zum Eintritt des ersten Risses an der Unterseite der
Asphalttragschicht

Gemäß Gl. 1 lässt sich dann der sogenannte Restsubstanzwert berechnen. Es wird bei der Berechnung des Restsubstanzwertes davon ausgegangen, dass der Substanzabbau proportional zur Belastung verläuft. Weitere Einflüsse, wie beispielsweise die Alterung finden keine Berücksichtigung, da sie nur schwer oder gar nicht quantitativ zu bestimmen sind. Grundlage der beiden Verfahren ist die Hypothese von MINER. Die Akkumulation von Einzelschädigungen führt letztlich zum Versagen und dem vollständigen Substanzverlust.

Das zweite Verfahren beruht auf einer Modifikation von Gl. 1 und wurde auf die Bedürfnisse innerhalb von neuen Vertragsformen, wie sie für PPP-Modelle oder als Funktionsbauverträge formuliert werden, abgestellt. Es werden nicht die Achsübergänge, sondern das Verhältnis der mittleren Schwerverkehrssteigerung p_i in Ansatz gebracht.

Der Restsubstanzwert errechnet sich bei dieser Systematik nach Gl. 2. Aufgrund der Herleitung dieser Formel unterliegt sie jedoch einigen Restriktionen. So darf nur mit dem Mittelwert für die jährliche Schwerverkehrssteigerung gerechnet werden und es wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die mittlere jährliche Verkehrssteigerung während der Vertragslaufzeit (Zähler) und der Gesamtnutzungsdauer (Nenner) gleich ist.

$$RW = \left(1 - \frac{(1+p)^{TV} - 1}{(1+p)^{GND} - 1} \right)$$

Gl. 2

mit:

RW Restsubstanzwert [%]

p_i mittlere Schwerverkehrssteigerung im Jahr i in [%]

$$p \dots \dots \dots \text{Verkehrssteigerung: } p = \frac{\sum_{i=1}^{TV} p_i}{T_V}$$

TV Vertragslaufzeit bzw. Zeit bis zum Bewertungszeitpunkt [a]

RND Restnutzungsdauer [a]

GND voraussichtliche Gesamtnutzungsdauer der Befestigung
(Addition von TV und RND)

Bei bekanntem Restsubstanzwert ist es weiterhin möglich, den monetären Restwert der Asphalttragschicht an einem beliebigen Betrachtungszeitpunkt zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der Verzinsung geschieht dies durch die multiplikative Verknüpfung des Restsubstanzwertes mit den Herstellkosten der Tragschicht gemäß Gl. 3.

$$W = RW \cdot HK_{ATS} \cdot \left(1 + \frac{q}{100} \right)^{TV}$$

Gl. 3

mit:

W Wert der Befestigung [€]

RW Restsubstanzwert [%]

HK_{ATS} Herstellkosten der Asphalttragschicht [€]

q Aufzinsungsprozentsatz

TV Vertragslaufzeit bzw. Zeit bis zum Bewertungszeitpunkt [a]

Das Bewertungsverfahren ist demnach durchaus in der Lage, die Gesamtlebensdauer bzw. die Gesamtsubstanz der Asphalttragschicht mittels rechnerischer Dimensionierung hinreichend genau zu prognostizieren und den monetären Restwert an einem beliebigen Zeitpunkt zu bestimmen. Die weiteren Schichten des Straßenoberbaus und damit auch die Auswirkungen verschiedener Erhaltungsmaßnahmen und -strategien werden hingegen nicht berücksichtigt. Für eine vollständige Life-Cycle Analyse einer Straßenbefestigung ist dies aber eine unbedingte Notwendigkeit. Entsprechende Erweiterungen des Verfahrens wurden in [5] vorgenommen.

2.1.5 METHODENSTUDIE ZUR LIFE-CYCLE BEWERTUNG VON STRASSENBEFESTIGUNGEN (2011)

In dem 2011 abgeschlossenen Forschungsprojekt von RESSEL ET. AL. [25] wurde eine Software (Life-Cycle Analysen an Straßenkonstruktionen in Deutschland – LCD) entwickelt, die eine computergestützte Abschätzung der Gesamtwirtschaftlichkeit von Straßenbaukonstruktionen in As-

phalt- oder Betonbauweise erlaubt. Neben den Investitions- und Erhaltungskosten während eines Betrachtungszeitraums können auch Nutzerkosten in die Berechnungen einbezogen werden.

Die Eingreifzeitpunkte für notwendige Erhaltungsmaßnahmen während der Nutzungsdauer werden ausschließlich anhand des Zustands der Deckschicht festgelegt. Übersteigt der aktuelle Zustand eines Jahres das jeweilige Ausfallkriterium, wird eine Maßnahme durchgeführt. Dabei sind jedoch zwei Aspekte zu berücksichtigen:

1. Als Verhaltensfunktionen werden die in [21] ermittelten Kurven verwendet (vgl. Kapitel 2.1.3). Die Qualität der Ergebnisse sowie die hieraus abgeleiteten Zustandsentwicklungen innerhalb der Software müssen demnach ebenfalls kritisch betrachtet werden.
2. Es lassen sich keine individuellen Erhaltungsstrategien bzw. freie Maßnahmenfolgen festlegen. Vielmehr werden ab dem Ausfallzeitpunkt feste zeitliche Abläufe von Maßnahmen vorgegeben (z.B. Erneuerung Deckschicht – Erneuerung Decke – Erneuerung gebundener Oberbau), deren Zeitpunkte sich wiederum nur aus dem Oberflächenzustand ableiten. Obwohl verschiedene Maßnahmefolgen ausgewählt werden können, ist ein solches Vorgehen einerseits sehr unflexibel, andererseits ist die Abstimmung der Erhaltungsstrategie auf die tatsächliche Substanz der Asphalttragschicht nicht möglich.

Um die Wertentwicklung des gebundenen Oberbaus zu beschreiben und letztlich einen Restwert für diesen zu ermitteln, wird für jedes Jahr ein prozentualer Faktor berechnet, in den ein Anteil aus dem Oberflächenzustand und ein Anteil aus der Substanz eingehen. Die Bestimmung der (Rest-)Substanz erfolgt dabei nicht anhand von konkreten Materialparametern (Steifigkeit und Ermüdung), sondern gemäß dem nicht mehr zeitgemäßen Dickenäquivalenzprinzip nach dem Arbeitspapier Substanzwert-Bestand [23]. Da bei diesem Verfahren ausschließlich das Alter der Schichten in die Berechnung des Bemessungsindexe geht, lassen sich Randbedingungen wie die individuellen Materialeigenschaften verschiedener Mischgüter oder Verkehrsentwicklungen (Menge oder Zusammensetzung) nicht adäquat berücksichtigen. Damit sind auch keine Wertentwicklungen der einzelnen Schichten ausweisbar, der Restwert liegt ausschließlich als prozentualer Anteil der Neubaukosten des Oberbaus vor.

Als Nutzerkostenkomponenten werden in der LCD-Software die zusätzlichen Zeitkosten, Kraftstoffdifferenzkosten, Unfallmehrkosten und Klimakostendifferenzen berücksichtigt. Diese Größen werden allerdings nicht direkt im Programm berechnet, sondern es wird auf eine Datenbank mit vorher festgelegten Szenarien zurückgegriffen. Das Handbuch sagt hierzu:

Die Berechnung [der Nutzerkosten, Anm. des Verf.] erfolgt nicht direkt in LCD2, sondern wurde für eine Vielzahl an Fällen vorab durchgeführt. Die Ergebnisse [...] werden fallweise ausgelesen. Es können daher geringfügige Abweichungen zwischen den prognostizierten Größen (z.B. DTV und SV-Anteil) sowie den für die Nutzerkostenberechnung verwendeten Größen auftreten. Diese Unterschiede werden im Protokoll auf der Ergebnisse-Seite angezeigt.²

² LCD Hilfe-Datei (im Programm aufrufbar), Kapitel Nutzerkosten

Die Nutzerkosten können demnach in ungefährender Größenordnung berücksichtigt werden, eine auf individuelle Randbedingungen (z.B. Erhaltungsstrategien) abgestimmte Abschätzung ist aufgrund der oben genannten Restriktionen hingegen nicht möglich.

2.1.6 GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG DER DIMENSIONIERUNGSRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN UND DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON OBERBAUBEFESTIGUNGEN AUS ASPHALT (2014)

Das Ziel des Forschungsprojekts „GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG DER DIMENSIONIERUNGSRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN UND DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON OBERBAUBEFESTIGUNGEN AUS ASPHALT“ [5] war es, den Einfluss sowohl der nach DIN EN 13108-21 [39] nicht zu beanstandenden Toleranzen bei der Mischgutzusammensetzung als auch des Einbauprozesses auf die Eingangsparameter der rechnerischen Dimensionierung nach den RDO Asphalt und somit auf die resultierenden Nutzungsdauern zu bestimmen. In einem weiteren Schritt wurden die Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten eines asphaltgebundenen Oberbaus untersucht. Hierzu wurde ein auf den Grundlagen der RSO Asphalt fußendes Bewertungsverfahren erarbeitet und angewendet.

Zunächst wurden verschiedene Asphaltmischgüter für die Deck-, Binder- und Tragschicht unter gezielter Ausnutzung der zulässigen Toleranzen gemäß den DIN EN 13108-21 hergestellt und seitens der TU Dresden labortechnisch untersucht. Zusätzlich wurden je zwei Mischgutvarianten in einer Versuchsstrecke verbaut und Bohrkerne entnommen. Mittels Spaltzug-Schwellversuchen konnten dann die Steifigkeits-Temperaturfunktionen aller Mischgüter sowie die Ermüdungskurven der Asphalttragschichten bestimmt werden. Anhand dieser Materialkenngrößen ließen sich mit statistischen und probabilistischen Analysen die Auswirkungen sowohl der zulässigen Toleranzen als auch der Herstellung auf die Materialparameter sowie die resultierenden Nutzungsdauern bestimmen.

Zusätzlich wurden an drei Deckschichtvarianten Druck-Schwellversuche durchgeführt, um das unterschiedliche (plastische) Verformungsverhalten der Mischgutkonzeptionen anzusprechen. Anhand der akkumulierten plastischen Verformungen wurde von der TU Dresden ein Materialmodell entworfen, das eine Prognose der Spurrinnenentwicklung in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer ermöglicht.

Die Untersuchungen der Materialparameter zeigen, dass ein Ausreizen der zulässigen Toleranzen sowie die Herstellung signifikante Auswirkungen auf die Steifigkeiten sowie das Ermüdungs- und Verformungsverhalten der untersuchten Asphaltgemische haben. Dementsprechend ergaben sich auch bei den Prognoserechnungen auf Grundlage der RDO Asphalt deutlich abweichende Nutzungsdauern je nach gewähltem Oberbaumaterial. Beispielhaft ist dies in Abbildung 2-5 für die ermittelten Ermüdungsstatuswerte der Oberbaubefestigungen aus Laborasphalt bei einer zugrunde gelegten Verkehrsbelastung von 100 Mio. äquiv. 10-t Aü dargestellt. Die sich daraus ergebenden Nutzungsdauern bis zum strukturellen Versagen schwanken je nach verwendetem Mischgut zwischen 7 Jahren (Variante 05 mit größerer Korngrößenverteilung und/oder niedrigerem Bindemittelgehalt) und weit über 30 Jahren (bspw. Variante 01 gemäß der Erstprüfung).

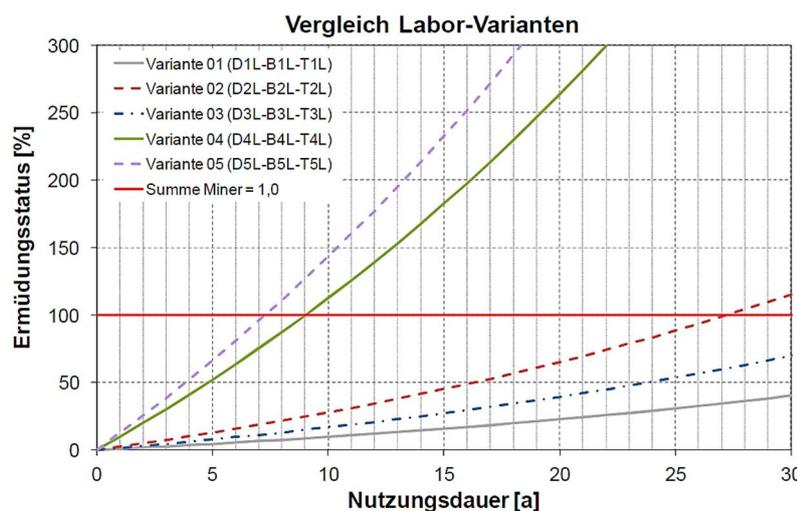


Abbildung 2-5: Verlauf der Ermüdungsstatus-Werte der Oberbaubefestigungen aus Laborasphalt [5]

Aus den berechneten Nutzungsdauern bis zum strukturellen Versagen der Asphalttragschichten ergab sich eine Vielzahl von Fragestellungen bezüglich der Lebenszykluskosten entsprechender Oberbaukonstruktionen. In einem weiteren Arbeitsschritt wurden deshalb die Auswirkungen

- der mischgutbedingten Nutzungsdauer der Asphalttragschicht,
- der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht aufgrund der kumulierten Verkehrsbelastung,
- der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht,
- der Kosten der Asphaltbinderschicht,
- der Kosten der Asphaltdeckschicht
- der über den Lebenszyklus gewählten Erhaltungsstrategie und
- der einbaubedingten Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

auf die Wirtschaftlichkeit einer eingehenden Betrachtung unterzogen.

Nutzungsdauern für die verschiedenen Asphalttragschichtvarianten lagen als Ergebnis der Dimensionierungsrechnungen des Forschungsprojekts vor, entsprechende Ansätze für die Binder- und Deckschichtvarianten wurden anhand von geeigneten Annahmen sowie des an der TU Dresden entwickelten Modells zur Beschreibung des plastischen Verformungsverhaltens festgelegt. Kostensätze für den Neubau sowie die Erhaltung der einzelnen Schichten des Oberbaus konnten u.a. mit Hilfe des Computerprogramms €-Cost 2010 [40] abgeschätzt werden.

Die Erhaltungsstrategien während des Lebenszyklus – also die Detektion der voraussichtlichen Eingreifzeitpunkte – wurden jeweils einzelfallbezogen auf Grundlage der Nutzungsdauern der einzelnen Asphalttragschichten bestimmt. Dabei ließ sich nicht immer auf den ersten Blick ausmachen, welches Erhaltungsmanagement am wirtschaftlichsten ist, sodass in vielen Fällen mehrere Alternativen betrachtet werden mussten.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der an der Universität Siegen durchgeführten Lebenszyklusbetrachtungen zusammenfassend dargestellt.

Einfluss der mischgutbedingten Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Die Dimensionierungsrechnungen lassen erkennen, dass besonders die Variation der Mischgutzusammensetzung der Asphalttragschicht maßgebenden Einfluss auf die ermittelten Nutzungsdauern der betrachteten Oberbaukonstruktionen hat. Bei vollständiger Ausnutzung der zulässigen Toleranzen hin zu einer größeren Korngrößenverteilung und/oder weniger Bindemittel kam es gegenüber der Erstprüfungsvariante zu bis zu rund 300 % höheren Lebenszykluskosten.

Einfluss der verkehrsmengenbedingten Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Eine Abschätzung der wirtschaftlichen Auswirkungen aufgrund der verkehrsmengenbedingten Nutzungsdauer der Asphalttragschicht ließ sich nur mit Einschränkungen vornehmen. Ursächlich hierfür waren berechnete Nutzungsdauern, die sich bei einer Verkehrsbelastung von 50 Mio. äquiv. 10-t Aü auf weit über 50 Jahre beliefen, was aufgrund der ermittelten Materialparameter zwar folgerichtig ist, jedoch aus Sicht der Praxis als unrealistisch eingestuft werden muss.

Generell lässt sich festhalten, dass sich die Nutzungsdauern der Asphalttragschicht mit steigender Verkehrsbelastung merklich verkürzen, was wiederum zu höheren Lebenszykluskosten führt. Der Einfluss der Verkehrsbelastung steigt mit sinkenden Nutzungsdauern der Asphalttragschicht.

Einfluss der durch den Einbau bedingten Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Um den Einfluss des Einbaus auf die Lebenszykluskosten zu untersuchen, wurden die anhand der Bohrkerne ermittelten Nutzungsdauern wirtschaftlich bewertet und die Ergebnisse anschließend ins Verhältnis zu den entsprechenden mit Laborasphalten dimensionierten Oberbaukonstruktionen gesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass sich unabhängig von der Verkehrsbelastung die Erhöhung oder die Verringerung der Nutzungsdauer am Bohrkern um ein Jahr gegenüber der Dimensionierung auf die jährlichen Lebenszykluskosten mit einer Veränderung von rund 2 bis 3 % auswirkt.

Einfluss der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht

Um auch die Auswirkungen unterschiedlicher Nutzungsdauern der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten abschätzen zu können, wurden diese unter Berücksichtigung des Spurrinnen-Prognosemodells der TU Dresden dreifach variiert (8, 12, 15 Jahre). Die Ergebnisse lassen erkennen, dass der realisierbare Kostenvorteil einer um ein Jahr verlängerten Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht höhere Kosten für die Asphaltdeckschicht in einer Größenordnung von 6,8 % zulässt.

Einfluss der Kosten der Asphaltdeckschicht

Bezüglich des Einflusses der Kosten der Asphaltdeckschicht konnte festgestellt werden, dass 10 % höhere Kosten für die Asphaltdeckschicht bei unveränderter Nutzungsdauer rund 2,5 % höhere Lebenszykluskosten für die Befestigung verursachen.

Einfluss der Erhaltungsstrategie

Bei diesen Betrachtungen wurde untersucht, in welchem Maße die gewählte Erhaltungsstrategie – also die zeitliche Abfolge und Art von Erhaltungsmaßnahmen während des Lebenszyklus – Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit eines Straßenoberbaus hat. Eine optimierte Erhaltungsstrategie – beispielsweise durch den gezielten Einsatz von Dünnen Asphaltdeckschichten in Heißbauweise oder ideal auf die Nutzungsdauern der einzelnen Schichten abgestimmte Eingreifzeitpunkte – ermöglicht eine Reduzierung der Lebenszykluskosten von rund 12 bis 15 %.

Weiterführende Untersuchungen zu den Auswirkungen der Mischgutzusammensetzung auf die Ermüdungsbeständigkeit wurden in der Dissertation von DRAGON [41] durchgeführt

2.2 NATIONALE REGELWERKE

Gesamtwirtschaftliche Bewertungsansätze von Straßenbefestigungen sind nicht ausschließlich Gegenstand nationaler und internationaler Forschung, sondern haben bereits seit geraumer Zeit Eingang in die deutschen Regelwerke gefunden. Entsprechende Bestrebungen traten bereits in den 70er Jahren im Rahmen der Erarbeitung des Bundesverkehrswegeplans in Erscheinung und fußten in den „RICHTLINIEN FÜR WIRTSCHAFTLICHE VERGLEICHSCHEUNUNGEN IM STRASSENWESEN (RWS)“, aus dem Jahr 1971/72. Die RAS-W 86 präzisieren die Ansätze der RWS und führten in aktualisierter Form zur Veröffentlichung der „EMPFEHLUNGEN FÜR WIRTSCHAFTLICHKEITSUNTERSUCHUNGEN AN STRASSEN (EWS)“ [42].

Mit der Einführung der RDO-Asphalt und den sich hieraus ergebenden Möglichkeiten, Straßenbefestigungen rechnerisch zu dimensionieren, trat die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit anhand einer materialspezifischen Substanz stärker in den Fokus. Mit den „RICHTLINIEN ZUR BEWERTUNG DER STRUKTURELLEN SUBSTANZ DES OBERBAUS VON VERKEHRSFLÄCHEN MIT ASPHALT-DECKSCHICHT (RSO ASPHALT)“ steht 2015/16 erstmals ein Regelwerk zur Verfügung, das diesen Ansatz konsequent in ein einheitliches Bewertungsverfahren überführt. Zwar haben die RSO Asphalt nicht die wirtschaftliche Bewertung der ermittelten Substanz zum Gegenstand, in Kombination mit weiterführenden Forschungsarbeiten (z.B. [5]) bieten sie aber eine geeignete Grundlage, um auch Lebenszykluskosten von Straßenoberbauten zu berechnen. Ein parallel zu den RSO erarbeitetes Arbeitsblatt zur monetären Bewertung der strukturellen Substanz wird voraussichtlich zusammen mit den RSO veröffentlicht (Stand September 2015).

2.2.1 EMPFEHLUNGEN FÜR WIRTSCHAFTLICHKEITSUNTERSUCHUNGEN AN STRASSEN (EWS 97)

Lange Zeit spielte in der Straßenplanung die kritische Überprüfung eines Vorhabens anhand der Gesamtwirtschaftlichkeit nur eine untergeordnete Rolle. Vielmehr ließ sich der Begriff „Wirtschaftlichkeit“ im Wesentlichen auf „kostengünstig“ reduzieren, d.h. die Wirtschaftlichkeit wurde nur anhand der erforderlichen Investitionsmittel gemessen. Mit den „EMPFEHLUNGEN FÜR WIRTSCHAFTLICHKEITSUNTERSUCHUNGEN AN STRASSEN (EWS)“ [42] wurde 1997 ein Regelwerk ein-

geführt, dass die Überprüfung der gesamtwirtschaftlichen Vertretbarkeit einer Maßnahme als Grundgedanke hat. Kern ist eine Kosten-Nutzen-Analyse, die die Investitionskosten und laufenden Kosten einem Nutzen durch die Veränderung

- der Betriebskosten,
- der Fahrzeiten,
- des Unfallgeschehens,
- der Lärmbelastung,
- der Schadstoffbelastung,
- der Klimabelastung,
- der Trennwirkung der Straße,
- der Flächenverfügbarkeit in bebauten Gebieten und ggf.
- weiterer Nutzerkomponenten

gegenüberstellt.

Entsprechende Kostenansätze werden in den EWS angegeben, müssen jedoch bezüglich ihrer Aktualität kritisch hinterfragt werden. Die Vorschrift befindet sich derzeit in Überarbeitung, sodass zumindest mittelfristig mit aktualisierten Kostensätzen gerechnet werden kann.

Eine Abhängigkeit der Lebenszykluskosten von der strukturellen Substanz – und damit material-spezifischen Einflussfaktoren – ist nicht Gegenstand der EWS.

2.2.2 RICHTLINIEN FÜR DIE PLANUNG VON ERHALTUNGSMASSNAHMEN AN STRASSENBEFESTIGUNGEN (RPE-STRA 01)

Zur Systematisierung und Vereinheitlichung der netzweiten streckenbezogenen Erhaltungsplanung stellen die RPE-Stra 01 [28] das maßgebende Regelwerk dar. Es befasst sich mit den wesentlichen verwaltungstechnischen Aufgaben eines Managementsystems der Straßenerhaltung und soll neben der Bewertung der Qualität eines zu erhaltenden Straßenabschnitts oder Netzobjekts auch die Erarbeitung von Erhaltungsstrategien, mittelfristigen Bedarfsprogrammen, jährlichen Programmplanungen und deren Umsetzung auf Ausführungsebene ermöglichen. Die in den RPE-Stra 01 behandelte bauliche Erhaltung unterliegt der in Tabelle 2-4 dargestellten Begriffssystematik, die in dieser Arbeit beibehalten wird.

Die RPE-Stra 01 enthalten konkrete Anhaltswerte zur Abschätzung des Zeitraums zwischen Neubau bzw. letzter Erneuerung bis zum Eingreifzeitpunkt bzw. letztmaliger Instandsetzungsmaßnahme bis zum Eingreifzeitpunkt für einzelne Schichten im Außerortsbereich. Diese werden für die gebundenen und ungebundenen Schichten als feste Größenordnungen veranschlagt. Die in Tabelle 2-5 und

Tabelle 2-6 angegebenen üblichen Nutzungsdauern resultieren aus den Ergebnissen mehrerer Forschungsprojekte ([9] [10] [11]), die sich mit Häufigkeitsverteilungen von Erhaltungsmaßnahmen, der Entwicklung von Zustandsmerkmalen sowie daraus resultierenden Erhaltungsintervallen im Erhaltungsmanagement beschäftigten.

Tabelle 2-4: Begriffssystematik der Straßenerhaltung gemäß den RPE-Stra 01

| | | |
|---------------------------|---|---|
| Bauliche Erhaltung | (örtlich-punktueller oder kleinflächige Maßnahmen) Bauliche Unterhaltung (Instandhaltung) (z.B. Vergießen von Rissen, kleinflächige Flickarbeiten) | |
| | Instandsetzung | I1 – auf der Deckschicht (z.B. Oberflächenbehandlung, Dünnschichtbelag) |
| | | I2 – an der Deckschicht (z.B. Hoch-/Tiefenbau der Deckschicht) |
| | Erneuerung | E1 – an der Decke (z.B. Hoch- oder Tiefenbau der Decke) |
| | | E2 – an Tragschicht(en) / am Oberbau (z.B. Verstärkung, Tiefenbau einschließlich der Tragschicht(en)) |

Tabelle 2-5: Anhaltswerte zur Abschätzung des Zeitraums zwischen dem Neubau bzw. der letzten Erhaltung und dem Eingreifzeitpunkt (Außerortsstraßen) [28]

| Befestigungsschicht | Anhaltswerte [Jahre] | |
|--|-------------------------|--------|
| | Bauklassen | |
| | SV, I, II | III-VI |
| Asphaltbefestigungen | | |
| Asphaltbeton | 12 | 18 |
| Splittmastixasphalt | 16 | 22 |
| Gussasphalt | 19 | 26 |
| Asphaltbinder | 26 | 30 |
| Asphalttragschicht | 55 | 75 |
| Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln | 60 | 80 |
| Tragschicht ohne Bindemittel | 55 | 75 |
| Betonbefestigungen | | |
| Betondecke | 26 | 30 |
| Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel | | |
| unter Vliesstoff | 55 | 70 |
| ohne Vliesstoff | 26 | 30 |
| Asphalttragschicht | 50 | 65 |
| Tragschicht ohne Bindemittel | 45 | 60 |
| Pflasterbefestigungen | | |
| Pflasterdecke | - | |
| Naturstein, groß | | 55 |
| Naturstein, klein | | 45 |
| Betonverbundstein | | 40 |
| Asphalttragschicht | - | 80 |
| Tragschicht ohne Bindemittel | - | 40 |

Tabelle 2-6: Anhaltswerte zur Abschätzung des Zeitraums zwischen der letztmaligen Durchführung einer Instandsetzungsmaßnahme und dem Eingreifzeitpunkt (Außerortsstraßen) [28]

| Instandsetzungsmaßnahmen | | Anhaltswerte [Jahre] | |
|--------------------------|--|-------------------------|--------|
| | | Bauklassen | |
| | | SV, I, II | III-VI |
| I1 | Oberflächenbehandlung | | |
| | mit einfacher Splittabstreuerung | (6) | 8 |
| | mit doppelter Splittabstreuerung | (7) | 9 |
| | mit Splittvorlage | (6) | 8 |
| I1 | Dünne Schichten im Kalteinbau (10-30 kg/m²) | 5 | 8 |
| I1 | Dünne Schichten im Heißeinbau | | |
| | Asphaltbeton | - | 10 |
| | Splittmastixasphalt | 8 | 10 |
| | Gussasphalt | 10 | 12 |
| I2 | Rückformen | 8 | 10 |
| I2 | Ersatz der Deckschicht (Tiefeinbau) | | |
| | Asphaltbeton | 12 | 18 |
| | Splittmastixasphalt | 16 | 22 |
| | Gussasphalt | 19 | 26 |
| I2 | Aufbringen einer Deckschicht (Hocheinbau) | | |
| | Asphaltbeton | 12 | 18 |
| | Splittmastixasphalt | 16 | 22 |
| | Gussasphalt | 19 | 26 |
| I1 | Heben oder Erneuerung von Betonplatten und -plattenteilen | 8 | - |

Um auch die Entwicklung bestimmter Zustandswerte über die Zeit und so die Abfolge von Maßnahmen bei der Erhaltungsprognose abschätzen zu können, enthalten die RPE-Stra 01 idealtypische Standard-Verhaltensfunktionen. Diese erlauben die Prognose und funktionale Beschreibung der Entwicklung bestimmter Zustandswerte oder Zustandsgrößen unter der Bedingung, dass der tatsächliche Verlauf der Zustandsentwicklung – beispielsweise durch die Ergebnisse einer oder mehrerer ZEB-Kampagnen – bekannt ist.

Die RPE-Stra 01 enthalten Funktionen für die Zustandswerte Allgemeine Unebenheit, Spurrinentiefe und Risse/Schäden (vgl. Abbildung 2-6), die von MAERSCHALK im Zuge des Forschungsprojekts FE 9.083 der BAST [27] aufgestellt wurden. Je nach Charakteristik des Schadensverlaufs (sehr schnell, schnell, mittel, langsam) lässt sich so auf die wahrscheinliche Zustandsentwicklung schließen.

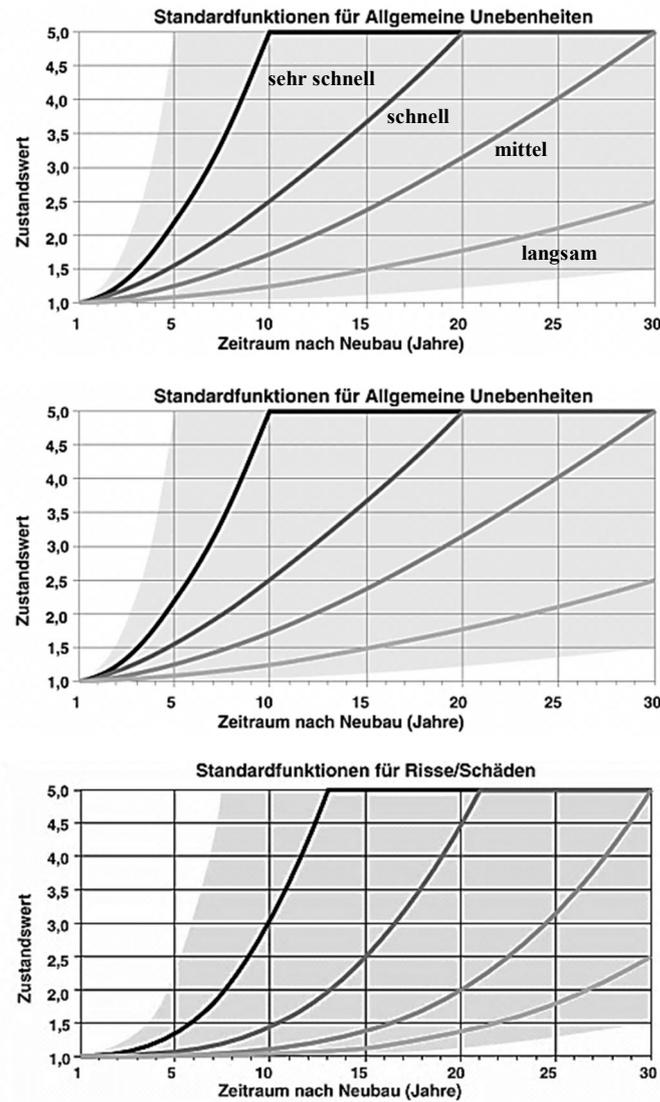


Abbildung 2-6: Standard-Verhaltensfunktionen für die Allgemeine Unebenheit, die Spurrinnen sowie Risse/Schäden gemäß den RPE-Stra 01

2.2.3 RICHTLINIEN ZUR BEWERTUNG DER STRUKTURELLEN SUBSTANZ DES OBERBAUS VON VERKEHRSFLÄCHEN MIT ASPHALTDECKSCHICHT (RSO 2014)

Mit der Einführung der RDO Asphalt sowie durch diverse Forschungsarbeiten (z.B. [22] [25]) ist es möglich, Straßenbefestigungen anhand von materialspezifischen Eingangsparametern in Abhängigkeit von dem Klima sowie des Verkehrsaufkommens rechnerisch zu dimensionieren. Hieraus ergeben sich ganz neue Möglichkeiten, die Substanz bzw. Restsubstanz eines Straßenoberbaus zu ermitteln und monetär zu bewerten. Deshalb wurde 2011 mit der Erstellung der „RICHTLINIEN ZUR BEWERTUNG DER STRUKTURELLEN SUBSTANZ DES OBERBAUS VON VERKEHRSFLÄCHEN MIT ASPHALTDECKSCHICHT (RSO ASPHALT)“ [4] begonnen. Der darin vorgesehene Ablauf zur Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen einschließlich der monetären Bewertung ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

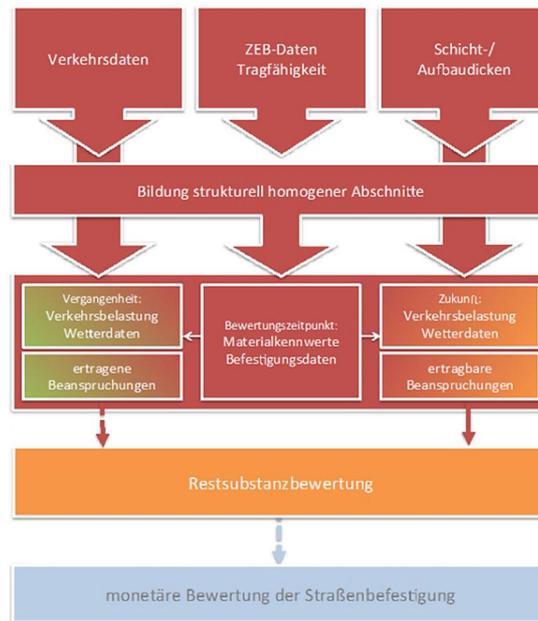


Abbildung 2-7: Ablaufschema zur Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen nach den RSO [4]

Die RSO regeln die Bestimmung und Bewertung der strukturellen Restsubstanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise. Ziel ist die Ermittlung von Ausfallzeitpunkten auf Objekt-ebene und hierauf aufbauend die Entwicklung von wirtschaftlich optimierten Erhaltungsstrategien.

Die Bewertung der strukturellen Substanz kann gemäß den RSO mittels eines deterministischen oder probabilistischen Verfahrens erfolgen. Dem deterministischen Verfahren liegt die rechnerische Dimensionierung gemäß den RDO Asphalt zugrunde, d.h. der Ausfallzeitpunkt wird anhand der Anzahl noch ertragbarer Lastwechsel bzw. Achsübergänge bis zum Erreichen einer Gesamtschädigung gleich 1 gemäß der Hypothese von MINER bestimmt (vgl. Gl. 4). Computergestützt kann eine solche Bewertung beispielsweise unter Verwendung der Dimensionierungssoftware PaDesTo der Firma Primia erfolgen.

$$\sum_{b=1}^n \frac{\text{prog}A\ddot{u}_b}{\text{zul}A\ddot{u}_b} \leq 1$$

Gl. 4

mit:

prog. $A\ddot{u}_b$ die mit der Beanspruchung ε (oder σ) im Belastungszustand $b = 1, 2, \dots, n$ prognostizierte Anzahl an Achsübergängen im geplanten Restnutzungszeitraum

zul. $A\ddot{u}_b$ die mit der Beanspruchung ε (oder σ) im Belastungszustand $b = 1, 2, \dots, n$ ertragbare (zulässige) Anzahl an Achsübergängen im geplanten Restnutzungszeitraum (Grenzlastwechselzahl)

n Anzahl an Belastungszuständen

Beim probabilistischen Verfahren wird die strukturelle Substanz anhand der Ausfallwahrscheinlichkeit eines strukturell homogenen Abschnitts bestimmt. Hierzu werden die Gesamtdicke der Asphaltbefestigung, die temperaturabhängigen Steifigkeitsmoduln jeder Asphaltschicht sowie die noch ertragbare Ermüdungslastwechselzahl an den maßgebenden Nachweispunkten benötigt. Anschließend werden Häufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten der zugehörigen Teilabschnitte kumuliert, deren Ermüdungsnachweis für die vorgegebene Anzahl noch zu ertragender Achsübergänge nicht erfüllt ist und die somit als ausgefallen angesehen werden können. Die Restsubstanz des Asphaltoberbaus entspricht dann den Achsübergängen des strukturell homogenen Abschnitts, die dieser bis zum Erreichen von definierten Ausfallwahrscheinlichkeiten ertragen kann.

Ein parallel zu den RSO erarbeitetes Arbeitspapier befasst sich mit der monetären Bewertung der strukturellen Substanz eines Straßenoberbaus. Nach einer homogenen Abschnittsbildung auf der Grundlage einer schichtweisen homogenen Bereichsbildung wird für jede Schicht die technische Restnutzungsdauer bestimmt. Diese ergibt sich anhand einer Prognose aus der bisherigen Entwicklung der Zustandsgrößen definierter Zustandsmerkmale bzw. anhand einer Bewertung der strukturellen Substanz. Liegen keine Erkenntnisse bezüglich der tatsächlichen Substanz vor, geben die RSO Asphalt und das Arbeitspapier Wirtschaftlichkeit übliche strukturellen Grundsubstanzen bzw. übliche Grundnutzungspotenziale vor, die für eine entsprechende Bestimmung der Restnutzungsdauer herangezogen werden können.

Der monetäre Restwert der Asphaltstraßenbefestigung berechnet sich schlussendlich aus der Summe der anhand der technischen Nutzungsdauern ermittelten monetären Teilwerte der Schichten des Aufbaus und bezieht sich stets auf homogene Streckenabschnitte. In der Regel wird die monetäre Bewertung von Straßenbefestigungen schichtweise am Aufbau und anhand der Randbedingungen jedes Fahrstreifens getrennt durchgeführt.

2.3 INTERNATIONALE LEBENSZYKLUSBETRACHTUNGEN

Life-Cycle Analysen haben im Ausland besonders bei Projekten mit hohem Investitionsvolumen einen hohen Stellenwert als Bewertungsinstrument. Eine Studie der PIARC [43] zeigte, dass bei großen Straßenbauprojekten von 24 befragten Ländern nur Deutschland und Polen generell nicht auf Life-Cycle Betrachtungen zurückgreifen. Besonders weit verbreitet sind entsprechende Verfahren zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit in den USA. Die meisten der obersten Straßenbaubehörden jedes Bundeslandes nutzen Life-Cycle Analysen (z.B. [44] [45]), auch wenn es sich zumeist um vereinfachte Abschätzungen zukünftiger Investitionen handelt. Dementsprechend ist es sinnvoll, nicht nur die nationalen Entwicklungen, sondern – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – auch den internationalen Stand der Technik ausgewählter Länder einer näheren Betrachtung zu unterziehen.

Mit dem Werk „WHOLE LIFE COSTING OF ROADS – FLEXIBLE PAVEMENTS“ [43] wird von der World Road Association-PIARC ein durch multinationale Fachleute erarbeitetes Dokument zum Thema Lebenszyklusbetrachtungen von Straßen zur Verfügung gestellt, das einen ersten Einblick bezüglich des internationalen Stands der Technik erlaubt. Lebenszykluskosten werden dabei ge-

mäß dem amerikanischen „QUALITY IMPROVEMENT OF THE NATIONAL HIGHWAY SYSTEM NHS DESIGNATION ACT“ wie folgt beschrieben:

“... a process for evaluating the total economic worth of a usable project segment by analyzing initial costs and discounted future costs, such as maintenance, user, reconstruction, rehabilitation, restoring and resurfacing costs over the life of the project segment [46].”

Diese Definition zeigt das Bestreben der Verantwortlichen, nicht ausschließlich die Herstellkosten (initial costs) sondern auch zukünftige Kosten (future costs) beispielsweise für die Erhaltung oder für den Nutzer in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Straßenkonstruktionen einzubinden.

Kosten fallen gemäß [43] beim Baulasträger (Highway Authority) vordringlich für den Bau und die Unterhaltung der Straße an. Diese Aufwendungen werden maßgeblich durch die Bauweise, das verwendete Mischgut, die Erhaltungsstrategie, aber auch das Verkehrsmanagement während der Bauphase bestimmt. Ein weiterer Faktor sind die durch den Straßennutzer (road user) verursachten Kosten. Diese umfassen neben den Zeit- bzw. Staukosten, die durch eine verkehrs- bzw. baustellenbedingte Reduktion der Reisegeschwindigkeit verursacht werden, auch die Betriebskosten der Fahrzeuge sowie Kostenansätze für emittierte Schadstoffe. Weiterhin wird bei Einbeziehung der Nutzerkosten in der Regel auch das Unfallgeschehen bzw. die Änderung des Unfallgeschehens z.B. aufgrund des Oberflächenzustands monetär bewertet. Hierzu ist jedoch zu berücksichtigen, dass Maßnahmen zur Verbesserung des Zustands der Straße selbst zu einer Erhöhung der Unfälle führen können. Aus der Literatur gehen baustellenbedingte Zunahmen des Unfallgeschehens mit einem Faktor von 2 [47] bis 12 [48] hervor. Auch wenn sie sich nur schwer abschätzen lassen, gibt es international verstärkt Bestrebungen, weitere volkswirtschaftliche Kostengrößen beispielsweise für den Winterdienst oder die Lärmreduktion bei Verwendung von offenporigem Asphalt in Lebenszyklusbetrachtungen einzubinden.

Die Zielsetzung sowie der Bewertungsgegenstand der international angewandten Lebenszykluskostenberechnungen unterscheiden sich im Regelfall nicht von den in Deutschland gängigen Ansätzen. Es werden unter Berücksichtigung einer Verzinsung alle betrachteten Kostenfaktoren während eines definierten Betrachtungszeitraums aufsummiert und dann ins Verhältnis zum Restwert (salvage value oder residual value) der Straßenbefestigung gesetzt. Einer Straßenbefestigung wird im Regelfall immer ein bestimmter Restwert zugeordnet, der nie unter den Wert fällt, den das Material noch besitzt, wenn es als Recyclingbaustoff erneut in die Befestigung eingebracht würde. Tatsächlich muss der eigentliche Wert sogar noch höher eingeschätzt werden, da auch ein ausgefallener Oberbau im Regelfall weiterhin Verkehr aufnehmen kann.

2.3.1 VEREINIGTE STAATEN VON AMERIKA (USA)

In den Vereinigten Staaten kommen bei größeren Straßenbauprojekten schon seit geraumer Zeit Lebenszyklusanalysen zur Anwendung. Das generelle Vorgehen dieser etablierten Verfahren kann beispielsweise [46] entnommen werden, wobei sich der eigentliche Prozessablauf und die Bewertungsgegenstände – nämlich die kumulierten Kosten während eines Betrachtungszeitraums

sowie der Restwert – nur unwesentlich von den Verfahren anderer Länder unterscheiden. Die in den USA angewandte sog. Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) umfasst grob folgende Schritte:

1. Erstellung von alternativen Design- bzw. Erhaltungsstrategien während des Betrachtungszeitraums
2. Bestimmung von Nutzungsdauern bzw. Ausfallzeitpunkten
3. Bestimmung der Baulastträgerkosten
4. Bestimmung der Nutzerkosten
5. Erstellung von Flussdiagrammen zur Darstellung der Kosten und des Nutzens
6. Berechnung der Kapitalwerte
7. Analyse/Bewertung der Ergebnisse
8. Neubewertung der untersuchten Erhaltungsstrategien

zu 1)

Für Lebenszyklusbetrachtungen ist ein ausreichend großer Betrachtungszeitraum zu wählen, der gemäß FHWA Final LCCA Policy statement 1996 [49] mindestens 35 Jahre betragen sollte. Als Orientierungshilfe für die Wahl einer geeigneten Erhaltungsstrategie liegen für die Asphalt- und Betonbauweise (Neubau und Erhaltung) tabellarische Empfehlungen – beispielsweise von dem Pennsylvania Department of Transportation (PennDOT) – vor (Abbildung 2-8).

| Year | Treatment |
|------|--|
| 5 | Clean and seal 25% of longitudinal joints. Clean and seal 5% of transverse joints. 0% for neoprene seals. Seal coat shoulders if Type 1 paved shoulders. |
| 10 | Same as year 5. |
| 15 | Clean and seal 25% of longitudinal joints. Clean and seal 10% of transverse joints, 5% for neoprene seals. Seal coat shoulders, if Type 1 paved shoulders. |
| 20 | Concrete patch 5% of pavement area Spall repair 1% of transverse joints (5 sf/joint). Slab stabilization: minimum 25% of transverse joint. Diamond grind 100% of pavement area. Clean and seal all longitudinal joints, including shoulders. Clean and seal all transverse joints, 7% for neoprene seals. Seal coat shoulders, if Type 1 paved shoulders. Maintenance and protection of traffic. User delay. |

Abbildung 2-8: Empfehlungen für mögliche Erhaltungsstrategien (PenDOT) – Auszug [43]

zu 2)

Erwartungsgemäß wird den Nutzungsdauern der jeweiligen Schichten eine große Bedeutung im Hinblick auf die Lebenszykluskosten zugesprochen. Die Ausfallzeitpunkte geben direkt oder indirekt die wirtschaftlichste Erhaltungsstrategie vor und müssen deshalb mit Sorgfalt ermittelt werden. In den USA wird unter anderem auf Erfahrungswerte anhand von histori-

schen Daten zurückgegriffen. Performance-orientierte Nutzungsdauern liegen u.a. als Ergebnis des „STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (SHRP) LONG-TERM PAVEMENT PERFORMANCE PROGRAM (LTPP)“ vor. Eine Berücksichtigung von konkreten materialspezifischen Substanzwerten findet bis dato noch nicht standardmäßig Anwendung.

zu 3)

Die Kosten für den Baulasträger einer Straße ergeben sich aus den Neubaukosten und den Aufwendungen für die Erhaltung während der Nutzungsphase. Entsprechende Kostensätze werden entweder aus historischen Daten oder konkreten Kalkulationen vergebener Projekte entnommen. Dabei werden auch die Kosten für die Vorplanung, die Vertragserstellung oder die Bauüberwachung mit einbezogen. Ansätze für die routinemäßige Unterhaltung der Straße (routine reactive-type maintenance) liegen zumeist nur sehr grob vor und werden deshalb oft vernachlässigt, was aufgrund der Größenordnung zulässig erscheint. Immer im Kontext zu den entstehenden Kosten wird der verbleibende Restwert (salvage value) unter Berücksichtigung des Recyclingwerts und die zum Bewertungszeitpunkt noch vorhandene Nutzungsdauer (serviceable life) des Straßenoberbaus betrachtet.

Beide Größen – Kosten und Restwert – können entweder ohne Berücksichtigung der Verzinsung (constant dollars) oder mit Verzinsung (nominal dollars) berechnet werden.

zu 4)

Die Nutzerkosten (user costs) setzen sich im Wesentlichen aus den drei Komponenten

- Betriebskosten der Fahrzeuge (vehicle operating costs – VOC)
- Verzögerungs- bzw. Staukosten (user delay costs)
- Unfallkosten (crash costs)

zusammen.

Dabei wird in den USA zwischen Nutzerkosten bei ungestörtem (normalen) Betrieb der Straße ohne Bau- und/oder Erhaltungsmaßnahmen (normal operation category) und Nutzerkosten, die durch entsprechende Maßnahmen entstehen (work zone operations category) unterschieden. Die Differenzkosten zwischen beiden Zuständen werden dann zur Bewertung einer Maßnahme oder einer Erhaltungsstrategie herangezogen.

Bei normalem Betrieb sollten bei einem Vergleich verschiedener Straßendesigns/Bauweisen nur kleine Unterschiede zwischen den Unfallkosten sowie den Verzögerungs- bzw. Staukosten vorliegen. Geht man von einem etwa gleichen Zustand der Straße aus, sind auch die Betriebskosten der Fahrzeuge ähnlich. Die Nutzerkosten bei Normalbetrieb werden dabei als Funktion des Straßenzustands – besonders der Rauheit – betrachtet. Abbildung 2-9 zeigt beispielhaft die Betriebskosten in Abhängigkeit von der Rauheit. Auch für die monetäre Bewertung der zeitlichen Verzögerungen sowie des Unfallgeschehens stehen feste Kostensätze zur Verfügung.

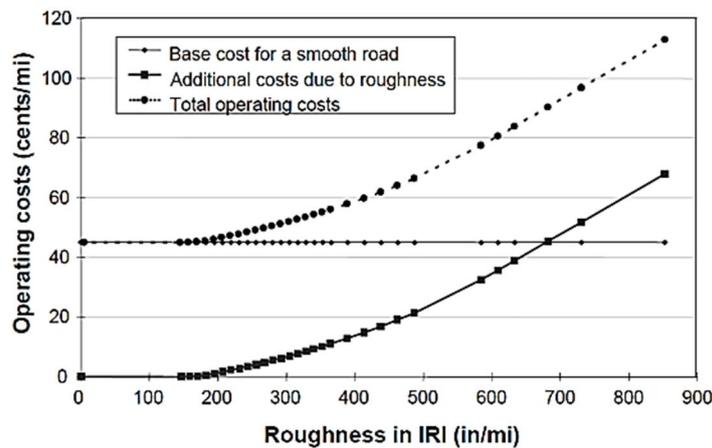


Abbildung 2-9: Einfluss der Rauheit auf die Betriebskosten der Fahrzeuge (Neuseeland) [50]

Bei baustellenbedingter Störung des Verkehrsablaufs müssen weitere Parameter in die Berechnung der Nutzerkosten einbezogen werden. Die sogenannten „work zone user costs“ lassen sich als Funktion in Abhängigkeit vom Zeitpunkt, der Dauer, dem Umfang und vom Grad der Verkehrsbehinderung der Maßnahme beschreiben. Hierzu werden detailliertere Informationen zur Verkehrszusammensetzung, Art und Dauer der Baustelle sowie der Verkehrsführung benötigt, die zusätzlich monetär zu berücksichtigen sind.

zu 5)

Um die Aufwendungen während des Betrachtungszeitraums grafisch darzustellen, wird oftmals auf Flussdiagramme (expenditure stream diagrams) zurückgegriffen. Sie helfen bei der Visualisierung der Höhe und des Zeitpunkts einer Aufwendung, wobei die Kosten im Regelfall als Aufwärtspfeile und der Nutzen/Restwert als negative Kosten (Pfeil nach unten) aufgetragen werden.

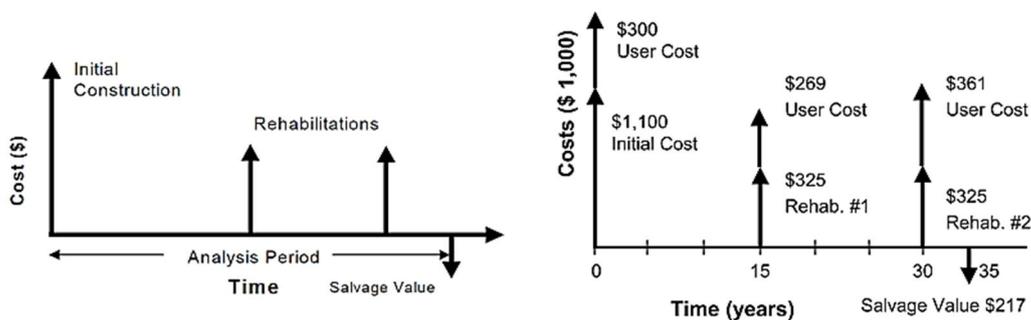


Abbildung 2-10: Beispiel für ein Flussdiagramm zur Darstellung der Aufwendungen während des Betrachtungszeitraums (links allgemein, rechts mit Werten)

zu 6)

Zur Bewertung der ökonomischen Effektivität eines Straßenbauprojekts werden im Regelfall die Kapitalwerte (net present value – NPV), also die auf ein Basisjahr diskontierten Kosten, herangezogen (Gl. 5).

$$\text{NPV} = \text{InitialCost} + \sum_{k=1}^N \text{RehabCost}_k \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^{n_k}} \right]$$

Gl. 5

mit:

NPV Kapitalwert (net present value)
 InitialCost Anfangs- bzw. Neubaukosten
 RehabCost_k Erhaltungskosten der Schicht zum Zeitpunkt k
 i Zinssatz (discount rate)
 n Jahr der Aufwendung

zu 7)

Die Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtungen sind auszuwerten und kritisch zu bewerten. Dabei ist es zusätzlich sinnvoll, Sensitivitätsanalysen beispielsweise in Form von best case/worst case Szenarien zu untersuchen, um die Auswirkungen von mit Unsicherheiten behafteten Eingangsparametern abschätzen zu können.

zu 8)

Nach Auswertung der Ergebnisse sollte die gewählte Bauweise und Erhaltungsstrategie erneut geprüft werden, um mögliche Einsparpotenziale zu detektieren.

Wie eine Untersuchung [51] in den USA aus dem Jahr 2004 belegt, treten teilweise große Defizite bei der Dokumentation von historischen Daten auf, obwohl diese von essenzieller Bedeutung für die Lebenszyklusbetrachtungen sind. Auch die generelle Akzeptanz solcher Untersuchungen für Straßenkonstruktionen ist in den USA nicht flächendeckend gewährleistet. 60 % der befragten Behörden sahen in LCCA-Anwendungen einen positiven Nutzen, während der Rest weder Vor- noch Nachteile feststellen konnte.

2.3.2 ENGLAND

Ähnlich wie das deutsche PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM (PMS) existiert in England das HIGHWAY AGENCY PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM (HAPMS) zur systematischen Planung des Erhaltungsgeschehens auf Netzebene. Um den besten Nutzen eines vorhandenen Budgets für das bestehende Netz zu ermitteln, verfügt das HAPMS mit dem integrierten SCHEME OPTIONS SYSTEM (SOS) bereits über einen rudimentären Lebenszyklusansatz.

Um jedoch auch die notwendigen Aufwendungen für die zukünftige Erhaltung abschätzen zu können sowie eine projektbezogene Life-Cycle Analyse zu ermöglichen, bedurfte es weiterer Ansätze. Für viele Jahre erfolgte die Abschätzung der Vorteilhaftigkeit von neuen Straßenbauprojek-

ten mit dem Computerprogramm COBA (COst Benefit Analysis). Dieses vollzieht einen Vergleich von Nutzerkosten (Reise- und Unfallkosten) mit und ohne Maßnahme und verrechnet diese mit den anfallenden Kosten für den Ausbau des Netzes (Abbildung 2-11).

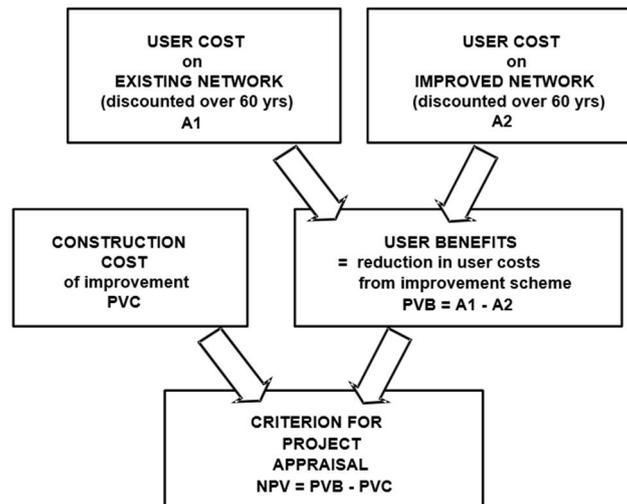


Abbildung 2-11: Schematischer Bewertungsablauf von COBA [52]

Die während der Nutzungsdauer notwendige Erhaltung wird dabei jedoch nur über sehr grobe Annahmen berücksichtigt, so dass COBA nicht in der Lage ist, Lebenszykluskosten unterschiedlicher Bauweisen adäquat gegeneinander zu werten. Deshalb wurde in den frühen 1990er Jahren durch das DEPARTMENT OF TRANSPORT ein weiterentwickeltes Verfahren zur Ermittlung der Lebenszykluskosten namens COMPARE erarbeitet, das hauptsächlich bei der Ausschreibung neuer Straßenbauprojekte Anwendung findet. Neben den Neubaukosten bzw. den Kosten zu Beginn des ersten betrachteten Jahres (first year costs), werden auch das zukünftige Erhaltungsgeschehen sowie die hieraus entstehenden Nutzerkosten detaillierter in die Kalkulationen einbezogen. Letztere umfassen die Zeitverzögerungen und steigende Anzahl an Unfällen aufgrund von Erhaltungsmaßnahmen. Ebenso wird angestrebt, die Lärm- und Abgasbelastung als Kostenfaktor zu berücksichtigen. Dies erfolgt in England jedoch noch nicht standardmäßig.

Als ökonomischer Faktor zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit verschiedener Strategien bzw. konkurrierender Bauweisen wird die folgende Gleichung (Gl. 6) herangezogen:

$$E(B : A) = \frac{N_A - N_B}{C_B - C_A}$$

Gl. 6

mit:

E(B:A)ökonomischer Indikator zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit von Vorgehen B oder A

N_A.....Kosten (Kapitalwert) während des Betrachtungszeitraums bei Vorgehen A

N_B.....Kosten (Kapitalwert) während des Betrachtungszeitraums bei Vorgehen B

C_A.....Neubaukosten bei Vorgehen A

C_B.....Neubaukosten bei Vorgehen B

Das COMPARE Verfahren operiert dabei auf Objektebene, ermöglicht also gemäß Gl. 6 den gesamtwirtschaftlichen Vergleich mehrerer konkurrierender Konzepte bzw. Bauweisen. Dabei bleibt der Einfluss von Erhaltungsmaßnahmen auf die Zustandsentwicklung des Gesamtnetzes weitestgehend unberücksichtigt. Deshalb wurde aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem HAPMS und COMPARE ein weiteres Verfahren erarbeitet, das in der Lage ist, die Auswirkungen verschiedener Erhaltungsstrategien oder verfügbarer Budgets auf den Zustand des gesamten Netzes auf Basis von Lebenszyklusbetrachtungen zu beurteilen. Das Verfahren ist so ausgelegt, dass bei entsprechendem Detaillierungsgrad und verfügbaren Rechenkapazitäten wesentlich differenziertere Ergebnisse – beispielsweise bezogen auf die Zustandsentwicklung des Netzes – geliefert werden können, als es mit dem SOS möglich ist.

Bei entsprechender Qualität der Eingangsparameter kann das Verfahren damit auch auf Projektebene angewendet werden, wobei jedoch zusätzlich die Auswirkungen auf das Straßennetz sowie die Interaktion mit anderen, im Netz befindlichen Baumaßnahmen berücksichtigt werden.

2.3.3 SCHWEDEN

In Schweden kommen seit geraumer Zeit Lebenszyklusbetrachtungen für Straßenbauprojekte zum Einsatz. Maßgeblich beteiligt an der Entwicklung und Fortentwicklung entsprechender Verfahren ist die SWEDISH NATIONAL ROAD ADMINISTRATION, die in Kooperation mit dem SWEDISH ENVIRONMENTAL RESEARCH INSTITUTE (IVL) eine Methodik entwickelte, mit der der Neubau sowie die Erhaltung und Unterhaltung einer Straßenkonstruktion über den Lebenszyklus wirtschaftlich bewertet werden kann. Hierzu steht ein EDV-gestütztes Berechnungsverfahren zur Verfügung, das in der Lage ist, für Straßenoberbauten mit einer Decke aus Beton oder in Asphaltbauweise Lebenszykluskosten zu ermitteln.

Bei den Lebenszyklusbetrachtungen in Schweden sowie den anderen skandinavischen Ländern sind besondere Bestrebungen zu erkennen, ökologische Aspekte (environmental impact) stärker in die Kostenermittlungen einzubeziehen. HÄKKINEN UND MÄKELE [53] untersuchten bereits 1998 für Asphalt- und Betonstrecken die umweltrelevanten Einflüsse, bedingt durch die Herstellung, den Einbau und die Entsorgung des verwendeten Mischguts. Auch der erhöhte Energiebedarf bei Erhaltungsmaßnahmen (durch die Behinderung des Verkehrs oder die Beleuchtung der Baustelle) sowie die Entstehung und Auswirkungen von Schadstoffemissionen (CO_2 , SO_2 , NO_x und CO) wurden einer näheren Betrachtung unterzogen.

Hierauf aufbauend untersuchte STRIPPLE [54] den Energieverbrauch über eine Nutzungsdauer von 40 Jahren für die Herstellung, die Erhaltung und den Betrieb (gemeint ist in dieser Studie beispielsweise die Beleuchtung oder Verkehrslenkung) von Straßenkonstruktionen mit Asphaltdeckschichten in Heiß- und Kaltasphaltbauweisen sowie Decken aus Beton. Weiterhin bezog er unterschiedliche Motorisierungen der Fahrzeuge – nämlich moderne Dieselmotoren mit geringen Emissionen und konventionelle Dieselmotoren – in die Betrachtungen ein. STRIPPLE berechnete einen Gesamtenergieverbrauch für die Herstellung, Erhaltung und den Betrieb von 23 TJ für die Asphaltbauweisen und 27 TJ für die Betonbauweise. Einen entscheidenden Anteil hat der Ener-

gieverbrauch für die angenommene Straßenbeleuchtung und die Verkehrslenkung. Mit rund 12 TJ leistet dieser Betrag unabhängig von der Bauweise einen bedeutenden Anteil am gesamten Energieverbrauchs während des Betriebs.

Zusätzlich wurde der verkehrsbedingte Energieverbrauch während der Nutzungsdauer ermittelt. Bei einer angenommenen Verkehrsstärke von 5.000 Kfz/24h und einem Kraftstoffverbrauch von 0,1 l/km, berechnete STRIPPLE einen Gesamtenergieverbrauch der Fahrzeuge von 229,2 TJ, was einen rund 9-mal höheren Wert, als für die Herstellung, Erhaltung und den Betrieb der Straße ausmacht. Die ebenfalls näher untersuchten Luftschadstoffe (CO₂, NO_x und SO₂) werden gemäß der Studie hauptsächlich bei der Herstellung der Straße emittiert, gefolgt von der Erhaltung. Der Betrieb leistet hingegen nur einen geringen Beitrag.

2.4 FAZIT DER LITERATURANALYSE

Die Literaturanalyse zeigt, dass bereits seit geraumer Zeit national und international große Anstrengungen unternommen werden, die Zustandsentwicklung von Straßen sowie die hierfür verantwortlichen Einflussgrößen zu beschreiben, festzulegen und wirtschaftlich zu bewerten.

In Deutschland stehen dementsprechend Erkenntnisse und Verfahren zur Verfügung, um die Zustandsentwicklung eines Oberbaus in die Zukunft zu prognostizieren und hieraus Erhaltungsstrategien zur Bestimmung der voraussichtlichen Aufwendungen abzuleiten. Bis zur Einführung der RDO Asphalt im Jahr 2009 war dies jedoch lediglich für definierte Oberflächenmerkmale möglich. Standardverhaltensfunktionen, wie sie beispielsweise in den RPE-Stra [28] enthalten sind oder in verschiedenen Forschungsprojekten ([18] [21]) erarbeitet wurden, können prinzipiell dafür verwendet werden, eine Abschätzung der Lebensdauer von Asphaltdeckschichten in Abhängigkeit von der Zeit oder der Verkehrsmenge vorzunehmen. Die Aussagekraft dieser Verhaltensfunktionen muss jedoch kritisch hinterfragt werden. Sowohl die generell prognostizierten Zustandsentwicklungen (Kurvenverläufe) als auch die resultierenden Nutzungsdauern bzw. ertragbaren Äquivalenzachsen bis zum Erreichen eines definierten Ausfallkriteriums decken sich oftmals nicht mit der Realität. Zudem ist eine Aussage zur Entwicklung des Zustands der tiefer in der Befestigung liegenden Schichten auf diese Weise nicht möglich, obwohl diese den Ausfallzeitpunkt des Oberbaus maßgeblich bestimmen.

Erst mit der Etablierung der rechnerischen Dimensionierung wurde es möglich, die Nutzungsdauer eines Straßenoberbaus anhand der strukturellen Substanz der Asphalttragschicht zu bestimmen und hieraus Verfahren zur monetären Bewertung der Restsubstanz ([22] [4]) oder der Lebenszykluskosten ([5]) abzuleiten. Diese stellen geeignete Grundlagen und Werkzeuge dar, um sie auf charakteristische Abschnitte verschiedener Straßenkategorien anzuwenden.

3 EINGANGSPARAMETER FÜR DIE BERECHNUNG DER LEBENSZYKLUSKOSTEN

In dem Forschungsprojekt „GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG DER DIMENSIONIERUNGSRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN UND DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON OBERBAUBEFESTIGUNGEN AUS ASPHALT“ [5] wurde ein Verfahren zur Ermittlung der Lebenszykluskosten entwickelt und einer Erstanwendung unterzogen. Der Ablauf des Bewertungsverfahrens, der für die weiteren Berechnungen übernommen wird, ist vereinfacht in Abbildung 3-1 dargestellt und wird für jede Schicht des Straßenoberbaus separat durchgeführt.

Während bei der Erstanwendung deutlich vereinfachte Annahmen beispielsweise bezüglich der Straßenquerschnitte oder der Ausstattung mit sonstigen Anlagenteilen getroffen wurden, werden in diesem Kapitel detaillierte und möglichst charakteristische Merkmale von Bundesautobahnen, Bundes- und Landesstraßen ermittelt und zu einem „repräsentativen“ Streckenabschnitt zusammengefasst. Anhand dieser Streckenabschnitte können dann Kosten für die Erhaltung des Oberbaus aber auch der sonstigen Anlagenteile berechnet werden.

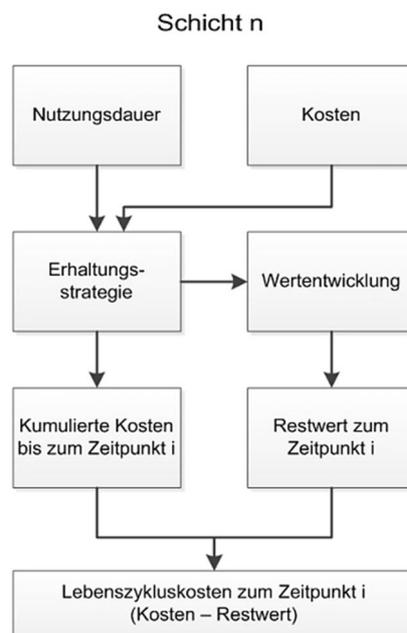


Abbildung 3-1: Schematischer Ablauf des monetären Bewertungsverfahrens

Hierzu wird ausgehend von berechneten bzw. festgelegten Nutzungsdauern der betrachteten Schichten des Oberbaus eine Erhaltungsstrategie entworfen, die die Art und Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen definiert. Unter Verwendung geeigneter Eingangswerte (vgl. Tabelle 3-1) für die Erhaltung lassen sich so die kumulierten Kosten während des betrachteten Lebenszyklus bestimmen.

Die Erhaltungsstrategie ist weiterhin ausschlaggebend für die Wertentwicklung der jeweiligen Schicht, wobei der Wertverlust durch die Nutzung sowie die Wertsteigerung bzw. Wiederherstellung des Wertes durch Erhaltungsmaßnahmen und eine Verzinsung berücksichtigt werden müssen. Auf diese Weise lässt sich zu einem beliebigen Betrachtungszeitraum i der Restwert der Schicht bestimmen.

Betrachtet man den Restwert als „negative Kosten“, ergeben sich die Lebenszykluskosten durch Subtraktion des Restwertes von den kumulierten Kosten. Die Lebenszykluskosten des Oberbaus berechnen sich dann aus der Summe der Einzelwerte der betrachteten Schichten.

Die Ergebnisse werden dabei maßgeblich durch die Qualität der Eingangsparameter sowie der getroffenen Festlegungen beeinflusst. Entsprechende Größen müssen deshalb für die jeweilige Fragestellung mit großer Sorgfalt ermittelt werden. Die für die Lebenszyklusberechnungen maßgebenden Parameter sind in Tabelle 3-1 aufgeführt und werden im Folgenden festgelegt bzw. hergeleitet.

Tabelle 3-1: Parameter des Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der Lebenszykluskosten einer Straßenbefestigung

| Parameter | |
|---------------------|--|
| Straßenabschnitt | Querschnitt Oberbau <i>Mischgutsorten</i> <i>Schichtfolgen</i> <i>Schichtdicken</i> Ausstattung mit sonstigen Anlagenteilen |
| Verkehr | Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) Schwerverkehrsanteil und -steigerung Achslastverteilung |
| Kosten | Neubau/grundhafte Erneuerung Erhaltungsmaßnahmen Ausbau Entsorgung Materialwert |
| Nutzungsdauern | maximal möglich tatsächlich realisierbar |
| Wertentwicklung | Minderung aufgrund von Nutzung durch Verkehr oder in Jahren Steigerung aufgrund von Erhaltungsmaßnahmen Steigerung aufgrund von Askontierung |
| Erhaltungsstrategie | technisch sinnvoll? wirtschaftlich optimiert |

3.1 DEFINITION CHARAKTERISTISCHER STRASSENABSCHNITTE

Um den Finanzbedarf für den Bau und die Erhaltung einer Straßenbefestigung berechnen zu können, werden zunächst Straßenabschnitte erarbeitet, die aufgrund ihrer Abmessungen, des Oberbaus sowie der Art und des Umfangs der Straßenausstattung möglichst repräsentativ für die jeweilige Straßenkategorie sind. Dabei muss zwischen dem Bestreben, die Wirklichkeit möglichst de-

tailliert wiederzugeben und den Vereinfachungen, die aufgrund der teilweise sehr inhomogenen Ausprägung verschiedener Netzabschnitte notwendig werden, sorgfältig abgewogen werden.

Die Erarbeitung von charakteristischen Streckenabschnitten erfolgt grundsätzlich in drei Schritten:

1. Festlegung eines (Regel)Querschnitts
2. Festlegung eines ausreichend dimensionierten Oberbaus
3. Festlegung der Ausstattung mit sonstigen Anlagenteilen

Geeignete Regelquerschnitte und deren Abmessungen können je nach Straßenkategorie den RICHTLINIEN FÜR DIE ANLAGE VON AUTOBAHNEN (RAA) [55] und den „RICHTLINIEN FÜR DIE ANLAGE VON LANDSTRASSEN (RAL)“ [56] entnommen werden.

Für die Festlegung von ausreichend dimensionierten Oberbaukonstruktionen mit definierten Schichtfolgen und -dicken werden die Standardbauweisen der RStO [2] herangezogen. Die Wahl von zweckmäßigen Mischgütern erfolgt anhand der ZTV Asphalt [57]

Auf den Banketten und Mittelstreifen werden Schutzeinrichtungen, Leitpfosten und vertikale Verkehrszeichen zur Sicherung und Regelung des Verkehrs angeordnet. Zur optischen Führung und Aufteilung der Fahrbahnfläche werden auf der Oberfläche zusätzlich Markierungen aufgebracht, die in verschiedenen geometrischen Formen und aus verschiedenen Materialien hergestellt werden können. Auch diese sonstigen Anlagenteile sind entweder von der Erhaltung der eigentlichen Straßenbefestigung betroffen oder werden im Rahmen eigener Maßnahmen turnusmäßig erneuert bzw. gewartet. Entsprechende Kosten müssen bei Lebenszyklusbetrachtungen demnach ebenfalls berücksichtigt werden.

Um den Querschnitten eine charakteristische Straßenausstattung zuordnen zu können, wurden neben Befragungen von Verantwortlichen besonders die Ergebnisse des Forschungsprojekts „GRUNDLAGEN FÜR DIE EINBEZIEHUNG DER SONSTIGEN ANLAGENTEILE VON STRASSEN IN DIE SYSTEMATISCHE STRASSENERHALTUNG ALS VORAUSSETZUNG EINES UMFASSENDEN ASSET MANAGERMENTS“ [58] (im Folgenden als FE Asset-Management bezeichnet) herangezogen.

3.1.1 AUTOBAHNEN

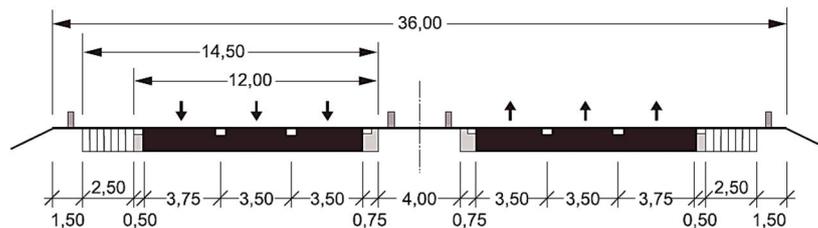
Bei Autobahnen handelt es sich um Fernverkehrsstraßen, die dem Schnellverkehr sowie dem Güterfernverkehr dienen. Auf den insgesamt rund 12.879 km Bundesautobahnen [59] (Stand 1. Januar 2013) wird ein Großteil des Warenverkehrs abgewickelt, was zu hohen Schwerverkehrsbelastungen und Beanspruchungen der Straßenkonstruktionen führt. Zusammen mit dem hohen Ausbaustandard stellen Autobahnen deshalb einen elementaren Teil der zu erhaltenden Infrastruktur im Bundesgebiet dar und haben dementsprechend eine herausragende Bedeutung im Erhaltungsmanagement.

3.1.1.1 QUERSCHNITT

In der vorliegenden Arbeit wird zwischen Autobahnquerschnitten mit drei- und zweistreifiger Richtungsfahrbahn unterschieden. Zur Festlegung der Abmessungen wurden die Regelquerschnitte RQ 36 (3-streifig) und RQ 31 (2-streifig) gemäß den RICHTLINIEN FÜR DIE ANLAGE VON AUTOBAHNEN (RAA) gewählt (Abbildung 3-2). Querschnitte mit 4-streifiger Richtungsfahrbahn kommen im Netz nur sehr selten vor und sind deshalb nicht Gegenstand der weiteren Untersuchungen.

Im Vergleich zu Bestandsstrecken, die oftmals noch nach den mittlerweile nicht mehr gültigen RAS-Q [60] geplant und gebaut wurden, sind die Querschnitte der RAA breiter bemessen. Dies ist jedoch größtenteils auf breitere Seiten- sowie Mittelstreifen zurückzuführen und weniger auf die Fahrstreifenbreiten, die einen wesentlichen Bewertungsgegenstand dieser Arbeit darstellen. Lediglich der Hauptfahrstreifen misst mit einer Breite von 3,75 m generell 0,25 m mehr als bei den Regelquerschnitten der RAS-Q. Zusammen mit dem Umstand, dass in Zukunft alle neu zu bauenden Autobahnen nach den RAA gebaut werden, erscheint die Festlegung der Breiten anhand der Regelquerschnitte der RAA plausibel und charakteristisch für die Straßenkategorie der Autobahnen.

RQ 36



RQ 31

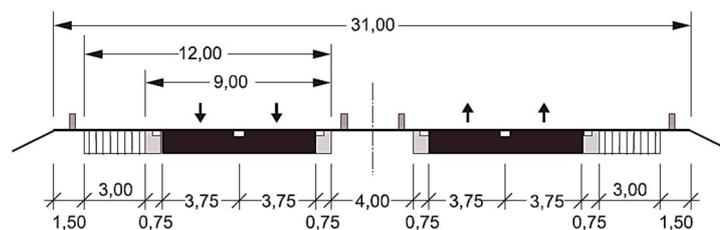
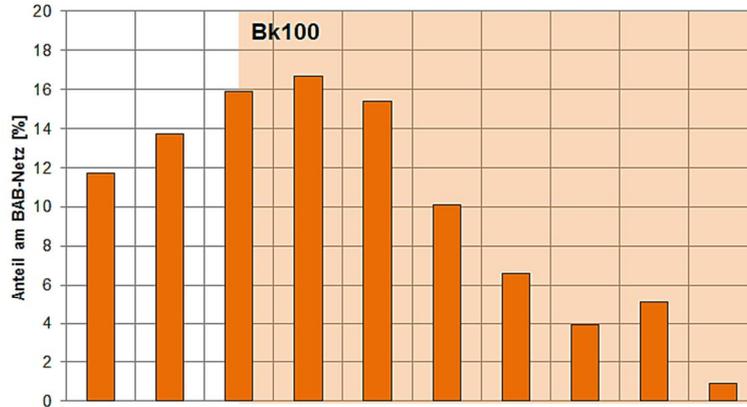


Abbildung 3-2: Gewählte Regelquerschnitte für Autobahnen gemäß den RAA

3.1.1.2 OBERBAU

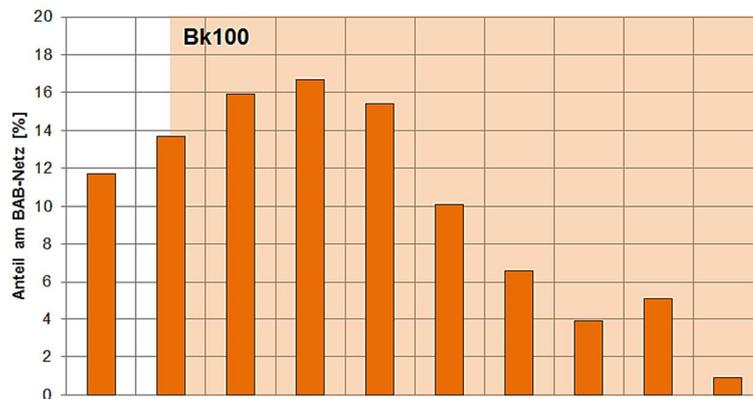
Die angemessene und für Autobahnen möglichst charakteristische Auswahl eines geeigneten Oberbaus ist von großer Bedeutung für die Lebenszykluskosten. Einerseits werden die anfallenden Mischgutkosten unmittelbar durch die vorgesehenen Schichtdicken und das gewählte Material bestimmt, andererseits kann nur durch einen ausreichend dick dimensionierten Oberbau sicher-

gestellt werden, dass die im Weiteren festgelegten Nutzungsdauern auch tatsächlich realisiert werden können und kein frühzeitiges Versagen eintritt.



| | | | | | | | | | | |
|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|
| DTV [Tausend Kfz/24h] | <20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | 90-120 | >120 |
| DTV-Anteil [%] | 11,7 | 13,7 | 15,9 | 16,7 | 15,4 | 10,1 | 6,6 | 3,9 | 5,1 | 0,9 |
| B (geschätzt) [Mio. äquiv. 10-t Aü] | <18 | 18-27 | 27-36 | 36-44 | 44-53 | 53-70 | 62-70 | 70-80 | 80-105 | >105 |

Abbildung 3-3: Verteilung von Verkehrsstärken auf das Autobahnnetz im Jahr 2000 (Auswertung der BAST)



| | | | | | | | | | | |
|--|------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|------|
| DTV [Tausend Kfz/24h] | <31 | 31-47 | 47-62 | 62-78 | 78-93 | 93-109 | 109-125 | 125-140 | 140-187 | >187 |
| DTV-Anteil [%] | 11,7 | 13,7 | 15,9 | 16,7 | 15,4 | 10,1 | 6,6 | 3,9 | 5,1 | 0,9 |
| B (geschätzt) [Mio. äquiv. 10-t Aü] | <28 | 28-42 | 42-55 | 55-69 | 69-83 | 83-97 | 97-111 | 111-125 | 125-166 | >166 |

Abbildung 3-4: Verteilung von Verkehrsstärken auf das Autobahnnetz im Jahr 2015 (eigene Prognose auf Grundlage der Auswertung der BAST)

Verkehrsprognosen zeigen, dass besonders das Schwerverkehrsaufkommen in Zukunft weiter zunehmen wird. Hiervon sind in besonderem Maße die Autobahnen betroffen, die schon jetzt sehr hohen Verkehrsbelastungen ausgesetzt sind. Eine Auswertung der Durchschnittlichen Täglichen Verkehrsstärke (DTV) für 11.425 km Autobahnen (2.442 Zählstellen) im Jahr 2000 durch die

BAST ergab die in Abbildung 3-3 dargestellte Verteilung. Anhand von hieraus abgeschätzten B-Zahlen (RStO)³ wird ersichtlich, dass schon damals rund 67 % der untersuchten Abschnitte bei Neubau als Belastungsklasse Bk100 ausgeführt werden müssten. Legt man als grobe Näherung eine durchschnittliche Steigerung des Verkehrs von 3 % zugrunde, müssten im Jahr 2015 sogar rund 81 % in Form einer Bk100 dimensioniert werden (Abbildung 3-4).

Als charakteristischer und ausreichend dick dimensionierter Oberbau für Autobahnen wird deshalb ein Aufbau gemäß der Belastungsklasse Bk100 gewählt. Ein entsprechender Aufbau in Asphaltbauweise gemäß Tafel 1, Zeile 1 der RStO 12 ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

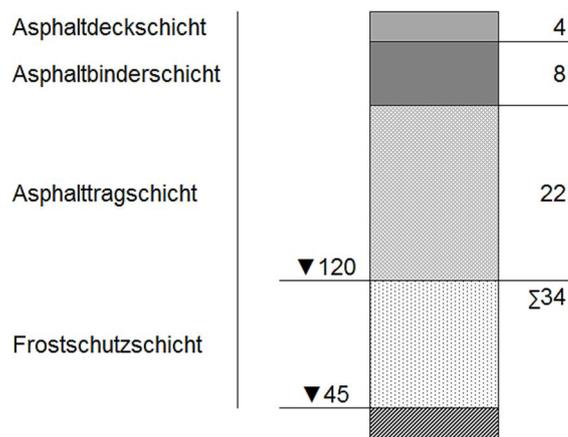


Abbildung 3-5: Oberbau aus Asphalt für die Bk100 gemäß Tafel 1: Zeile 1, Spalte 1 der RStO 12

Tabelle 3-2: Gewählte Asphaltmischgüter für die Schichten des gebundenen Oberbaus von Autobahnen

| Schicht | Autobahn Bk100 | |
|---------------|----------------|-------------|
| | Mischgut | Bindemittel |
| Deckschicht | SMA 8 S | 25/55-55 |
| Binderschicht | AC 22 B S | 25/55-55 |
| Tragschicht | AC 32 T S | 50/70 |

Um zweckmäßige Asphaltmischgut- und Bindemittelsorten in Abhängigkeit von der Belastungsklasse zu bestimmen, werden die Tabellen 1 und 2 der ZTV Asphalt herangezogen und entsprechend Tabelle 3-2 festgelegt. Als ungebundene Schicht zur Sicherstellung der Frostsicherheit wird eine FSS 0/45 verwendet. Bei einer zugrunde gelegten Gesamtdicke des frostsicheren Oberbaus von 65 cm resultiert hieraus eine Einbaudicke von 31 cm.

³ Es wird überschlägig von einem mittleren Alter des Autobahnnetzes von 15 Jahren ausgegangen.

3.1.1.3 PASSIVE SCHUTZEINRICHTUNGEN UND LEITPFOSTEN

Passive Schutzeinrichtungen aus Stahl oder Beton werden hauptsächlich zum Schutz von neben der Fahrbahn befindlichen Einrichtungen sowie der Fahrzeuginsassen bei einem Unfall eingesetzt. Damit stellen die Schutzeinrichtungen ein kritisches Element für die Sicherheit des Straßenverkehrs dar, besonders auf Autobahnen mit hohen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten. Weiterhin unterliegen diese Anlagenteile einer regelmäßigen Erhaltung, die teilweise nur die Schutzeinrichtungen selbst betrifft – beispielsweise die Erneuerung nach einem Anprall. Andererseits können Schutzeinrichtungen auch von Erhaltungsmaßnahmen betroffen sein, die hauptsächlich die Fahrbahn betreffen, z.B. wenn die Bankette angepasst werden müssen. Aufgrund dessen und der augenscheinlich hohen Ausstattungsquote auf Autobahnen werden die passiven Schutzeinrichtungen bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten berücksichtigt.

Augenscheinlich und gemäß dem FE Asset-Management [58] sind Autobahnquerschnitte sowohl im Bereich der Bankette als auch der Mittelstreifen mit passiven Schutzeinrichtungen in Form von Stahlschutzplanken oder Betonschutzwänden ausgestattet. Nach ALFES [61] werden in Nordrhein-Westfalen auf rund 90 % des insgesamt etwa 2.200 km langen Autobahnnetzes des Bundeslandes Schutzeinrichtungen in Stahlbauweise verbaut. Die Erhebungen aus dem FE Asset-Management bestätigen diese Größenordnung auch für das bundesweite Autobahnnetz, mit einer nochmals geringfügig höheren Ausstattungsquote von rund 92 %. Trotzdem müssen auch passive Schutzeinrichtungen aus Beton bei der Erstellung eines repräsentativen Autobahnabschnitts berücksichtigt werden.

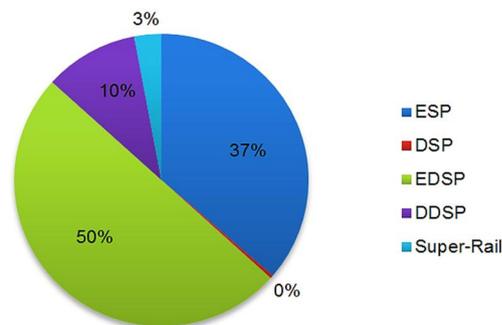


Abbildung 3-6: Prozentuale Verteilung der auf Autobahnen verbauten Schutzsysteme aus Stahl

Die im FE Asset-Management erhobenen mittleren Ausstattungsquoten der unterschiedlichen Schutzsysteme in Stahlbauweise sind in Abbildung 3-6 als prozentuale Verteilung dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der größte Teil – nämlich insgesamt rund 87 % – auf Einfache Schutzplanken (ESP) und Einfache Distanzschutzplanken (EDSP) entfallen. Etwa 10 % der Schutzplanken werden als Doppelte Distanzschutzplanke (DDSP) ausgebildet, die restlichen Systeme weisen eine vernachlässigbar kleine Ausstattungsquote auf. Aus diesem Grund werden die DSP sowie die Super-Rail Systeme bei der weiteren Verteilung der Schutzeinrichtungen nicht weiter berücksichtigt. Eine Übersicht über die verschiedenen passiven Schutzeinrichtungen aus Stahl nach der DIN EN 1317 [62] gibt Abbildung 3-7.

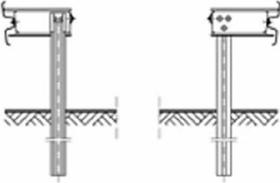
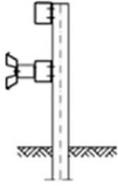
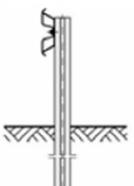
| System | Skizze | Aufhaltestufe |
|-----------------------|---|---------------|
| DDSP/1.33 SL |  | H2 |
| EDSP/2.0 zweifach |  | H2 |
| SUPER-RAIL |  | H4b |
| EDSP/2.0 EDSP/1.33 |  | H1 |
| ESP/4.0 ESP/2.0 |  | N2 |

Abbildung 3-7: Stahlschutzplankensysteme nach DIN EN 1317 [62]

Anhand der im FE Asset-Management erhobenen Ausstattungsquote von passiven Schutzeinrichtungen an Bundesautobahnen – angegeben als km Schutzeinrichtungen pro km Gesamtquerschnitt – ergibt sich eine maximale Ausstattung von rund 1,4 km Schutzeinrichtungen pro km Strecke, wobei 0,15 km auf Schutzeinrichtungen aus Beton entfallen. Anhand von Abbildung 3-6 lässt sich folgende Verteilung ableiten:

- EDSP = 494 m pro km Richtungsfahrbahn
 - DDSP = 406 m pro km Richtungsfahrbahn
 - ESP = 350 m pro km Richtungsfahrbahn
 - Beton = 150 m pro km Richtungsfahrbahn
- Σ **1.400 m pro km Richtungsfahrbahn**

Die Schutzeinrichtungen müssen in einem weiteren Schritt auf den Mittelsteifen und das Bankett verteilt werden. Die „RICHTLINIEN FÜR PASSIVEN SCHUTZ AN STRASSEN DURCH FAHRZEUG-RÜCKHALTESYSTEME (RPS)“ [63] legen fest, dass am Mittelstreifen Schutzsysteme mit der

Rückhaltstufe H2 bzw. bei einem $DTV_{(SV)} > 3.000$ Kfz/24h und erhöhter Abkommenswahrscheinlichkeit der Rückhaltstufe H4b gemäß der DIN EN 1317 angeordnet werden müssen. Eine Aufhaltstufe H2 kann entweder durch das Anbringen einer Doppelten Distanzschutzplanke (DDSP/1.33 SL), einer zweifachen Einfachen Distanzschutzplanke (EDSP/2.0) gemäß Abbildung 3-7 oder mittels Betonschutzwänden (bis Aufhaltstufe H4b möglich) sichergestellt werden. Doppelte Schutzplanken (DSP) sollen laut den RPS nicht mehr verwendet werden und finden – wie bereits erwähnt – unter Berücksichtigung der geringen Ausstattungsquote im Folgenden keine weitere Berücksichtigung. Die höchste Aufhaltstufe H4b gewährleisten beispielsweise Super-Rail Systeme. Wie Abbildung 3-6 zu entnehmen ist, sind jedoch bisher nur sehr geringe Teile des Autobahnnetzes mit solchen Schutzsystemen ausgestattet.

Zur Festlegung der benötigten Aufhaltstufen von passiven Schutzeinrichtungen im äußeren Fahrbahnrandbereich stellen die RPS ein Ablaufdiagramm zur Verfügung, das eine entsprechende Auswahl in Abhängigkeit von Gefährdungstufen, zulässigen Höchstgeschwindigkeiten sowie dem $DTV_{(SV)}$ ermöglicht. Demnach sind mindestens Systeme mit einer Aufhaltstufe N2 vorzusehen, beispielsweise Einfache Schutzplanken (ESP) nach Abbildung 3-7. Dass Einfache Schutzplanken auf Autobahnen vielfach verbaut sind, geht aus Abbildung 3-6 hervor. Die Verteilung (s.o.) lässt jedoch auch erkennen, dass Teile der Fahrbahnränder von Autobahnquerschnitten mit Schutzplanken höherer Aufhaltstufe (vordringliche EDSP der Aufhaltstufe H1) ausgestattet sind.

Dementsprechend werden für einen 1 km langen Autobahnabschnitt (Richtungsfahrbahn) die verschiedenen Schutzsysteme unabhängig von der Fahrstreifenanzahl verteilt. Am Mittelstreifen werden auf gesamter Abschnittslänge insgesamt 444 m Einfache Distanzschutzplanken (EDSP), 406 m Doppelte Distanzschutzplanken (DDSP) und 150 m Betonschutzwände angeordnet. Einfache Schutzplanken (ESP) werden ausschließlich am Bankett verbaut und weisen demnach eine Länge von 350 m auf. Die restlichen Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand entfallen auf EDSP (50 m).

Aufgrund fehlender Erkenntnisse werden Anfangs- und Endkonstruktionen, Übergangskonstruktionen sowie Anpralldämpfer nicht in die weiteren Betrachtungen einbezogen.

Leitpfosten dienen der Abgrenzung der Fahrbahn und helfen, den Verlauf der Strecke zu visualisieren. Da sie ebenfalls direkt oder indirekt von Erhaltungsmaßnahmen betroffen sind und auf Autobahnen im Regelfall über die gesamte Streckenlänge angeordnet sind, werden sie als Kostenfaktor bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten in Ansatz gebracht.

Die ermittelten Ausstattungsquoten für Leitpfosten aus dem FE Asset-Management weisen auf Autobahnen ausgeprägte Schwankungen in einer Größenordnung von 9 bis 39 Leitpfosten pro km Richtungsfahrbahn auf. Demzufolge würden entsprechende Leiteinrichtungen in einem Abstand von etwa 26 bis 111 m am äußeren Fahrbahnrand angeordnet. Diese sehr heterogene Verteilung mag darauf zurückzuführen sein, dass die zuständigen Straßenbaubehörden frei über den Einsatz von Leitpfosten entscheiden können (StVO §45, Abschnitt 3) [64].

Richtwerte für geeignete Abstände können jedoch aus der Literatur „HINWEISE FÜR DAS ANBRINGEN VON VERKEHRSZEICHEN UND VERKEHRSEINRICHTUNGEN (HAV)“ [65] entnommen werden. Demnach sollte der gegenseitige Abstand von Leitpfosten in der Geraden und in der Ebene 50 m betragen. Bei Krümmungen bzw. Kuppen kann ein engeres Aufstellen von Leitpfosten sinnvoll sein. Da bei Straßen der Entwurfsklasse 1 A gemäß den RAA große Mindestradien von 900 m vorzusehen sind (bzw. 720 m bei EKA 1 B), kann laut den HAV jedoch auch im Kurvenbereich der Leitpfostenabstand von 50 m beibehalten werden. Das gleiche gilt sinngemäß für Kuppen, die bei der EKA 1 A mit so großen Halbmessern versehen werden (min. $H_K = 13.000$ m), dass ein engerer Abstand der Leitpfosten nicht notwendig ist.

Es wird deshalb festgelegt, dass der charakteristische Autobahnabschnitt am äußeren Fahrbahnrand mit Leitpfosten in einem Abstand von jeweils 50 m versehen ist, was bezogen auf einen Kilometer Strecke 20 Leitpfosten pro Richtungsfahrbahn ausmacht. Am Mittelstreifen werden keine Leitpfosten angeordnet.

3.1.1.4 HORIZONTALE UND VERTIKALE VERKEHRSZEICHEN

Unter dem Oberbegriff Verkehrszeichen werden die auf der Straßenoberfläche aufgetragenen Straßenmarkierungen (horizontale Verkehrszeichen) sowie die Beschilderung (vertikale Verkehrszeichen) auf bzw. entlang der Strecke zusammengefasst.

Straßenmarkierungen (horizontale Verkehrszeichen)

Straßenmarkierungen werden nahezu auf allen Fahrbahnen zur Erhöhung der Sicherheit, der Verkehrslenkung und Verkehrsbeeinflussung aufgebracht. In Deutschland werden Straßenmarkierungen generell in Weiß, oder bei vorübergehenden Baumaßnahmen in Gelb hergestellt. Entsprechende Verkehrszeichen unterliegen durch die Überrollungen des Verkehrs einer stetigen Abnutzung, sodass sie regelmäßig erneuert werden müssen. Gleichzeitig sind die Markierungen von nahezu jeder Erhaltungsmaßnahme an der Fahrbahn betroffen und müssen danach neu aufgebracht werden. Dementsprechend stellen diese Anlagenteile einen Kostenfaktor im Erhaltungsmanagement dar, der nicht vernachlässigt werden darf.

Straßenmarkierungen können aus verschiedenen Materialien bestehen, die sich einerseits auf die Kosten und andererseits auf die Langlebigkeit auswirken. Straßenmarkierungen werden im Regelfall aus einfacher Dispersionsfarbe, Folie, Heiß- oder Kaltplastik bzw. in Form von Agglomeratmarkierungen (Heiß- bzw. Kaltplastik mit darin verteilten Agglomeraten) hergestellt. Die Ergebnisse des FE Asset-Management zeigen dabei, dass Straßenmarkierungen aus Dispersionsfarbe auf Autobahnen in der Regel nicht verwendet werden (vgl. Abbildung 3-8).

Dies deckt sich auch mit den Empfehlungen der „ZUSÄTZLICHEN TECHNISCHEN VERTRAGSBEDINGUNGEN UND RICHTLINIEN FÜR MARKIERUNGEN AUF STRASSEN (ZTV M)“ [66], die Markierungen aus Farben bzw. Dispersionen für stark bzw. besonders stark beanspruchte Bereiche als ungeeignet beschreiben (siehe auch Tabelle 8 in [66]). Straßenmarkierungen aus Folien werden gemäß dem FE Asset-Management trotz hoher erreichbarer Verkehrsklasse (produktspezifisch bis

P7) ebenfalls nur selten verwendet. Ursächlich hierfür sind u.U. wirtschaftliche Gesichtspunkte, da Markierungen aus Folie zwar längere Nutzungsdauern aufweisen, jedoch bei der Herstellung zunächst höhere Kosten verursachen (vgl. [58]). Die meisten Markierungen auf Autobahnen bestehen aus Heiß- oder Kaltplastik ohne bzw. mit Agglomeraten (Abbildung 3-8), was durchaus nachvollziehbar ist, da entsprechende Systeme auch erkennbare Vorteile beispielsweise bei der Nachsichtbarkeit bei Nässe oder der Widerstandsfähigkeit gegen Abnutzung durch den Winterdienst aufweisen.

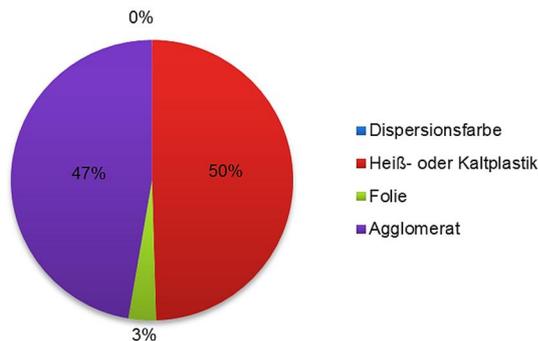


Abbildung 3-8: Prozentuale Verteilung der auf Autobahnen aufgebrauchten Materialien für Straßenmarkierungen

Es lassen sich die Materialien Heiß- und Kaltplastik aufgrund der Datenverfügbarkeit des FE Asset-Management – beispielsweise im Hinblick auf die Ausstattungsquote – nicht unmittelbar voneinander trennen. Tatsächlich befinden sich zahlreiche patentierte Produkte verschiedenster Hersteller auf dem Markt, die eine für Autobahnen benötigte Verkehrsklasse und Typ II Zulassung (erhöhte Nachsichtbarkeit bei Nässe) von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) erhalten haben. Aufgrund voneinander abweichender Kosten bzw. Nutzungsdauern seitens der Hersteller erscheint eine weitere Untergliederung wenig praktikabel. Straßenmarkierungen aus Heiß- bzw. Kaltplastik werden deshalb im Weiteren als eine Gruppe behandelt und mit mittleren Kosten und Nutzungsdauern versehen.

Wo und in welcher Form Straßenmarkierungen im Querschnitt zur Abgrenzung zum Gegenverkehr bzw. für Leitlinien und Fahrbahnbegrenzungen aufzubringen sind, ist in den „RICHTLINIEN FÜR DIE MARKIERUNG VON STRASSEN (RMS)“ [67] aufgeführt. Bezüglich der Strichdicken der Längsmarkierungen sowie der Abstände bei Leit- und Warnlinien gelten die Angaben gemäß Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4.

Tabelle 3-3: Strichbreiten der Längsmarkierungen [67]

| | Autobahnen | andere Straßen |
|--------------|------------|----------------|
| Schmalstrich | 0,15 m | 0,12 m |
| Breitstrich | 0,30 m | 0,25 m |

Tabelle 3-4: Länge von Strichen und Lücken bei unterbrochenen Längsmarkierungen [67]

| | Autobahnen | andere Straßen | |
|------------------------------|------------|----------------|-------------|
| | | außerorts | innerorts |
| Strich/Lücke (Leitlinie) 1:2 | 6 m / 12 m | 4 m / 8 m | 3 m / 6 m |
| Strich/Lücke (Warnlinie) 2:1 | 6 m / 3 m | 4 m / 2 m | 3 m / 1,5 m |

Die Anordnung der Längsmarkierungen für Autobahnquerschnitte mit baulicher Trennung der Fahrbahnen wird in den RMS gemäß Abbildung 3-9 vorgesehen. Demzufolge werden als Fahrbahnbegrenzungen durchgehende Längsmarkierungen mit einer Strichbreite von 0,30 m (Breitstrich) angeordnet. Die Leitlinien zwischen den Fahrstreifen werden als Schmalstrich ($b = 0,15$ m) aufgebracht, jedoch als unterbrochene Linie mit einer Strichlänge von 6 m und einer Lücke von 12 m (Verhältnis 1:2). Die Angaben der RMS beziehen sich auf die Querschnitte der mittlerweile nicht mehr gültigen RAS-Q [60], können jedoch auf die Regelquerschnitte der RAA übertragen werden.

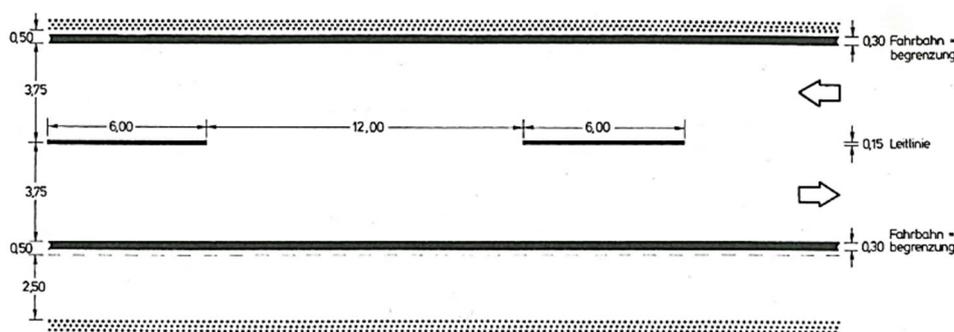


Abbildung 3-9: Markierung einer Fahrbahn mit befestigtem Mittelstreifen [67]

Es wird festgelegt, dass die Leitlinien aus Markierungsstoffen mit Agglomerat hergestellt werden, da eine erhöhte Nachtsichtbarkeit bei Nässe hier besonders wichtig erscheint. Als Fahrbahnbegrenzungen werden Markierungen aus Heiß- oder Kaltplastik (ohne Agglomerate) aufgebracht.

Beschilderung (vertikale Verkehrszeichen)

Die Beschilderung an einer Straße dient unmittelbar der Regelung des Verkehrs sowie der Verkehrssicherheit, beispielsweise durch die behördliche Vorgabe von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten. Auch die vertikalen Verkehrszeichen müssen immer wieder unterhalten oder erneuert werden, damit sie von den Verkehrsteilnehmern eindeutig wahrgenommen werden können. Sie werden deshalb bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten monetär in Ansatz gebracht.

In dem Forschungsprojekt Asset-Management wurden Ausstattungsquoten von vertikalen Verkehrszeichen auf Autobahnen erhoben. Demnach sind auf einem Kilometer Strecke rund 18 Verkehrszeichen mit einer Fläche von $< 1 \text{ m}^2$ bezogen auf den Gesamtquerschnitt angeordnet. Bei symmetrischer Aufteilung sind dies jeweils 9 Verkehrszeichen pro Fahrbahnseite, die im Mittel einen Abstand von rund 111 m zueinander aufweisen. Die Anzahl an Verkehrszeichen $< 1 \text{ m}^2$ erscheint zunächst recht hoch. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass in diese Kategorie eine Vielzahl an verschiedenen Gefahren-, Vorschrifts- und Richtzeichen der StVO (§39-§43) [64] fallen.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass neben den Verkehrszeichen $< 1 \text{ m}^2$ auch oftmals größere, teilweise an Schilderbrücken angebrachte Schilder und Tafeln angeordnet werden. Ebenso verfügen einige Autobahnabschnitte über Strecken-, Netz- oder Knotenbeeinflussungsanlagen. Als groben Richtwert kann dem FE Asset Management entnommen werden, dass im bundesweiten Mittel pro km Richtungsfahrbahn etwa 0,3 bis 0,5 Verkehrsbeeinflussungsanlagen – also Schilderbrücken mit nicht näher beschriebener Ausstattung – vorliegen. Die Erhaltungsintervalle sowie die Kosten beispielsweise einer Streckenbeeinflussungsanlage sind jedoch stark von den individuellen Abmessungen (z.B. Anzahl der Fahrstreifen, usw.) sowie der Ausstattung (z.B. Anzeige durch Prismen tafeln oder LED) abhängig und lassen sich deshalb nur hinreichend genau im jeweiligen Einzelfall abschätzen. Sie werden daher nicht standardmäßig berücksichtigt und müssen bei Bedarf mit in die Kostenermittlung einbezogen werden.

Die Daten aus dem FE Asset Management zeigen allerdings auch, dass die Berücksichtigung von Strecken-, Netz- oder Knotenbeeinflussungsanlagen im Erhaltungsmanagement deutlichen Einfluss auf die anfallenden Kosten hat. Für Verkehrsbeeinflussungsanlagen erarbeiteten BALMBERGER ET. AL. [68] jüngst mehrere Excel-Tools, die eine Nutzen-Kosten Abschätzung über den gesamten Lebenszyklus ermöglichen. Diese Tools können bei Bedarf als Ergänzung zu den Ergebnissen dieser Arbeit herangezogen werden und den Lebenszykluskosten für Autobahnabschnitte mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen entsprechend angeglichen werden.

3.1.2 BUNDESSTRASSEN

Bundesstraßen bilden zusammen mit den Autobahnen das Fernstraßennetz und dienen in erster Regel dem überregionalen Verkehr. Mit rund 39.604 km [59] (Stand 1. Januar 2013) weisen Bundesstraßen eine über dreimal so hohe Gesamtlänge wie Autobahnen auf und sind dementsprechend ebenfalls ein bedeutender Bestandteil der Verkehrsinfrastruktur.

3.1.2.1 QUERSCHNITT

Bundesstraßen weisen eine verhältnismäßig große Anzahl an verschiedenen Querschnitten auf, die je nach verkehrlicher Situation individuell zum Einsatz kommen. Entsprechend der jeweiligen Entwurfsklasse können ein- oder zweibahnige Querschnitte angeordnet werden, bei nur einer Fahrbahn sind zwei oder drei Fahrstreifen möglich. Um einen geeigneten Querschnitt und im Weiteren ausreichend dick dimensionierten Oberbau festzulegen, wird zunächst die Verkehrssituation auf Bundesstraßen einer näheren Betrachtung unterzogen. Wie auch für die Autobahnen werden an verschiedenen Bundesstraßen durch die BASt Verkehrsdaten (DTV sowie Fahrzeuge des Schwerververkehrs) erhoben. Die hieraus abgeleitete Verteilung des DTV auf Bundesstraßen ist für das Jahr 2013 in Abbildung 3-10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die gemessenen täglichen Verkehrsstärken eine enorme Streuung von < 1.000 Kfz/24h bis > 80.000 Kfz/24h aufweisen. Jedoch liegen rund 93 % der Werte unter 25.000 Kfz/24h, während sehr hohe Verkehrsstärken (> 35.000 Kfz/24h) mit zusammen etwa 3 % absolute Ausnahmen darstellen. Um die großen Schwankungen bei den Verkehrsstärken in gewissem Maße zu relativieren, kann das 75 %-Quantil herangezogen werden, also der Wert, der von 75 % aller gemessenen Werte nicht überschritten wird. Dieser beläuft sich auf 14.400 Kfz/24h.

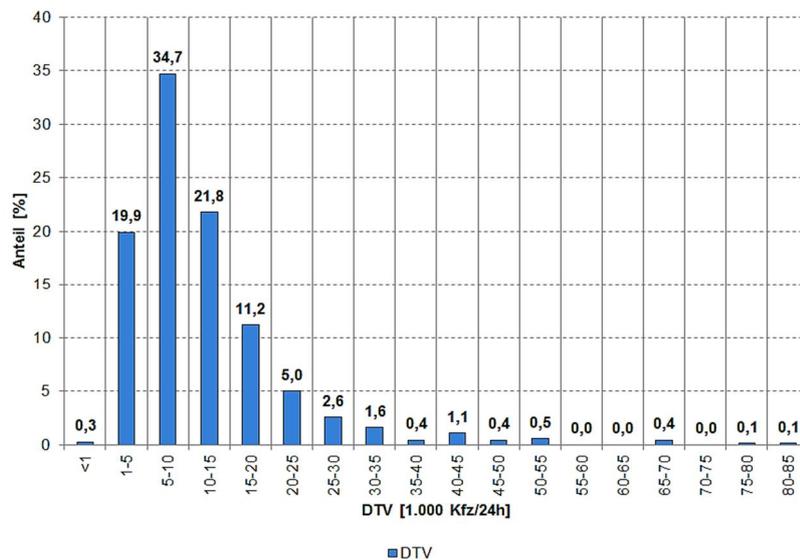


Abbildung 3-10: Verteilung der DTV-Werte für Bundesstraßen im Jahr 2013 (auf Grundlage von Messungen der BASt)

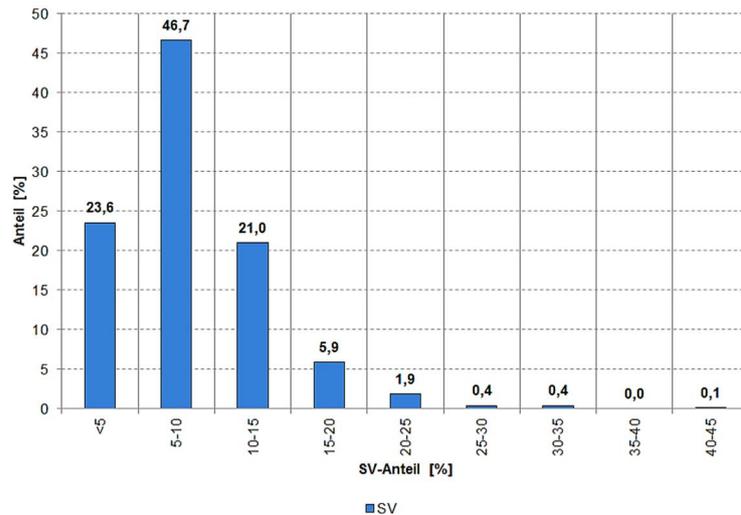


Abbildung 3-11: Verteilung des Schwerverkehrsanteils (SV) für Bundesstraßen im Jahr 2013 (auf Grundlage von Messungen der BAST)

Weiterhin kann aus den Messungen der BAST die Verteilung der Schwerverkehrsanteile auf Bundesstraßen ermittelt werden (Abbildung 3-11). Die Spannweite des gemessenen Schwerverkehrs ist mit Anteilen von < 5 % bis > 40 % ebenfalls sehr groß. Allerdings weisen rund die Hälfte (46,7 %) der Strecken einen Schwerverkehrsanteil zwischen 5 und 10 % auf und nur noch etwa 2,8 % liegen über 20 %. Das 75 %-Quantil aller Werte beträgt 10,7 %.

RICHTER UND ZIERKE [69] analysierten vorhandene Landstraßen anhand eines Landkreises im nördlichen Brandenburg, um den vorhandenen Aufbaustandard zu ermitteln. Dabei wurden die untersuchten Abschnitte anhand ihrer Verbindungsfunktionsstufe und der Verkehrsstärke einer Entwurfsklasse nach den RAL zugeordnet (Abbildung 3-12). Die Entwurfsklasse EKL 3 macht mit rund 195 km Gesamtlänge rund 63 % des untersuchten Straßennetzes aus. Mit 100 km Länge ist die Entwurfsklasse EKL 4 ebenfalls stark vertreten. Die beiden höchsten Entwurfsklassen (EKL 1 und EKL 2) liegen mit insgesamt rund 7 % in nur sehr geringer Länge vor.

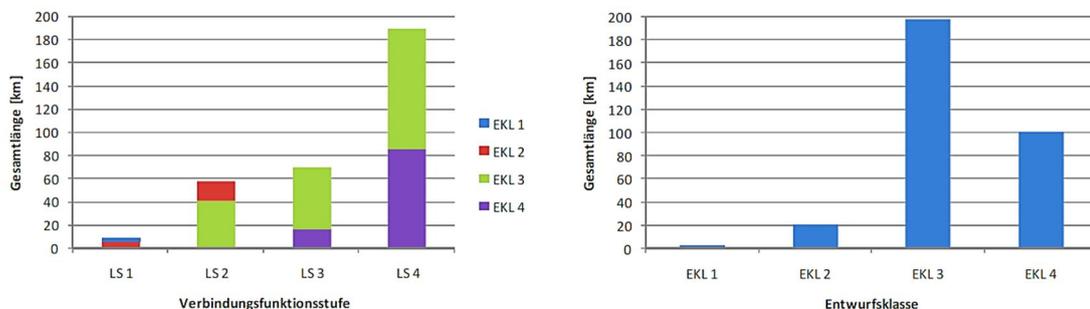


Abbildung 3-12: Länge der Entwurfsklassen nach RAL bezogen auf die Entwurfsklasse [69]

Weiterhin konnte anhand der Abmessungen eine Verteilung der vorhandenen Regelquerschnitte nach den RAS Q vorgenommen werden (Abbildung 3-13, links) und diese mit den aus heutiger Sicht empfohlenen Regelquerschnitten der RAL verglichen werden (Abbildung 3-13, rechts). Die Verteilung der Querschnitte gemäß den RAL zeigt eine relativ homogene Verteilung, über 90 % der Strecken im Untersuchungsgebiet weisen einen einbahnigen Regelquerschnitt auf.

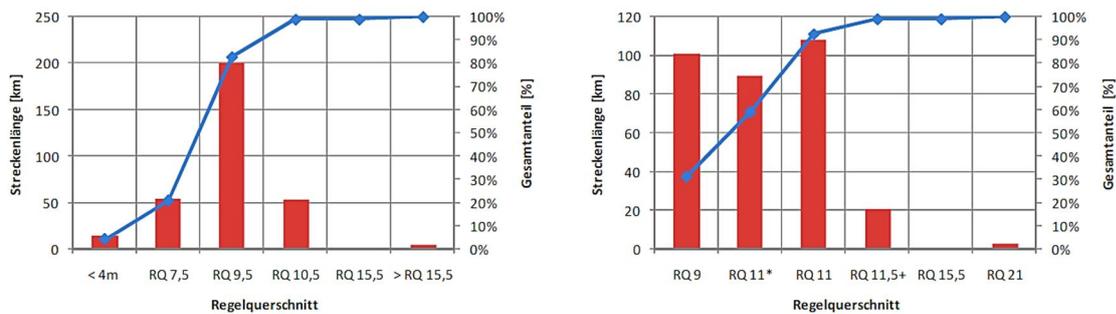


Abbildung 3-13: Streckenlänge und Summenlinie der vorhandenen Querschnitte (links) und der Querschnitte nach den RAL (rechts) [69]

Auf Grundlage der Messungen der BAST sowie der Ergebnisse von RICHTER UND ZIERKE [69] sind demnach der RQ9 und RQ11 nach den RAL typische Querschnitte für Bundesstraßen. Da der 75 %-Quantilwert der täglichen Verkehrsstärken aus den Erhebungen der BAST mit 14.400 Kfz/24h verhältnismäßig hoch liegt, wird als charakteristischer Querschnitt für Bundesstraßen der größere RQ11 festgelegt (entspricht bis auf die breiteren Randstreifen dem RQ10,5 der RAS Q).

Der für Bundesstraßen gewählte Regelquerschnitt mit den Abmessungen der einzelnen Elemente ist in Abbildung 3-14 dargestellt.

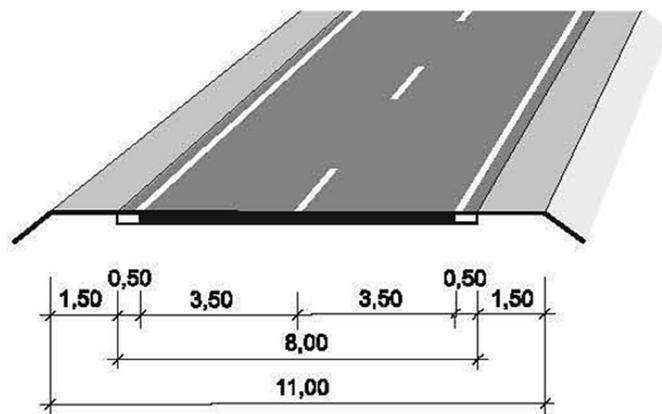


Abbildung 3-14: Gewählter Regelquerschnitt für Bundesstraßen gemäß den RAL

Weiterhin wird angenommen, dass der Streckenabschnitt außerhalb geschlossener Ortschaften liegt. Dies ist eine begründete Annahme, da Bundesstraßen zu rund 81 % außerorts verlaufen (vgl. [59]).

3.1.2.2 OBERBAU

Der gewählte Regelquerschnitt RQ11 ist laut den RAL für eine Durchschnittlichen Täglichen Verkehrsstärke (DTV) von bis zu 15.000 Kfz/24h geeignet. Bei einem zugrunde gelegten Schwerverkehrsanteil von 8-10 % berechnet sich eine B-Zahl, die einen Aufbau entsprechend Bk10 notwendig macht (Abbildung 3-15). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Verkehrsstärken auf Bundesstraßen je nach Streckenabschnitt große Schwankungsbreiten aufweisen. Dementsprechend werden im Netz sowohl dicker als auch dünner dimensionierte Oberbauten anzutreffen sein.

Die für den Oberbau von Bundesstraßen gewählten Asphaltmischgüter nach den ZTV Asphalt sind in Tabelle 3-5 dargestellt. Als Material für die Frostschutzschicht wird wiederum eine FSS 0/45 verwendet, die bei einer frostsicheren Gesamtdicke von 65 cm mit einer Mächtigkeit von 39 cm vorliegt.

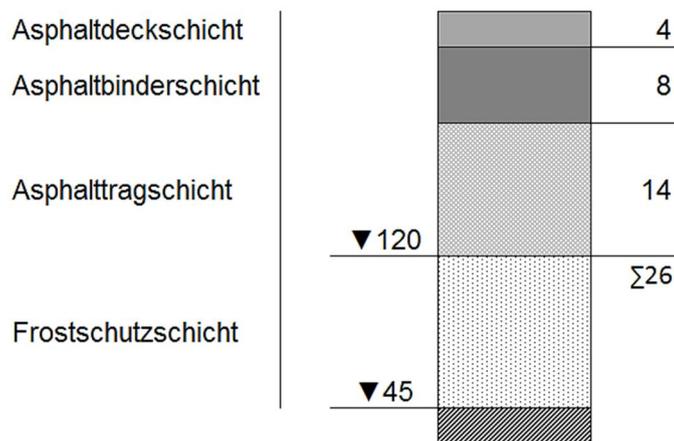


Abbildung 3-15: Oberbau aus Asphalt für die Bk10 gemäß Tafel 1: Zeile 1, Spalte 1 der RStO 12

Tabelle 3-5: Gewählte Asphaltmischgüter für die Schichten des gebundenen Oberbaus von Bundesstraßen

| Schicht | Bundesstraße Bk10 | |
|---------------|----------------------|-------------|
| | Mischgut | Bindemittel |
| Deckschicht | SMA 8 S | 50/70 |
| Binderschicht | AC 22 B S | 30/45 |
| Tragschicht | AC 32 T S | 50/70 |

3.1.2.3 PASSIVE SCHUTZEINRICHTUNGEN UND LEITPFOSTEN

Passive Schutzeinrichtungen an Bundesstraßen erfüllen dieselben Aufgaben wie an Autobahnen. Jedoch sind sie – anders als beispielsweise am Mittelstreifen – nicht durchgängig über die gesamte Streckenlänge angeordnet, sondern nur an Stellen mit erhöhtem Sicherheitsrisiko bzw. -bedürfnis. Auskunft über mittlere Ausstattungsquoten gibt das FE Asset-Management [58].

Die hieraus abgeleitete prozentuale Verteilung der verschiedenen Systeme ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass über die Hälfte (54 %) der Schutzeinrichtungen aus Stahl in Form von Einfachen Schutzplanken (ESP) hergestellt werden. Der Rest unterteilt sich in Einfache Distanzschutzplanken EDSP (20 %) und Doppelte Distanzschutzplanken DDSP (23 %). Doppelte Schutzplanken (DSP) und Super-Rail Systeme weisen mit zusammen 3 % eine vernachlässigbar geringe Ausstattungsquote auf.

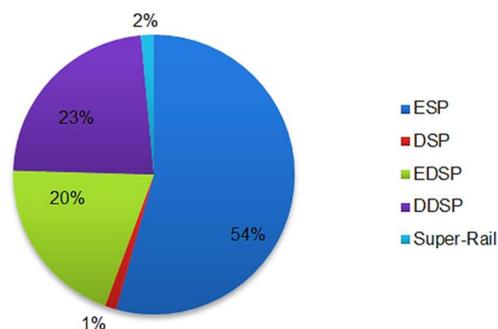


Abbildung 3-16: Prozentuale Verteilung der auf Bundesstraßen verbauten Schutzsysteme aus Stahl

Eine längenbezogene Verteilung der Schutzsysteme auf den charakteristischen Straßenabschnitt anhand der Ausstattungsquoten aus dem FE Asset-Management ist für Bundesstraßen nicht ohne weiteres möglich. So werden Doppelte Distanzschutzplanken (DDSP) in der Regel nur zur Trennung der Fahrbahnen auf zweibahnigen Querschnitten notwendig. Auf den in dieser Arbeit festgelegten einbahnigen RQ11 lassen sich diese Systeme demnach nicht verteilen.

Die eigene Auswertung der Ergebnisse von zwei ZEB-Kampagnen aus dem Jahr 2007 und 2008 [70] ergab, dass bundesweit nur rund 7-10 % der Bundesstraßen zweibahnige Querschnitte aufweisen. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass ESP und EDSP auf Bundesstraßen nur im Randbereich verbaut werden, da ansonsten sehr breite (autobahnähnliche) Mittelstreifen notwendig werden, die aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kaum realisiert werden dürften. Dementsprechend erscheint es zulässig, die DDSP bei den weiteren Betrachtungen zu vernachlässigen und die restlichen Systeme anteilmäßig auf den charakteristischen Streckenabschnitt zu verteilen.

Es lässt sich bezüglich der passiven Schutzeinrichtungen aus Stahl die folgende Verteilung abschätzen:

- EDSP = 135 m pro km Bundesstraße (Gesamtquerschnitt)
- ESP = 365 m pro km Bundesstraße (Gesamtquerschnitt)
- Σ 500 m pro km Gesamtquerschnitt

Auf Grundlage der Ergebnisse des FE Asset-Management lassen sich keine verlässlichen Ausstattungsquoten für Leitpfosten an Bundesstraßen festlegen. Gemäß den Angaben der HAV sind im Idealfall auf gerader Strecke beidseitig alle 50 m Leitpfosten anzuordnen. Auch wenn eine solche Ausstattung im relativ heterogenen Bundesstraßennetz nicht durchgängig gegeben ist, wird dies den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt. Der Erhaltungsaufwand für Leitpfosten wird somit voraussichtlich eher überschätzt.

3.1.2.4 HORIZONTALE UND VERTIKALE VERKEHRSZEICHEN

Straßenmarkierungen (horizontale Verkehrszeichen)

Aus den Ergebnissen des FE Asset-Management lässt sich die in Abbildung 3-17 dargestellte Verteilung der Materialien für Straßenmarkierungen auf Bundesstraßen ableiten. Demzufolge werden rund die Hälfte (51 %) der horizontalen Verkehrszeichen aus Dispersionsfarbe hergestellt, weitere 36 % aus Heiß- oder Kaltplastik. Die verbleibenden 13 % der Straßenmarkierungen sind mit Agglomerat versehen. Teure und für hohe Verkehrsbelastungen ausgelegte Markierungssysteme aus Folie finden gemäß dem FE Asset Management keine Anwendung auf Bundesstraßen.

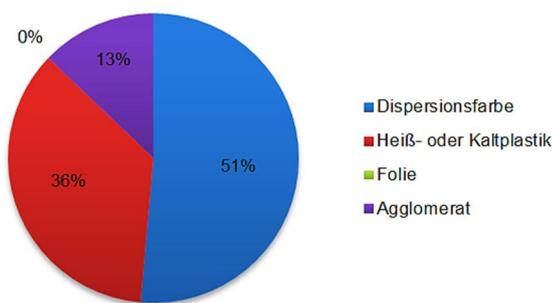


Abbildung 3-17: Prozentuale Verteilung der auf Bundesstraßen aufgebrauchten Materialien für Straßenmarkierungen

In den Erhebungen des FE Asset-Management wurde bezogen auf den Gesamtquerschnitt Ausstattungsquoten von rund 3 km Markierungen (inkl. Breitstrich) pro 1 km Strecke angegeben. Dies ist stimmig, wenn man zugrunde legt, dass über den gesamten Abschnitt durchgängig Markierungen am Fahrbahnrand sowie eine Leitlinie zur Trennung der Fahrstreifen angeordnet sind.

Die Art und Anordnung der Straßenmarkierungen für Straßenquerschnitte mit einer befestigten Breite von 7,5 m bis 9,0 m gemäß den RMS ist in Abbildung 3-18 dargestellt. Die beidseitigen Fahrbahnbegrenzungen werden als durchgängiger Schmalstrich, die Leitlinie als unterbrochener Schmalstrich (1:2) ausgeführt.

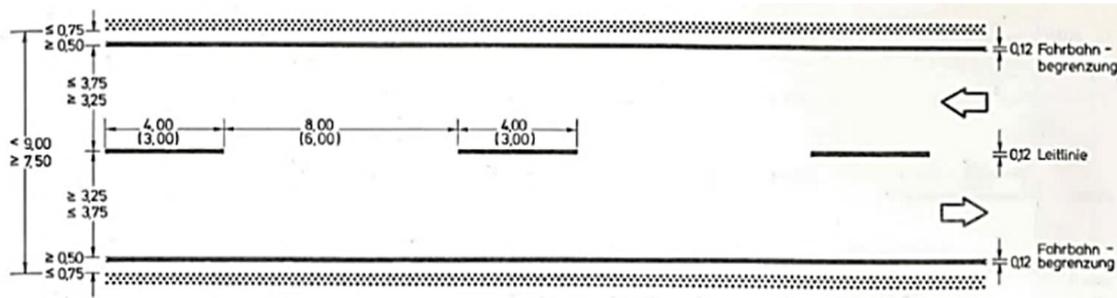


Abbildung 3-18: Markierung einer Bundesstraße mit einer bebauten Breite von 7,5 m bis 9,0 m [67]

Die in Abbildung 3-18 dargestellte Markierung mit Schmalstrichen deckt sich nicht gänzlich mit den ermittelten Ausstattungsquoten des FE Asset-Management. Hieraus ist zu entnehmen, dass auf Bundesstraßen im Mittel ebenfalls rund 500 m Breitstrich pro Kilometer Strecke aufgebracht sind. Betrachtet man einen längeren Netzabschnitt, ist dies durchaus nachvollziehbar, werden doch bei besonderen Verkehrsführungen oder Kreuzungsbereichen auch Breitstrichmarkierungen angeordnet. Da in der vorliegenden Arbeit jedoch freie Strecken untersucht werden sollen, werden die Straßenmarkierungen auf Bundesstraßen gemäß den Vorgaben der RMS angeordnet (Abbildung 3-18).

Um eine längenbezogene Aufteilung der Markierungssysteme zu ermöglichen, müssen demzufolge gewisse Annahmen getroffen werden. Um alle verwendeten Materialien angemessen zu berücksichtigen, wird festgelegt, dass die Fahrbahnbegrenzungen auf $\frac{3}{4}$ der Streckenlänge aus Dispersionsfarbe hergestellt werden. Dies entspricht bei einer Abschnittslänge von 1.000 m bezogen auf den Gesamtquerschnitt 1.600 m Markierungen. Die verbleibenden 400 m der Fahrbahnbegrenzung werden mit Agglomeratmarkierungen versehen. Die Leitlinie wird auf voller Länge aus Heiß- oder Kaltplastik hergestellt, was einer Gesamtlänge von 1.000 m entspricht.

vertikale Verkehrszeichen

Eine charakteristische Ausstattung von vertikalen Verkehrszeichen auf Bundesstraßen lässt sich nur schwer bestimmen, wird diese doch maßgeblich durch die vorherrschenden und sehr individuellen Randbedingungen – bspw. Geschwindigkeitsbeschränkungen, starke Steigungen/Gefälle, Wildwechsel, usw. – des jeweiligen Streckenabschnitts bestimmt. Die Ausstattungsquote von Verkehrsschildern aus dem FE Asset-Management wird mit rund 30 Stk. pro Kilometer Gesamtquerschnitt angegeben. Eine höhere Ausstattung als auf Bundesautobahnen ist nachvollziehbar, gelten auf Bundesstraßen doch oftmals Geschwindigkeitsbeschränkungen, die in regelmäßigen Abständen durch Beschilderung kenntlich gemacht werden müssen. Plangleiche Knotenpunkte

machen zusätzliche Verkehrszeichen (bspw. Zeichen 306 Vorfahrtsstraße) notwendig, sodass für die weiteren Berechnungen eine Ausstattungsquote von 30 Stk. vertikale Verkehrszeichen pro Kilometer Gesamtquerschnitt angesetzt wird.

3.1.3 LANDESTRASSEN

Landesstraßen haben eine niedrigere Verkehrsbedeutung als Autobahnen oder Bundesstraßen, weisen mit einer Gesamtlänge von rund 86.224 km [59] (Stand 1. Januar 2013) jedoch einen wesentlich höheren Anteil am Straßennetz auf, als die ersten beiden Kategorien.

3.1.3.1 QUERSCHNITT

Die Anforderungen an den Querschnitt werden auch bei Landesstraßen maßgeblich durch die jeweilige Verkehrssituation bestimmt. Allerdings werden die täglichen Verkehrsstärken sowie der Schwerverkehr nicht einheitlich erfasst und dokumentiert. Deshalb muss die Auswahl eines geeigneten Querschnitts (und im Folgenden eines ausreichend dick dimensionierten Oberbaus) anhand anderer Kriterien erfolgen.

In Kapitel 3.1.2.1 wurde die Verkehrssituation auf Landstraßen bereits näher beleuchtet. Anhand dieser Ergebnisse wird für Landesstraßen nochmals ein schmalerer Querschnitt als für Bundesstraßen gewählt, nämlich ein RQ9 (Abbildung 3-19). Dies ist eine durchaus folgerichtige Annahme, wenn man berücksichtigt, dass die Soll-Querschnitte nach den RAL (Abbildung 3-13) theoretischer Natur sind und nicht exakt den tatsächlichen Bestand widerspiegeln. Der Vergleich der vorhandenen Querschnitte mit denen nach den RAL zeigt, dass der vorhandene Ausbaustandard die Netzfunktion der Straße eher selten darstellt, die Straßen also tendenziell eher geringere Breiten aufweisen.

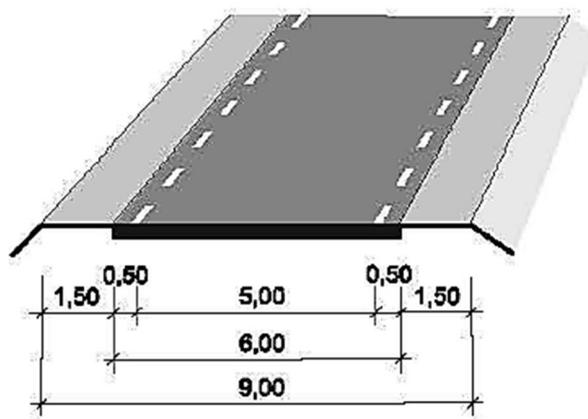


Abbildung 3-19: Gewählter Querschnitt für Landesstraßen nach den RAL

3.1.3.2 OBERBAU

Ein RQ9 ist laut den RAL für eine maximale DTV von 3.000 Kfz/24h und eine Schwerverkehrsstärke von 150 Fz/24h geeignet. Aus der mit diesen Werten berechneten B-Zahl resultiert für eine vorgesehene Nutzungsdauer von 30 Jahren die Belastungsklasse Bk1,8. Ein für diese Belastungsklasse ausreichend dick dimensionierter Oberbau in Asphaltbauweise gemäß den RStO 12 ist in Abbildung 3-20 dargestellt. Aufgrund der geringen Verkehrsbelastung wird bei dieser Belastungsklasse auf eine Binderschicht verzichtet.

Die Frostschuttschicht wird als FSS 0/45 mit einer Dicke von 45 cm festgelegt.

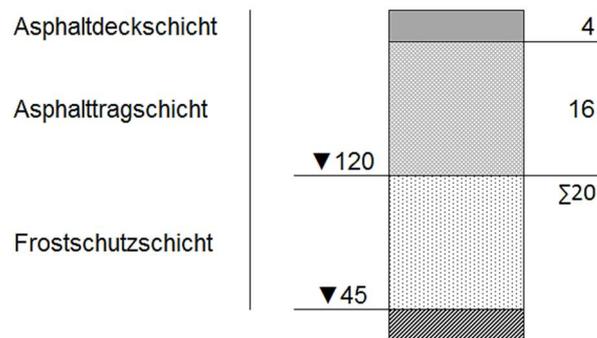


Abbildung 3-20: Oberbau aus Asphalt für die Bk1,8 gemäß Tafel 1: Zeile 1, Spalte 1 der RStO 12

Für die gewählte Belastungsklasse geeignete Asphaltmischgüter können den ZTV Asphalt entnommen werden (Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Gewählte Asphaltmischgüter für die Schichten des gebundenen Oberbaus von Landesstraßen

| Schicht | Landesstraße Bk1,8 | |
|---------------|-----------------------|-------------|
| | Mischgut | Bindemittel |
| Deckschicht | AC 11 D N | 50/70 |
| Binderschicht | - | - |
| Tragschicht | AC 32 T N | 50/70 |

3.1.3.3 PASSIVE SCHUTZEINRICHTUNGEN UND LEITPFOSTEN

Landesstraßen sind wie auch Bundesstraßen nicht durchgängig mit passiven Schutzeinrichtungen versehen. Aufgrund der geringeren Verkehrsbedeutung und des Verkehrsaufkommens kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Ausstattungsquote auf Landesstraßen noch einmal deutlich niedriger ist, als auf Bundesstraßen.

Gemäß RPS werden bei einem DTV von < 3.000 Kfz/24h keine Schutzseinrichtungen notwendig. Zwar wurden in den vergangenen Jahren verstärkt Anstrengungen unternommen, besonders gefahrenträchtige Bereiche (z.B. Alleen) abzusichern. Dies betrifft jedoch auch weiterhin nur einzelne Punkte des Netzes. Vor diesem Hintergrund erscheinen die während des Lebenszyklus anfallenden Kosten für die Erhaltung der Schutzseinrichtungen an Landesstraßen vernachlässigbar gering, so dass diese nicht weiter berücksichtigt werden.

Leitpfosten hingegen werden durchaus auch an Landesstraßen angeordnet. In Ermangelung weiterer Erkenntnisse wird angenommen, dass alle 50 m beidseitig entsprechende Anlagenteile vorhanden sind.

3.1.3.4 HORIZONTALLE UND VERTIKALE VERKEHRSZEICHEN

Bezüglich der aufzubringenden Straßenmarkierungen eines RQ9 machen die RAL konkrete Vorgaben. Gemäß den RAL werden auf beiden Seiten im Abstand von 0,50 m vom Rand der befestigten Fläche Leitlinien markiert (siehe Abbildung 3-19). Das Strich-Lücke-Verhältnis beträgt 1:1 (1 m Strich/1 m Lücke). Der charakteristische Streckenabschnitt für Landesstraßen wird gemäß dieser Vorgabe markiert. Es wird festgelegt, dass als Markierungsmaterial Dispersionsfarbe verwendet wird, die über die gesamte Streckenlänge (1.000 m) aufgebracht wird. Bezogen auf den Gesamtquerschnitt macht dies demnach 2.000 m Schmalstrichmarkierungen aus.

Bezüglich der Ausstattungsquote von vertikalen Verkehrszeichen liegen keine Informationen vor. Legt man eine generelle Beschränkung der Geschwindigkeit zugrunde und berücksichtigt die Beschilderung der plangleichen Knotenpunkte, kann in erster Näherung von einer Ausstattungsquote ausgegangen werden, die identisch mit der von Bundesstraßen ist. Es wird demnach festgelegt, dass auch an Landesstraßen pro Kilometer Gesamtquerschnitt 30 Stk. vertikale Verkehrszeichen angeordnet sind.

3.2 VERKEHR

Die Festlegung einer Verkehrsbelastung während des betrachteten Lebenszyklus ist notwendiger Bestandteil, um den Wertverlust der Straßenbefestigung durch die verkehrliche Nutzung bestimmen zu können. Es müssen Festlegungen zur Verkehrsbelastung getroffen werden, die einerseits allgemein genug sind, um sie einer gewissen Straßenkategorie zuzuordnen, andererseits aber die Charakteristika der jeweiligen Verkehrszusammensetzung – beispielsweise den Schwerverkehrsanteil – berücksichtigen.

Als geeignete Größe zur Beschreibung des Verkehrsaufkommens wird die dimensionierungsrelevante Belastung gemäß den RStO – kurz B-Zahl – gewählt. Die Eingangsparemeter – im besonderen Maße der $DTV_{(SV)}$ – wurden dabei so gewählt, dass sich nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren B-Zahlen ergeben, die der Obergrenze der gewählten Belastungsklassen für die jeweiligen Straßenkategorien entsprechen. Die hierfür angesetzten Parameter sind in Tabelle 3-7 dargestellt. Die resultierenden B-Zahlen pro Jahr können Anhang II entnommen werden.

Tabelle 3-7: Gewählte Eingangsparameter zur Berechnung der B-Zahl in Abhängigkeit von der Straßenkategorie

| Parameter | Einheit | Straßenkategorie | | |
|--------------|-----------------|------------------|--------------|--------------|
| | | Autobahn | Bundesstraße | Landesstraße |
| $DTV_{(SV)}$ | Kfz/24 h | 4.300 | 1.200 | 270 |
| f_A | - | 4,50 | 4,00 | 3,30 |
| q_{BM} | - | 0,33 | 0,25 | 0,23 |
| f_1 | - | 0,90 | 0,50 | 0,50 |
| f_2 | - | 1,00 | 1,10 | 1,40 |
| f_3 | - | 1,00 | 1,02 | 1,02 |
| p | - | 0,03 | 0,02 | 0,01 |
| B-Zahl | äquiv. 10-t Äü. | ≈ 99,8 Mio. | ≈ 10,0 Mio. | ≈ 1,8 Mio. |

3.3 KOSTEN

Es wird davon ausgegangen, dass der Lebenszyklus einer Straßenbefestigung mit dem Neubau bzw. einer grundhaften Erneuerung beginnt. Erreicht eine Schicht im Weiteren ihre maximal realisierbare Nutzungsdauer, muss diese in der Regel im Zuge der folgenden Erhaltungsmaßnahme ausgebaut werden. Die Kosten für eine Neubau- bzw. Erhaltungsmaßnahme setzen sich für jede Schicht aus verschiedenen Komponenten zusammen (Abbildung 3-21).

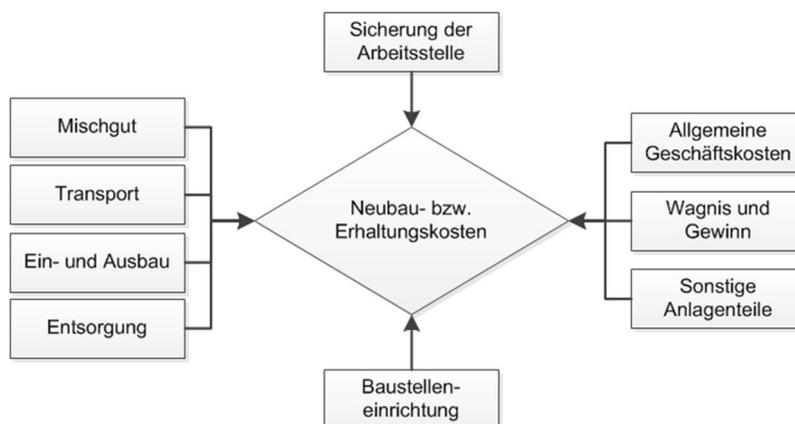


Abbildung 3-21: Kostenbestandteile für den Neubau und die Erhaltung von Schichten des Straßenoberbaus

Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass die Kosten hinreichend genau durch das Abschätzen der Anteile für den Ein- und Ausbau, den Transport, die Entsorgung sowie für das Mischgut beschrieben werden können. Zusätzlich müssen für jede Maßnahme die Aufwendungen für das Einrichten und Vorhalten der Baustelleneinrichtung sowie die Sicherung der Arbeitsstelle ermittelt werden. Weitere Kostenfaktoren – beispielsweise im Zuge der Maßnahme anfallende Arbeiten an den sonstigen Anlagenteilen (bspw. Leit- oder Schutzeinrichtungen) – werden ebenfalls angemess-

sen berücksichtigt. Die Kosten werden weiterhin mit einem pauschalen Aufschlag für das Wagnis und den Gewinn (WuG) sowie die allgemeinen Geschäftskosten (AGK) versehen.

Es wird für alle weiteren Berechnungen angenommen, dass keine Entsorgungskosten anfallen. Entsprechende Aufwendungen würden die Kosten für eine Maßnahme ebenso wie die Lebenszykluskosten im hohen Maße beeinflussen (beispielsweise bei Vorhandensein von Teer/Pech), lassen sich jedoch nur schwer pauschalisieren und stellen nicht den Regelfall dar.

Die angegebenen Kosten beinhalten keine Mehrwertsteuer!

3.3.1 MISCHGUT

Die Ermittlung von üblichen Marktpreisen für Asphaltmischgüter gestaltet sich schwierig. Diese schwanken je nach Art und Ausstattung des Mischwerks, Abnahmemenge, Baufirma, Region oder Materialverfügbarkeit teilweise signifikant. Dies zeigten auch schon die Erhebungen im Rahmen des Forschungsprojekts „AKTUALISIERUNG DER KOSTENDATEN“ [40]. Es konnte auf Grundlage einer bundesweiten Umfrage bei verschiedenen Asphaltmischwerken zwar eine Abhängigkeit zwischen dem Mischgutpreis und der Abnahmemenge festgestellt werden, diese lässt sich allerdings nur unzureichend beschreiben. Es ist tendenziell zu erkennen, dass der Mischgutpreis pro Tonne mit steigender Abnahmemenge sinkt. In welchem Maße sich dies ausprägt, wird jedoch maßgeblich von den abgeschlossenen Verträgen und den darin vereinbarten jährlichen Abnahmemengen bzw. der grundlegenden Geschäftsbeziehung zwischen Baufirma und Mischwerk bestimmt.

Tabelle 3-8: Asphaltmischgutpreise im Bundesland Nordrhein-Westfalen

| Mischgut | Abnahmemenge [t] | Bitumensorte | Mischgutkosten [€/t] ^{*)} ^{**)} |
|-----------|------------------|--------------|---|
| AC 32 T N | 4.000 | 50/70 | 38,00 |
| AC 22 T S | | 50/70 | 39,00 |
| AC 32 T S | | 50/70 | 38,00 |
| AC 16 B N | 1.500 | 50/70 | 44,00 |
| AC 22 B S | | 25/55-55 | 49,00 |
| AC 22 B S | | 30/45 | 45,00 |
| AC 11 D N | 750 | 70/100 | 62,00 |
| AC 11 D S | | 50/70 | 62,00 |
| SMA 8 S | | 50/70 | 65,00 |
| SMA 8 S | | 25/55-55 | 69,00 |
| SMA 5 S | | 45/80-50 | 71,00 |

*) ab Werk

**) bei einer Einbaumenge von < 500 t bei der Deckschicht und 1.500 t bei der Binder- und Tragschicht sind die Mischgutpreise pauschal um 10 % zu erhöhen

Tabelle 3-9: Preise für die Gesteinskornmische der ungebundenen Schichten im Bundesland Nordrhein-Westfalen

| Schicht | Abnahmemenge [t] | Körnung | Kosten [€/t] ^{*)} |
|--------------|------------------|---------|----------------------------|
| FSS oder SoB | 1.500 | 0/32 | 6,00 |
| | | 0/45 | 6,00 |

*) ab Werk

Bei der obigen Befragung gaben Mischguthersteller einen maximalen Rabatt von ca. 5-10 % an. Dieser wird ab einer gewissen Abnahmemenge gewährt, die sich jedoch regional und von Werk zu Werk stark unterscheidet und deshalb kaum pauschalisiert werden kann. Bei sehr geringen Abnahmemengen (<100 t) fällt hingegen im Regelfall ein Mindermengenzuschlag an, der sich durchaus auf 30-40 % belaufen kann. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass in den weiteren Berechnungen entsprechend geringe Mischgutmengen nicht relevant werden. Die in Tabelle 3-8 aufgeführten Mischgutpreise für das Bundesland Nordrhein-Westfalen stellen Werte dar, die nach Absprache mit Herstellern als durchaus realistisch angesehen werden können. Es sei jedoch noch einmal darauf hingewiesen, dass auch die Preise innerhalb von NRW große Schwankungsbreiten je nach Mischwerk, Abnehmer, usw. aufweisen.

Zusätzlich ist bei den Mischgutpreisen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Region in Deutschland feststellbar. Abgeleitet aus den Ergebnissen des Forschungsprojekts „AKTUALISIERUNG DER KOSTENDATEN“ [40] sind in Tabelle 3-10 und Tabelle 3-11 die Zusammenhänge zwischen den Preisen für verschiedene Asphaltgemische sowie den ungebundenen Schichten und dem jeweiligen Bundesland bezogen auf Nordrhein-Westfalen dargestellt. Die Wahl von NRW als Bezug ist Folge der erhobenen Mischgutpreise, die für eben dieses Bundesland im Jahr 2010 ortsnah und vergleichsweise umfassend ermittelt wurden (Tabelle 3-8 und Tabelle 3-9).

Die in den folgenden Tabellen dargestellten Zusammenhänge müssen jedoch kritisch gewertet werden und stellen ohne weitere Validierung bestenfalls grobe Richtwerte dar. Ursächlich ist die in [40] teilweise nur unzureichende Anzahl an verfügbaren Daten, so dass oftmals keine statistisch gesicherten Aussagen getroffen werden konnten. Weiterhin beeinflussen weitere unbekanntere Einflussgrößen die aufgeführten Ergebnisse, wie die im Rahmen der Befragung nicht erhobene technische Ausstattung der im jeweiligen Bundesland befragten Mischwerke. Ein eindeutiger Nord-Süd bzw. Ost-West Trend lässt sich nicht erkennen.

In den norddeutschen Bundesländern Niedersachsen (Nord), Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein/Bremen scheinen die Preise für Asphaltmischgüter jedoch tendenziell am höchsten zu sein. Die in Tabelle 3-10 und Tabelle 3-11 angegebenen Verteilungen innerhalb des Bundesgebiets können eine Hilfestellung sein, um bei ansonsten unveränderten Eingangsparametern eine erste grobe Abschätzung und ggf. Anpassung der anfallenden Lebenszykluskosten auch für andere Bundesländer vorzunehmen.

Tabelle 3-10: Zusammenhang zwischen Asphaltmischgutpreisen und dem jeweiligen Bundesland (bezogen auf Nordrhein-Westfalen)

| Bundesland | relative Preise bezogen auf Nordrhein-Westfalen | | | |
|----------------------------|---|------------|------------|------------|
| | [%] | | | |
| | SMA 8 S | AC 22 B S | | AC 32 T S |
| | 25/55-55 | 25/55-55 | 30/45 | 50/70 |
| Baden-Württemberg (Nord) | 110 | 106 | 107 | 106 |
| Baden-Württemberg (Süd) | 109 | 91 | 112 | 106 |
| Bayern (Nord) | 91 | 96 | 85 | 102 |
| Bayern (Süd) | 81 | 84 | 71 | 97 |
| Brandenburg/Berlin | 95 | 91 | 102 | 108 |
| Hessen | 102 | 79 | 97 | 99 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 111 | 104 | 110 | 125 |
| Niedersachsen (Nord) | 117 | 113 | 124 | 142 |
| Niedersachsen (Süd) | 115 | 111 | 121 | 136 |
| Nordrhein-Westfalen | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Rheinland-Pfalz/Saarland | 97 | 74 | 97 | 95 |
| Sachsen | 83 | 89 | 73 | 97 |
| Sachsen Anhalt | 118 | 94 | 96 | 104 |
| Schleswig-Holstein/Hamburg | 120 | 106 | 117 | 140 |
| Thüringen | 106 | 91 | 94 | 102 |

Tabelle 3-11: Zusammenhang zwischen den Preisen der Gesteinskorngemische und dem jeweiligen Bundesland (bezogen auf Nordrhein-Westfalen)

| Bundesland | relative Preise bezogen auf Nordrhein-Westfalen |
|----------------------------|---|
| | [%] |
| | FSS |
| | 0/32 - 0/45 |
| Baden-Württemberg (Nord) | 113 |
| Baden-Württemberg (Süd) | 105 |
| Bayern (Nord) | 109 |
| Bayern (Süd) | 110 |
| Brandenburg/Berlin | 98 |
| Hessen | 91 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 74 |
| Niedersachsen (Nord) | 81 |
| Niedersachsen (Süd) | 72 |
| Nordrhein-Westfalen | 100 |
| Rheinland-Pfalz/Saarland | 69 |
| Sachsen | 44 |
| Sachsen Anhalt | 88 |
| Schleswig-Holstein/Hamburg | 91 |
| Thüringen | 88 |

3.3.2 HERSTELLKOSTEN UND AUSBAUKOSTEN DER SCHICHTEN DES OBERBAUS

Um die Herstellkosten für die Schichten des Oberbaus zu kalkulieren, wurde die Ausschreibungssoftware RIB iTWO (ARRIBA) verwendet. Die dort hinterlegten Ansätze erlauben es, über die Mischgutkosten hinaus auch die Kostenanteile für das benötigte Personal, die Maschinen und den Transport der Baustoffe zur Baustelle – also die Einbaukosten – abzuschätzen. Die verwendeten Einzelkosten sind Kalkulationen aus dem Jahr 2015 entnommen und demnach aktuell. Obwohl auch die Einbaukosten von den individuellen Gegebenheiten der jeweiligen Maßnahme beeinflusst werden, können die in Tabelle 3-12 und Tabelle 3-13 angegebenen Herstellkosten für die Asphalt-schichten sowie die Schichten ohne Bindemittel nach Rücksprache mit Verantwortlichen aus der Wirtschaft als hinreichend genau angesehen werden.

Die der Kostenschätzung zugrunde gelegten Annahmen und Festlegungen können Anhang I entnommen werden. Die Unterschiede bezüglich der Herstellkosten auf Bundesautobahnen und Bundes- bzw. Landesstraßen resultieren vordringlich aus der realisierbaren Einbauleistung. Diese wird bei Autobahnen im Regelfall deutlich höher angesetzt, was zu niedrigeren Kosten führt. Die Kosten für Dünne Deckschichten in Heißbauweise (DSH) wurden anhand der Einbaukosten des SMA 8 S abgeschätzt. Zusätzlich mit eingerechnet werden dabei die Anteile für das Anfräsen der Deckschicht (2 cm). Zusammen mit den etwas höheren Mischgutkosten ergeben sich für den Einbau einer DSH pro Tonne tendenziell höhere Einbaukosten als bei einer „konventionellen“ Deckschicht. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass bei den Herstellkosten der anderen Schichten die Aufwendungen für den Ausbau noch nicht mit eingerechnet sind.

Für das Kehren und Anspritzen mit polymermodifizierter Bitumenemulsion (C60BP1-S) zur Herstellung des Schichtenverbunds zwischen den Lagen der Asphalttragschicht bzw. der Trag- und Binderschicht werden Kosten von 0,50 €/m² angesetzt. Der Kalkulation liegt dabei eine Dosierung von rund 350 g/m² zugrunde (vgl. Tabelle 7 der ZTV Asphalt-StB [57]). Für die Versiegelung beim Aufbringen von Dünnen Deckschichten in Heißbauweise (DSH-V) wird ebenfalls eine entsprechende polymermodifizierte Bitumenemulsion eingesetzt. Allerdings liegt die Dosierung mit 700 bis 900 g/m² (offene Unterlage) [29] deutlich höher, so dass für die Versiegelung Kosten von 1,20 €/m² angesetzt werden.

Tabelle 3-12: Herstellkosten der ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus in [€/m³]

| Mischgut | Körnung | Herstellkosten [€/m ³] | |
|----------|---------|---------------------------------------|---------------------------|
| | | Autobahnen | Bundes- und Landesstraßen |
| FSS | 0/45 | 22,60 | 27,50 |
| SoB | | 22,60 | 27,50 |

Tabelle 3-13: Herstellkosten der Asphaltsschichten des Straßenoberbaus in [€/t]

| Mischgut | Bitumensorte | Herstellkosten ^{*)} [€/t] | |
|----------------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | | Autobahnen | Bundes- und Landesstraßen |
| AC 32 T N | 50/70 | 49,60 | 56,30 |
| AC 22 T S | 50/70 | 50,80 | 57,40 |
| AC 32 T S | 50/70 | 49,60 | 56,30 |
| AC 16 B N | 50/70 | 61,40 | 68,40 |
| AC 22 B S | 25/55-55 | 67,30 | 75,10 |
| AC 22 B S | 30/45 | 62,60 | 69,60 |
| AC 11 D N | 50/70 | 82,70 | 89,60 |
| AC 11 D S | 50/70 | 82,70 | 89,60 |
| SMA 8 S | 50/70 | 86,20 | 93,20 |
| SMA 8 S | 25/55-55 | 90,90 | 97,90 |
| DSH-V 5 (SMA 5 S) | 45/80-50 | 99,10 ^{**)} | 106,10 ^{**)} |

^{*)} ohne Anspritzen oder Versiegelung

^{**)} inklusive Anfräsen der vorhandenen Schicht

Im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen wird es im Regelfall notwendig, bestehende Schichten des Oberbaus auszubauen. Entsprechende Kosten müssen ebenfalls rechnerisch in Ansatz gebracht werden. Nach Rücksprache mit Verantwortlichen aus dem Baugewerbe setzen sich die Kosten für das Fräsen von Asphaltsschichten aus

- den Kosten für das Fräsen und Laden,
- den Kosten für den Transport zur Baustelle (angenommene Entfernung bis ca. 40 km) und
- der Gutschrift für das Fräsgut

zusammen.

Für Deck- und Binderschichten fallen für das Fräsen und Laden (bis 8 cm Tiefe) 5,21 €/t zuzüglich 5,00 €/t für den Abtransport an. Die Höhe der Gutschrift für das Fräsgut lässt sich schwer festlegen, da der erzielbare Preis großen Schwankungen unterliegt. Angaben aus der Wirtschaft zufolge können Verkaufserlöse von durchaus 5,00 bis 8,00 €/t erreicht werden, was aber sehr hoch angesetzt sein dürfte. Für Deck- und Binderschichten wird deshalb eine Gutschrift von pauschal 5 €/t angenommen. Bei der Tragschicht variieren die Ausbaurkosten in Abhängigkeit von der Frästiefe. Bei einer Frästiefe von 14 cm fallen Kosten von 3,79 €/t für das Fräsen und Laden an, bei 22 cm rund 4,46 €/t. Der Abtransport wird wie bei der Deck- und Binderschicht mit 5 €/t in Ansatz gebracht, lediglich der Verkaufswert für das Granulat wird mit 3,00 €/t niedriger gewählt.

Um die benötigte Zeit für den Ausbau der gebundenen Schichten ermitteln zu können, wurden für die Straßenfräse Leistungskennwerte in Anlehnung an üblichen Zahlentafeln des Baubetriebs [71] angesetzt.

Für die Asphaltsschichten resultieren hieraus die in Tabelle 3-14 dargestellten Ausbauskosten (gerundet). Für die ungebundenen Schichten wurden Ausbauskosten von 11,21 €/m³ berechnet. Die Kalkulation der Ausbauskosten kann Anhang I entnommen werden. Alle Werte enthalten einen Aufschlag von 18 % für die Allgemeinen Geschäftskosten sowie Wagnis und Gewinn.

Tabelle 3-14: Ausbauskosten der Asphaltsschichten des Straßenoberbaus

| Schicht | Frästiefe [cm] | Ausbauskosten [€/t] |
|----------------------|----------------|---------------------|
| DSH-V | 2 | 6,20 |
| Asphaltdeckschicht | 4 | |
| Asphaltbinderschicht | 8 | |
| Asphalttragschicht | 14 | 6,80 |
| | 22 | 7,60 |

Tabelle 3-15: Ausbauskosten der Schichten ohne Bindemittel

| Schicht | Ausbauskosten [€/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Schicht ohne Bindemittel | 11,21 |

3.3.3 HERSTELLKOSTEN FÜR PASSIVE SCHUTZEINRICHTUNGEN

Aus dem FE Asset-Management können getrennt nach Systemen Kosten für die Herstellung bzw. Erneuerung von Schutzeinrichtungen aus Stahl sowie Betonschutzwände gewonnen werden. Erwartungskonform sind die Kosten für Einfache Schutzplanken am geringsten, während Super-Rail Systeme aufgrund der komplexeren Bauart mit Abstand am teuersten sind. Generell steigen die Kosten mit steigender Aufhaltestufe.

In dem FE Asset-Management wird die Nutzungsdauer von Stahlschutzplanken weitestgehend systemunabhängig mit 25-40 Jahren angegeben. Dies setzt voraus, dass kein vorzeitiger Ersatz beispielsweise durch den Einschlag eines Fahrzeugs notwendig wird. Da in diesem Fall die Versicherung des Unfallverursachers und nicht der Baulastträger die Kosten für die Erneuerung der Schutzeinrichtung übernehmen muss und sich ein solch zufälliges Ereignis kaum verallgemeinern lässt, wird dieses Szenario im Weiteren vernachlässigt. Für die weiteren Berechnungen wird eine mittlere Nutzungsdauer von 30 Jahren angesetzt, sodass die Schutzeinrichtungen theoretisch am Ende der üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht ausgetauscht würden.

Die maximalen Nutzungsdauern sowie die Herstell- bzw. Erneuerungskosten von passiven Schutzeinrichtungen sind in Tabelle 3-16 dargestellt. Die Werte enthalten Anteile für den Ausbau der vorhandenen Schutzeinrichtungen und werden zudem mit einem Aufschlag von 18 % für WuG und AGK versehen.

Tabelle 3-16: Kosten und Nutzungsdauern für die Erneuerung von passiven Schutzeinrichtungen

| System | ND [a] | Kosten [€/m] | | | jährliche Kosten (mittel) [€/m*a] |
|------------|--------|--------------|--------|--------|-----------------------------------|
| | | min. | max. | mittel | |
| ESP | 30 | - | - | 26,50 | 0,90 |
| EDSP | 30 | 49,00 | 54,00 | 52,00 | 1,70 |
| DDSP | 30 | 61,00 | 80,00 | 71,00 | 2,40 |
| Super-Rail | 30 | 116,00 | 151,00 | 134,00 | 4,50 |
| Beton | 30 | - | - | 135,00 | 4,30 |

Tabelle 3-17: Kosten für das Abbauen, Lagern und Wiedereinbauen der Schutzeinrichtungen

| System | Kosten [€/m] |
|------------------|--------------|
| ESP | 8,00 |
| EDSP | 11,00 |
| DDSP (einseitig) | 11,00 |
| Super-Rail | - |

Die Gesamtkosten für die Herstellung/Erhaltung der passiven Schutzeinrichtungen errechnen sich demzufolge durch die Multiplikation der jährlichen Kosten mit der zugehörigen Länge des jeweiligen Plankensystems und der Dauer des betrachteten Lebenszyklus in Jahren. Ein entsprechender Ansatz von mittleren jährlichen Erhaltungskosten ist zulässig, wenn man davon ausgeht, dass Maßnahmen an den Schutzeinrichtungen weitestgehend unabhängig von denen an der Fahrbahn oder den restlichen sonstigen Anlagenteilen sind. Es muss beachtet werden, dass für die weiteren Berechnungen festgelegt wird, dass bei jeder E2-Erhaltungsmaßnahme (also bei der grundhaften Erneuerung des Oberbaus oder der Erneuerung des gebundenen Oberbaus) die Schutzplanken abgebaut, seitlich gelagert und anschließend wieder eingebaut werden müssen. Die hierfür anfallenden Kosten wurden auf Grundlage von [40] abgeschätzt (Tabelle 3-17) und den Kosten der entsprechenden Erhaltungsmaßnahmen zugerechnet.

3.3.4 HERSTELLKOSTEN FÜR LEITPFOSTEN

Leitpfosten weisen unabhängig von der Straßenkategorie eine hohe Ausstattungsquote auf und verursachen für die Baulasträger jährliche Kosten in Millionenhöhe. Nach Angaben des Landesbetriebs Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein [72] fallen dort zur Unterhaltung und Erhaltung der etwa 320.000 Leitpfosten jährliche Gesamtkosten von 1,5 Mio. € an, davon 770.000 € allein auf Landstraßen (Stand 2011). In erster Näherung wären damit jährlich rund 4,70 € pro Leitpfosten aufzuwenden.

Diese Größenordnung scheint durchaus plausibel zu sein. Laut Angaben aus der Bauwirtschaft kostet die Herstellung eines Leitpfostens inklusive Lieferung und Montage rund 50,00 €/Stk. Bei

einer mittleren Nutzungsdauer von 8 bis 10 Jahren (vgl. [58]) ergeben sich jährliche Kosten von etwa 5,00 €/Stk. bis 6,25 €/Stk. Bei dieser Überlegung werden die Anteile für die Unterhaltung – also bspw. das Reinigen – nicht berücksichtigt, was jedoch gewollt ist, da die betrieblichen Leistungen der Straßenmeistereien nicht Gegenstand dieser Arbeit sind. Die im Rahmen des FE Asset Management angegebenen Herstellkosten pro Leitpfosten sind mit 5,40 bis 14,50 €/Stk. hingegen wenig realistisch und stellen vermutlich ebenfalls mittlere Kosten pro Jahr dar (obwohl in den Angaben anders deklariert).

Die Ausbaukosten für einen Leitpfosten können anhand der Datenbank der €-Cost Software mit rund 5 €/Stk. abgeschätzt werden. Für die Neuherstellung werden unter Berücksichtigung eines Aufschlags von 18 % für Wagnis und Gewinn sowie die Allgemeinen Geschäftskosten dementsprechend Gesamtkosten von rund 65 €/Stk. notwendig. Dies entspricht jährlichen Aufwendungen von rund 8 €/Stk. Auch hier ist jedoch zu beachten, dass die Leitpfosten bei einer E2-Erhaltungsmaßnahme ausgebaut, seitlich gelagert und wieder eingebaut werden müssen. Entsprechende Kosten wurden anhand der Ergebnisse aus [40] abgeschätzt und mit einem Wert von 16,00 €/Stk. angenommen.

3.3.5 HERSTELLKOSTEN FÜR VERKEHRSZEICHEN

Herstell- bzw. Erneuerungskosten für vertikale Verkehrszeichen mit einer Fläche von $< 1 \text{ m}^2$ reichen gemäß den Erhebungen des FE Asset-Management von 50 bis 240 €/Stk. Nach einer Veröffentlichung von SCHMIDT UND KEPPLER [73] aus dem Jahr 2008 werden sogar noch einmal höhere Kosten von maximal 360 €/Stk. ohne Berücksichtigung der Wartung und Reinigung angegeben (Abbildung 3-22). Bezüglich der Angaben aus dem FE Asset-Management ist dies ein Indikator dafür, sich an der oberen Kostenspanne zu orientieren. Aufgrund fehlender Daten bleibt dabei unberücksichtigt, dass es bei der Beschilderung verschiedene Größen und Leistungsklassen (Retroreflexion und/oder Leuchtdichte) gibt, die sich preislich unterscheiden. Für die weiteren Berechnungen werden deshalb anhand der obigen Erkenntnisse mittlere Herstellkosten für vertikale Verkehrszeichen mit einer Fläche $< 1 \text{ m}^2$ von 300 €/Stk. in Ansatz gebracht.

SCHMIDT UND KEPPLER trafen ebenfalls Annahmen bezüglich der Nutzungsdauer von vertikalen Verkehrszeichen, die sie mit 10 bis 15 Jahren angeben (Abbildung 3-22). Entsprechende Werte aus dem FE Asset-Management liegen mit 16-18 Jahren etwas höher. Im Weiteren wird deshalb eine maximale Nutzungsdauer von 15 Jahren festgelegt. Zusammen mit dem Ausbau der vorhandenen vertikalen Verkehrszeichen ergeben sich Gesamtkosten (inkl. WuG + AGK) in Höhe von rund 566 €/Stk., was jährlichen Kosten von etwa 38 €/Stk. entspricht.

| Verkehrsschild | |
|--|------------|
| Maßnahme | Kosten |
| Installation | max. 180 € |
| Wartung, Reinigung ein- bis zweimal in 5 Jahren | 30 € |
| Demontage und Erneuerung nach 10 bis 15 Jahren | max. 180 € |
| Gesamtaufwand nach 10 Jahren (Annahme 1) | 450 € |
| Gesamtaufwand nach 15 Jahren (Annahme 2) | 450 € |

Abbildung 3-22: Herstellkosten und Nutzungsdauern für vertikale Verkehrszeichen (Auszug) [73]

Straßenmarkierungen müssen während der Lebensdauer der Asphaltdeckschicht mehrmals erneuert werden, spätestens jedoch, wenn diese ausgebaut wird. Zur Festlegung der Erneuerungskosten und Nutzungsdauern von Straßenmarkierungen wird auf die Ergebnisse des FE Asset-Management zurückgegriffen. Diese sind in Abbildung 3-23 zusammenfassend dargestellt.

| Markierungsart | Erneuerungskosten von Markierungen in €/m | | |
|---|---|-------|----------------|
| | min. | max. | mittlere |
| Dispersionsfarbe Schmalstrich | – | – | 0,14 |
| Breitstrich | – | – | 0,25 (1,80) |
| Heiß- oder Kaltplastik Schmalstrich | – | – | 2,15 |
| Breitstrich | 1,1 | 2,97 | 3,7 (2,34) |
| Agglomerat-Markierungen Schmalstrich | 1,3 | 1,85 | 1,65 |
| Breitstrich | 1,7 | 2,97 | 2,65 |
| Markierungen aus Folien Schmalstrich | 2 | 10,6 | 7,65 |
| Breitstrich | 8,75 | 17,50 | 13,08 |

| Markierungsmaterial | Tatsächliche Nutzungsdauer von Schmalstrich-Markierungen in [a] | | |
|---|---|------|------------|
| | min. | max. | mittlere |
| Markierungen aus Dispersionsfarbe | 1 | 4 | 2,2 |
| Markierungen aus Heiß- oder Kaltplastik | 2 | 6 | 4 |
| Agglomerat-Markierungen | 2 | 4 | 3,5 (3) |
| Markierungen aus Folien | 4 | 8 | 6 (5,5) |

| Markierungsmaterial | Tatsächliche Nutzungsdauer von Breitstrich-Markierungen in [a] | | |
|---|--|------|-------------|
| | min. | max. | mittlere |
| Markierungen aus Dispersionsfarbe | 1 | 4 | 2,4 |
| Markierungen aus Heiß- oder Kaltplastik | 2 | 6 | 4 (4,4) |
| Agglomerat-Markierungen | 2 | 6 | 3,5 (4) |
| Markierungen aus Folien | 4 | 8 | 6 (6,25) |

Abbildung 3-23: Erneuerungskosten von Straßenmarkierungen (links) und Nutzungsdauern (rechts) [58]

Es ist zu erkennen, dass Straßenmarkierungen aus Dispersionsfarbe mit Abstand die geringsten Kosten, jedoch auch die niedrigsten Nutzungsdauern aufweisen. Heiß- oder Kaltplastiken sind demgegenüber wesentlich teurer, halten jedoch nahezu doppelt so lange. Agglomeratmarkierungen sind teurer als Dispersionsfarbe, jedoch günstiger als Plastikmassen in Glattstrich. Dies deckt sich mit Angaben aus der Literatur (z.B. [74]). Die Nutzungsdauer von Agglomeratmarkierungen

wird in [74] mit 4 bis 6 Jahren, im FE Asset-Management mit 2 bis 4 bzw. 2 bis 6 Jahren (Abbildung 3-23) angegeben. Am teuersten sind Markierungen aus Folie, die aber im Gegenzug die längste Nutzungsdauer aller Markierungssysteme aufweisen. Wie in Kapitel 3.1 dargelegt, werden entsprechende Markierungen allerdings sowohl auf Bundes- als auch auf Landesstraßen bisher nur wenig genutzt. Ursächlich hierfür können einerseits die geringere Verkehrsbelastung, aber auch die höheren Investitionskosten sein.

Ausgehend von den obigen Erkenntnissen sowie den in Abbildung 3-23 dargestellten Werten werden die Kosten und Nutzungsdauern der verschiedenen Straßenmarkierungen unabhängig von der Straßenkategorie (inkl. WuG + AGK) wie folgt festgelegt:

Tabelle 3-18: Für die Berechnung der Lebenszykluskosten festgelegte Kosten und Nutzungsdauern für Straßenmarkierungen [58]

| Material | Art | ND [a] | Kosten [€/m] | jährliche Kosten [€/(m*a)] |
|-------------------------|--------------|--------|--------------|----------------------------|
| Dispersionsfarbe | Schmalstrich | 2 | 0,17 | 0,09 |
| | Breitstrich | | 0,30 | 0,15 |
| Heiß-, oder Kaltplastik | Schmalstrich | 4 | 2,50 | 0,63 |
| | Breitstrich | | 4,40 | 1,10 |
| Agglomerate | Schmalstrich | 4 | 1,95 | 0,49 |
| | Breitstrich | | 3,13 | 0,78 |
| Folien | Schmalstrich | 6 | 9,03 | 1,50 |
| | Breitstrich | | 15,43 | 2,57 |

3.3.6 KOSTEN FÜR DAS EINRICHTEN UND VORHALTEN DER BAUSTELLE

Die Baustelleneinrichtung umfasst alle Einrichtungen, die zum Errichten eines Bauwerks vor Ort benötigt werden. Die dabei anfallenden Kosten werden maßgeblich durch die Größe des Bauprojekts, die Art des Bauwerks, der Bauzeit sowie von lokalen Randbedingungen bestimmt. Abgesehen von Tagesbaustellen, die im Regelfall nur eine minimale Ausstattung benötigen, müssen die Kosten für das Einrichten der Baustelle bei Maßnahmen längerer Dauer mit in die Wirtschaftlichkeitbetrachtungen einbezogen werden.

Eine Möglichkeit, die Kosten für die Baustelleneinrichtung abzuschätzen, eröffnet das Programm €-Cost 2010 [40]. Der Kalkulation innerhalb des Programms liegt eine zuvor definierte Einrichtung der Baustelle zugrunde, aus der die Kosten in Abhängigkeit von der Dauer der Maßnahme – bzw. indirekt über die Menge des verbauten Mischguts – abgeleitet werden können. Die kalkulierten Baustellenkosten umfassen das Einrichten und Räumen der Baustelle, das Aufstellen/Abbauen und Vorhalten eines Baubüros, das Bereitstellen sanitärer Anlagen sowie einen Auf-

schlag für sonstige Einrichtungsgegenstände (Strom, etc.). Weitere kostenintensive Einrichtungen wie etwa eine Baustellenmischanlage sind nicht Gegenstand der Kalkulation.

Die Ansätze aus €-Cost stammen aus dem Jahr 2010 und sind deshalb nicht mehr uneingeschränkt auf Ende des Jahres 2014 übertragbar. Die entnommenen Werte wurden deshalb mittels des Baupreisindex (Abbildung 3-24) auf den aktuellen Stand gebracht, d.h. die Kosten wurden pauschal um 11,2 % erhöht.

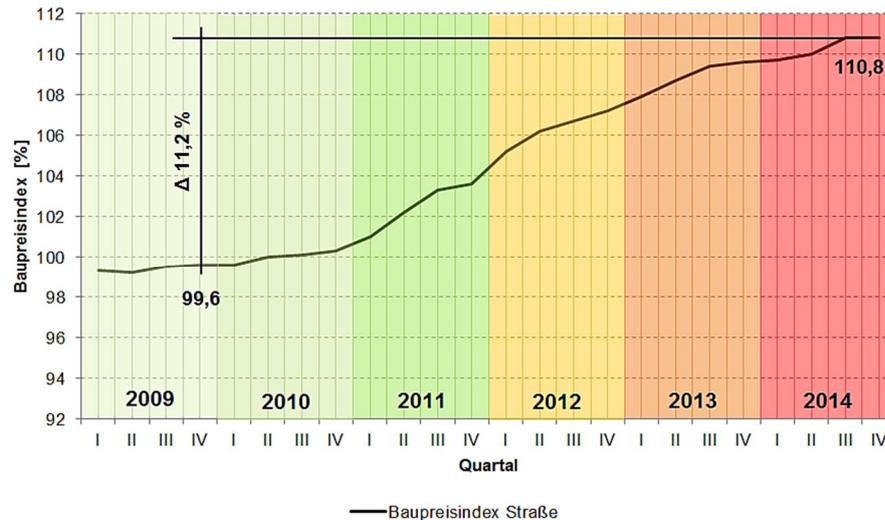


Abbildung 3-24: Entwicklung des Baupreisindex für den Sektor Straße
 (<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Konjunkturindikatoren/Preise/bpr210.html>, abgerufen am 02.02.2015)

Damit ergeben sich die in Gl. 7 und Gl. 8 angegebenen linearen Funktionen zur Bestimmung der Kosten für das Bereitstellen und Vorhalten der Baustelleneinrichtung in Abhängigkeit von der Bauzeit. Diese werden noch einmal in Baustellen mit einer Dauer von weniger als 7 Kalendertagen und Baustellen mit einer Dauer von gleich oder mehr als 7 Kalendertagen untergliedert.

Bauzeit

< 7 Kalendertage $BStK = 1,2 \cdot (5.467 + 25 \cdot KT)$ (ohne Zuschlag WuG + AGK) Gl. 7

≥ 7 Kalendertage $BStK = 1,2 \cdot (5.657 + 125 \cdot KT)$ (ohne Zuschlag WuG + AGK) Gl. 8

mit:

BStK Kosten für das Einrichten und Vorhalten der Baustelleneinrichtung [€]

KT Dauer der Baustelle in Kalendertagen

Es wurden mit den angegebenen Funktionen mehrere Testrechnungen durchgeführt und die Ergebnisse mit Kalkulationen aus der Bauwirtschaft abgeglichen. Die formalen Ansätze können

demzufolge als hinreichend genau angesehen werden, um die Kosten für das Einrichten und Vorhalten der Baustelleneinrichtung unter Vernachlässigung individueller Randbedingungen abzuschätzen. Die Kosten werden ebenfalls mit einem Zuschlag für Wagnis und Gewinn sowie für die Allgemeinen Geschäftskosten in Höhe von 18 % beaufschlagt.

Abbildung 3-25 visualisiert noch einmal die Entwicklung der Kosten für das Einrichten und Vorhalten der Baustelleneinrichtung.

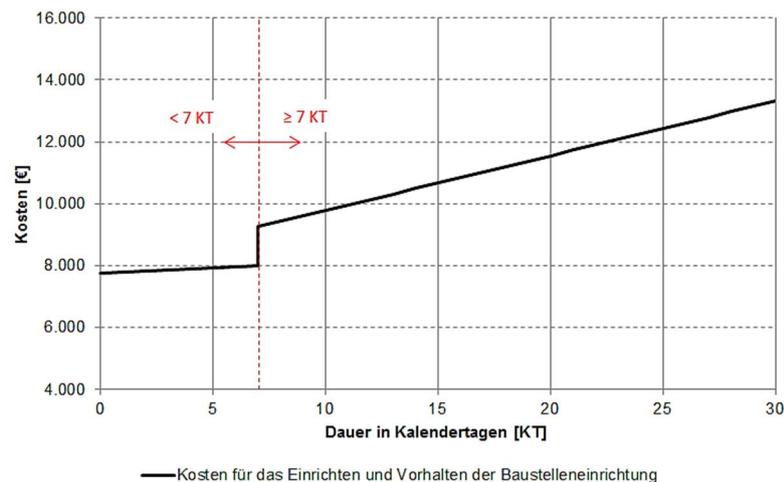


Abbildung 3-25: Entwicklung der Kosten für die Baustelleneinrichtung in Abhängigkeit von der Dauer der Maßnahme (inkl. WuG + AGK)

3.3.7 KOSTEN FÜR DIE SICHERUNG DER ARBEITSSTELLE

Die Pflicht, eine Arbeitsstelle ausreichend abzusichern, besteht sowohl für den Arbeits- als auch für den von der Baustelle betroffenen Verkehrsbereich. Während erstes weitestgehend durch versicherungsrechtliche Regelungen sowie die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften sichergestellt wird, ist die Sicherung des Verkehrsraumes in den „RICHTLINIEN FÜR DIE SICHERUNG VON ARBEITSSTELLEN AN STRASSEN (RSA)“ [75] geregelt. In den RSA wird bezüglich der Baustellensicherung generell zwischen innerörtlichen Straßen (Teil B), Landstraßen (Teil C) und Autobahnen (Teil D) unterschieden. Die entsprechenden Teile gliedern sich weiter in Arbeitsstellen längerer Dauer (durchgehend und ortsfest mindestens einen Kalendertag lang) und Arbeitsstellen kürzerer Dauer (begrenzte Stundenzahl, in der Regel während der Tageshelligkeit).

Vor allem bei aufwendigen Verkehrsführungen und Sicherungsmaßnahmen – vordringlich auf stark befahrenen Autobahnen – kann die Verkehrssicherungspflicht einen bedeutenden Anteil an den Gesamtkosten einer Maßnahme ausmachen, sodass entsprechende Aufwendungen bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen unbedingt berücksichtigt werden müssen.

3.3.7.1 AUTOBAHNEN

Die Verkehrssicherungskosten auf Autobahnen beeinflussen die Gesamtkosten einer Maßnahme je nach gewähltem Regelplan erheblich. Da in dieser Arbeit Querschnitte mit 2-streifigen und 3-streifigen Richtungsfahrbahnen unterschieden werden, müssen auch unterschiedliche Regelpläne zur Sicherung der Arbeitsstelle gewählt werden. Wie bspw. schon SOCINA UND KOMMA [76] bei ihren Untersuchungen feststellten, bleibt es jedoch weitestgehend offen, wie die Verkehrsführung im Baustellenbereich allgemeingültig beschrieben werden kann. Dementsprechend müssen gewisse Annahmen – beispielsweise bezüglich eines geeigneten Regelplans – getroffen werden. Weiterhin wird zugrunde gelegt, dass an den von einer Maßnahme betroffenen Autobahnquerschnitten Mittelstreifenüberfahrten vorhanden sind und die Baustelle außerhalb einer Anschlussstelle, einem Parkplatz oder einer Zu- oder Ausfahrt liegt.

Querschnitte mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn

Ist von einer Maßnahme nur ein einzelner Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn betroffen, wird festgelegt, dass die Sicherung der Baustelle nach dem Regelplan D II / 1 mit einer Verkehrsführung 3s+1 sichergestellt wird. Bei dieser Variante wird der Verkehr auf zwei Behelfsfahrstreifen an der Baustelle vorbeigeführt, wobei einer dieser Fahrstreifen auf der Gegenfahrbahn angeordnet wird. Müssen beide Fahrstreifen einer Fahrbahn gesperrt werden, wird auf den Regelplan D II / 2 mit einer Verkehrsführung 4s+0 zurückgegriffen. Der Verkehr wird auf zwei Behelfsfahrstreifen auf der Gegenfahrbahn an der Baustelle vorbei geleitet.

Im Forschungsprojekt „KOSTENERMITTLUNG FÜR ERHALTUNGSMASSNAHMEN ZUR BESTIMMUNG DER KOSTENEINGANGSGRÖSSEN FÜR DAS PMS (PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM)“ [77] wurden Parameter ermittelt, die die Bestimmung von Kosten für die Absicherung von Arbeitsstellen an Straßen in Abhängigkeit von der Verkehrsführung, der Bauloslänge sowie der Dauer der Maßnahme ermöglichen (Gl. 9). Zudem unterscheiden sich die Parameter und damit die resultierenden Kosten signifikant, je nachdem wie die Trennung der Fahrtrichtungen bzw. die Längsabspernung realisiert wird. Die Abspernung mit Stahlschutzwänden (SSW) ist dabei wesentlich teurer als die Ausführung mit Baken oder Leitsystemen (vgl. Abbildung 3-26), weist jedoch ein deutlich höheres Sicherheitsniveau auf.

$$K_{SA} = a + b \cdot L + c \cdot KT$$

Gl. 9

mit:

- K_{SA} Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle [€]
- a,b,c Regressionsparameter in Abhängigkeit von dem Regelplan
- L Loslänge [km]
- KT Dauer der Baustelle in Kalendertagen

Die in [77] angegebenen Parameter beziehen sich auf Kosten aus dem Jahr 2001, da auch im Folgeprojekt [40] keine aktuelleren Werte ermittelt werden konnten. Um die Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle trotzdem näherungsweise auf den aktuellen Stand zu heben, wird auf den Baupreisindex⁴ zurückgegriffen. Von 2001 bis Ende 2014 ist für Straßen ein Anstieg des BPI um rund 26 % festzustellen. Die in [77] ermittelten Parameter wurden für die weiteren Berechnungen entsprechend angehoben (Tabelle 3-19).

Tabelle 3-19: Parameter zur Ermittlung der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn [77] (Parameter mittels BPI erhöht)

| Regelplan RSA | Verkehrsführung | Var. | Trennung der Fahrtrichtung | Längsabspernung | Parameter | | |
|------------------|-----------------|----------------|----------------------------|-----------------|---------------|---------------|------------|
| | | | | | a | b | c |
| D II 1a / 1b | 3s+1 | 1 | LS | B | 11.970 | 15.120 | 630 |
| | | 2 | SSW | SSW | 37.170 | 36.540 | 756 |
| | | 3 | LS/SSW | SSW/B | 24.570 | 25.830 | 693 |
| | | gewählt | - | - | 34.650 | 34.398 | 743 |
| D II 2a / 2b | 4s+0 | 1 | LS | - | 13.592 | 10.936 | 558 |
| | | 2 | SSW | - | 62.189 | 21.270 | 614 |
| | | gewählt | - | - | 57.329 | 20.237 | 608 |

mit:

LS.....Leitsystem

SSW Stahlschutzwand

B..... Baken

Welche Ausführungsvariante angewendet wird, ist von individuellen Randbedingungen – beispielsweise der Verkehrsstärke oder der Art der Baustelle – abhängig. Allerdings zeigt die Erhaltungspraxis, dass eine Sicherung der Arbeitsstelle mit Baken die Ausnahme darstellt und unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit zugrunde gelegten hohen Verkehrsmengen eine wenig praktikable Variante darstellt. Deshalb wird im Weiteren nicht mit mittleren Kosten gerechnet, sondern angenommen, dass nur 10 % aller Verkehrsführungen mit Baken realisiert werden und ansonsten auf Leitsysteme und Stahlschutzwände zurückgegriffen wird. Hieraus ergeben sich die in Tabelle 3-19 hervorgehobenen Werte („gewählt“), die den weiteren Berechnungen zugrunde gelegt werden.

Abbildung 3-26 visualisiert noch einmal die Entwicklung der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle in Abhängigkeit von der Dauer der Maßnahme (Stand Ende 2014 mittels BPI). Dabei lassen sich auch deutlich die großen Unterschiede je nach Ausführungsvariante erkennen. Die berechneten Kosten enthalten keine Anteile für WuG + AGK und werden deshalb zur Berücksichtigung dieser Kostenanteile mit einem Aufschlag von 18 % versehen.

⁴ (<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Konjunkturindikatoren/Preise/bpr210.html>)

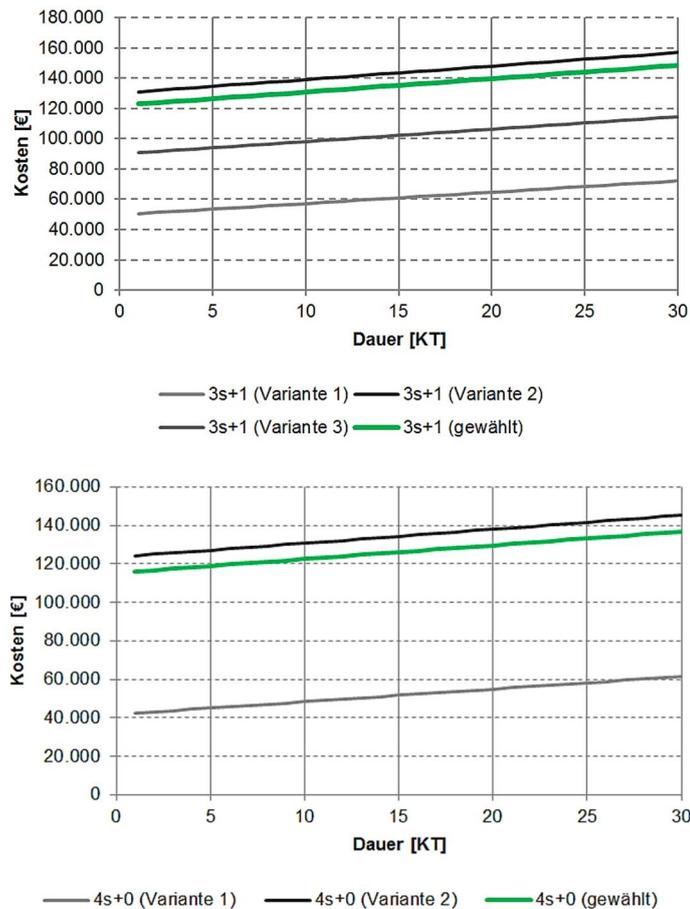


Abbildung 3-26: Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn (hochgerechnet auf Stand Ende 2014)

Querschnitte mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn

Für Autobahnabschnitte mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn geben die RSA ebenfalls Regelpläne vor, nach denen die Arbeitsstelle zu sichern ist. Welche Verkehrsführung zur Anwendung kommt, ist dabei wieder von den von der Maßnahme betroffenen Fahrstreifen abhängig. Muss nur ein Fahrstreifen gesperrt werden, wird eine 4+2 Verkehrsführung nach dem Regelplan D II / 5 gewählt, d.h. ein Fahrstreifen wird auf der Gegenfahrbahn geführt. Sind zwei Fahrbahnen von einer Maßnahme betroffen, wird der Regelplan D II / 6 mit einer 5s+1 Verkehrsführung angewendet. Demzufolge wird der Verkehr auf zwei Behelfsfahrstreifen auf der Gegenfahrbahn an der Baustelle vorbei geleitet. Bei der Vollsperrung einer Fahrbahn wird die Arbeitsstelle gemäß dem Regelplan D II / 8 gesichert, also mit einer 5s+0 Führung des Verkehrs.

Der rechnerische Ansatz zur Bestimmung der Kosten entspricht dem aus Gl. 9. Die Parameter je nach Regelplan und Variante sind in Tabelle 3-20 dargestellt. Die Variante 3 stellt dabei jeweils eine Kombination aus den Varianten 1 und 2 dar, die Kosten entsprechen dem Mittelwert.

Die sich ergebende Entwicklung der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn ist je nach Regelplan in Abbildung 3-27 dargestellt. Auch hier

sind die großen Spreizungen je nach Absperrvariante deutlich zu erkennen. Bezüglich der Art der Sicherung der Arbeitsstelle (Längsabspernung, usw.) wurden dieselben Festlegungen wie bei Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn getroffen. Die Werte wurden wiederum mittels Baupreisindex auf den Stand Ende 2014 gebracht und enthalten einen Aufschlag von 18 % für WuG und AGK.

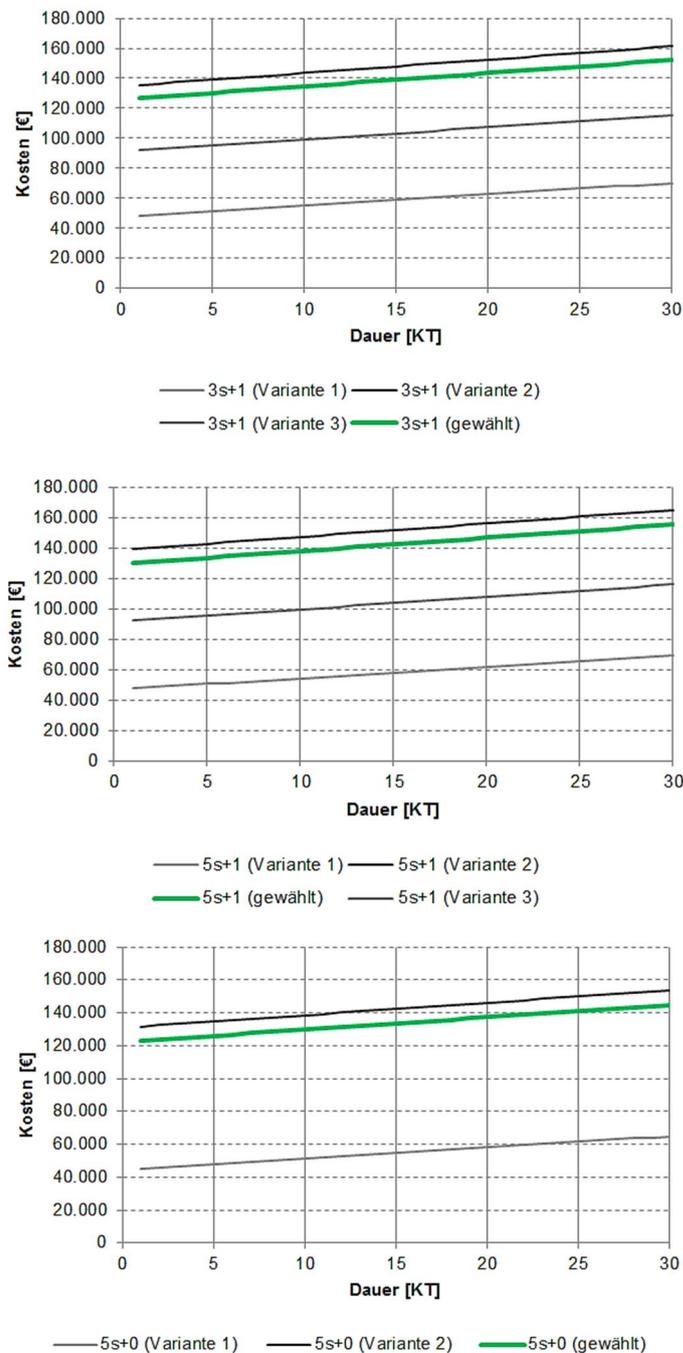


Abbildung 3-27: Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn (hochgerechnet auf Stand Ende 2014)

Tabelle 3-20: Parameter zur Ermittlung der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn [77] (Parameter mittels BPI erhöht)

| Regelplan RSA | Verkehrsführung | Var. | Trennung der Fahrtrichtung | Längsabspernung | Parameter | | |
|------------------|-----------------|----------------|----------------------------|-----------------|---------------|---------------|------------|
| | | | | | a | b | c |
| D II / 5a/b | 4+2 | 1 | LS | B | 11.340 | 14.490 | 630 |
| | | 2 | SSW | SSW | 40.950 | 36.540 | 756 |
| | | 3 | LS/SSW | SSW/B | 25.830 | 25.578 | 693 |
| | | gewählt | - | - | 37.989 | 34.335 | 743 |
| D II / 6a/b | 5s+1 | 1 | LS | B | 10.710 | 14.490 | 630 |
| | | 2 | SSW | SSW | 41.580 | 37.800 | 756 |
| | | 3 | LS/SSW | SSW/B | 25.830 | 25.830 | 693 |
| | | gewählt | - | - | 38.493 | 35.469 | 743 |
| D II / 8a/b | 5s+0 | 1 | LS | - | 13.297 | 12.288 | 571 |
| | | 2 | SSW | - | 62.299 | 24.348 | 645 |
| | | gewählt | - | - | 57.399 | 23.142 | 638 |

mit:

LS.....Leitsystem

SSW.....Stahlschutzwand

B.....Baken

3.3.7.2 BUNDES- UND LANDESSTRASSEN

Arbeitsstellen an einbahnigen Querschnitten kommen entweder ohne Verkehrssicherung aus (Umleitung des Verkehrs), oder es wird halbseitig gesperrt und der Verkehr auf dem verbleibenden Fahrstreifen an der Baustelle vorbeigeleitet. Geeignete Regelpläne nach den RSA sind die Pläne C I / 4, C I / 5 und C I / 6, die eine Sicherung des Arbeitsbereiches entweder mit Lichtsignalanlage (C I / 5) oder ohne (C I / 4, C I / 6) vorsehen. Ausführungen ohne LSA dürfen dabei nur bei Baustellen mit einer Länge von maximal 50 m angewendet werden. Da in dieser Arbeit für die weiteren Berechnungen sowohl auf Bundes- als auch auf Landesstraßen größere Loslängen angenommen werden, sind diese Varianten folglich nicht weiter relevant.

In [77] wurden keine Parameter zur Ermittlung der Sicherungskosten auf einbahnigen Querschnitten erhoben. Deshalb wurden entsprechende Kostenansätze bei einem großen Unternehmen erfragt, das sich auf die Sicherung von Baustellen an Straßen spezialisiert hat (Tabelle 3-21). Aus den Angaben für eine zugrunde gelegte Loslänge von 500 m resultiert eine nahezu lineare Entwicklung der Kosten, die sich mit der in Abbildung 3-28 dargestellten Gleichung in Abhängigkeit von der Dauer der Maßnahme beschreiben lässt.

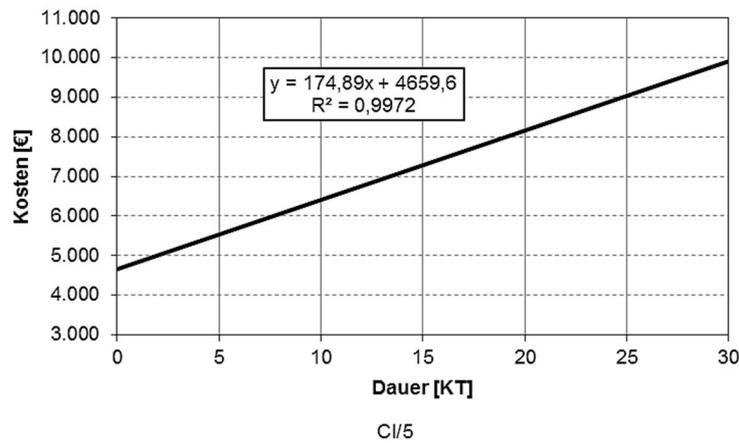


Abbildung 3-28: Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf Bundes- und Landesstraßen

Tabelle 3-21: Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf einbahnigen Querschnitten in Abhängigkeit von der Dauer der Maßnahme (inkl. WuG + AGK)

| Dauer [KT] | Kosten [€] |
|------------|------------|
| | C I / 5 |
| 4 | 5.300 |
| 10 | 5.500 |
| 21 | 8.300 |

3.3.8 KOSTEN VON ERHALTUNGSMASSNAHMEN AM OBERBAU

Auf Grundlage der in den vorherigen Kapiteln ermittelten repräsentativen Streckenabschnitte sowie der Kosten für die verschiedenen Leistungen können in einem weiteren Schritt Gesamtkosten für Erhaltungsmaßnahmen getrennt nach Straßenkategorie berechnet werden. Diese sind eine zentrale Größe für die weiteren Betrachtungen.

Generell wird die Erhaltung der Schichten des Oberbaus und der sonstigen Anlagenteile – also der passiven Schutzeinrichtungen, Leitpfosten sowie der horizontalen und vertikalen Verkehrszeichen – unabhängig voneinander betrachtet, d.h. die im Weiteren angegebenen Kosten für die Erhaltungsmaßnahmen am Oberbau enthalten keine Anteile für Tätigkeiten an den abgekoppelt davon behandelten sonstigen Anlagenteilen. Eine Ausnahme bilden die Straßenmarkierungen. Da diese bei jeder Erneuerung der Deckschicht neu hergestellt werden müssen, können sie nicht unabhängig von einer Maßnahme betrachtet werden und sind deshalb in die jeweiligen Maßnahmekosten eingerechnet. Dies ändert natürlich nichts an dem Umstand, dass Straßenmarkierungen aufgrund ihrer teilweise geringen Nutzungsdauer auch zwischen zwei Erhaltungsmaßnahmen turnusmäßig erneuert werden müssen. Arbeiten am Oberbau stellen jedoch Zwangspunkte dar, also Zeitpunkte, an denen unabhängig von der verbleibenden Nutzungsdauer eine Erneuerung der Markierungen vorgenommen werden muss.

Um die Kosten für Erhaltungsmaßnahmen hinreichend genau bestimmen zu können, müssen weiterhin Festlegungen bezüglich des Umfangs und der zu tätigen Leistungen getroffen werden.

Generell wird angenommen, dass E2-Maßnahmen – also eine grundhafte Erneuerung und die Erneuerung des gebundenen Oberbaus – die gesamte Breite der gebundenen Befestigung der Richtungsfahrbahn oder des Querschnitts umfassen. Auf Autobahnen wird zusätzlich bei Erhaltungsmaßnahmen, die nur die Decke (E1) bzw. die Deckschicht (I2-I1) betreffen, zwischen der Erhaltung des Hauptfahrstreifens (HFS) und der restlichen Fahrstreifen (rFS) bzw. des verbleibenden Fahrstreifens bei 2-streifigen Richtungsfahrbahnen unterschieden. Hieraus resultieren unterschiedliche Einbaubreiten und damit -mengen, die sich auf die Kosten einer Maßnahme auswirken.

Bei Bundes- und Landesstraßen entspricht die Maßnahmenbreite hingegen stets der Breite der gesamten gebundenen Befestigung. Es muss jedoch beachtet werden, dass der Verkehr entweder auf einem Fahrstreifen an der Baustelle vorbeigeführt (jeweils halbseitige Sperrung mit Lichtsignalanlage) oder über eine Umleitungsstrecke komplett um die Baustelle herum geleitet werden kann. Im zweiten Fall wird demnach nur eine minimale Sicherung der Arbeitsstelle notwendig.

Tabelle 3-22: Definition des Umfangs der Erhaltungsmaßnahmen

| Maßnahmenbezeichnung | Bezeichnung RPE-Stra | Erläuterung |
|---|----------------------|---|
| grundhafte Erneuerung | E2 | <ul style="list-style-type: none"> umfasst die Erneuerung des gesamten gebundenen Oberbaus <u>inklusive</u> der Schichten ohne Bindemittel die Einbaubreite umfasst die gesamte befestigte Richtungsfahrbahn <u>einschließlich</u> des Seitenstreifens bzw. die befestigte Fahrbahn |
| Erneuerung des gebundenen Oberbaus | E2 | <ul style="list-style-type: none"> umfasst die Erneuerung des gesamten gebundenen Oberbaus <u>ohne</u> die Schichten ohne Bindemittel Einbaubreite umfasst nicht den Seitenstreifen (falls vorhanden) |
| Erneuerung der Decke | E1 | <ul style="list-style-type: none"> umfasst die Erneuerung der bitumengebundenen Deck- und Binderschicht |
| Erneuerung der Deckschicht | I2 | <ul style="list-style-type: none"> umfasst die Erneuerung der bitumengebundenen Deckschicht |
| Dünne Deckschicht in Heißbauweise (DSH-V) | I1 | <ul style="list-style-type: none"> umfasst das Abfräsen der vorhandenen Deckschicht und Aufbringen einer Dünne Deckschicht in Heißbauweise (DSH-V) |

HFS = Hauptfahrstreifen
rFS = restliche Fahrstreifen

Eine Zusammenfassung der grundlegenden Festlegungen für die Erhaltungsmaßnahmen ist in Tabelle 3-22 dargestellt. Diese wurden in ein rudimentäres Excel-Tool überführt, das durch gezielte Variation der Eingangsparameter eine Abschätzung der Kosten ermöglicht. Um den Ansprüchen des Berechnungsverfahrens für die Lebenszykluskosten (Kapitel 4.1) gerecht zu werden, müssen die Gesamtkosten jeder Erhaltungsmaßnahme auf die einzelnen Schichten umgelegt werden, da im Weiteren eine schichtweise Betrachtung vorgenommen wird. Die Kostenanteile für den Aus- und Einbau der Schichten des Oberbaus konnten direkt aus dem Excel-Tool abgelesen werden,

ebenso wie die hierfür benötigte Dauer. Die Anteile für das Einrichten und Vorhalten der Baustelle sowie die Sicherung der Arbeitsstelle wurden anhand der ermittelten Dauern anteilig auf die jeweiligen Schichten verteilt.

Mit Ausnahme der Straßenmarkierungen wird angenommen, dass die sonstigen Anlagenteile unabhängig vom eigentlichen Straßenoberbau erhalten werden. Sowohl die Eingreifzeitpunkte als auch die hieraus resultierende Wertentwicklung einschließlich des verbleibenden Restwerts werden demnach für jedes Anlagenteil separat ermittelt und den Lebenszykluskosten für die Erhaltung des Oberbaus zugerechnet.

3.3.8.1 AUTOBAHNEN

Auf Grundlage der zuvor getroffenen Festlegungen, werden in diesem Kapitel die Kosten für Erhaltungsmaßnahmen auf Autobahnen mit 2- bzw. 3-streifiger Richtungsfahrbahn berechnet. Die jeweiligen Einbaubreiten ergeben sich aus den gewählten Regelquerschnitten (Kapitel 3.1.1.1) sowie den in Tabelle 3-22 getroffenen Annahmen. Den Berechnungen liegt eine Loslänge von 2.000 m zugrunde.

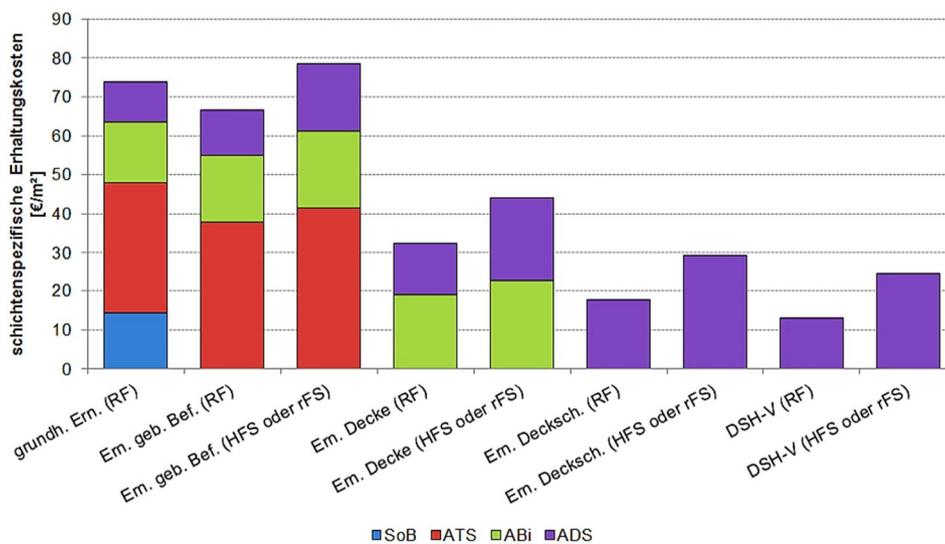
Querschnitte mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn

Die Kosten pro Quadratmeter für Erhaltungsmaßnahmen auf Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn sind in Tabelle 3-23 dargestellt. Da die Breite des Haupt- und Überholfahrstreifens bei einem RQ31 mit jeweils 3,75 m identisch ist und zudem der gleiche Regelplan zur Sicherung der Arbeitsstelle angesetzt wird, sind die resultierenden Kosten für Erhaltungsmaßnahmen auf beiden Fahrstreifen gleich. Die angegebenen Werte gelten demnach sowohl für den Haupt- als auch den Überholfahrstreifen.

Auffällig sind bei den in Abbildung 3-29 dargestellten Kosten die teilweise deutlich höheren Werte, wenn die Erhaltungsmaßnahme nur einen einzelnen Fahrstreifen betrifft. Ursächlich hierfür sind vordringlich die Kostenanteile für die Sicherung der Arbeitsstelle. Selbst wenn eine Maßnahme nur einen einzelnen Fahrstreifen umfasst, muss eine teure Verkehrsführung eingerichtet werden, um einen möglichst stetigen Verkehrsfluss auch im Baustellenbereich sicherzustellen. Bezogen auf die gegenüber einer Erhaltungsmaßnahme der gesamten Richtungsfahrbahn geringeren Gesamtkosten und kleineren Einbaufläche, steigen die Anteile für die Sicherung der Arbeitsstelle signifikant und erhöhen so die Maßnahmekosten bezogen auf einen Quadratmeter Fläche.

Tabelle 3-23: Nach Schichten getrennte Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn (RQ 31)

| Erhaltungsmaßnahme | Fahrbahn/ Fahrstreifen | Kosten für Schicht [€/m ²] | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | ADS | ABi | ATS | SoB | Summe |
| grundhafte Erneuerung | Richtungsfahrbahn | 10,24 | 15,53 | 33,72 | 14,30 | 73,79 |
| Erneuerung geb. Befestigung | Richtungsfahrbahn | 11,75 | 17,04 | 37,81 | - | 66,60 |
| | Hauptfahrstreifen | 17,10 | 19,80 | 41,50 | - | 78,40 |
| | restliche Fahrstreifen | 17,10 | 19,80 | 41,50 | - | 78,40 |
| Erneuerung der Decke | Richtungsfahrbahn | 13,62 | 18,91 | - | - | 32,53 |
| | Hauptfahrstreifen | 21,44 | 22,69 | - | - | 44,13 |
| | restliche Fahrstreifen | 21,44 | 22,69 | - | - | 44,13 |
| Erneuerung der Deckschicht | Richtungsfahrbahn | 17,71 | - | - | - | 17,71 |
| | Hauptfahrstreifen | 29,25 | - | - | - | 29,25 |
| | restliche Fahrstreifen | 29,25 | - | - | - | 29,25 |
| DSH-V | Richtungsfahrbahn | 13,10 | - | - | - | 13,10 |
| | Hauptfahrstreifen | 24,68 | - | - | - | 24,68 |
| | restliche Fahrstreifen | 24,68 | - | - | - | 24,68 |



HFS Hauptfahrstreifen
 rFS restliche Fahrstreifen
 RF Richtungsfahrbahn

Abbildung 3-29: Schichtenspezifische Kosten [€/m²] für Erhaltungsmaßnahmen an Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn

Dies verdeutlicht auch die in Abbildung 3-30 beispielhaft dargestellte Verteilung der Kostenanteile für das Aufbringen einer Dünnen Deckschicht in Heißbauweise. Der Anteil für die Sicherung der Arbeitsstelle beträgt rund 51 %, wenn die Erhaltungsmaßnahme die gesamte Richtungsfahrbahn umfasst und steigt auf rund 69 %, wenn lediglich ein einzelner Fahrstreifen betroffen ist. Im letzten Fall nehmen demgegenüber die Anteile für den eigentlichen Einbau der Dünnen Deckschicht in Heißbauweise deutlich ab.

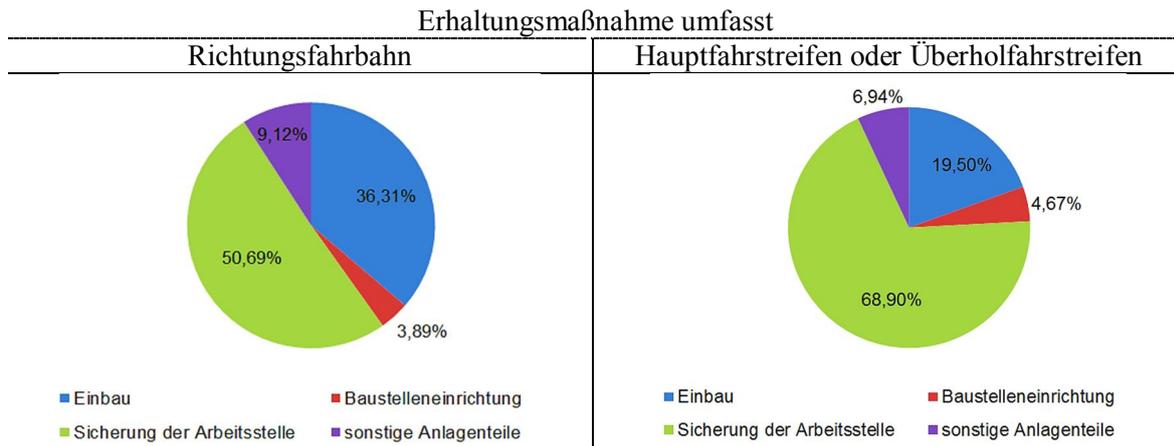


Abbildung 3-30: Vergleich der Kostenanteile einer Erhaltungsmaßnahme (Aufbringen einer Dünnen Deckschicht in Heißbauweise), wenn diese die gesamte Richtungsfahrbahn oder nur den Haupt- bzw. Überholfahrstreifen umfasst

Querschnitte mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn

In Tabelle 3-24 sind die nach Schichten getrennten Kosten für Erhaltungsmaßnahmen auf Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn dargestellt. Für die E1-, I2- und I1-Maßnahmen findet zudem eine Unterscheidung zwischen dem Hauptfahrstreifen (HFS) und den restlichen Fahrstreifen (rFS) statt, da abweichende Einbaubreiten und Regelpläne zur Sicherung der Arbeitsstelle Anwendung finden (siehe Kapitel 3.1.1.1 und Kapitel 3.3.7.1).

Tabelle 3-24: Nach Schichten getrennte Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn (RQ 36)

| Erhaltungsmaßnahme | Fahrbahn/ Fahrstreifen | Kosten für Schicht [€/m ²] | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | ADS | ABi | ATS | SoB | Summe |
| grundhafte Erneuerung | Richtungsfahrbahn | 10,05 | 15,56 | 35,55 | 14,00 | 73,16 |
| Erneuerung geb. Befestigung | Richtungsfahrbahn | 11,27 | 16,56 | 36,57 | - | 64,40 |
| | Hauptfahrstreifen | 16,48 | 19,38 | 40,66 | - | 76,52 |
| | restliche Fahrstreifen | 12,69 | 17,13 | 37,01 | - | 66,83 |
| Erneuerung der Decke | Richtungsfahrbahn | 12,86 | 18,15 | - | - | 31,01 |
| | Hauptfahrstreifen | 21,85 | 22,96 | - | - | 44,81 |
| | restliche Fahrstreifen | 15,00 | 20,29 | - | - | 35,29 |
| Erneuerung der Deckschicht | Richtungsfahrbahn | 16,43 | - | - | - | 16,43 |
| | Hauptfahrstreifen | 29,92 | - | - | - | 29,92 |
| | restliche Fahrstreifen | 20,42 | - | - | - | 20,42 |
| DSH-V | Richtungsfahrbahn | 11,78 | - | - | - | 11,78 |
| | Hauptfahrstreifen | 25,36 | - | - | - | 25,36 |
| | restliche Fahrstreifen | 15,79 | - | - | - | 15,79 |

Wie in Abbildung 3-31 zu erkennen, weisen die Kosten für Erhaltungsmaßnahmen auf Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn ebenfalls eine deutlich Abhängigkeit von dem/den von der Maßnahme betroffenen Fahrstreifen auf. Die Kosten pro Quadratmeter steigen dabei mit kleiner werdender Einbaufläche, was auf dieselben Ursachen wie bei Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn zurückgeführt werden kann (s.o.). Demzufolge sind die Kosten am niedrigsten, wenn die gesamte Richtungsfahrbahn von der Erhaltungsmaßnahme betroffen ist und am höchsten, wenn lediglich der Hauptfahrstreifen erhalten wird.

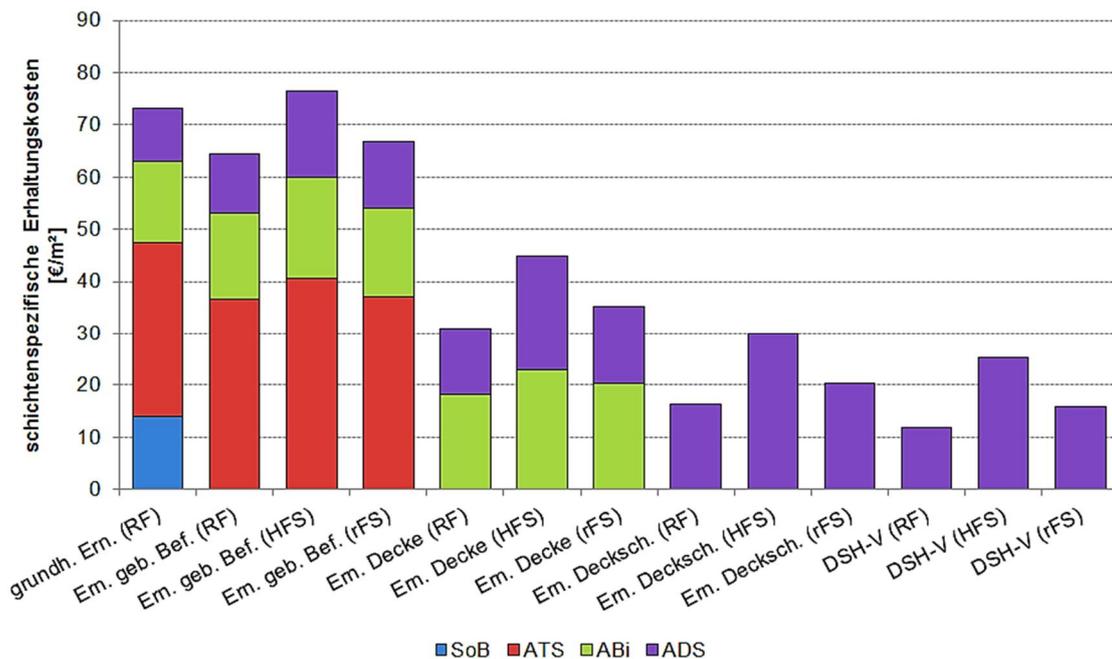


Abbildung 3-31: Schichtenspezifische Kosten [€/m²] für Erhaltungsmaßnahmen an Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn

3.3.8.2 BUNDESSTRASSEN

Der Kalkulation der Kosten von Erhaltungsmaßnahmen an Bundesstraßen liegt eine Loslänge von 1.000 m zugrunde. Weiterhin wird angenommen, dass von einer Maßnahme jeweils der gebundene Querschnitt in voller Breite betroffen ist. Bezüglich der Sicherung der Arbeitsstelle sind demzufolge zwei Szenarien denkbar:

- Szenario 1: Es existieren geeignete Umleitungsstrecken, auf denen der Verkehr um die Baustelle herum geführt werden kann. Die Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle können so auf ein Minimum reduziert werden und gehen nicht in die Berechnung der Maßnahmekosten ein.
- Szenario 2: Es existieren keine geeigneten Umleitungsstrecken, d.h. der Verkehr muss direkt an der Baustelle vorbei geführt werden, was eine halbseitige Sicherung der Arbeitsstelle notwendig macht. Ist ein Fahrstreifen auf voller Loslänge fertiggestellt, müssen die Absperrungen ab- und auf der Gegenfahrbahn wieder aufgebaut werden. Dementsprechend müssen über die gesamte Maßnahmedauer Kosten für das Einrichten und Vorhalten der Baustellensicherung berücksichtigt werden.

Die schichtenspezifischen Kosten für die jeweiligen Erhaltungsmaßnahmen an Bundesstraßen sind in Tabelle 3-25 aufgeführt und in Abbildung 3-32 visualisiert. Erwartungsgemäß liegen die Kosten von Szenario 2 stets über denen von Szenario 1, da die Notwendigkeit einer Absicherung der Arbeitsstelle immer zusätzliche Aufwendungen zur Folge hat.

Tabelle 3-25: Nach Schichten getrennte Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Bundesstraßen (RQ 11)

| Erhaltungsmaßnahme | Szenario | Kosten für Schicht [€/m ²] | | | | |
|-----------------------------|------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | | ADS | ABi | ATS | SoB | Summe |
| grundhafte Erneuerung | 1 mit Vollsperrung | 9,81 | 15,23 | 22,48 | 16,27 | 63,80 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 10,05 | 15,39 | 22,72 | 17,32 | 65,48 |
| Erneuerung geb. Befestigung | 1 mit Vollsperrung | 10,39 | 15,62 | 23,06 | - | 49,07 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 10,92 | 15,97 | 23,58 | - | 50,47 |
| Erneuerung der Decke | 1 mit Vollsperrung | 10,40 | 15,63 | - | - | 26,03 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 11,27 | 16,20 | - | - | 27,47 |
| Erneuerung der Deckschicht | 1 mit Vollsperrung | 10,97 | - | - | - | 10,97 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 12,33 | - | - | - | 12,33 |
| DSH-V | 1 mit Vollsperrung | 6,52 | - | - | - | 6,52 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 7,88 | - | - | - | 7,88 |

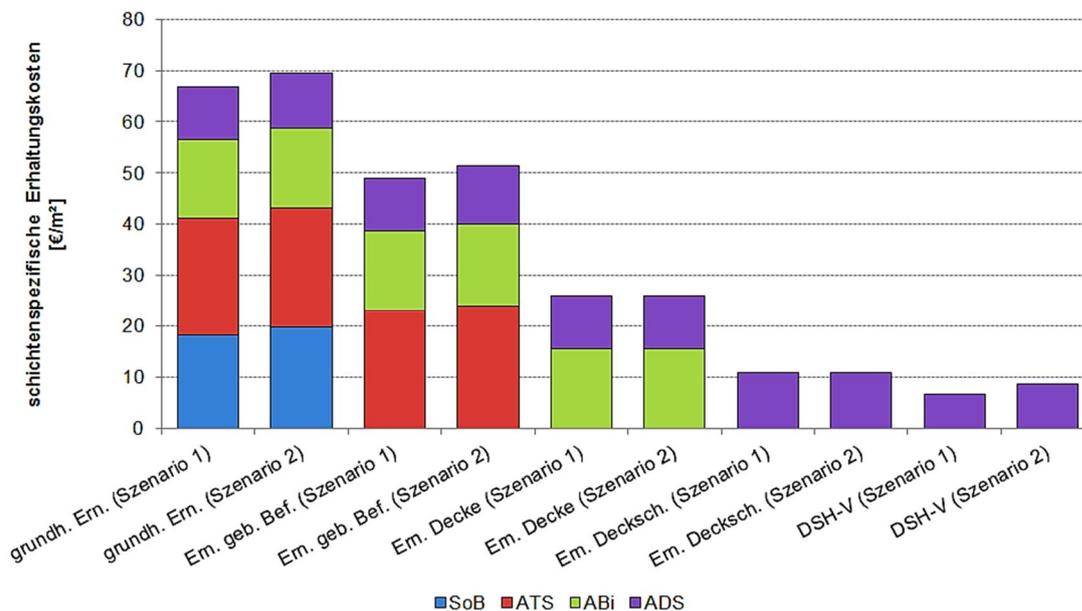


Abbildung 3-32: Schichtenspezifische Kosten [€/m²] für Erhaltungsmaßnahmen an Bundesstraßen

3.3.8.3 LANDESSTRASSEN

Der Kalkulation der Kosten für Erhaltungsmaßnahmen auf Landesstraßen liegt eine Loslänge von 500 m zugrunde. Die Maßnahmen umfassen dabei die gesamte gebundene Befestigung mit einer Breite von 6,00 m. Bezüglich der Sicherung der Arbeitsstelle werden jeweils dieselben Szenarien

wie bei Bundesstraßen betrachtet (Kapitel 3.3.8.2). Die nach Schichten getrennten Erhaltungskosten für Landesstraßen sind in Tabelle 3-26 zusammenfassend dargestellt und in Abbildung 3-33 visualisiert.

Tabelle 3-26: Nach Schichten getrennte Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Landesstraßen

| Erhaltungsmaßnahme | Szenario | Kosten für Schicht [€/m ²] | | | | |
|-----------------------------|------------------------|--|-----|-------|-------|-------|
| | | ADS | ABi | ATS | SoB | Summe |
| grundhafte Erneuerung | 1 mit Vollsperrung | 9,87 | - | 25,55 | 19,43 | 54,85 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 10,64 | - | 26,32 | 21,74 | 58,71 |
| Erneuerung geb. Befestigung | 1 mit Vollsperrung | 10,56 | - | 26,25 | - | 36,81 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 12,31 | - | 28,00 | - | 40,30 |
| Erneuerung der Deckschicht | 1 mit Vollsperrung | 11,87 | - | - | - | 11,87 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 15,21 | - | - | - | 15,21 |
| DSH-V | 1 mit Vollsperrung | 6,76 | - | - | - | 6,97 |
| | 2 halbseitige Sperrung | 10,32 | - | - | - | 10,32 |

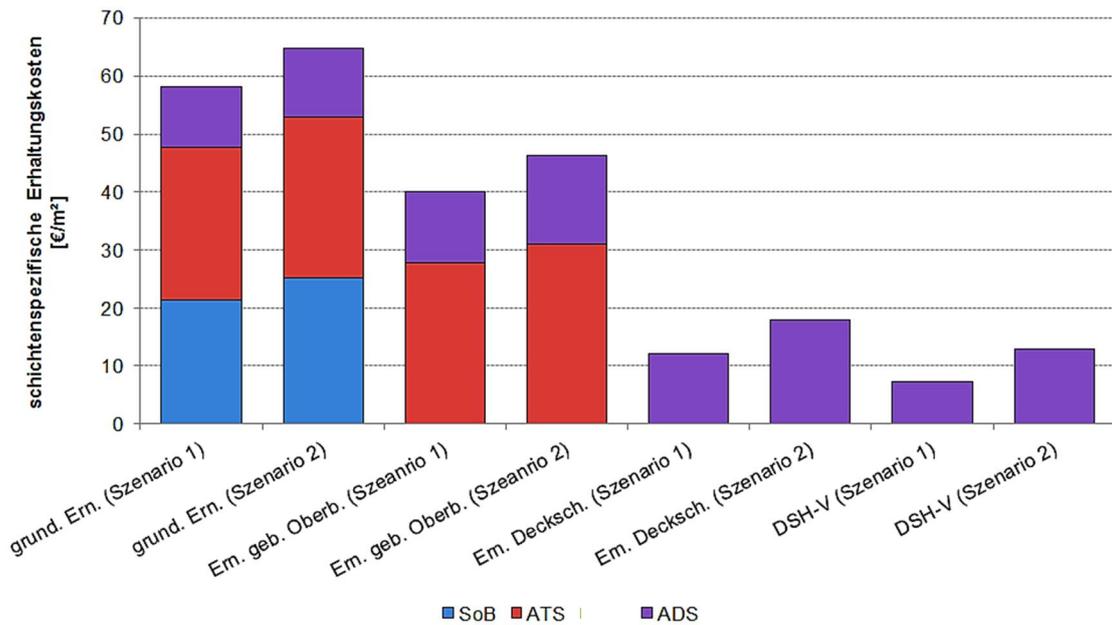


Abbildung 3-33: Schichtenspezifische Kosten [€/m²] für die Erhaltungsmaßnahmen an Landesstraßen

Es ist zu erkennen, dass die schichtenspezifischen Erhaltungskosten auf Landesstraßen generell höher sind als auf Bundesstraßen. Dies ist erklärbar, wenn man die einzelnen Kostenanteile näher betrachtet. In Abbildung 3-34 sind diese beispielhaft als prozentuale Verteilung für die Instandsetzung der Deckschicht mittels Dünner Deckschicht in Heißbauweise (Szenario 2) dargestellt.

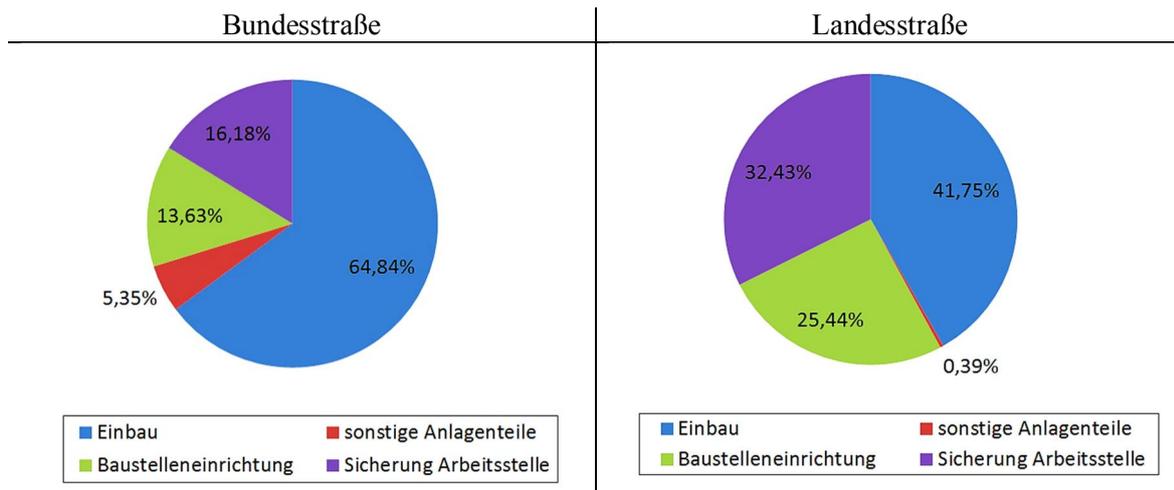


Abbildung 3-34: Vergleich der Kostenanteile einer Erhaltungsmaßnahme (Aufbringen einer Dünnen Deckschicht in Heißbauweise) zwischen Bundes- und Landesstraßen

Ersichtlich ist, dass die Kostenanteile für das Einrichten und Vorhalten der Baustelle und die Sicherung der Arbeitsstelle auf Landesstraßen einen bedeutend höheren Anteil ($\approx 57,9\%$) an den Maßnahmekosten ausmachen als auf Bundesstraßen ($\approx 30\%$). Dies liegt darin begründet, dass Gl. 7 bis Gl. 9 zur Berechnung beider Größen einen sehr hohen Fixkostenanteil – bzw. bei den Verkehrssicherungskosten einen zusätzlich hohen Anteil in Abhängigkeit von der fixen Bauloslänge – und einen vergleichbar niedrigen zeitabhängigen Kostenanteil aufweisen. Da aufgrund der hohen Fertigerleistung zudem die Dauer von Maßnahmen an Bundes- und Landesstraßen nicht signifikant voneinander abweicht, berechnen sich absolut betrachtet nur geringfügig unterschiedliche Kosten für das Einrichten und Vorhalten der Baustelle sowie die Sicherung der Arbeitsstelle. Relativ betrachtet haben diese Kostenanteile bei Bundesstraßen bei einer zugrunde gelegten Einbaufläche von 8.000 m^2 somit einen geringeren Einfluss auf die Erhaltungskosten als bei Landesstraßen mit einer Einbaufläche von nur 3.000 m^2 .

Weiterhin kann festgestellt werden, dass die Kosten pro Quadratmeter für die Erneuerung der Asphalttragschicht auf Autobahnen mit rund 34 bis 39 €/m^2 bis zu 75% teurer sind als auf Bundes- und Landesstraßen. Dies bedingt – neben den generell höheren Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle – auch maßgeblich die Dicke der Asphalttragschicht, die bei Autobahnen mit 22 cm einen deutlich mächtigeren Aufbau aufweist als die der anderen beiden Straßenkategorien (14 cm bei Bundesstraßen und 16 cm auf Landesstraßen).

Die Kosten für Erhaltungsmaßnahmen auf Autobahnen sind generell höher als auf Bundes- und Landesstraßen, was sich besonders bei weniger umfangreichen Maßnahmen bemerkbar macht. Besonderen Einfluss hierauf haben die Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle. Selbst bei einer Erneuerung der Deckschicht muss auf einer Autobahn eine weit aufwändigere Verkehrsführung als bei den beiden anderen Straßenkategorien hergestellt und vorgehalten werden. Bei einer Deckschichterneuerung betragen die Aufwendungen für die Sicherung der Arbeitsstelle beispielsweise rund $1,28\text{ €/m}^2$, bei Landesstraßen rund $3,40\text{ €/m}^2$ und auf Autobahnen (HFS) rund $6,31\text{ €/m}^2$. Dies macht sich in den resultierenden Schichtkosten bemerkbar.

3.3.9 NUTZUNGSDAUERN DER SCHICHTEN DES OBERBAUS

Die Festlegung von maximalen Nutzungsdauern der Schichten des Straßenoberbaus ist ein elementarer Bestandteil für die Berechnung von Lebenszykluskosten. Neben der Wertentwicklung der Schichten bestimmen die Nutzungsdauern auch die Eingreifzeitpunkte für Erhaltungsmaßnahmen und damit deren Anzahl während des Betrachtungszeitraums. Demnach leitet sich hieraus die gesamte über den Lebenszyklus hinweg vorgesehene Erhaltungsstrategie mit einer bestimmten Anzahl und Abfolge verschiedener Maßnahmentearten ab.

Die Ergebnisse aus [5] zeigten deutlich, dass die Nutzungsdauern bis zum strukturellen Versagen des Oberbaus je nach Mischgutkonzeption großen Schwankungen unterliegen. Demzufolge ist es auch für diese Arbeit folgerichtig, die Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von variierenden Nutzungsdauern zu bestimmen, die möglichst das in der Realität vorkommende Spektrum abdecken.

3.3.9.1 AUTOBAHNEN

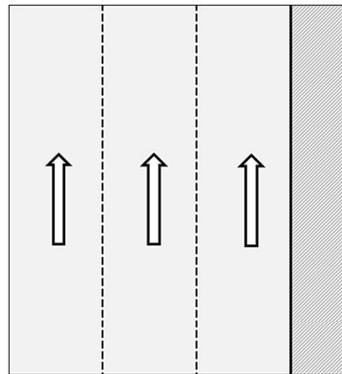
Besonders großen Einfluss auf die Nutzungsdauer des Oberbaus haben die dimensionierungsrelevanten Eingangsparmeter der Asphalttragschicht. Je nach Mischgutkonzeption trat in [5] das strukturelle Versagen bei einer angenommenen Verkehrsbelastung von 100 Mio. äquiv. 10-t-Aü. nach 8 bis 48 Jahren auf. Auch wenn der untere Extremwert kaum als charakteristisch für eine tatsächliche Straßenbefestigung angesehen werden kann, zeigen die Ergebnisse doch, dass die mischgutbedingte Nutzungsdauer der Asphalttragschicht ausgeprägte Schwankungen aufweist, die dementsprechend auch in den folgenden Berechnungen Berücksichtigung finden müssen.

Deshalb wird in dieser Arbeit die maximale Nutzungsdauer der Asphalttragschicht auf dem Hauptfahrstreifen mehrfach variiert und auf 10, 20, 30, 40, 50 und 65 Jahren festgesetzt. Entsprechende Nutzungsdauern auch für die restlichen Fahrstreifen festzulegen, gestaltet sich hingegen schwierig. Deshalb wurden diesbezüglich zunächst einige Vorüberlegungen getätigt.

Ein erster Ansatz sah vor, die gewählte B-Zahl von 100 Mio. äquiv. 10-t Aü auf die Fahrstreifen einer Autobahn mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn zu verteilen. Hierzu wurde zunächst der Fahrstreifenfaktor f_1 der RStO 12 herangezogen. Demzufolge verteilt sich der Schwerverkehr zu 80 % auf den Hauptfahrstreifen (also 80 Mio. äquiv. 10-t Aü) und zu 20 % auf den ersten Überholfahrstreifen (also 20 Mio. äquiv. 10-t Aü). Zwischen den beiden Fahrstreifen ergibt sich demnach ein Verhältnisfaktor von 4, die Asphalttragschicht auf dem Überholfahrstreifen würde 4-mal so lange halten wie auf dem Hauptfahrstreifen. Bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren auf dem Hauptfahrstreifen würde die entsprechende Schicht auf dem Überholfahrstreifen also erst nach rund 120 Jahren versagen, was wenig realistisch ist (blau eingefärbte Felder in Abbildung 3-35).

SCHMERBECK [78] zeigte durch die Auswertung mehrere Dauerzählstellen auf Autobahnen in der Region Südbayern, dass durchaus andere als von den RStO 12 unterstellte Verteilungen auftreten. Auf der Bundesautobahn A 99 verteilte sich der Verkehr beispielsweise zu rund 70 % auf den Hauptfahrstreifen und zu 30 % auf die restlichen Fahrstreifen. Damit ergibt sich zwischen den

Fahrstreifen nur noch ein Faktor von etwa 2,3, sodass bei einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren auf dem Hauptfahrstreifen die entsprechende Schicht auf dem Überholfahrstreifen etwa 70 Jahre halten würde (lila eingefärbte Felder in Abbildung 3-35). Dies ist eine realistischere Abschätzung.



| | | | | |
|--|----------|---------|---------|---|
| B-Zahl (gesamt) [äquiv. 10-t Äu] | 100 Mio. | | | |
| B-Zahl (je Fahrstreifen) nach RStO 12 [äquiv. 10-t Äu] | 0 | 20 Mio. | 80 Mio. | - |
| resultierende Nutzungsdauer der ATS [a] | -- | 120 | 30 | - |
| B-Zahl (je Fahrstreifen) nach Schmerbeck [äquiv. 10-t Äu] | 0 | 30 Mio. | 70 Mio. | - |
| resultierende Nutzungsdauer der ATS [a] | -- | 70 | 30 | - |

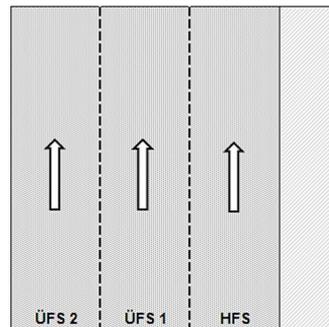
Abbildung 3-35: Vorüberlegung zur Verteilung der B-Zahl auf die Fahrstreifen einer Autobahn mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn

Bei allen obigen Betrachtungen muss jedoch stets berücksichtigt werden, dass die Verteilung des Schwerverkehrs maßgeblich von dessen Menge abhängt. Bei geringen Verkehrsstärken wird sich dieser stärker auf dem Hauptfahrstreifen bewegen, als wenn Lastkraftwagen aufgrund hoher Verkehrsdichte auf den ersten Überholfahrstreifen ausweichen. Andererseits kann unterstellt werden, dass Autobahnquerschnitte mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn überhaupt nur gebaut werden, wenn eine hohe Schwerverkehrsstärke vorliegt.

Weitere Untersuchungen zur Verkehrsverteilung sind von der BAST als externes Forschungsprojekt vorgesehen, jedoch zum Bearbeitungszeitpunkt dieser Arbeit noch nicht vergeben (Forschungsthema im Zuge des gemeinsamen Forschungsprogramms 2014 des BMVI und der FGSV: „AUSWIRKUNGEN DER REALEN VERKEHRSVERTEILUNG AUF BUNDESFERNSTRASSEN AUF DIE DAUERHAFTIGKEIT VON STRASSENBEFESTIGUNGEN“).

In einem zweiten Ansatz wurde untersucht, ob sich andere Ergebnisse einstellen, wenn man zunächst die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke auf die Fahrstreifen verteilt und im Anschluss die B-Zahl berechnet. So lässt sich auch der Einfluss des Pkw-Verkehrs berücksichtigen (Abbildung 3-36). Als Ausgangswert wurde ein DTV von 100.000 Fz/24h für den Querschnitt der Autobahn angenommen, was eine durchaus realistische Größenordnung auf hochbelasteten Auto-

bahnen darstellt. Bei einem unterstellten Schwerverkehrsanteil von 16 % ergeben sich folglich 16.000 Fahrzeuge des Schwerverkehrs, der Rest sind Pkw. Der $DTV_{(SV)}$ wurde wiederum mittels des Fahrstreifenfaktors der RStO 12 verteilt, für den DTV_{Pkw} mussten Annahmen getroffen werden.



| | | | | |
|---|------------|-----------|------------|---|
| $DTV [Fz/24h]$ | 50.000 | | | |
| $DTV_{SV} [Fz/24 h]$ | 8.000 | | | |
| $DTV_{Pkw} [Fz/24 h]$ | 42.000 | | | |
| DTV_{SV} (je Fahrstreifen) nach RStO 12 [Fz/24 h] | 0 | 1.600 | 6.400 | - |
| DTV_{Pkw} (je Fahrstreifen) gewährt [Fz/24 h] | 10.000 | 30.000 | 2.000 | - |
| B-Zahl (Lkw) [äquiv. 10-t Äü] | 0 | 41 Mio. | 165 Mio. | - |
| B-Zahl (Pkw) [äquiv. 10-t Äü] | 0,069 Mio. | 0,2 Mio. | 0,014 Mio. | - |
| B-Zahl (Summe) [äquiv. 10-t Äü] | 0,069 Mio. | 41,2 Mio. | 165 Mio. | - |
| resultierende Nutzungsdauer der ATS [a] | ∞ | 120 | 30 | - |

Abbildung 3-36: Vorüberlegung zur Verteilung des DTV auf die Fahrstreifen einer Autobahn mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn

Bei der anschließenden Berechnung zeigte sich, dass der Pkw-Verkehr selbst in dieser Größenordnung kaum Einfluss auf die B-Zahl jedes Fahrstreifens hat. Bei einer zugrunde gelegten Achsanzahl von 2 und Achslasten von 1,5 t bzw. 0,75 t für Pkw ergeben sich so geringe Schädigungen (q_B -Werte), dass im Vergleich zum Schwerverkehr verschwindend geringe B-Zahlen berechnet werden. Dies hat zur Folge, dass sich mit geringfügigen Verschiebungen dieselben Tendenzen wie in Abbildung 3-35 ergeben und keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen werden können. Für Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn sind die oben beschriebenen Verhältnisfaktoren zwischen den Fahrstreifen aufgrund des höheren f_1 -Faktors der RStO 12 (0,9) noch stärker ausgeprägt, so dass sich auf dem Überholfahrstreifen tendenziell noch einmal höhere Nutzungsdauern der Asphalttragschicht ergeben würden. Weitere Untersuchungen zu entsprechenden Querschnitten liegen zudem nicht vor. Auf eine detaillierte Auswertung wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Aufgrund der obigen Erkenntnisse wird für die weiteren Berechnungen festgelegt, dass die Nutzungsdauer der Asphalttragschicht auf den restlichen Fahrstreifen doppelt so hoch ist wie die an-

genommene Nutzungsdauer auf dem Hauptfahrstreifen (Faktor 2). Es sei an dieser Stelle aber noch einmal auf den Forschungsbedarf bezüglich dieser Problemstellung hingewiesen.

Die Festlegung geeigneter Ausfallzeitpunkte für die Asphaltbinderschicht gestaltet sich auch nach dem derzeitigen Stand der Technik schwierig. Einerseits liegen für die Schicht keine Verhaltensfunktionen wie für Deckschichten vor, andererseits wird bei der rechnerischen Dimensionierung i.d.R. die Unterseite der Tragschicht als Nachweispunkt gewählt, so dass der Ausfall der Binderschicht normalerweise nicht als Versagenskriterium herangezogen wird. Nutzungsdauern für die Asphaltbinderschicht müssen deshalb anhand von Erfahrungswerten festgelegt werden, wie sie beispielsweise in den RPE-Stra dokumentiert sind. Die dort angegebenen Werte sind jedoch sehr hoch angesetzt. Vor dem Hintergrund der schlechter werdenden Bitumenqualität und dem steigenden Verkehrsaufkommen wird für die weiteren Berechnungen ein konservativerer Ansatz gewählt. Die maximale Nutzungsdauer der Asphaltbinderschicht wird deshalb für den Hauptfahrstreifen mit 18 Jahren angenommen.

Auch wenn die Binderschicht des Überholfahrstreifens im Regelfall eine höhere Lebensdauer als im Hauptfahrstreifen aufweist, wird diese heute vor allem durch eindringendes Wasser und den damit verbundenen Haftverlust begrenzt. Nutzungsdauern von 26 bis 30 Jahren, wie sie in den RPE-Stra genannt werden, können nach Rücksprache mit Verantwortlichen auch auf dem Überholfahrstreifen kaum noch realisiert werden. Es wird deshalb für diesen Fahrstreifen eine maximale Nutzungsdauer der Asphaltbinderschicht von 24 Jahren angenommen, wobei dieser Wert ebenfalls durch neue Erkenntnisse und Forschung validiert werden muss.

Für Deckschichten existieren neben Erfahrungswerten auch verschiedene Verhaltensfunktionen, die die Entwicklung verschiedener Oberflächenmerkmale in Abhängigkeit von den Nutzungsdauern oder der Verkehrsbelastung beschreiben (siehe Kapitel 2). Die Literaturanalyse zeigt jedoch, dass diese aufgrund der Zeitabhängigkeit bzw. dem unterstellten Schädigungsverlauf nur bedingt geeignet sind, realistische und für Bestandsstrecken charakteristische Nutzungsdauern zu bestimmen. Eine weitere Möglichkeit, ertragbare Äquivalenzachsen der Deckschicht bis zu einem definierten Ausfallkriterium zu bestimmen, wurde in [5] vorgestellt. Die Spurrinnenprognose der Deckschicht mittels Druck-Schwellversuchen ist jedoch noch nicht erprobt bzw. kalibriert, so dass derzeit keine allgemein gültigen Aussagen zu maximal ertragbaren Verkehrsbelastungen getroffen werden können. Es wird deshalb für die Asphaltdeckschicht des Hauptfahrstreifens eine maximale Nutzungsdauer von 12 Jahren angenommen. Bezüglich der Nutzungsdauer der Deckschicht auf dem Überholfahrstreifen wären prinzipiell dieselben Überlegungen wie bei Asphalttragschichten denkbar. Hieraus würden Nutzungsdauern von rund 28 Jahren (Faktor 2,3) bis 48 Jahren (Faktor 4) resultieren, was wiederum wenig realistisch erscheint. Tatsächlich limitieren insbesondere Risse und mangelhaftes Haftverhalten die realisierbare Lebensdauer einer Asphaltdeckschicht. Nach Rücksprache mit Verantwortlichen aus den Straßenbauverwaltungen erscheinen für den Überholfahrstreifen maximale Nutzungsdauern von 18 Jahren (Faktor 1,5) praxisgerecht.

Die Ergebnisse aus [5] zeigen, dass die Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht einen erkennbaren Einfluss auf die resultierenden Lebenszykluskosten des Straßenoberbaus hat (siehe Kapitel 2.1.6).

Dieser ist jedoch weniger signifikant, als die Auswirkungen der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht. Um den Umfang dieser Arbeit in einem angemessenen Rahmen zu halten, wird deshalb auf die Variation der Lebensdauer der Asphaltdeckschicht verzichtet und diesbezüglich auf die Erkenntnisse aus [5] verwiesen. Eine Verknüpfung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.1.2.

Für Dünne Deckschichten in Heißbauweise (DSH-V) wird einheitlich eine maximale Nutzungsdauer von 8 Jahren festgesetzt.

| Schicht | Nutzungsdauer [a] | | | |
|---------|-------------------|-------|-----|----|
| | ÜFS 2 | ÜFS 1 | HFS | RS |
| ADS | 18 | 18 | 12 | ∞ |
| ABi | 24 | 24 | 18 | ∞ |
| ATS | 20 | 20 | 10 | ∞ |
| | 40 | 40 | 20 | ∞ |
| | 60 | 60 | 30 | ∞ |
| | 80 | 80 | 40 | ∞ |
| | 100 | 100 | 50 | ∞ |
| | 130 | 130 | 65 | ∞ |
| SoB | 130 | 130 | 65 | ∞ |

Abbildung 3-37: Gewählte Nutzungsdauern der Schichten des Oberbaus von Autobahnen je nach Fahrstreifen

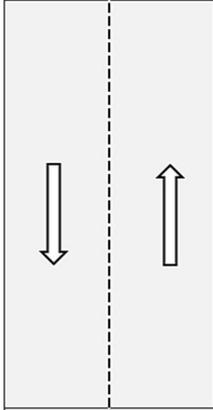
Genauere Erkenntnisse bezüglich dieser Problemstellung liegen auch derzeit nicht vor, sollen jedoch durch die Vergabe eines Forschungsprojekts mit dem Titel „ABSCHÄTZUNG DER ERHALTUNGSINTERVALLE VON FAHRBAHNBESTÄNDEN FÜR EIN NACHHALTIGES ERHALTUNGS- MANAGEMENT“ durch die BAST gewonnen werden. Zum Bearbeitungszeitpunkt dieser Arbeit war das Projekt jedoch noch nicht vergeben.

Schichten ohne Bindemittel können sehr hohe Nutzungsdauern aufweisen und sind in der Erhaltungspraxis größtenteils nur von Maßnahmen betroffen, wenn beispielsweise großflächig Setzungen oder andere Anzeichen einer Schädigung vorliegen. Aus den RPE-Stra können Werte zwischen 55 und 75 Jahre bis zum Ausfall einer ungebundenen Schicht entnommen werden. Hierauf aufbauend, wird für den Hauptfahrstreifen eine maximale Nutzungsdauer von 65 Jahren für die Schichten ohne Bindemittel angenommen.

3.3.10 BUNDES- UND LANDESSTRASSEN

Da bei Bundes- und Landesstraßen festgelegt wird, dass Erhaltungsmaßnahmen jeweils die Breite der gesamten gebundenen Befestigung umfassen, ist die Festlegung von Nutzungsdauern der einzelnen Schichten des Straßenoberbaus leichter zu realisieren als auf Autobahnen. Diese sind für beide Fahrstreifen identisch und entsprechen den gewählten Werten des Hauptfahrstreifens auf Autobahnen.

Weitere Untersuchungen sind jedoch auch hier wünschenswert bzw. notwendig



Das Diagramm zeigt einen Querschnitt einer Straße mit zwei Fahrstreifen, die durch eine gestrichelte vertikale Linie getrennt sind. Ein Pfeil zeigt nach unten auf den linken Fahrstreifen (FS 2), ein anderer nach oben auf den rechten Fahrstreifen (FS 1). Darunter ist eine Tabelle mit den Nutzungsdauern der Schichten für beide Fahrstreifen.

| Schicht | Nutzungsdauer a | |
|---------|-----------------|------|
| | FS 2 | FS 1 |
| ADS | 12 | 12 |
| ABi | 18 | 18 |
| ATS | 10 | 10 |
| | 20 | 20 |
| | 30 | 30 |
| | 40 | 40 |
| | 50 | 50 |
| SoB | 65 | 65 |

Abbildung 3-38: Gewählte Nutzungsdauern der Schichten des Oberbaus von Bundes- und Landesstraßen

4 LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSEN IN ASPHALTBAUWEISE

Aufbauend auf den im vorherigen Kapitel festgelegten Eingangsgrößen werden in diesem Abschnitt die Lebenszykluskosten für verschiedene Szenarien und Straßenkategorien berechnet. Dabei wird stets versucht, eine relative (prozentuale) Darstellung der Entwicklung der Lebenszykluskosten zu erarbeiten, da einem solchen Ansatz eine größere Allgemeingültigkeit innewohnt, als der Angabe von Absolutwerten. Durch die Verknüpfung dieser Ergebnisse mit definierten Kostensätzen lassen sich dann jedoch auch konkrete Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von den getroffenen Eingangsparametern abschätzen.

4.1 BESCHREIBUNG DES BEWERTUNGSVERFAHRENS

Für die monetäre Bewertung von Straßenbefestigungen wurde durch das Institut für Straßenwesen an der Universität Siegen ein Verfahren erarbeitet, das die strukturelle Substanz als ertragbare Achsübergänge der Asphalttragschicht und das strukturelle Potenzial als die der Asphaltbinder- und Asphaltdeckschicht definiert. Das Bewertungsverfahren ermöglicht es, durch die Gegenüberstellung des verbleibenden Restwerts und aller während des Lebenszyklus anfallenden Kosten eine gesamtwirtschaftliche Bewertung eines Straßenoberbaus bezogen auf einen definierten Bewertungszeitpunkt vorzunehmen. Generell wird dabei jede Schicht des Straßenoberbaus separat betrachtet und das Verfahren ermittelt in Abhängigkeit von der bautechnisch zu erwartenden Restnutzungsdauer einen monetären Wert anhand definierter oder tatsächlicher Neubau- bzw. Erhaltungskosten. Der monetäre Wert einer Asphaltstraßenbefestigung ergibt sich dann aus der Summe der monetären Teilwerte aller Schichten des Oberbaus, die ausgehend vom jeweiligen Bezugszeitpunkt askontiert werden.

Der den weiteren Berechnungen zugrunde gelegte Bewertungszeitpunkt wird auf 50 Jahren nach der grundhaften Erneuerung festgelegt. Weiterhin wird angenommen, dass man sich in einem Bestandsnetz befindet, d.h. zum Zeitpunkt $t=0$ wird eine grundhafte Erneuerung durchgeführt, bei der ein Ausbau des gesamten vorhandenen Oberbaus einschließlich der ungebundenen Schichten vorzunehmen ist. Beim Neubau entfallen die Kosten für den Ausbau der vorhandenen Befestigung, dafür werden aber ggf. aufwendige Erdbauarbeiten sowie weitere Arbeiten notwendig, die sich schlecht verallgemeinern lassen. Reine Neubaukosten wurden deshalb nicht kalkuliert bzw. weiter in die Betrachtungen einbezogen.

4.1.1 ERHALTUNGSSTRATEGIE

Um Lebenszykluskosten berechnen zu können, müssen ausgehend von der grundhaften Erneuerung zum Zeitpunkt $t=0$ zunächst individuelle Erhaltungsstrategien in Abhängigkeit von den Nutzungsdauern der Schichten des Straßenoberbaus entwickelt werden. Diese bestimmen die Anzahl, Art und zeitliche Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen während des zu betrachtenden Lebenszyklus. Ausschlaggebend für die weiteren Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ist für jede Va-

riante die Erhaltungsstrategie, die die geringsten Lebenszykluskosten aufweist, also bei unveränderten Randbedingungen wirtschaftlich optimiert wurde.

Beispiel:

Nach einer Deckenerneuerung weist die Binderschicht eine Restlebensdauer von 18 Jahren und die Deckschicht von 12 Jahren auf. Am Ende der Lebensdauer der Deckschicht hat der Binder demnach noch eine verbleibende Nutzungsdauer von 6 Jahren. Bis zur notwendigen Deckenerneuerung wird eine dünne Deckschicht in Heißbauweise (DSH-V) aufgebracht, da diese für den zu überbrückenden Zeitraum wirtschaftlicher ist als eine Erneuerung der Deckschicht in voller Dicke.

Neben dem genannten Beispiel kann eine wirtschaftliche Optimierung aber auch durch andere Überlegungen – beispielsweise eine vorgezogene Erneuerung von technisch noch nicht ausgefallenen Schichten – zu geringeren Lebenszykluskosten führen. Individuelle Erhaltungsstrategien müssen deshalb im Einzelfall erarbeitet und ggf. verschiedene Varianten gegeneinander abgewogen werden.

Die Erhaltungsmaßnahmen weisen definierte Kosten auf. Diese müssen bis zum Bewertungszeitpunkt aufsummiert und unter Berücksichtigung einer Verzinsung dem verbleibenden Restwert gegenübergestellt werden. Die jeweilige Erhaltungsstrategie bestimmt die Lebenszykluskosten einer Untersuchungsvariante also maßgeblich. Abbildung 4-1 visualisiert an einem Zeitstrahl beispielhaft die Abfolge verschiedener Erhaltungsmaßnahmen und den verbleibenden Restwert zum Bewertungszeitpunkt.

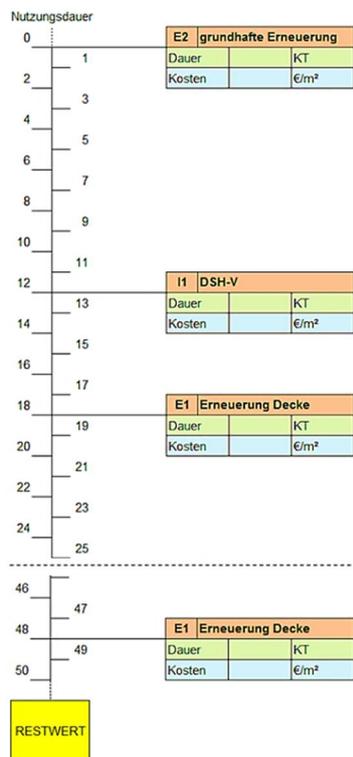


Abbildung 4-1: Beispiel für eine Folge von Erhaltungsmaßnahmen während des Lebenszyklus

4.1.2 WERTENTWICKLUNG DER SCHICHTEN DES OBERBAUS

Durch die Nutzung der Straße verliert diese mit fortschreitender Liegedauer stetig an Wert, bis dieser zum Ausfallzeitpunkt aufgebraucht ist. Während des Lebenszyklus durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen am gesamten Oberbau oder an einzelnen Schichten können den Wert vollständig oder teilweise wiederherstellen.

Für die wirtschaftliche Bewertung von unterschiedlichen Befestigungen muss aber auch die Wertänderung durch Inflation berücksichtigt werden, was durch einen Askontierungszinssatz von jährlich 3 % ([71]) geschieht. Neben dem Wertverlust durch Inflation werden vor allem in der Privatwirtschaft Geldmittel längerfristig am Finanzmarkt angelegt, um Zinsen zu akquirieren. Die Generierung von Zinsen und damit die Bildung von Rücklagen für zukünftige Investitionen wären im öffentlichen Sektor hingegen nur möglich, wenn den Baulastträgern die benötigten Mittel für die Erhaltung der Straße für den gesamten Lebenszyklus von Anfang an zur Verfügung ständen. Da die Zuweisung von Zuwendungen jedoch i.d.R. jährlich erfolgen, können keine langfristigen Anlagen am Finanzmarkt zur Zinsenakquise realisiert werden. Für das in dieser Arbeit verwendete Berechnungsverfahren bedeutet dies, dass zukünftige Investitionen teurer sind, es findet also eine Askontierung in Höhe der Inflation von 3 % statt.

4.1.2.1 SCHICHTEN OHNE BINDEMittel

Für Schichten ohne Bindemittel (SoB) wird davon ausgegangen, dass im Regelfall kein technisches Versagen während des gewählten Betrachtungszeitraums eintritt und somit keine Erhaltungsmaßnahmen erforderlich werden. Für die weiteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wird ein linearer Wertverlust in Abhängigkeit von der gewählten Nutzungsdauer angesetzt. Ein entsprechendes Vorgehen ist zulässig, wenn keine Anzeichen für eine begrenzte Restnutzungsdauer beispielsweise durch lokale oder langwellige Setzungen vorliegen.

Die Wertentwicklung von Schichten ohne Bindemittel ergibt sich durch die Verrechnung des Restnutzungsanteils RNA für das betrachtete Jahr (Gl. 10) mit den anteiligen Erhaltungsmaßnahmekosten der ungebundenen Schicht. Der Restnutzungsanteil berechnet sich dabei wie oben bereits erwähnt ausschließlich anhand der Nutzungsdauer bzw. Restnutzungsdauer der Schichten ohne Bindemittel.

$$RNA = \left(1 - \frac{ND_i}{ND_i + RND_{i-j}} \right) \cdot 100$$

Gl. 10

RNA: Restnutzungsanteil [%]
 ND_i: bisherige Nutzungsdauer bis zum Zeitpunkt i [a]
 RND_{i;j}: Restnutzungsdauer vom Zeitpunkt i bis zum Ausfallzeitpunkt j [a]

In Abbildung 4-2 ist die Wertentwicklung von ungebundenen Schichten beispielhaft ohne und mit einer jährlichen Verzinsung von 3 % dargestellt. Ohne Askontierung ist der lineare Wertverlust während der Nutzungsdauer deutlich zu erkennen, ebenso wie die Wirkung der notwendigen Erneuerung nach 65 Jahren, die den Wert der Schicht wieder auf das Niveau der grundhaften Erneuerung hebt.

Unter Berücksichtigung der Verzinsung ergibt sich hingegen eine andere Entwicklung, der Wert der Schicht steigt mit fortschreitender Nutzungsdauer sogar bis zu einem gewissen Zeitpunkt an. Dies liegt in der hohen Nutzungsdauer der Schichten ohne Bindemittel und dem somit geringen jährlichen Wertverlust begründet. Liegt dieser unter dem Verzinsungsprozentsatz von 3 %, kommt es zunächst zu einer Wertsteigerung in der Zukunft. Ab einem gewissen Zeitpunkt übersteigt die Abschreibungsrate (bzw. der Wertverlust) dann die Askontierung, sodass der Wert ab dann progressiv abfällt, hier z.B. bei etwa 32 Jahren (Abbildung 4-3).

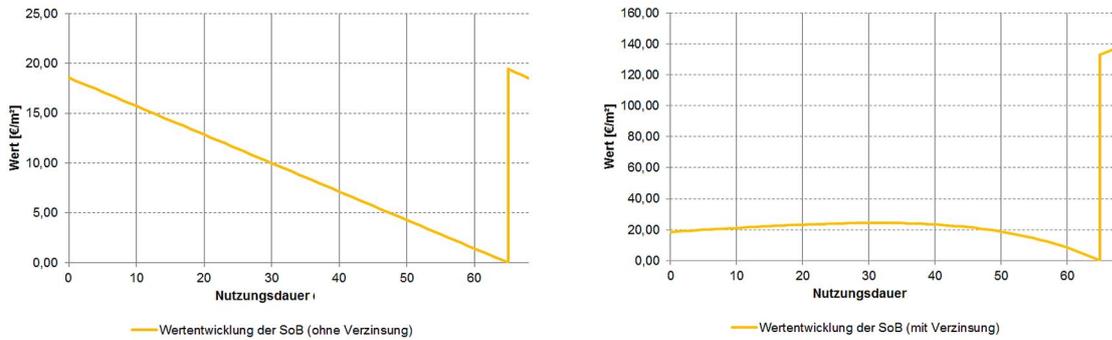


Abbildung 4-2: Beispiel für die Wertentwicklung von Schichten ohne Bindemittel (SoB) ohne Verzinsung (links) und mit Verzinsung von 3 % (rechts)

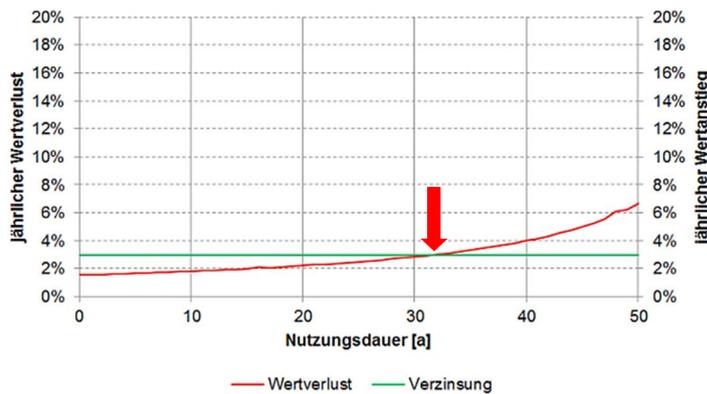


Abbildung 4-3: Beispiel für den Zusammenhang zwischen Wertverlust und Wertsteigerung durch Verzinsung

4.1.2.2 ASPHALTTRAGSCHICHT

Die Wertentwicklung der Asphalttragschicht wird in Anlehnung an die Vorgaben der RSO Asphalt in Abhängigkeit von der strukturellen Substanz bestimmt, also als ertragbare bzw. bereits ertragene äquivalente 10-t Achsübergänge. Hieraus lässt sich der sogenannte Substanzwert SW berechnen (Gl. 11), der den prozentualen Anteil an noch ertragbaren Achsübergängen bezogen auf die Gesamtsubstanz beschreibt. Der Wertverzehr bzw. die Wertentwicklung einer Asphalttragschicht berechnet sich dann durch die Multiplikation des jährlich verbleibenden Substanzwertes mit den anteiligen Kosten der Tragschicht.

Auch ohne Berücksichtigung der Verzinsung weist der Wertverzehr der Asphalttragschicht aufgrund der Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung keinen linearen sondern einen progressiven Verlauf auf. Da der Verkehr mit fortschreitender Nutzungsdauer exponentiell zunimmt, steigt im Umkehrschluss auch der Wertverzehr progressiv an (Abbildung 4-4 (links)). Die Verzinsung wirkt dem Wertverlust entgegen und kann ebenfalls einen Wertanstieg der Asphalttragschicht bewirken (vgl. Kapitel 4.1.2.1). Die Wertentwicklung der Asphalttragschicht unter Berücksichtigung eines Askontierungsprozentsatzes von 3 % ist beispielhaft in Abbildung 4-4 (rechts) dargestellt.

$$SW = \left(1 - \frac{\text{ertr.Aü}}{\text{ertr.Aü} + S_{RN}} \right) \cdot 100$$

Gl. 11

SW: Substanzwert [%]
 ertr. Aü: bereits ertragene Verkehrsbelastung [äquiv. 10-t Aü]
 S_{RN}: strukturelle Restsubstanz als noch ertragbare Anzahl an Äquivalenzachsen [äquiv. 10-t Aü]

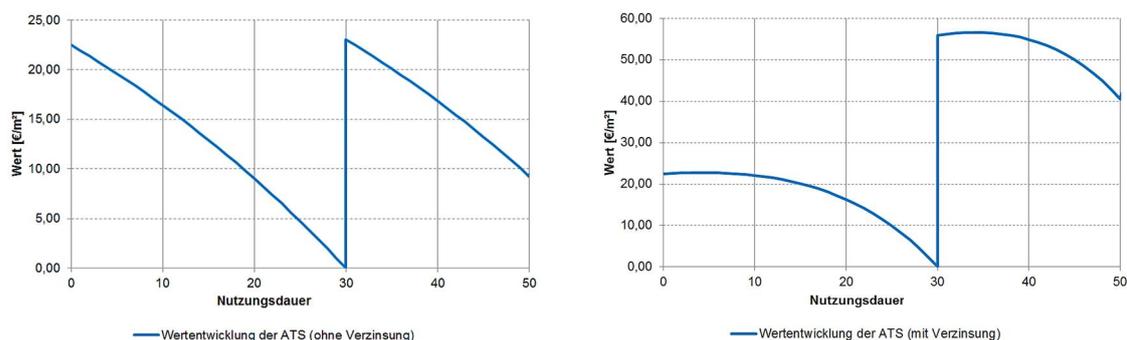


Abbildung 4-4: Beispiel für die Wertentwicklung einer Asphalttragschicht ohne Verzinsung (links) und mit Verzinsung von 3 % (rechts)

4.1.2.3 ASPHALTBINDERSCHICHT

Die Nutzungsdauer einer Asphaltbinderschicht lässt sich mit dem Vorgehen der RDO Asphalt nicht anhand einer Substanz – also ertragbaren Achsübergängen – bestimmen. Die Erhaltungspra-

xis zeigt, dass in der Vergangenheit ein Versagen der Asphaltbinderschicht vornehmlich aufgrund von Verformungen aus dem Verkehr auftrat, solche Schäden durch den Einbau von sehr standfesten Asphaltbinderemischgut (AC 22 B S) aber spürbar verringert werden konnten. Heutzutage können Auflösungsprozesse des Mischguts beispielsweise durch eindringendes Wasser als Hauptursache für das Versagen der Asphaltbinderschicht angesehen werden. Eine direkte Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung ist demnach nicht mehr eindeutig feststellbar.

Erschwerend kommt hinzu, dass sich auch mit dynamischen Versuchen wie dem Druck-Schwellversuch nach dem aktuellen Stand der Technik keine Nutzungsdauern in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung prognostizieren lassen. Die Ableitung einer Nutzungsdauer aus einem Potenzial in Form von ertragbaren äquivalenten 10-t Achsübergängen ist demnach wünschenswert, aber derzeit nicht umzusetzen.

Aus diesem Grund wird wie bei den Schichten ohne Bindemittel eine lineare Entwicklung des Wertes in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer in Jahren gewählt, die mittels Gl. 10 beschrieben werden kann. Durch das Verrechnen des Restnutzungsanteils (RNA) mit den anteiligen Maßnahmekosten der Binderschicht kann anschließend der Restwert an einem beliebigen Zeitpunkt ermittelt werden (beispielhaft dargestellt in Abbildung 4-5)

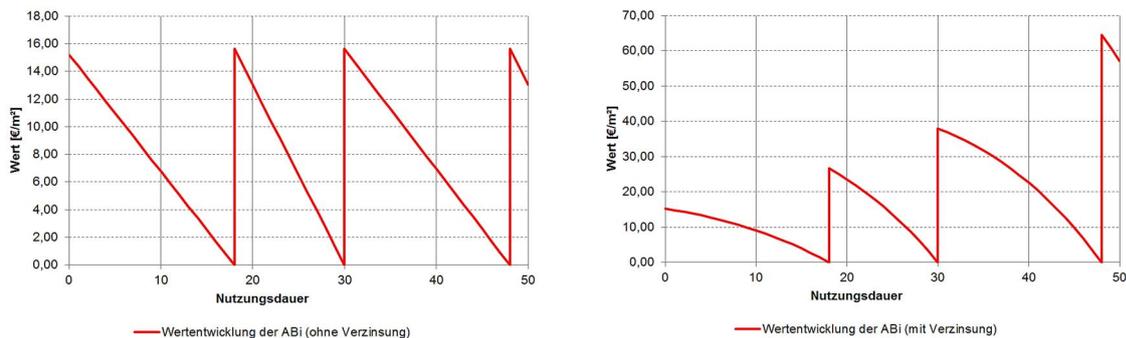


Abbildung 4-5: Beispiel für die Wertentwicklung einer Asphaltbinderschicht ohne Verzinsung (links) und mit Verzinsung von 3 % (rechts)

4.1.2.4 ASPHALTDECKSCHICHT

Grundsätzlich können die Restpotenziale und daraus abgeleitete Nutzungsdauern von Asphaltdeckschichten anhand einer Prognose der Entwicklung der Zustandsgrößen definierter Zustandsmerkmale bis zum Erreichen eines Eingreifwerts ermittelt werden. Als maßgebliche Zustandsgröße für die Beschreibung des funktionalen Verhaltens der Deckschicht wurde bislang stets die Spurrinntiefe angenommen, auch wenn sie in jüngerer Zeit nicht mehr eindeutig die häufigste Ursache des Nutzungsausfalls darstellt.

Um auf diese Weise Restpotenziale bestimmen zu können, müssen die maximal ertragbaren Achsübergänge oder entsprechende Verhaltensfunktionen jeder Schicht bekannt sein. Beides ist aktuell nicht bzw. nur mit deutlichen Einschränkungen verfügbar. Zwar werden derzeit durch die Ana-

lyse des Baugeschehens durch die BAST maximal ertragbare Achsübergänge abgeschätzt, entsprechende Ergebnisse lagen jedoch während der Bearbeitung der vorliegenden Arbeit nicht vor. Bis die Ergebnisse dieser Untersuchungen verfügbar sind, wird deshalb mit Annahmen auf der Grundlage veröffentlichter Nutzungsdauern gerechnet.

Dementsprechend wird wie bei der Asphaltbinderschicht eine lineare Wertentwicklung der Deckschicht gewählt, die sich gemäß Gl. 10 berechnet. Beispielhaft ist diese in Abbildung 4-6 links ohne und rechts mit Askontierung dargestellt.

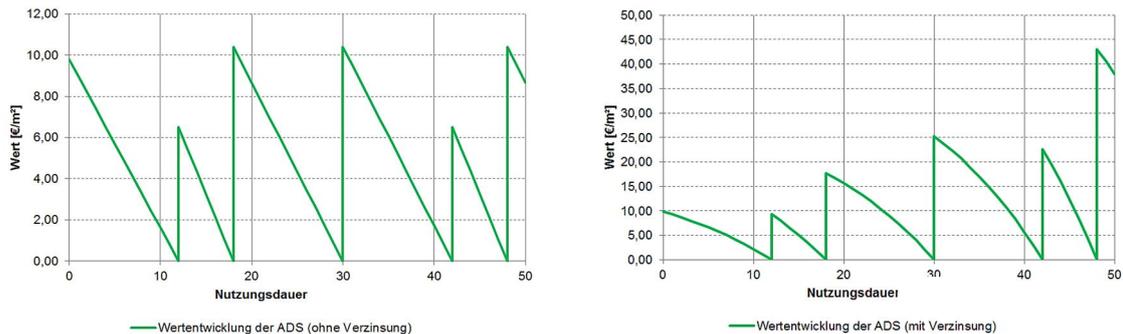


Abbildung 4-6: Beispiel für die Wertentwicklung einer Asphaltdeckschicht ohne Verzinsung (links) und mit Verzinsung von 3 % (rechts)

4.1.3 WERTENTWICKLUNG DER SONSTIGEN ANLAGENTEILE

Auch die sonstigen Anlagenteile unterliegen einem Wertverlust durch ihre Nutzung und weisen zum Bewertungszeitpunkt einen gewissen Restwert auf, der bei der Kalkulation der Lebenszykluskosten berücksichtigt werden muss. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass Erhaltungsmaßnahmen an den sonstigen Anlagenteilen unabhängig von denen am Straßenoberbau vollzogen werden. Eine Ausnahme bilden hierbei die Straßenmarkierungen, deren Erneuerung Bestandteil aller ermittelten Maßnahmekosten ist.

Anhand der bekannten Kosten sowie der Nutzungsdauern kann die notwendige Erhaltung der sonstigen Anlagenteile prognostiziert und auf den jeweiligen Maßnahmezeitpunkt askontiert werden. Da bis dato keine weiteren Erkenntnisse vorliegen, wird für die sonstigen Anlagenteile ein linearer Wertverlust in Abhängigkeit von ihrer Nutzungsdauer angenommen (Gl. 10). Die Wertentwicklung erfolgt unter Berücksichtigung einer Askontierung von 3 %. Beispielhaft ist dies in Abbildung 4-7 dargestellt.

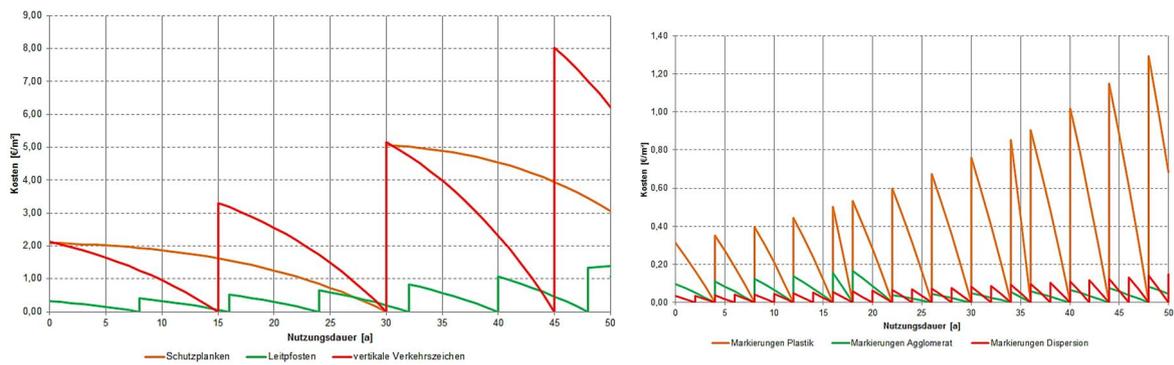


Abbildung 4-7: Beispiel für die Wertentwicklung der passiven Schutzeinrichtungen, Leitpfosten und vertikalen Verkehrszeichen (links) sowie der horizontalen Verkehrszeichen (rechts) inklusive einer Verzinsung von 3 %.

4.1.4 BERECHNUNG DER LEBENSZYKLUSKOSTEN

Um die Lebenszykluskosten bis zu einem definierten Bewertungszeitpunkt berechnen zu können, müssen die Kosten für die Herstellung bzw. die grundlegende Erneuerung des Oberbaus, die kumulierten Erhaltungsaufwendungen (auch die der sonstigen Anlagenteile) sowie der verbleibende Restwert berücksichtigt und askontiert werden. Die kumulierten Erhaltungskosten während des Betrachtungszeitraums ergeben sich als Zeitwert aus der Summe der askontierten Kosten für die jeweiligen Erhaltungsmaßnahmen (Gl. 12). Auch die Berechnung des Zeitwertes der sonstigen Anlagenteile erfolgt gemäß diesem Ansatz.

$$ZW_{i,EK} = \sum_{a=1}^n \left(EK_{a,c} \cdot \left(1 + \frac{q}{100} \right)^{ND_{i=0,a}} \right)$$

Gl. 12

mit:

- $ZW_{i,EK}$ Zeitwert der Kosten für die Erhaltungsmaßnahmen zum Bewertungszeitpunkt i
- $EK_{a,c}$ Kosten für eine Erhaltungsmaßnahme a an der/den Schicht(en) c
- q Askontierungsprozentsatz (3 %)
- $ND_{i=0;a}$ Nutzungsdauer ab dem Neubau oder der grundhaften Erneuerung ($i=0$) bis zur Erhaltungsmaßnahme a

Um die Lebenszykluskosten zu berechnen, werden die während des Betrachtungszeitraums anfallenden Kostenfaktoren für die Herstellung und die Erhaltung des Oberbaus sowie ggf. der sonstigen Anlagenteile mit dem verbleibenden Restwert zum Bewertungszeitpunkt i verrechnet. Demnach wird der verbleibende Wert des Oberbaus $W_{i,OB}$ als negative Kosten oder „Guthaben“ verstanden und die kumulierten Kosten um diesen Betrag vermindert. Die Lebenszykluskosten berechnen sich gemäß Gl. 13. Der Zusammenhang zwischen den Kosten, dem Restwert und den daraus resultierenden Lebenszykluskosten ist in Abbildung 4-8 noch einmal visualisiert.

$$LZK = (ZW_{i,OB} + ZW_{i,EK} - W_{i,OB})$$

Gl. 13

mit:
 LZK Lebenszykluskosten
 $ZW_{i,OB}$ Zeitwert der Kosten des Oberbaus zum Bewertungszeitpunkt i
 $ZW_{i,EK}$ Zeitwert der Kosten für die Erhaltungsmaßnahmen zum Bewertungszeitpunkt i
 $W_{i,OB}$ Gesamtwert des zu bewertenden Oberbaus zum Bewertungszeitpunkt

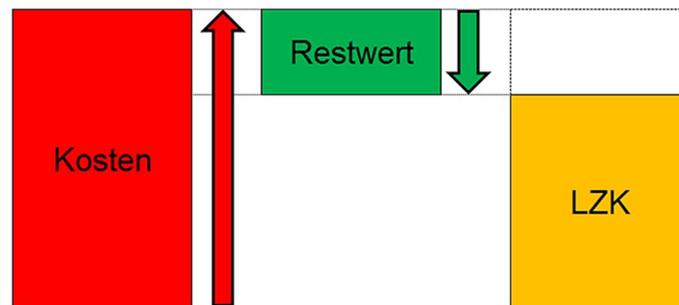


Abbildung 4-8: Zusammenhang zwischen Kosten, Restwert und Lebenszykluskosten (LZK)

4.2 AUTOBAHNEN

Bei Autobahnen ist die Berechnung von Lebenszykluskosten aufwendiger als bei Straßenkategorien mit einbahnigem Querschnitt. Dies liegt darin begründet, dass mehr Betrachtungsfälle – beispielsweise die von einer Maßnahme betroffenen Fahrstreifen und die hierbei notwendige Sicherung der Arbeitsstelle – untersucht werden müssen, denn es ist in der Praxis üblich, dass Erhaltungsmaßnahmen nicht immer die gesamte Richtungsfahrbahn umfassen, sondern im Regelfall eine nach Fahrstreifen getrennte Erhaltung erfolgt. Besonders der stark befahrene Hauptfahrstreifen wird oftmals unabhängig von den restlichen Fahrstreifen erhalten.

4.2.1 LEBENSZYKLUSKOSTEN

In Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 sind die berechneten jährlichen Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2- bzw. 3-streifiger Richtungsfahrbahn aufgeführt. Den Berechnungen liegen die Eingangsparameter aus Kapitel 3 zugrunde. Die aus den dort festgelegten Nutzungsdauern der einzelnen Schichten abgeleiteten Erhaltungsstrategien sind in Abbildung 4-9 bis Abbildung 4-14 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Lebenszykluskosten mit steigender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht sowohl bei Autobahnen mit 2-streifiger als auch 3-streifiger Richtungsfahrbahn tendenziell sinken. Dies ist eine erwartungskonforme Entwicklung, da mit steigender Lebensdauer der am tiefsten in der Befestigung liegenden gebundenen Schicht (hier die Asphalttragschicht) weniger kostenintensive Erhaltungsmaßnahmen notwendig werden. Fällt die Nutzungsdauer der Asphalttragschicht unter die der darüber liegenden Schichten (Betrachtungsfall $ND_{ATS} = 10$ Jahre), steigen die Kosten im Vergleich zu den anderen Betrachtungsfällen überproportional an, da jedes Mal

der gesamte gebundene Oberbau neu hergestellt werden muss. Dies stellt eine extrem unwirtschaftliche Erhaltungsstrategie ohne Optimierungspotenzial dar.

Tabelle 4-1: Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn

| Nutzungsdauer der ATS (Hauptfahrstreifen) [a] | Lebenszykluskosten pro Jahr [€/m ²] | |
|--|---|--------------------------|
| | ohne sonst. Anlagenteile | mit sonst. Anlagenteilen |
| 10 | 20,12 | 21,03 |
| 20 | 11,81 | 12,73 |
| 30 | 8,87 | 9,78 |
| 40 | 7,65 | 8,56 |
| 50 | 7,65 (7,74) | 8,56 (8,60) |
| 65 | 6,01 | 6,92 |

() tatsächlich berechneter Wert (vgl. Kapitel 4.2.3)

Tabelle 4-2: Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn

| Nutzungsdauer der ATS (Hauptfahrstreifen) [a] | Lebenszykluskosten pro Jahr [€/m ²] | |
|--|---|--------------------------|
| | ohne sonst. Anlagenteile | mit sonst. Anlagenteilen |
| 10 | 18,93 | 19,53 |
| 20 | 10,94 | 11,85 |
| 30 | 7,99 | 8,90 |
| 40 | 6,88 | 7,79 |
| 50 | 6,88 (7,01) | 7,79 (7,87) |
| 65 | 5,29 | 6,20 |

() tatsächlich berechneter Wert (vgl. Kapitel 4.2.3)

Die Lebenszykluskosten bei Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile sind unabhängig von der Lebensdauer der Asphalttragschicht immer höher als ohne eine solche Berücksichtigung, da zusätzliche Aufwendungen in die Berechnungen einbezogen werden.

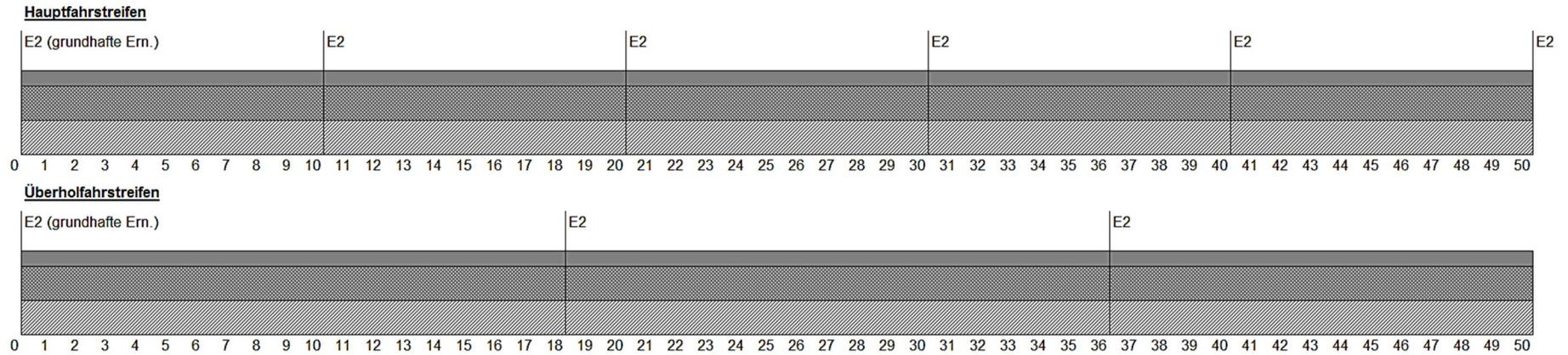


Abbildung 4-9: Erhaltungstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren auf dem Hauptfahrstreifen

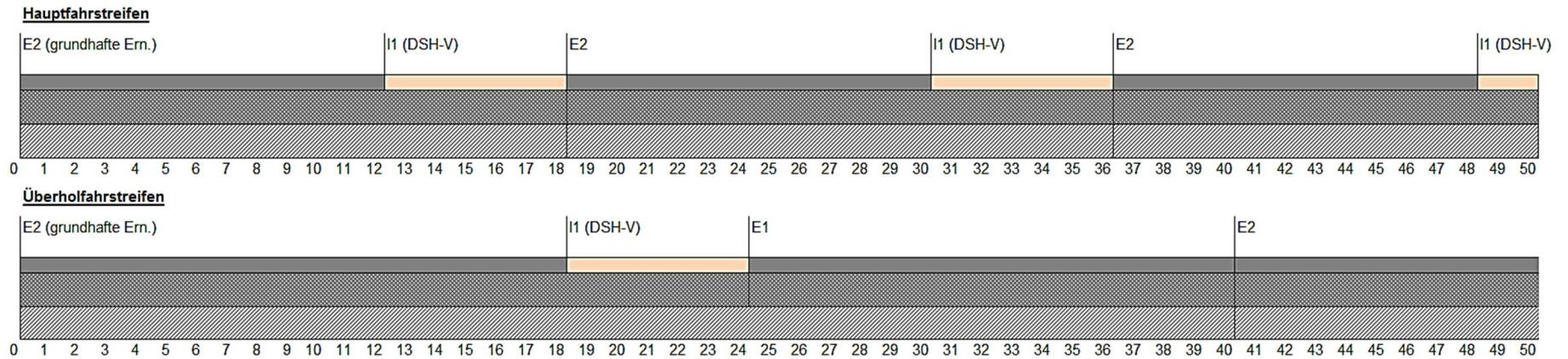


Abbildung 4-10: Erhaltungstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 20 Jahren auf dem Hauptfahrstreifen

LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSEN IN ASPHALTBAUWEISE

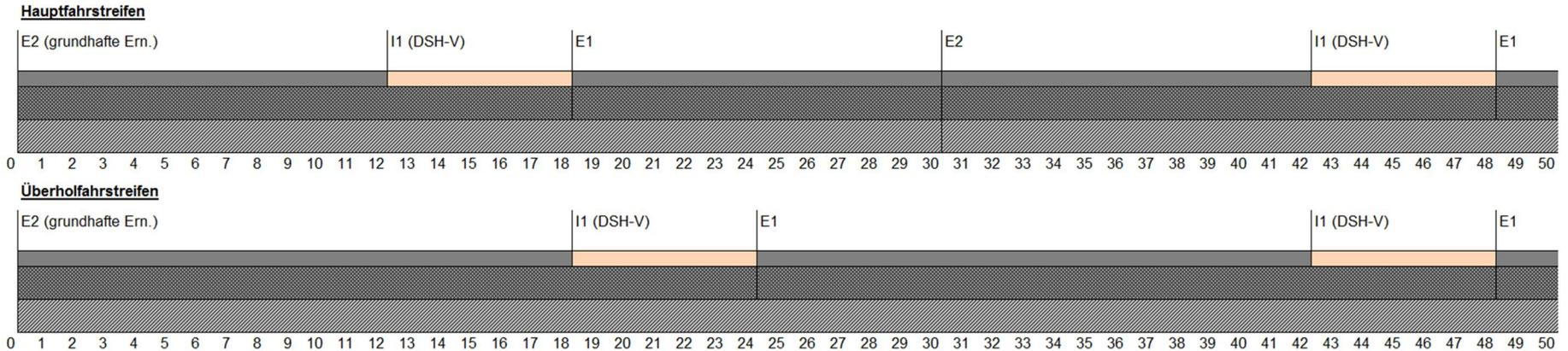


Abbildung 4-11: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren auf dem Hauptfahrstreifen

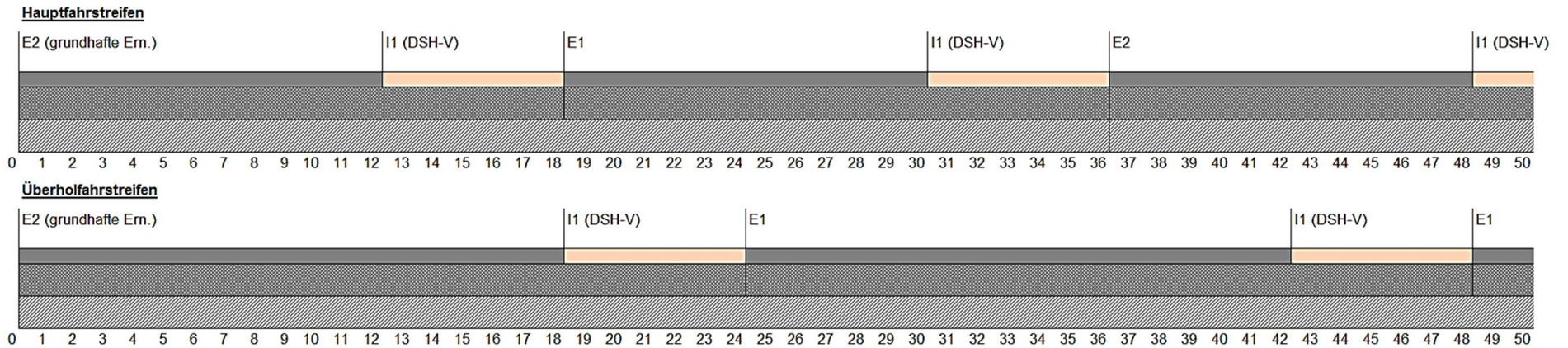


Abbildung 4-12: Erhaltungsstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 40 Jahren auf dem Hauptfahrstreifen

LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSEN IN ASPHALTBAUWEISE

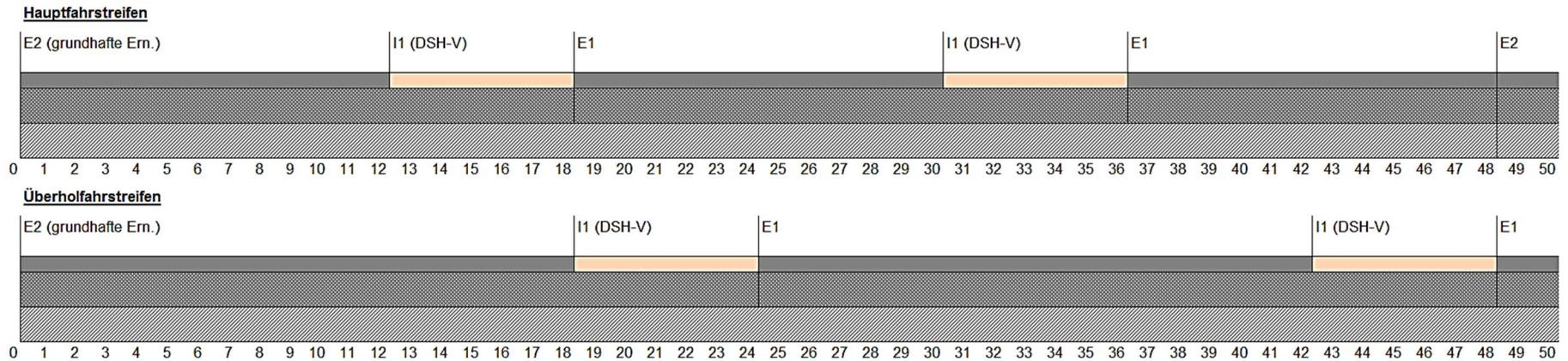


Abbildung 4-13: Erhaltungstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren auf dem Hauptfahrstreifen

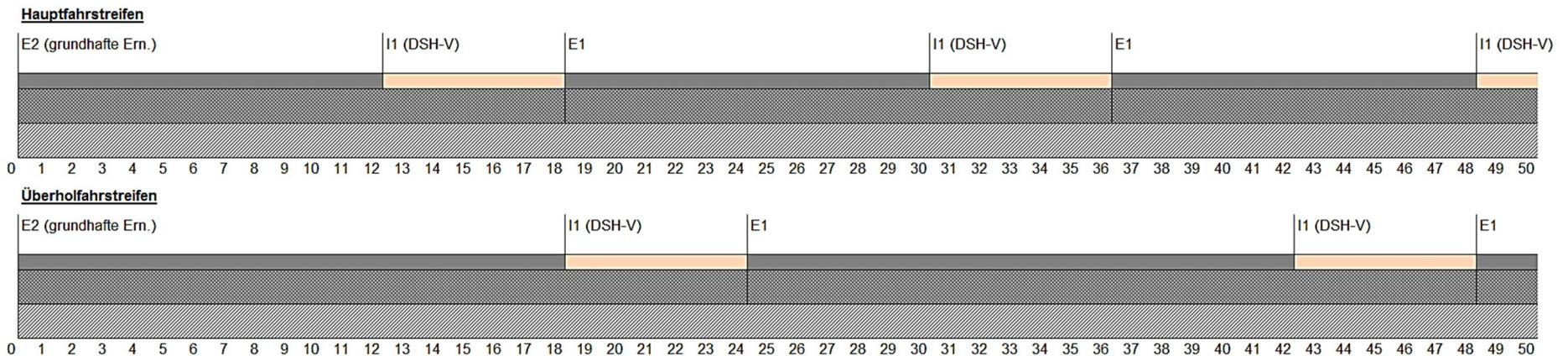


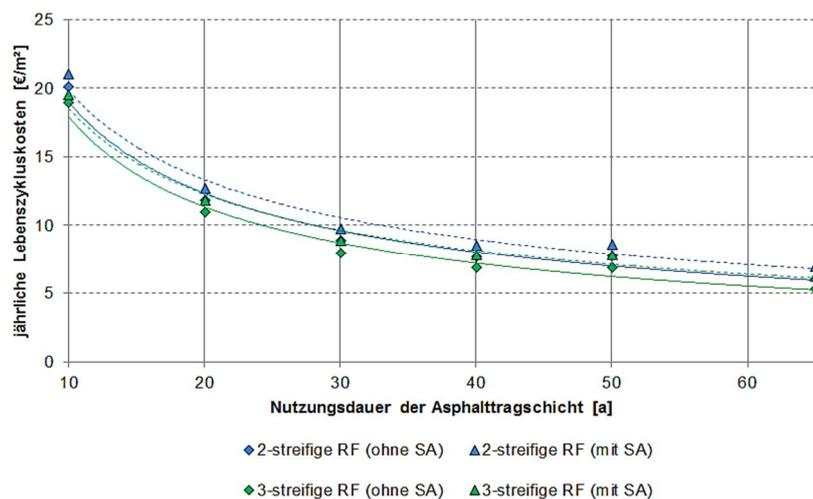
Abbildung 4-14: Erhaltungstrategie für Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 65 Jahren auf dem Hauptfahrstreifen

4.2.2 EINFLUSS DER NUTZUNGSDAUER DER ASPHALTTRAGSCHICHT

Im Folgenden werden zunächst die in Kapitel 4.2.1 aufgeführten Lebenszykluskosten für Autobahnen mit 2-streifiger und 3-streifiger Richtungsfahrbahn grafisch dargestellt (Abbildung 4-15), um die Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht zu untersuchen.

Die mit steigender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht zunehmend degressive Entwicklung der Lebenszykluskosten bei allen Betrachtungsfällen ist erwartungskonform. Die Kosten entwickeln sich immer mehr hin zu den „Sowieso-Kosten“, also den Kostenanteilen, die sich unabhängig von der Nutzungsdauer der Tragschicht nicht vermeiden bzw. weiter reduzieren lassen. Dies betrifft besonders die Aufwendungen für die Sicherung der Arbeitsstelle sowie das Einrichten und Vorhalten der Baustelleneinrichtung, die eine gewisse Kostenuntergrenze vorgeben.

Wenn auch nicht direkt aus den Kurven zu erkennen, kann auch eine Kostenobergrenze angenommen werden. Liegt die Nutzungsdauer der Tragschicht unter der der Deckschicht, kommen einzig eine Erneuerung der gebundenen Befestigung als Maßnahmen zur Erhaltung des Oberbaus in Frage. Dies stellt die unwirtschaftlichste aller möglichen Erhaltungsstrategien dar und verursacht dementsprechend die höchsten Lebenszykluskosten. Zwar werden die Kosten bei weiter sinkenden Nutzungsdauern der Asphalttragschicht stetig zunehmen, es wird für die weiteren Berechnungen jedoch angenommen, dass immer eine Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von mindestens 10 Jahren erreicht wird. Die Lebenszykluskosten dieses Betrachtungsfalls stellen demnach die theoretische Obergrenze dar.



SA: sonstige Anlagenteile

Abbildung 4-15: Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Um einen Kurvenverlauf mit fester Ober- und Untergrenze funktionell zu beschreiben, eignen sich SIGMOID-Funktionen. Diese lassen sich nach dem in Gl. 14 angegebenen Ansatz beschreiben. Um eine möglichst hohe Allgemeingültigkeit zu erreichen, werden die Ergebnisse im Weiteren als relative Kosten in Prozent dargestellt. Als Bezugspunkt dienen dabei die Lebenszykluskosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (entspricht demnach 100 %).

$$f_{k,j}(ND_{ATS,i}) = LZK_{min,j} + \frac{(LZK_{max,j} - LZK_{min,j})}{(1 + m \cdot ND_{ATS,i}^b)}$$

Gl. 14

mit:

- $f_{k,j}(ND_{ATS,i})$ Entwicklung der Lebenszykluskosten der Straßenkategorie k für den Betrachtungsfall j in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht ab Neubau/grundhafter Erneuerung bis zum Betrachtungszeitpunkt i [%]
- $LZK_{min,k,j}$ minimale Lebenszykluskosten der Straßenkategorie k für den Betrachtungsfall j (relativ, bezogen auf die Lebenszykluskosten bei einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren)
- $LZK_{max,k,j}$ maximale Lebenszykluskosten der Straßenkategorie k für den Betrachtungsfall j (relativ, bezogen auf die Lebenszykluskosten bei einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren)
- $ND_{ATS,i}$ Nutzungsdauer der Asphalttragschicht vom Neubau/grundhafter Erneuerung bis zum Betrachtungszeitpunkt i
- m, b Regressionsparameter

Aufgrund des somit bekannten formalen Zusammenhangs zwischen der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht und der prozentualen Entwicklung der Lebenszykluskosten, kann in einem weiteren Schritt ein Verfahren erarbeitet werden, um auch konkrete Lebenszykluskosten von Autobahnen bei bekannter oder angenommener Nutzungsdauer der Asphalttragschicht abzuschätzen. Hierzu werden die mittels Gl. 14 ermittelten Funktionen mit den tatsächlichen Lebenszykluskosten des zugehörigen Betrachtungsfalls bei einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren multipliziert (Gl. 15).

$$LZK_{k,j}(ND_{ATS,i}) = f_{k,j}(ND_{ATS,i}) \cdot LZK_{k,j,ND(ATS)=30}$$

Gl. 15

mit:

- $LZK_{k,j}(ND_{ATS,i})$: jährliche Lebenszykluskosten der Straßenkategorie k (A=Autobahnen, B=Bundesstraßen, L=Landesstraßen) für den Betrachtungsfall j in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht ab Neubau/grundhafter Erneuerung bis zum Betrachtungszeitpunkt i [%]
- $f_{k,j}(ND_{ATS,i})$ Entwicklung der Lebenszykluskosten (Gl. 14)
- $LZK_{k,j,ND=30}$ Lebenszykluskosten der Straßenkategorie k für den Betrachtungsfall j bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren

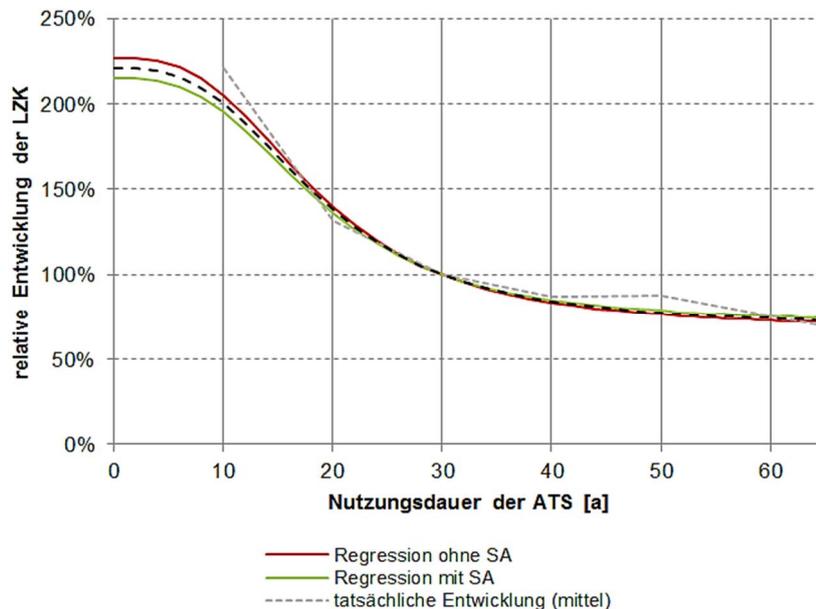
Die mittels Gl. 14 bestimmten Sigmoid-Funktionen für Autobahnen mit 2- und 3-streifiger Richtungsfahrbahn sind in Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17 dargestellt. Die zugehörigen Funktionsparameter können Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 entnommen werden. Die graue Linie visualisiert jeweils die tatsächlich berechneten Lebenszykluskosten.

Tabelle 4-3: Parameter der Sigmoid-Funktionen für Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn

| Parameter | 2-streifige Richtungsfahrbahn | | Mittelwert |
|------------------|-------------------------------|----------|---------------|
| | ohne SA | mit SA | |
| $LZK_{\min,A,j}$ | 0,72 | 0,74 | 0,73 |
| $LZK_{\max,A,j}$ | 2,05 | 1,95 | 2,00 |
| m | 1,90E-04 | 1,89E-04 | 1,89E-04 |
| b | 2,9220 | 2,9241 | 2,9230 |

Tabelle 4-4: Parameter der Sigmoid-Funktionen für Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn

| Parameter | 3-streifige Richtungsfahrbahn | | Mittelwert |
|------------------|-------------------------------|-----------|------------------|
| | ohne SA | mit SA | |
| $LZK_{\min,A,j}$ | 0,69 | 0,73 | 0,71 |
| $LZK_{\max,A,j}$ | 2,20 | 2,05 | 2,12 |
| m | 5,801E-05 | 5,731E-05 | 5,766E-05 |
| b | 3,2795 | 3,2746 | 3,2770 |



SA: sonstige Anlagenteile

Abbildung 4-16: Relative Entwicklung der Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

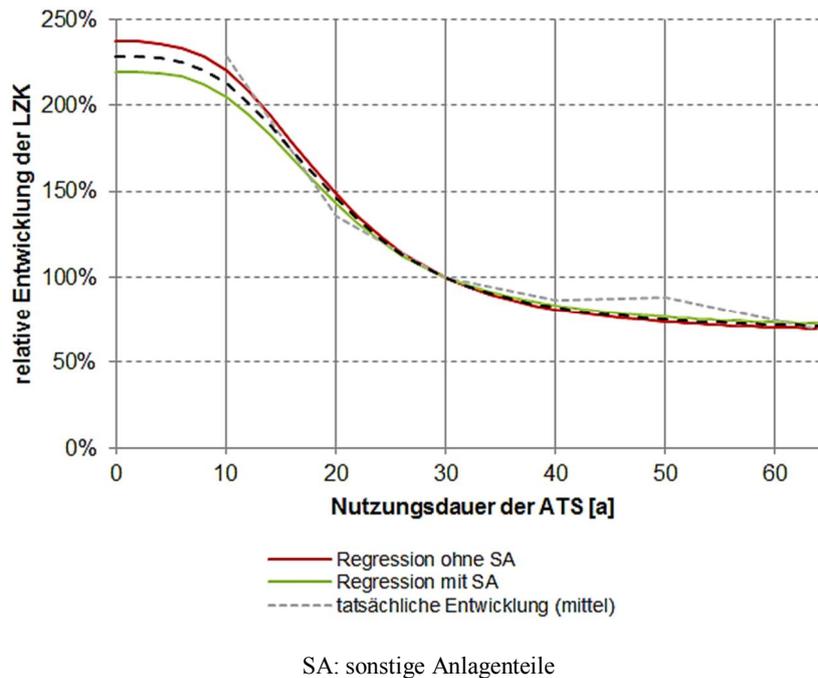
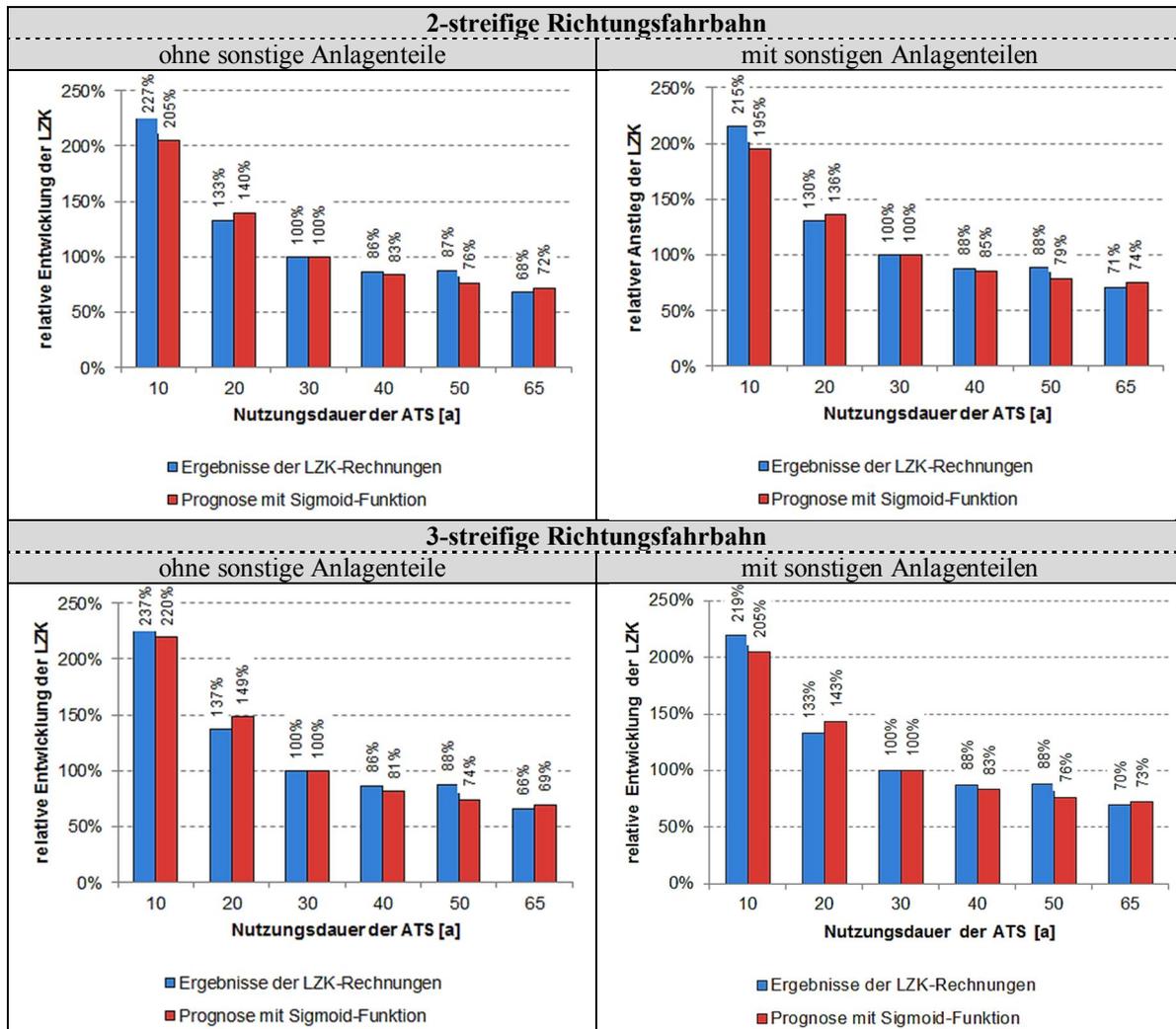


Abbildung 4-17: Relative Entwicklung der Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Sensitivitätsuntersuchungen zeigen, dass die Regressionsfunktionen die tatsächlichen Lebenszykluskosten weitestgehend gut abbilden (siehe Tabelle 4-5). Bei Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn treten die größten Abweichungen bei einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren auf. Hier prognostizieren die Regressionsfunktionen im Mittel rund 21 % niedrigere Lebenszykluskosten, als sie tatsächlich berechnet wurden. Bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren liegen die durch die Regression berechneten Kosten hingegen etwa 7 % über den tatsächlichen Kosten. Steigt die Nutzungsdauer der Asphalttragschicht auf 40 bzw. 50 Jahre, geben die Regressionsfunktionen im Mittel 3 bzw. 10 % niedrigere Werte aus als tatsächlich berechnet. Bei einer Nutzungsdauer von 65 Jahren ermitteln die Funktionen hingegen etwa 4 % höhere Kosten.

Bei Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn verhält es sich ähnlich. Bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren unterschätzen die Regressionsfunktionen die berechneten Lebenszykluskosten um etwa 14 bis 17 %, während bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren durch die Funktionen rund 10 bis 12 % höhere Lebenszykluskosten prognostiziert werden. Bei weiter steigender Lebensdauer der Asphalttragschicht auf 40 bzw. 50 Jahre errechnen die Sigmoid-Funktionen hingegen wiederum im Mittel etwa 5 bis 13 % niedrigere Werte. Bei der maximalen Nutzungsdauer der Tragschicht von 65 Jahren liegen die tatsächlich berechneten Lebenszykluskosten 3 % unter den prognostizierten Werten.

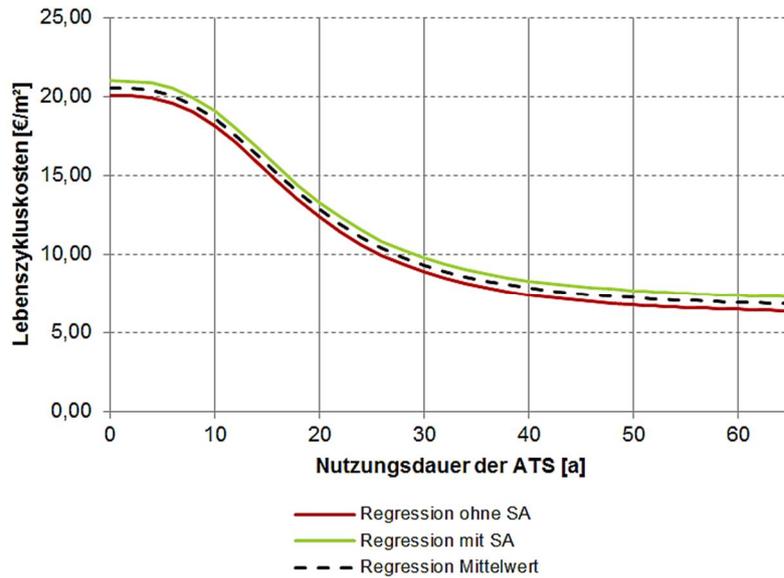
Tabelle 4-5: Relativvergleich zwischen den tatsächlich berechneten und mittels Sigmoid-Funktionen prognostizierten Lebenszykluskosten von Autobahnen, normiert auf die Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren



Kombiniert man gemäß Gl. 15 die prozentuale Entwicklung der Kosten mit den berechneten Lebenszykluskosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (Tabelle 4-6), ergeben sich die in Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19 dargestellten Verläufe. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die tatsächliche Entwicklung der Lebenszykluskosten voraussichtlich einen weniger stetigen Verlauf aufweist, als es die anhand der Funktion ermittelten Ergebnisse unterstellen. Dies liegt in dem Umstand begründet, dass nicht für jede Nutzungsdauer der Asphalttragschicht eine individuelle bzw. wirtschaftlich ideale Erhaltungsstrategie entwickelt werden kann. Für gewisse Kombinationen lassen sich besonders wirtschaftlich abgestimmte Maßnahmentearten und -folgen realisieren, während bei ungünstigen Konstellationen ggf. hohe Wertverluste in Kauf genommen werden müssen. Dies bewirkt lokale Unstetigkeitsstellen im Kurvenverlauf, was beispielsweise die aus Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17 zu entnehmenden Kurven der tatsächlichen Entwicklung der Lebenszykluskosten belegen.

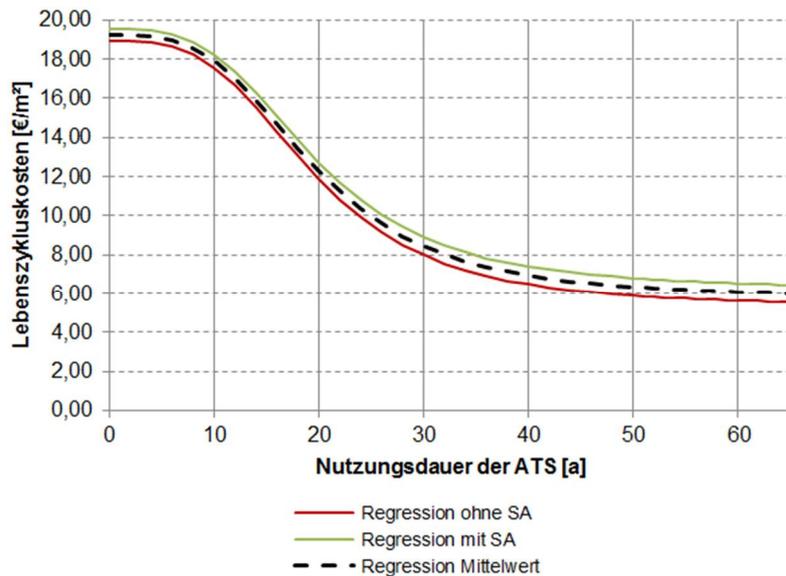
Dies gilt sinngemäß auch für die anderen untersuchten Straßenkategorien.

Die zugehörigen Einzelwerte der in Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19 dargestellten Kurven können Anhang III entnommen werden.



SA: sonstige Anlagenteile

Abbildung 4-18: Mittels Schätzverfahren berechnete jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht



SA: sonstige Anlagenteile

Abbildung 4-19: Mittels Schätzverfahren berechnete jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Die jährlichen Lebenszykluskosten von Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren sind in Tabelle 4-6 dargestellt.

Tabelle 4-6: Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (Faktor $LZK_{A,j,ND(ATS)=30}$)

| Variante j | $LZK_{A,j,ND(ATS)=30}$ | |
|----------------------------|------------------------|----------------|
| | 2-streifige RF | 3-streifige RF |
| ohne sonstige Anlagenteile | 8,87 | 7,99 |
| mit sonstigen Anlagenteile | 9,78 | 8,90 |
| Mittelwert | 9,33 | 8,45 |

Ein wichtiger Sachverhalt bleibt dabei allerdings bis dato unberücksichtigt. So können die sehr hoch angesetzten Nutzungsdauern der Asphalttragschicht (50 und 65 Jahre) voraussichtlich nur realisiert werden, wenn entweder hochwertigere Materialien – beispielsweise polymermodifizierte Bitumen – verwendet werden, oder die Einbaudicke erhöht wird. Beides wirkt sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit aus, sodass entsprechende Betrachtungsfälle derzeit zu positiv bewertet werden.

Um sich diesem Problem zumindest in einem ersten Schritt anzunähern, wurde vereinfacht angenommen, dass der gewählte Oberbau für Autobahnen mit einer gebundenen Gesamtdicke von 34 cm unter den gegebenen Randbedingungen eine Nutzungsdauer von 30 Jahren aufweist. Mittels rechnerischer Dimensionierung wurde dann berechnet, welche Dicke die Asphalttragschicht bei unveränderten Eingangsparametern aufweisen müsste, um eine Nutzungsdauer von 50 bzw. 65 Jahren zu ermöglichen (Tabelle 4-7).

Um eine Nutzungsdauer von 50 Jahren zu erreichen, müsste die Asphalttragschicht gegenüber der Standardbauweise etwa 4 cm dicker eingebaut werden, um eine Nutzungsdauer von 65 Jahren zu erreichen sogar um 6 cm. Bezieht man dies auf die Einbaukosten der Asphalttragschicht ergeben sich pro Quadratmeter etwa 18 bis 27 % höhere Kosten. Die Erhaltungsaufwendungen für Maßnahmen der grundhaften Erneuerung sowie der Erneuerung des gebundenen Oberbaus würden sich somit spürbar erhöhen. Die Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten müssten in einem weiteren Schritt dezidiert untersucht werden, was in dieser Arbeit jedoch nicht mehr realisiert werden konnte.

Tabelle 4-7: Berechnete Einbaudicke der Asphalttragschichten bei verschiedenen Nutzungsdauern

| Nutzungsdauer der ATS | benötigte Dicke der ATS | Mehrdicke |
|--------------------------|----------------------------|-----------|
| [a] | [cm] | [cm] |
| 30 (Referenz) | 22 | - |
| 50 | 26 | + 4 |
| 65 | 28 | + 6 |

Die Möglichkeit zur Reduzierung der Dicke der Asphalttragschicht bei sehr geringen Nutzungsdauern wurde nicht näher untersucht, da dieser Fall für die öffentliche Hand in der Regel nicht relevant ist. Im Zuge neuer Vertragsformen (z.B. PPP) kann eine solche Fragestellung – besonders gegen Ende der Vertragslaufzeit – aber durchaus an Bedeutung gewinnen.

Die oben beschriebene Problematik lässt sich ohne weitere Erkenntnisse jedoch nicht befriedigend auf Basis der Variation der Einbaudicke der Tragschicht lösen. Der Autor dieser Arbeit vertritt die Meinung, dass die Konzeption eines ermüdungsbeständigen und damit auf die Substanz abgestimmten Mischguts durchaus signifikante Erhöhungen der Nutzungsdauer einer Straßenbefestigung bewirken kann, ohne dass hierbei Mehrkosten entstehen. Welches Potenzial eine solche Optimierung aufweist und ab welchem Zeitpunkt tatsächlich eine Anpassung der Kosten erfolgen muss, ist durch weitere Forschungsarbeit zu klären.

4.2.3 EINFLUSS DER VERZINSUNG

Auffällig ist, dass sowohl bei Autobahnen mit 2-streifiger als auch mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn bei einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren geringfügig höhere Lebenszykluskosten berechnet werden als bei einer maximalen Lebensdauer der Tragschicht von nur 40 Jahren. Um diese zunächst nicht plausibel erscheinende Entwicklung nachzuvollziehen, muss man die gewählten Erhaltungsstrategien sowie die Verzinsung bzw. den Askontierungsprozentsatz einer genaueren Betrachtung unterziehen.

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich dabei auf den Hauptfahrstreifen, da die Erhaltungsstrategien der restlichen Fahrstreifen während des Betrachtungszeitraums identisch sind. So wurde bei einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren eine Erhaltungsstrategie entwickelt, bei der sich die mögliche Lebensdauer der Asphaltbinderschicht nach der Erneuerung der Decke zum Zeitpunkt $t = 36$ nicht voll ausnutzen lässt. Die Binderschicht muss im Zuge der Erneuerung des gebundenen Oberbaus bei $t = 48$ bereits 12 Jahre später erneut ausgetauscht werden, obwohl sie gemäß den Festlegungen noch 6 Jahre in der Befestigung verbleiben könnte. Demzufolge wird hier ein nicht unerheblicher Wert vernichtet, was sich wiederum negativ auf die Lebenszykluskosten auswirkt.

Wie oben bereits erwähnt, bedingt die gewählte Erhaltungsstrategie eine Erneuerung des gebundenen Oberbaus nach 48 Jahren, also kurz vor Ende des Betrachtungszeitraums ($t = 50$). Durch den Askontierungsprozentsatz von 3 % stellt dies ausgehend vom Zeitpunkt $t = 0$ eine extrem teure Erhaltungsmaßnahme dar. Ähnliche Erkenntnisse liegen auch aus PPP-Projekten vor, bei denen aus diesem Grund aufwendige und teure Maßnahmen nach Möglichkeit früh realisiert werden.

In der Literatur (z.B. [71]) wird häufig eine mittlere Inflationsrate von 3 % aufgeführt. Hieraus resultiert der in dieser Arbeit gewählte Askontierungsprozentsatz, der auch häufig in der Praxis verwendet wird. Betrachtet man die aktuellen Teuerungsraten (Juli 2015) gemäß den Angaben der

Deutschen Bundesbank⁵ ergeben sich hingegen tendenziell niedrigere Werte, die sich meist im Bereich von 1-2 % befinden. Um den Einfluss der Inflation – also der Verteuerung von in der Zukunft liegenden Investitionen – auf die Lebenszykluskosten zu untersuchen, wurden diese noch einmal unter Beibehaltung der Erhaltungsstrategie jedoch einer Askontierung von nur 1 % sowie ohne Verzinsung berechnet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind beispielhaft in Abbildung 4-20 für Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn ohne Berücksichtigung der Kosten für die sonstigen Anlagenteile dargestellt. Sinngemäß gelten die folgenden Erkenntnisse jedoch auch für 3-streifige Richtungsfahrbahnen sowie die anderen Straßenkategorien.

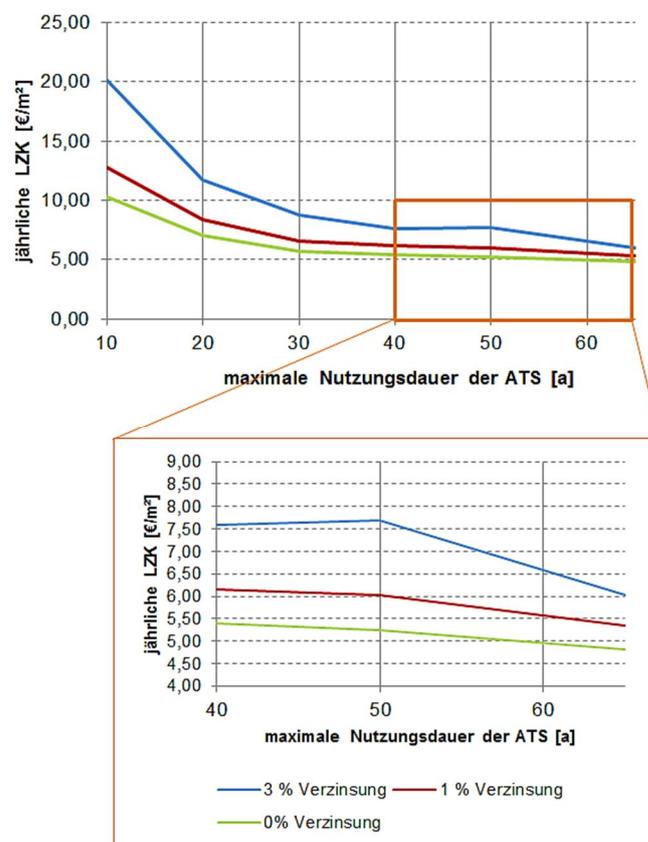


Abbildung 4-20: Einfluss der Verzinsung auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn ohne Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile

Betrachtet man die Kosten bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 40 und 50 Jahren im Detail, fällt auf, dass der Einfluss einer weit in der Zukunft liegenden Erhaltungsmaßnahme auf die Lebenszykluskosten mit sinkender Verzinsung abnimmt. Das ist nachvollziehbar, da eine geringe Teuerungsrate zukünftig zu günstigeren Maßnahmen führt. Schon bei einer

⁵ <http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/statistiken.html> (abgerufen am 12.07.2015)

Verzinsung von nur noch 1 % ist zu erkennen, dass die Lebenszykluskosten zwischen der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren trotz ungünstiger Erhaltungsstrategie (s.o.) nicht mehr ansteigen, sondern weiter sinken. Dieser Effekt verstärkt sich noch einmal, wenn ganz auf eine Askontierung verzichtet wird.

Die zusätzlichen Analysen zeigen demnach, dass sowohl die Erhaltungsstrategie als auch in besonderem Maße die Höhe der Verzinsung Einfluss auf die Entwicklung der Lebenszykluskosten haben. Demzufolge kann es durchaus sein, dass sich trotz höherer Nutzungsdauer der Tragschicht höhere Lebenszykluskosten ergeben. Für die weiteren Berechnungen wird zwar eine praxisübliche Teuerungsrate von 3 % angenommen, die in diesem Kapitel gezeigten Auswirkungen sollten jedoch im Auge behalten und ggf. weiter konkretisiert werden.

4.2.4 EINFLUSS DER KOSTEN FÜR DIE ERHALTUNG DER SONSTIGEN ANLAGENTEILE

In Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 ist der Einfluss der Aufwendungen für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2- und 3-streifiger Richtungsfahrbahn dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei Berücksichtigung der Kosten für die sonstigen Anlagenteile die jährlichen Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht um rund 4,5 bis 15 % (2-streifige Richtungsfahrbahn) bzw. 3 bis 17 % (3-streifige Richtungsfahrbahn) erhöhen, was durchaus eine bedeutende Größenordnung darstellt.

Es kann weiterhin festgestellt werden, dass der Einfluss der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten mit steigender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht tendenziell zunimmt. Dies ist nachvollziehbar, denn die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile wird mit Ausnahme der Straßenmarkierungen gänzlich unabhängig vom Straßenoberbau vollzogen. Die resultierenden Lebenszykluskosten weisen demzufolge nur eine geringe Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht auf und entsprechende Aufwendungen während des Betrachtungszeitraums sind unabhängig vom Betrachtungsfall immer etwa gleich hoch. Gleichzeitig nehmen die Lebenszykluskosten am eigentlichen Oberbau mit zunehmender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht bis zu einem gewissen Grenzwert kontinuierlich ab, der prozentuale Anteil der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile steigt folglich. Da sich die Lebenszykluskosten des Oberbaus jedoch einer gewissen Untergrenze annähern („Sowieso-Kosten“) bleibt der prozentuale Einfluss der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten ab einem gewissen Zeitpunkt nahezu konstant.

Dies zeigt sich auch, wenn man die Erhöhung der Lebenszykluskosten bei Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile funktional beschreibt (Abbildung 4-23). Bei Approximation mittels einer Potenzfunktion lässt sich der degressive Verlauf gut abbilden. Die Parameter der Mittelwertfunktion sind in der Abbildung dargestellt.

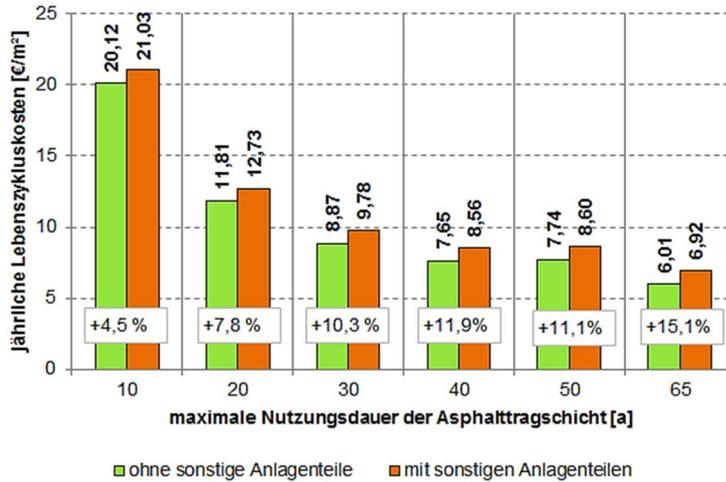


Abbildung 4-21: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn

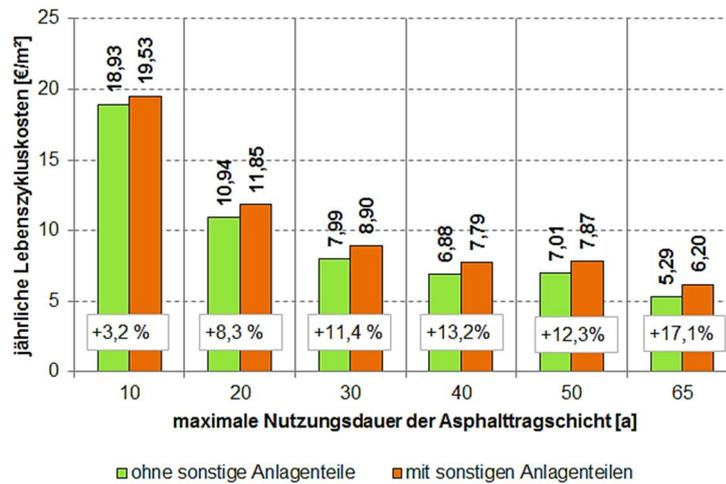


Abbildung 4-22: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn

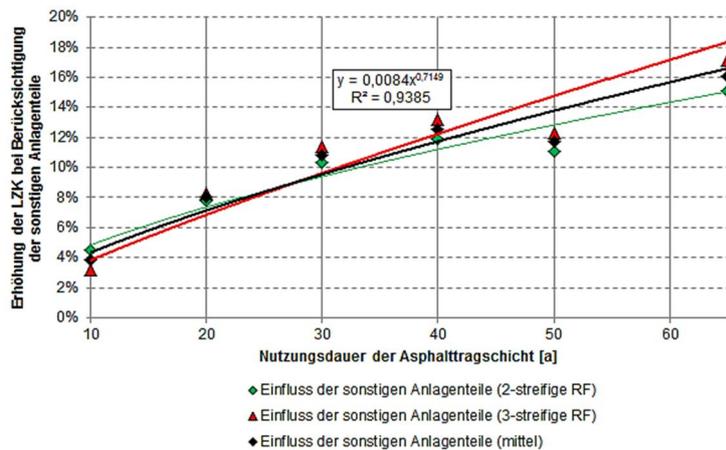


Abbildung 4-23: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

4.3 BUNDESSTRASSEN

4.3.1 LEBENSZYKLUSKOSTEN

In Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 sind die jährlichen Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht und den Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle ohne und mit Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile dargestellt. Den Berechnungen liegen die in Abbildung 4-24 bis Abbildung 4-29 dargestellten Erhaltungsstrategien zugrunde.

Erwartungsgemäß sinken die berechneten Lebenszykluskosten auch auf Bundesstraßen mit steigender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht. Das ist folgerichtig, da weniger teure Erhaltungsmaßnahmen notwendig werden. Ebenfalls nachvollziehbar sind die steigenden Kosten, wenn eine Sicherung der Arbeitsstelle (halbseitige Sperrung) eingerichtet werden muss. Diese einzurichten und vorzuhalten verursacht zusätzliche Aufwendungen, die Lebenszykluskosten steigen folglich. Genauso verhält es sich bei der Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile.

Tabelle 4-8: Jährliche Lebenszykluskosten von Bundesstraßen ohne Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile

| Nutzungsdauer der ATS [a] | Lebenszykluskosten pro Jahr [€/m ²] | |
|---------------------------------|---|----------------------|
| | Vollsperrung | halbseitige Sperrung |
| 10 | 9,62 | 9,88 |
| 20 | 5,34 | 5,56 |
| 30 | 4,29 | 4,55 |
| 40 | 3,63 | 3,87 |
| 50 | 3,42 | 3,71 |
| 65 | 2,81 | 3,05 |

Tabelle 4-9: Jährliche Lebenszykluskosten von Bundesstraßen mit Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile

| Nutzungsdauer der ATS [a] | Lebenszykluskosten pro Jahr [€/m ²] | |
|---------------------------------|---|----------------------|
| | Vollsperrung | halbseitige Sperrung |
| 10 | 10,21 | 10,43 |
| 20 | 5,88 | 6,11 |
| 30 | 4,85 | 5,08 |
| 40 | 4,17 | 4,42 |
| 50 | 3,95 | 4,25 |
| 65 | 3,34 | 3,59 |

LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSEN IN ASPHALTBAUWEISE

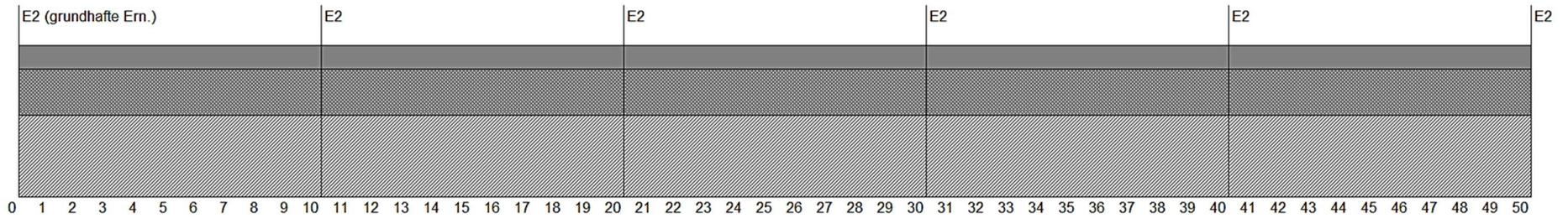


Abbildung 4-24: Erhaltungsstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren

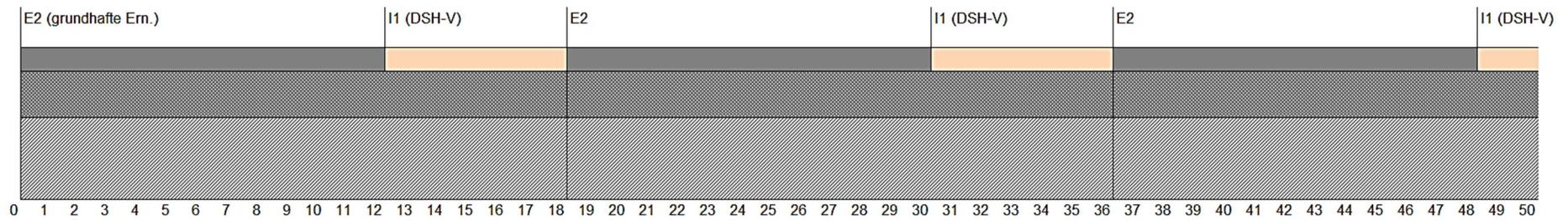


Abbildung 4-25: Erhaltungsstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 20 Jahren

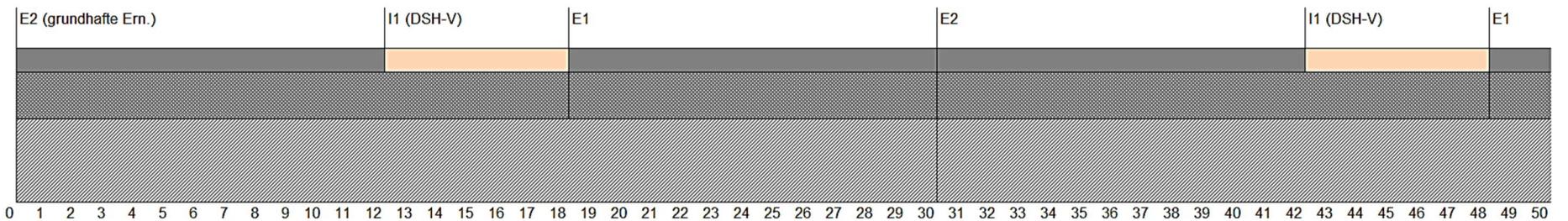


Abbildung 4-26: Erhaltungsstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren

LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSEN IN ASPHALTBAUWEISE

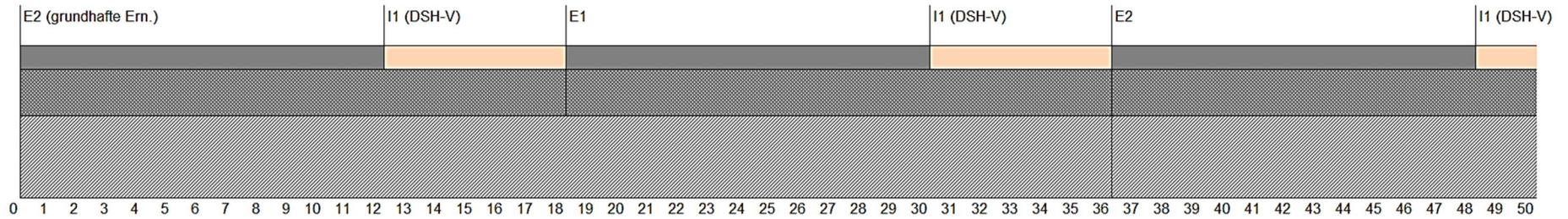


Abbildung 4-27: Erhaltungstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 40 Jahren

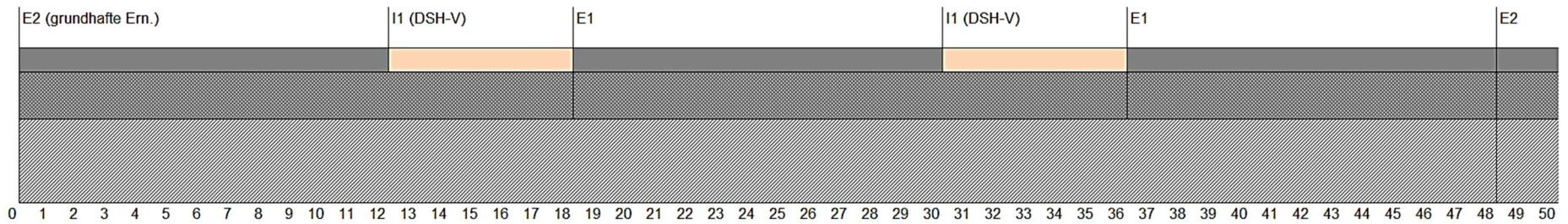


Abbildung 4-28: Erhaltungstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren

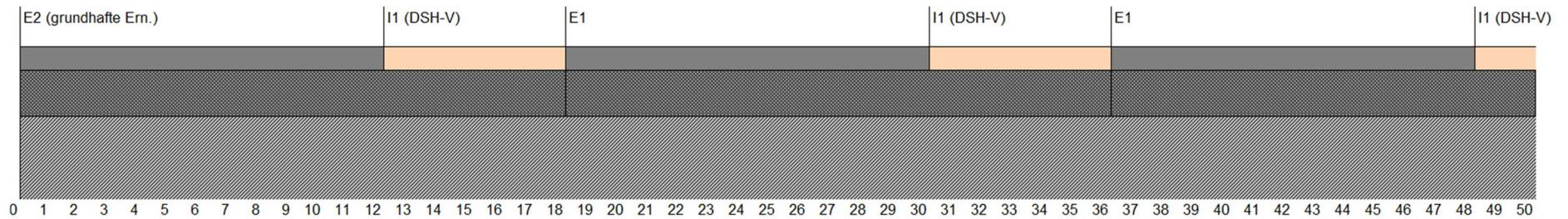


Abbildung 4-29: Erhaltungstrategie für Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 65 Jahren

4.3.2 EINFLUSS DER NUTZUNGSDAUER DER ASPHALTTRAGSCHICHT

In Abbildung 4-30 ist die Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht für die verschiedenen Betrachtungsfälle dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der zunehmend degressive Verlauf aller Kurven, der sich wie auch bei den Autobahnen auf die „Sowieso-Kosten“ – vordringlich für die Sicherung der Arbeitsstelle sowie das Einrichten und Vorhalten der Baustelleneinrichtung – zurückführen lässt, also auf Kostenanteile, die sich unabhängig von der realisierbaren Nutzungsdauer der Asphalttragschicht nicht weiter reduzieren lassen.

Unabhängig von den sonstigen Anlagenteilen sowie der Art der Sicherung der Arbeitsstellen weisen die Kurven einen nahezu identischen Verlauf auf und sind nur um einen gewissen Betrag parallel verschoben. Die Kosten liegen bei halbseitiger Sperrung immer höher als wenn auf eine Absicherung der Arbeitsstelle verzichtet werden kann. Bei Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile steigen die resultierenden Lebenszykluskosten noch einmal an. Eine detaillierte Auswertung und Bewertung dieser Einflussfaktoren erfolgt in den Kapiteln 4.3.3 und 4.3.4.

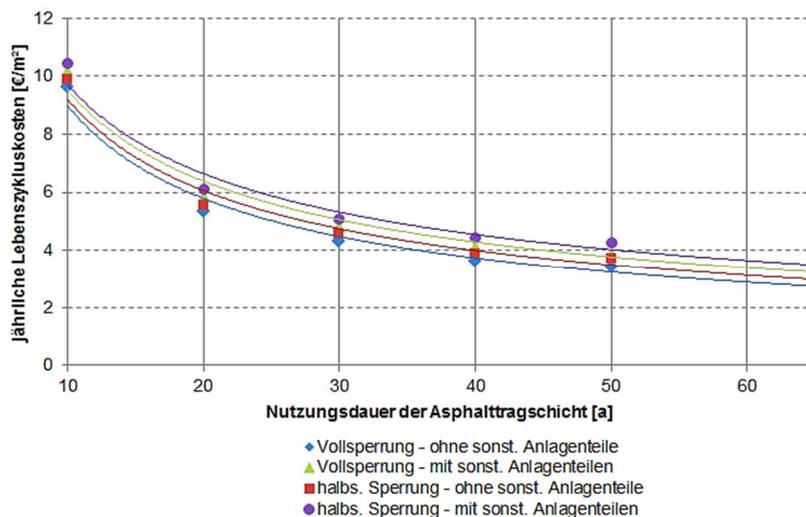
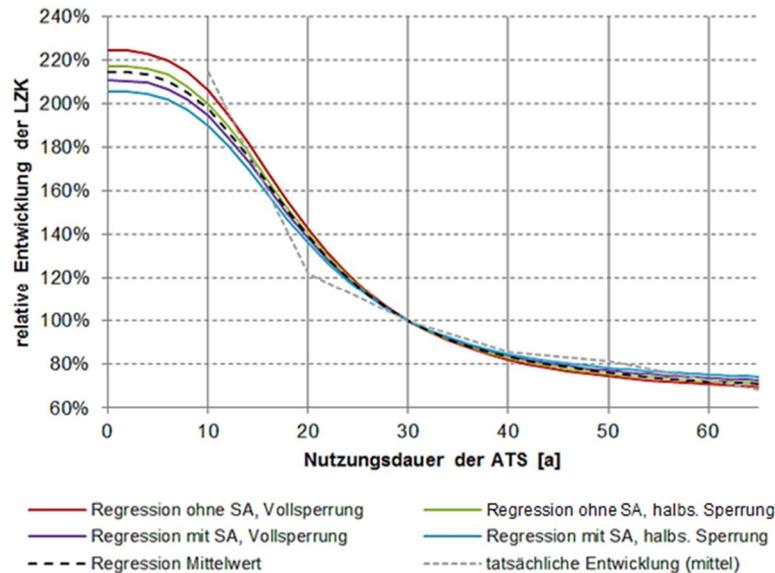


Abbildung 4-30: Entwicklung der Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Die in Abbildung 4-30 dargestellten Entwicklungen der berechneten Lebenszykluskosten wurden mittels Gl. 14 (siehe Seite 105) in Form von Sigmoid-Funktionen mit definierten Kostenober- und -untergrenzen nachgebildet. Diese beschreiben die relative (prozentuale) Entwicklung der Lebenszykluskosten, bezogen auf die ermittelten Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren. Die Funktionen sind in Abbildung 4-31 dargestellt, die zugehörigen Funktionsparameter können Tabelle 4-10 entnommen werden. Die in Grau dargestellte Kurve visualisiert zusätzlich die aus den Ergebnissen der Berechnungen abgeleitete tatsächliche Entwicklung der Lebenszykluskosten.



SA: sonstige Anlagenteile

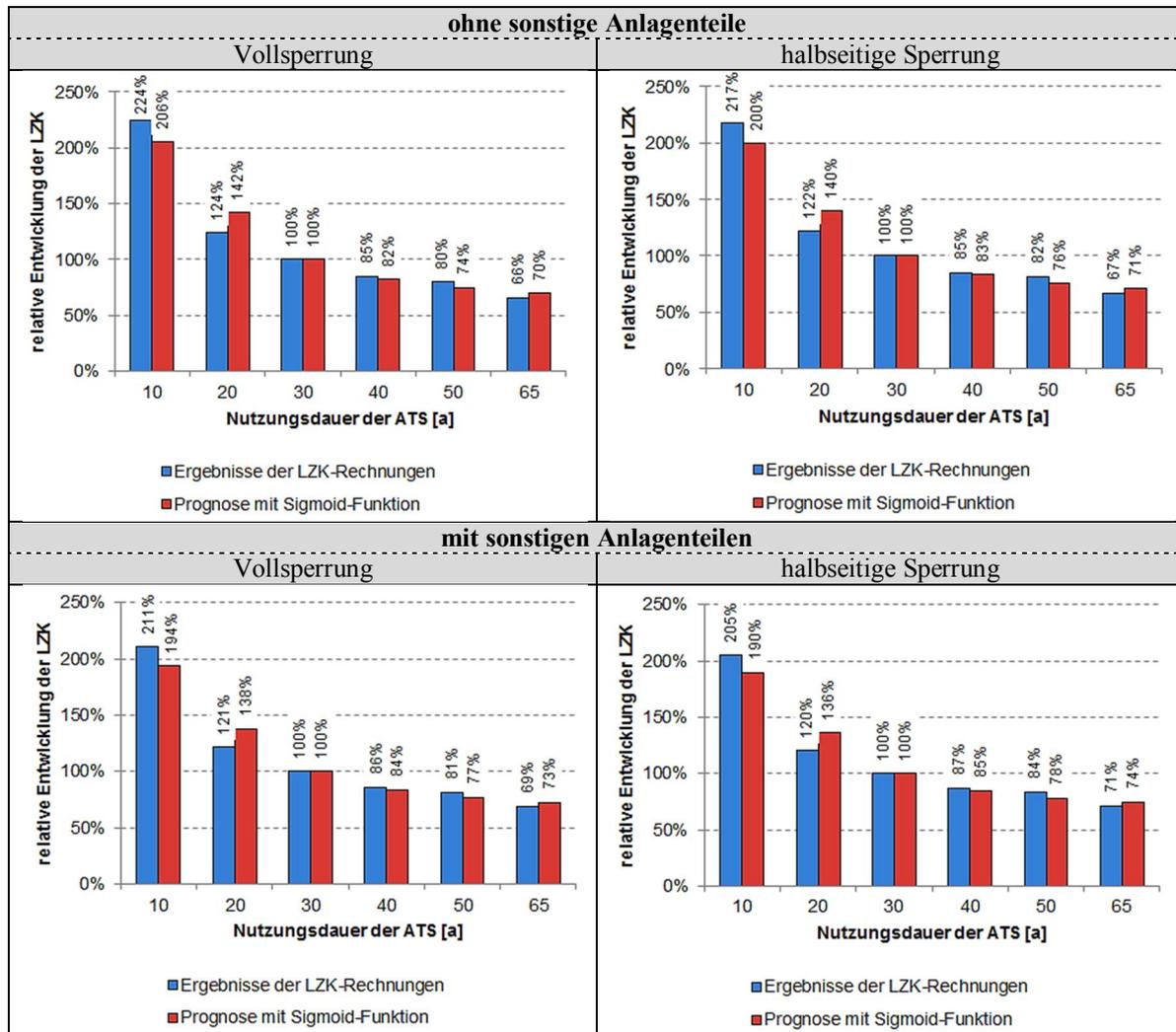
Abbildung 4-31: Entwicklung der Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht $f_{B,j}(ND_{ATS,i})$

Tabelle 4-10: Parameter der Sigmoid-Funktionen für Bundesstraßen

| Parameter | ohne sonstige Anlagenteile | | mit sonstigen Anlagenteilen | | Mittelwert |
|------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| | Vollsperrung | halbs. Sperrung | Vollsperrung | halbs. Sperrung | |
| $LZK_{\min,B,j}$ | 0,70 | 0,71 | 0,73 | 0,74 | 0,72 |
| $LZK_{\max,B,j}$ | 2,06 | 0,200 | 1,94 | 1,90 | 1,97 |
| m | 1,31E-04 | 1,30E-04 | 1,29E-04 | 1,25E-04 | 1,29E-04 |
| b | 3,0056 | 3,0026 | 3,0056 | 3,0174 | 3,0078 |

Mittels Sensitivitätsanalysen wurden die tatsächlich berechneten Lebenszykluskosten für jeden Betrachtungsfall den anhand der Sigmoid-Funktionen prognostizierten Werten gegenübergestellt (Tabelle 4-11). Die tatsächlich berechneten Kosten werden dabei weitestgehend gut abgebildet. Bei einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren unterschätzen die Funktionen die tatsächlichen Kosten um etwa 15 bis 18 %. Steigt die Lebensdauer auf 20 Jahre, ermitteln die Sigmoid-Funktionen hingegen rund 16-18 % höhere Lebenszykluskosten als aus den Berechnungen hervorgehen. Bei einer Nutzungsdauer von 40 bzw. 50 Jahren liegen die tatsächlichen Lebenszykluskosten etwa 4 bis 6 % höher, bei einer Nutzungsdauer von 65 Jahren rund 4 % niedriger als die mittels Regression prognostizierten Werte.

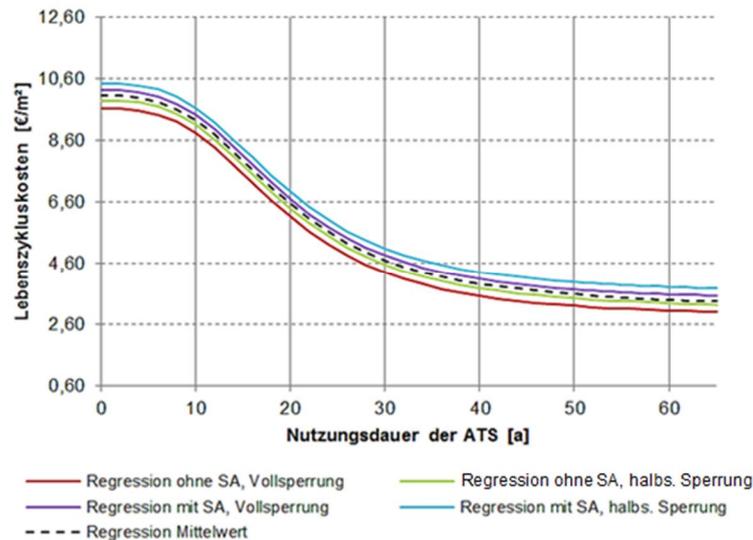
Tabelle 4-11: Relativvergleich zwischen den tatsächlich berechneten und mittels Sigmoid-Funktionen prognostizierten Lebenszykluskosten von Bundesstraßen, normiert auf die Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren



Um neben der prozentualen Entwicklung auch konkrete Lebenszykluskosten für verschiedene Nutzungsdauern der Asphalttragschicht berechnen zu können, werden die Ergebnisse der in Abbildung 4-31 dargestellten Sigmoid-Funktion gemäß Gl. 15 multiplikativ mit den zuvor berechneten Lebenszykluskosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren verknüpft. Die entsprechenden Parameter für Bundesstraßen sind in Tabelle 4-12 aufgeführt.

Tabelle 4-12: Jährliche Lebenszykluskosten von Bundesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (Faktor $LZK_{B,j,ND(ATS)=30}$)

| Variante j | $LZK_{B,j,ND(ATS)=30}$ | |
|----------------------------|------------------------|----------------------|
| | Vollsperrung | halbseitige Sperrung |
| ohne sonstige Anlagenteile | 4,29 | 4,55 |
| mit sonstigen Anlagenteile | 4,85 | 5,08 |
| Mittelwert | 4,57 | 4,82 |



SA: sonstige Anlagenteile

Abbildung 4-32: Mittels Schätzverfahren berechnete jährliche Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

In Abbildung 4-32 sind die so berechneten Lebenszykluskosten von Bundesstraßen für die verschiedenen Betrachtungsfälle in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht dargestellt. Die zugehörigen Einzelwerte können Anhang III entnommen werden.

Wie auch bei Autobahnen gilt, dass die tatsächliche Entwicklung der Lebenszykluskosten voraussichtlich einen weniger stetigen Verlauf aufweist, als sie mittels Regressionsfunktionen prognostiziert werden. Ursächlich hierfür sind wiederum aus wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten nicht optimal realisierbare Erhaltungsstrategien, welche das Potenzial zur Senkung der Lebenszykluskosten abmindern und zu Unstetigkeiten im Kurvenverlauf führen.

4.3.3 EINFLUSS DER KOSTEN FÜR DIE SICHERUNG DER ARBEITSSTELLE

In Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34 sind die jährlichen Lebenszykluskosten bei einer Vollsperrung und einer halbseitigen Absperrung der Arbeitsstelle gegenübergestellt. Erwartungskonform ergeben sich höhere Kosten, wenn eine Sicherung der Arbeitsstelle (halbseitige Sperrung) eingerichtet und vorgehalten werden muss. Prozentual gesehen erhöhen sich die Kosten um rund 2 bis 9 %, im Mittel um etwa 5,7 %. Das 75 %-Quantil – also der Wert, der von 75 % der Einzelwerte nicht überschritten wird – beträgt 7,6 %.

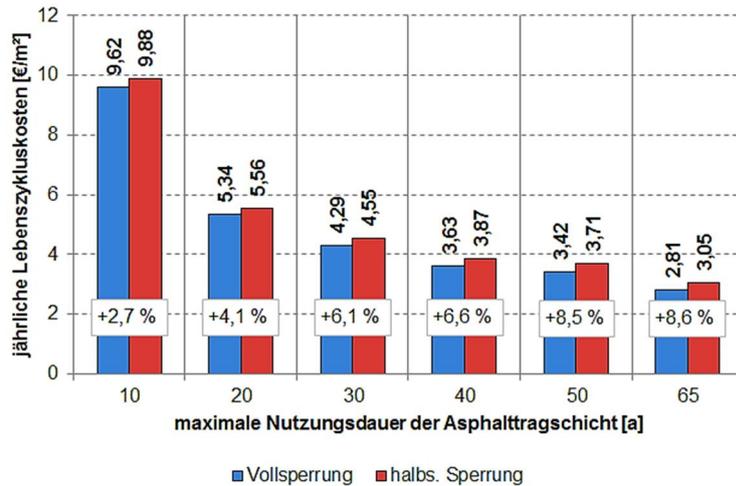


Abbildung 4-33: Auswirkungen der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen ohne Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile

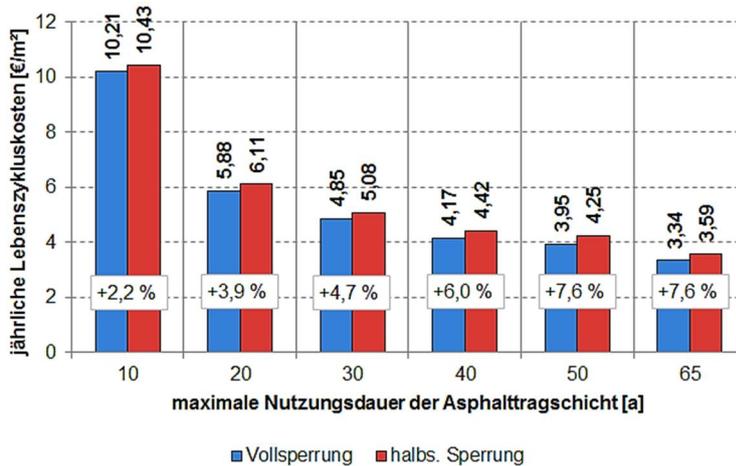


Abbildung 4-34: Auswirkungen der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen mit Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile

Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der Kostenanteile für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten mit steigender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht zunimmt. Dies ist nachvollziehbar, da bei hohen Nutzungsdauern die Gesamtkosten für die Erhaltung des Oberbaus deutlich sinken und weniger kostenintensive Maßnahmen notwendig werden (vgl. Kapitel 4.3.2). Eine Sicherung der Arbeitsstelle muss jedoch auch bei Erhaltungsmaßnahmen, die z.B. nur die Deckschicht betreffen, eingerichtet und vorgehalten werden. Entsprechende Kostenanteile lassen sich über den Betrachtungszeitraum gesehen demnach nicht so signifikant verringern, wie es eine günstigere Erhaltungsstrategie mit weniger kostenintensiven Maßnahmen ermöglicht. Prozentual betrachtet nimmt der Anteil für die Sicherung der Arbeitsstelle an den gesamten Lebenszykluskosten demnach zu.

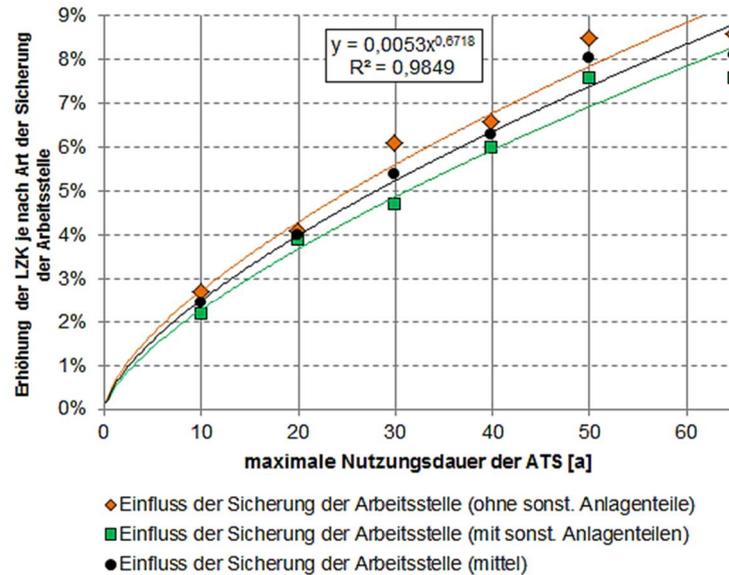


Abbildung 4-35: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Art der Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Der Einfluss der Art der Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen lässt sich funktional beschreiben (Abbildung 4-35). Hierzu eignet sich mit sehr gutem Bestimmtheitsmaß eine Potenzfunktion, deren Funktionsparameter für die Mittelwertfunktion in der Abbildung angegeben sind.

4.3.4 EINFLUSS DER KOSTEN FÜR DIE ERHALTUNG DER SONSTIGEN ANLAGENTEILE

In Abbildung 4-36 und Abbildung 4-37 sind die jährlichen Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von der Art der Sicherung der Arbeitsstelle ohne und mit Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die zusätzlichen Aufwendungen für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile rund 6 bis 19 % höhere Lebenszykluskosten zur Folge haben. Das 75 %-Quantil aller Werte beträgt rund 15,1 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Berücksichtigung bzw. die Vernachlässigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile bedeutende Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten hat. Im Vergleich zur Art der Sicherung der Arbeitsstelle (Kapitel 4.3.3) ist der Einfluss der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die resultierenden Lebenszykluskosten im Mittel mehr als 2,3-mal so hoch.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass der Einfluss der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten – wie auch bei der Sicherung der Arbeitsstelle – mit steigender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht zunimmt. Da die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile mit Ausnahme der Straßenmarkierungen unabhängig von der Erhaltungsstrategie des Oberbaus vollzogen wird, ergeben sich jährlich nahezu konstante Kosten für entsprechende Leistungen. Die jährlichen Auf-

wendungen für die Erhaltung des Straßenoberbaus hingegen nehmen mit zunehmender Lebensdauer der Tragschicht bis zu einem gewissen Grenzwert ab. Prozentual betrachtet steigen die Anteile für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile zunächst an, bis sie sich schließlich auf einem konstanten Niveau einpendeln.

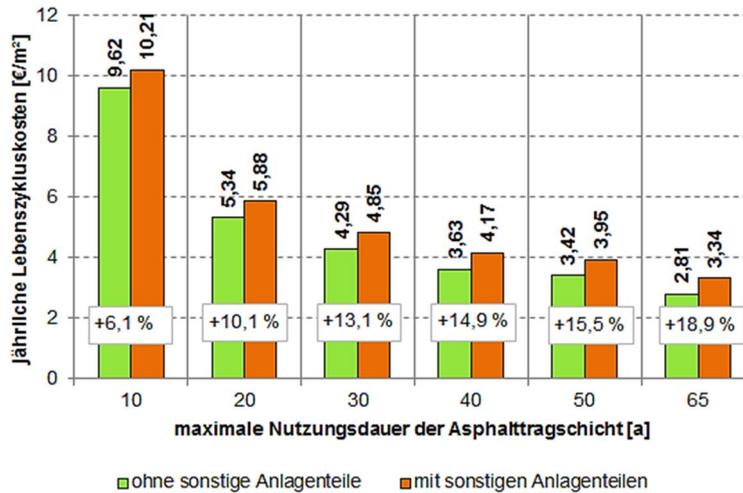


Abbildung 4-36: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen (Vollsperrung)

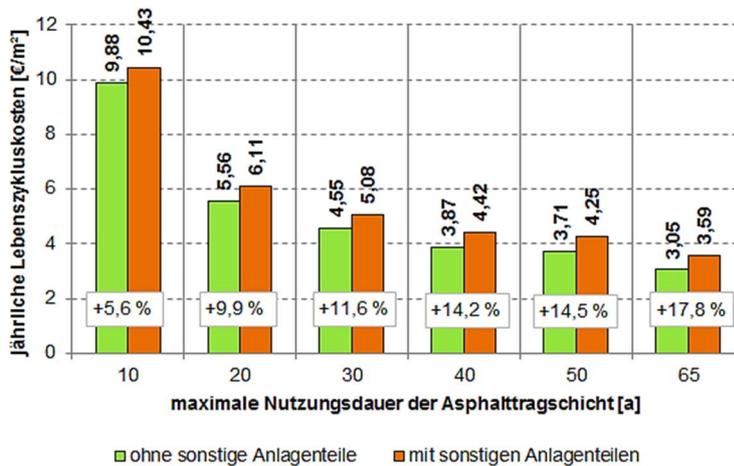


Abbildung 4-37: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen (halbseitige Sperrung)

Eine solche degressive Entwicklung ergibt sich auch, wenn man die prozentuale Erhöhung der Lebenszykluskosten durch die Berücksichtigung der Kostenanteile für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile direkt ins Verhältnis zu der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht setzt (Abbildung 4-38). Die in der Abbildung dargestellten Funktionsparameter beziehen sich auf die Mittelwertfunktion. Erkennbar ist weiterhin, dass der Einfluss der sonstigen Anlagenteile am geringsten ist, wenn eine Sicherung der Arbeitsstelle eingerichtet werden muss. Dies verursacht zu-

sätzliche Kosten, während die Aufwendungen für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile hiervon nicht beeinflusst werden. Der prozentuale Anteil für die Arbeiten an den sonstigen Anlagenteilen an den Gesamtkosten sinkt somit.

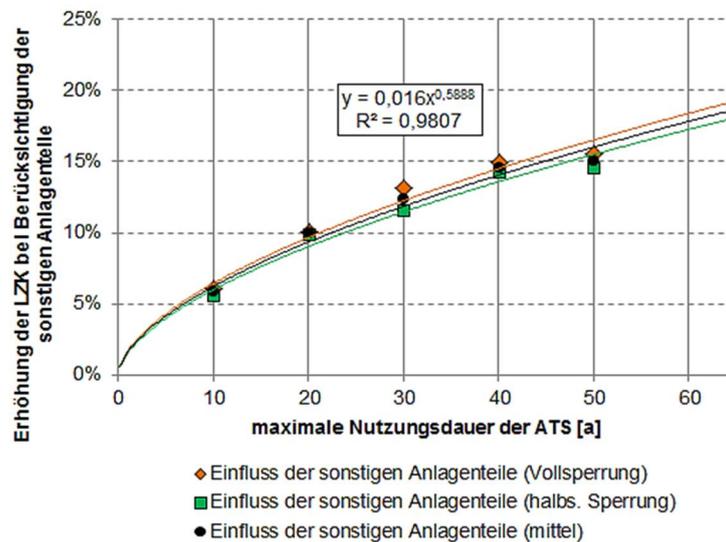


Abbildung 4-38: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Kosten für die sonstigen Anlageneile auf die Lebenszykluskosten von Bundesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

4.4 LANDESSTRASSEN

4.4.1 LEBENSZYKLUSKOSTEN

In Tabelle 4-13 und Tabelle 4-14 sind die jährlichen Lebenszykluskosten für Landesstraßen ohne und mit Berücksichtigung der Aufwendungen für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile dargestellt. Die anhand der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht gewählten Erhaltungsstrategien sind in Abbildung 4-39 bis Abbildung 4-44 dargestellt.

Tabelle 4-13: Jährliche Lebenszykluskosten von Landesstraßen ohne Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile

| Nutzungsdauer der ATS [a] | Lebenszykluskosten pro Jahr [€/m ²] | |
|---------------------------|---|----------------------|
| | Vollsperrung | halbseitige Sperrung |
| 10 | 4,38 | 4,86 |
| 20 | 3,61 | 4,18 |
| 30 | 2,76 | 3,28 |
| 40 | 2,41 | 2,95 |
| 50 | 2,26 | 2,71 |
| 65 | 1,67 | 2,14 |

Tabelle 4-14: Jährliche Lebenszykluskosten von Landesstraßen mit Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile

| Nutzungsdauer der ATS [a] | Lebenszykluskosten pro Jahr [€/m²] | |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| | Vollsperrung | halbseitige Sperrung |
| 10 | 4,77 | 5,25 |
| 20 | 4,11 | 4,67 |
| 30 | 3,25 | 3,77 |
| 40 | 2,89 | 3,43 |
| 50 | 2,75 | 3,20 |
| 65 | 2,17 | 2,64 |

Allgemein gelten dieselben Zusammenhänge wie bei Bundesstraßen. Die Lebenszykluskosten sinken demnach signifikant mit steigender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht, steigen hingegen, wenn eine Sicherung der Arbeitsstelle eingerichtet werden muss und/oder die Kosten für die sonstigen Anlagenteile in die Berechnungen einbezogen werden. Eine detaillierte Auswertung der jeweiligen Einflussfaktoren erfolgt in den weiteren Kapiteln.

4.4.2 EINFLUSS DER NUTZUNGSDAUER DER ASPHALTTRAGSCHICHT

Der Einfluss der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht auf die resultierenden Lebenszykluskosten von Landesstraßen ist in Abbildung 4-45 dargestellt. Erwartungsgemäß sinken diese mit steigender Nutzungsdauer und nähern sich degressiv einem unteren Grenzwert an, nämlich den Kostenanteilen, die sich unabhängig von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht nicht weiter reduzieren lassen. Gemeint sind vordringlich die Aufwendungen für die Sicherung der Arbeitsstelle sowie das Einrichten und Vorhalten der Baustelleneinrichtung.

Wie auch bei Bundesstraßen ist bei Landesstraßen zu erkennen, dass die Entwicklungen der Lebenszykluskosten der jeweiligen Betrachtungsfälle einen nahezu identischen Verlauf aufweisen und lediglich parallel verschoben sind. Aufgrund dessen wurden die berechneten Lebenszykluskosten wiederum einheitlich mittels Sigmoid-Funktionen gemäß Gl. 14 nachgebildet. Diese sind Abbildung 4-46 zu entnehmen und stellen die prozentuale Entwicklung der Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht bezogen auf die Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Tragschicht von 30 Jahren dar. Die zugehörigen Funktionsparameter sind in Tabelle 4-15 angegeben. Zusätzlich ist in Grau die aus den Ergebnissen der Kostenberechnungen abgeleitete tatsächliche Entwicklung der Lebenszykluskosten aufgezeigt.

LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSEN IN ASPHALTBAUWEISE

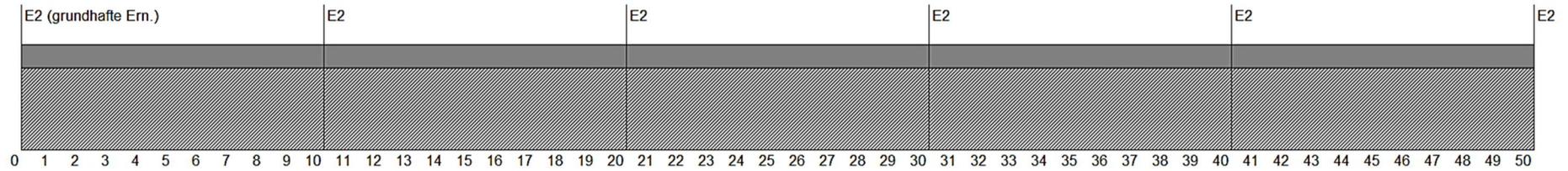


Abbildung 4-39: Erhaltungstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 10 Jahren

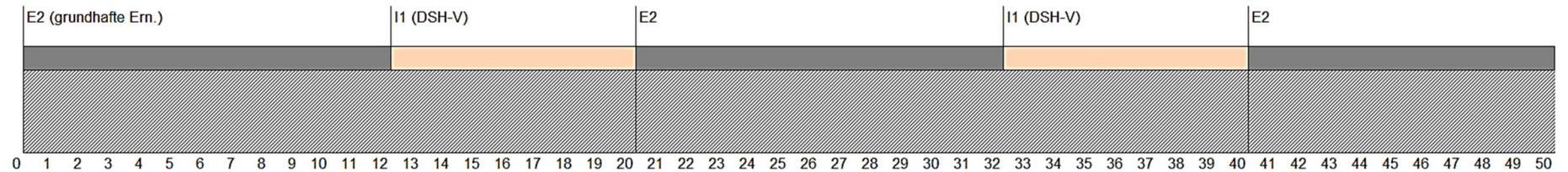


Abbildung 4-40: Erhaltungstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 20 Jahren

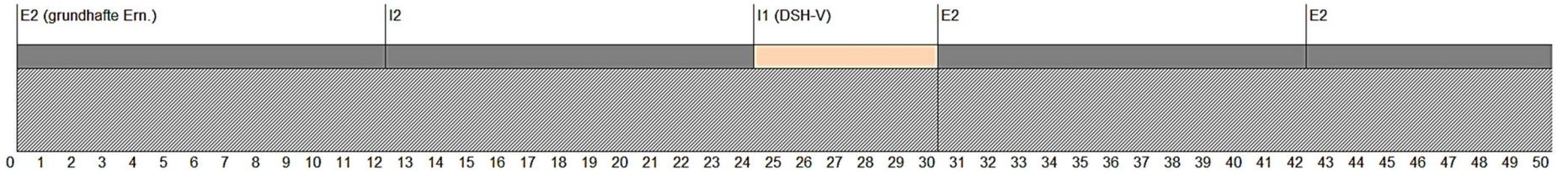


Abbildung 4-41: Erhaltungstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren

LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSEN IN ASPHALTBAUWEISE

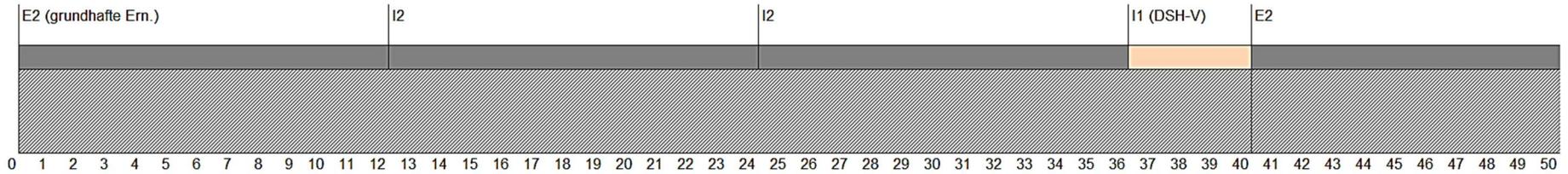


Abbildung 4-42: Erhaltungstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 40 Jahren

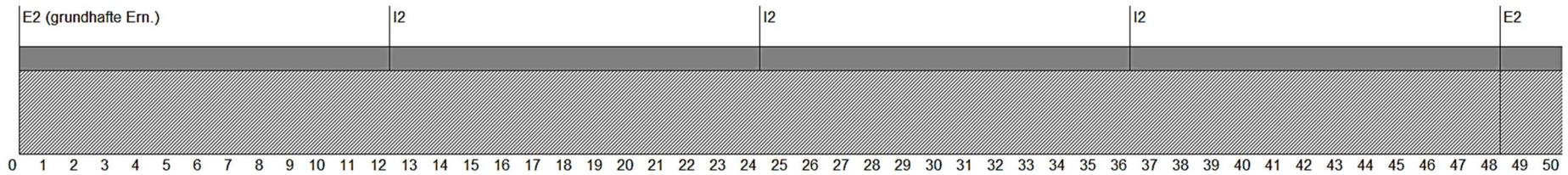


Abbildung 4-43: Erhaltungstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 50 Jahren

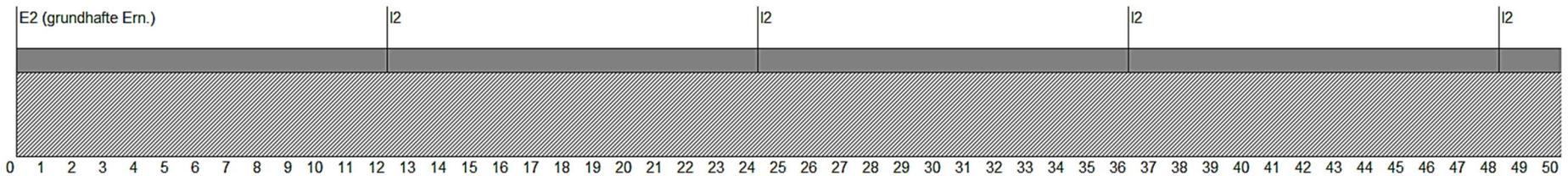


Abbildung 4-44: Erhaltungstrategie für Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 65 Jahren

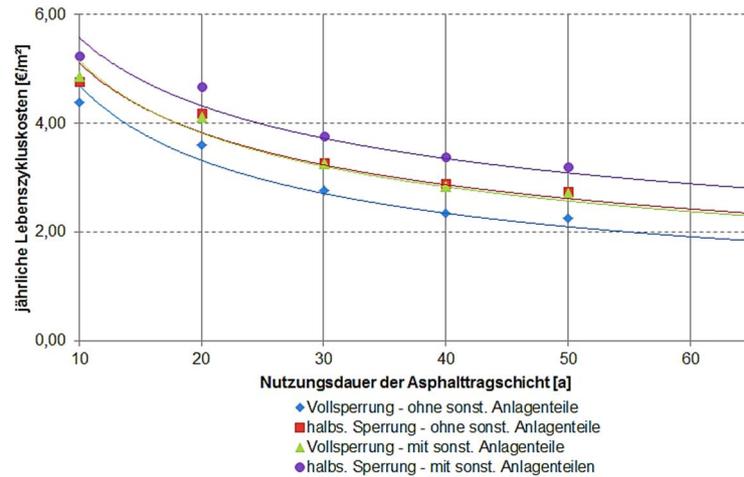
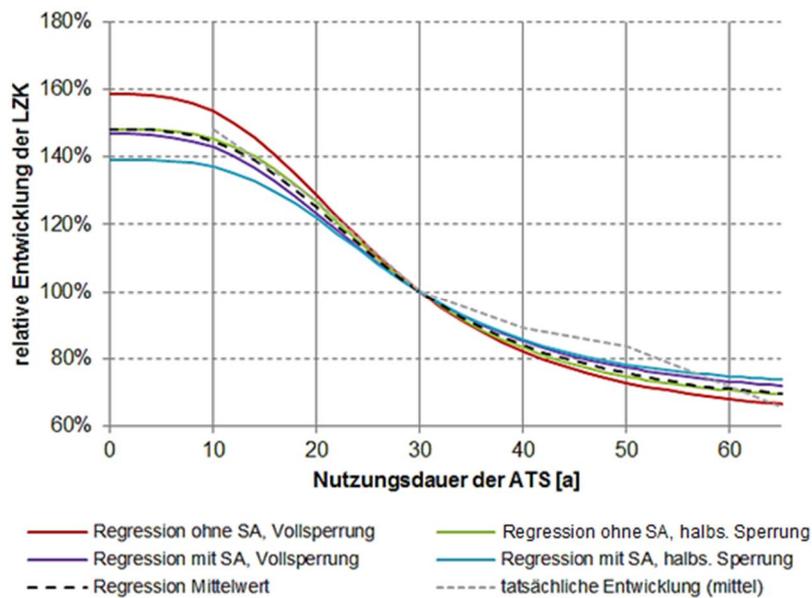


Abbildung 4-45: Entwicklung der Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht



SA: sonstige Anlagenteile

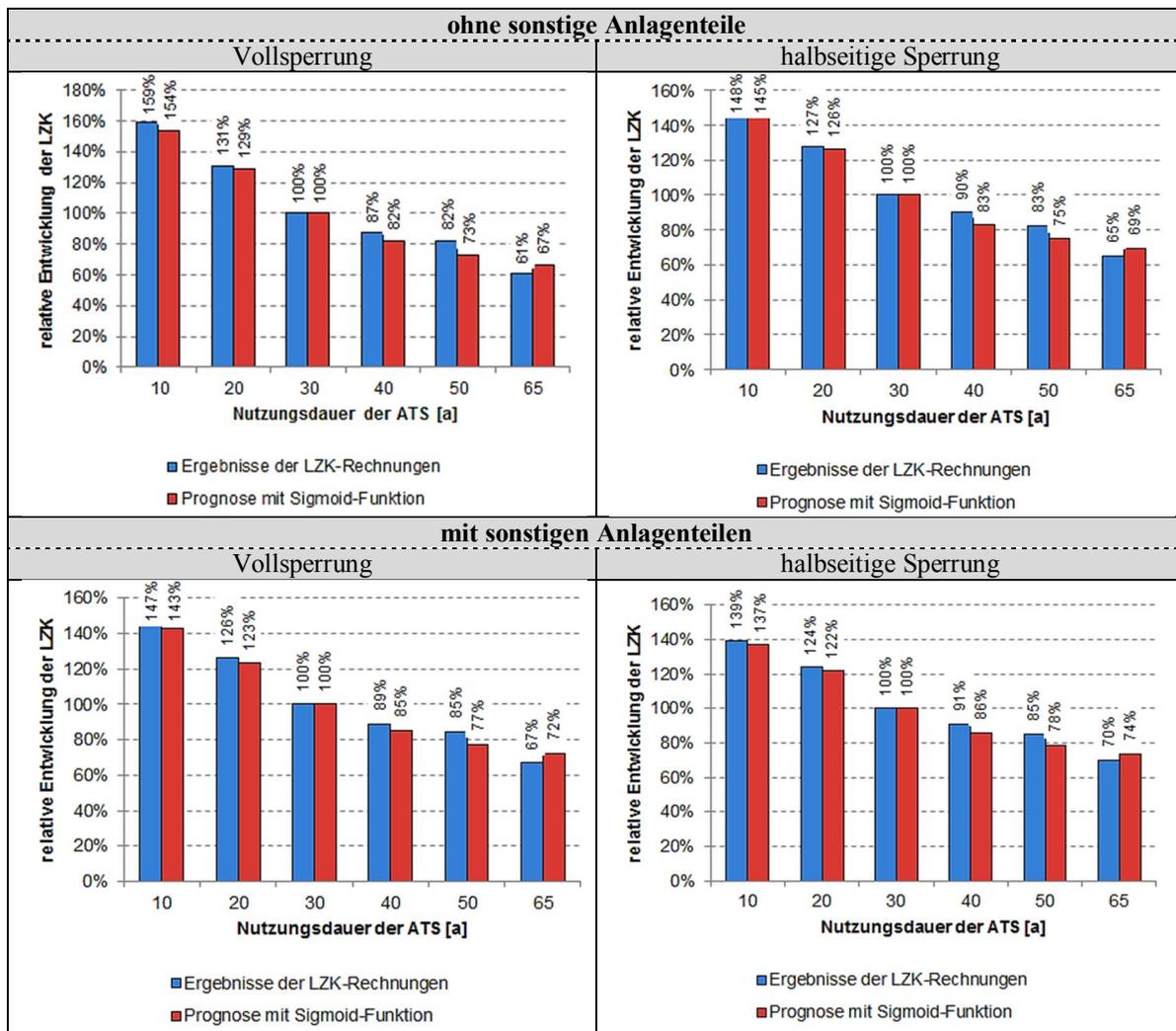
Abbildung 4-46: Entwicklung der Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Tabelle 4-15: Parameter der Sigmoid-Funktionen für Landesstraßen

| Parameter | ohne sonstige Anlagenteile | | mit sonstigen Anlagenteilen | | Mittelwert |
|----------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| | Vollsperrung | halbs. Sperrung | Vollsperrung | halbs. Sperrung | |
| $LZK_{\min,j}$ | 0,67 | 0,69 | 0,72 | 0,74 | 0,70 |
| $LZK_{\max,j}$ | 1,54 | 1,45 | 1,43 | 1,37 | 1,45 |
| m | 5,401E-05 | 1,513E-05 | 5,114E-05 | 1,43E-05 | 3,364E-05 |
| b | 3,0056 | 3,3592 | 3,0056 | 3,3592 | 3,1824 |

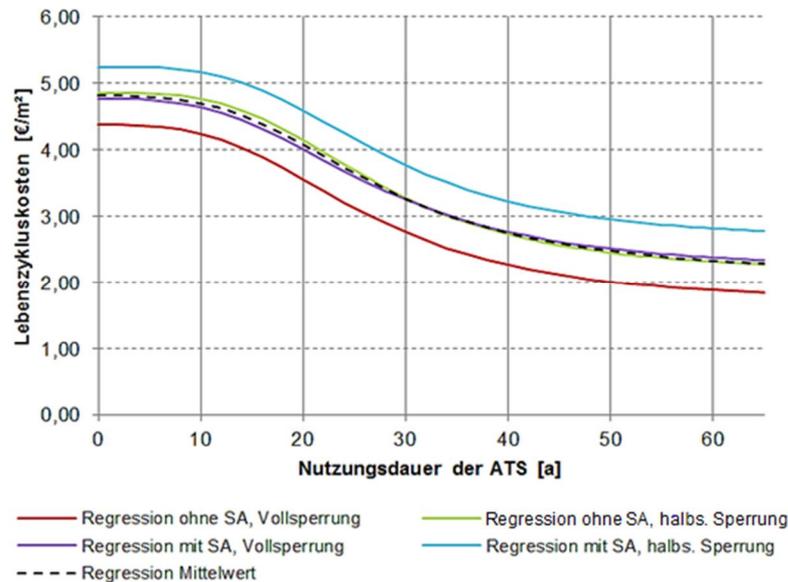
Um die Qualität der Regressionsfunktionen zu überprüfen, wurden abermals Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt, also die tatsächlich berechneten relativen Lebenszykluskosten mit den Ergebnissen der Regressionsfunktionen verglichen. Aus Tabelle 4-16 wird ersichtlich, dass die Funktionen die berechneten Lebenszykluskosten für jeden Betrachtungsfall überwiegend sehr gut abbilden. Die Abweichungen zwischen den tatsächlich berechneten Lebenszykluskosten und den prognostizierten Werten liegen bis zu einer Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren unter 5 %. Bei Lebensdauern von 40 bzw. 50 Jahren liegen die mittels Regressionsfunktion berechneten Werte rund 4 bis 9 % unter den tatsächlich ermittelten Lebenszykluskosten. Steigt die Nutzungsdauer weiter auf den Maximalwert von 65 Jahren, ergeben sich aus den Funktionen hingegen etwa 4 bis 6 % höhere Aufwendungen.

Tabelle 4-16: Relativvergleich zwischen den tatsächlich berechneten und mittels Sigmoid-Funktionen prognostizierten Lebenszykluskosten von Landesstraßen, normiert auf die Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren



Um konkrete Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht abschätzen zu können, wurde auch bei Landesstraßen die mittels Gl. 14 bestimmbare prozentuale

Entwicklung der Lebenszykluskosten mit den berechneten Werten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Tragschicht von 30 Jahren multipliziert (Gl. 15). Die sich ergebenden Lebenszykluskosten sind für den jeweiligen Betrachtungsfall in Tabelle 4-17 dargestellt. Die Einzelwerte können Anhang III entnommen werden.



SA: sonstige Anlagenteile

Abbildung 4-47: Mittels Schätzverfahren berechnete jährliche Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Wie auch bei Autobahnen und Bundesstraßen muss berücksichtigt werden, dass die tatsächlichen Lebenszykluskosten voraussichtlich mehr Unstetigkeitsstellen aufweisen, als es die mittels der Regressionsfunktionen berechneten Werte suggerieren.

Tabelle 4-17: Jährliche Lebenszykluskosten von Landesstraßen bei einer maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (Faktor $LZK_{L,j,ND(ATS)=30}$)

| Variante j | $LZK_{L,j,ND(ATS)=30}$ | |
|----------------------------|------------------------|----------------------|
| | Vollsperrung | halbseitige Sperrung |
| ohne sonstige Anlagenteile | 2,76 | 3,28 |
| mit sonstigen Anlagenteile | 3,25 | 3,77 |
| Mittelwert | 3,01 | 3,53 |

4.4.3 EINFLUSS DER KOSTEN FÜR DIE SICHERUNG DER ARBEITSSTELLE

In Abbildung 4-48 und Abbildung 4-49 ist der Einfluss der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht ohne und mit Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile dargestellt. Dabei kann eine deutliche Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht festgestellt werden. Mit steigender Liegedauer verstärkt sich auch der Einfluss der Aufwendungen für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten signifikant und bewirkt eine Zunahme der Kosten von rund 8 bis 28 %. Die Angabe einer mittleren Erhöhung erscheint vor diesem Hintergrund wenig sinnvoll, das robustere 75 %-Quantil beträgt 20,4 %.

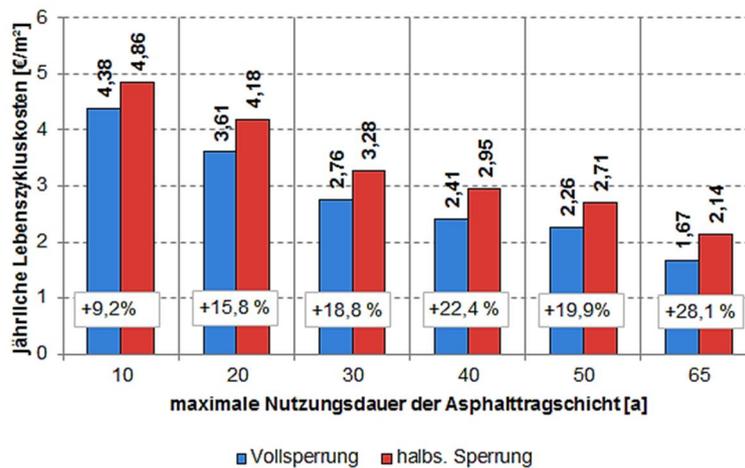


Abbildung 4-48: Auswirkungen der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen ohne Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile

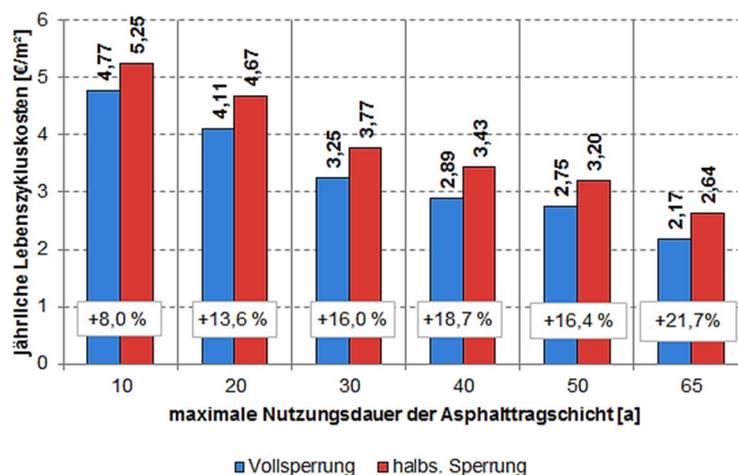


Abbildung 4-49: Auswirkungen der Kosten der Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen mit Berücksichtigung der sonstigen Anlagenteile

Dass der Einfluss der Kostenanteile für die Sicherung der Arbeitsstelle mit steigender Nutzungsdauer der Tragschicht zunimmt, ist nachvollziehbar und auf dieselben Ursachen wie bei Bundesstraßen zurückzuführen. Auffällig ist jedoch, dass die Anteile für die Sicherung der Arbeitsstelle einen größeren Einfluss auf die Lebenszykluskosten haben. Dies liegt darin begründet, dass die Kosten für den reinen Aus- und Einbau der Schichten des dünneren Oberbaus von Landesstraßen und damit die Erhaltungsmaßnahmen in der Summe wesentlich günstiger sind. Die Sicherung der Arbeitsstelle verursacht jedoch hiervon unabhängig Kosten, die aufgrund der hohen Fixanteile sowie der auf Landesstraßen nur unwesentlich geringeren Bauzeit nicht signifikant niedriger sind als beispielsweise auf Bundesstraßen. Hieraus resultieren relativ betrachtet deutlich höhere Anteile für die Absicherung der Baustelle.

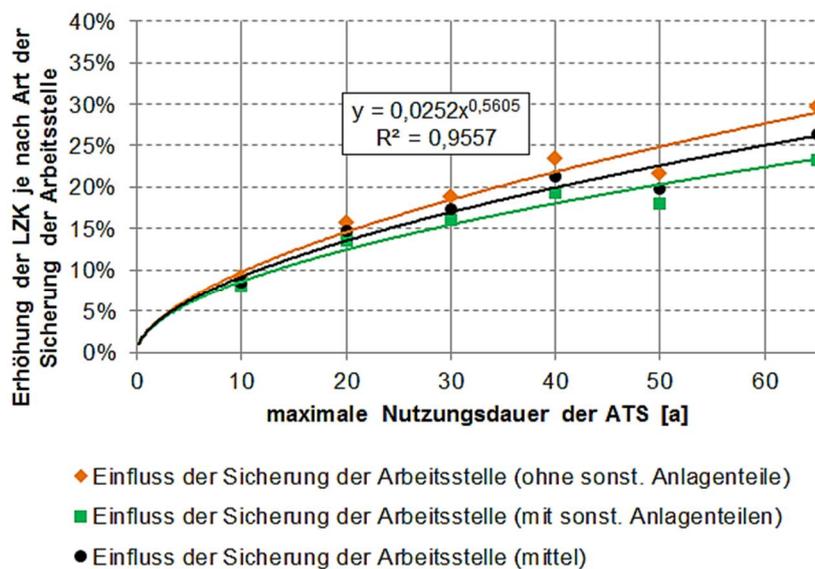


Abbildung 4-50: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Art der Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

In Abbildung 4-50 ist der Einfluss der Kosten für die Sicherung der Arbeitsstelle auf die Lebenszykluskosten als Potenzfunktion dargestellt. Die angegebenen Parameter beziehen sich dabei auf die Mittelwertfunktion.

4.4.4 EINFLUSS DER KOSTEN FÜR DIE ERHALTUNG DER SONSTIGEN ANLAGENTEILE

Die Aufwendungen für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile beeinflussen die resultierenden Lebenszykluskosten von Landesstraßen teilweise erheblich. So erhöhen diese die Lebenszykluskosten je nach maximaler Nutzungsdauer der Asphalttragschicht um rund 10 bis 30 %. Das 75 %-Quantil aller Werte beträgt 20,4 %.

Dies liegt in dem Umstand begründet, dass die Kosten für die Erhaltung des Oberbaus von Landesstraßen aufgrund der geringeren Dicke sowie des gewählten Mischguts günstiger ist als bei

anderen Straßenkategorien. Trotzdem weisen Landesstraßen gemäß den getroffenen Festlegungen – mit Ausnahme von passiven Schutzeinrichtungen – eine hohe Ausstattungsquote bezüglich der sonstigen Anlagenteile auf. Der Erhaltungsaufwand für diese ist dementsprechend hoch. Bezogen auf die vergleichsweise niedrigen Kosten für die Erhaltung des Oberbaus ergeben sich im Umkehrschluss hohe prozentuale Kostenanteile für die Arbeiten an den sonstigen Anlagenteilen.

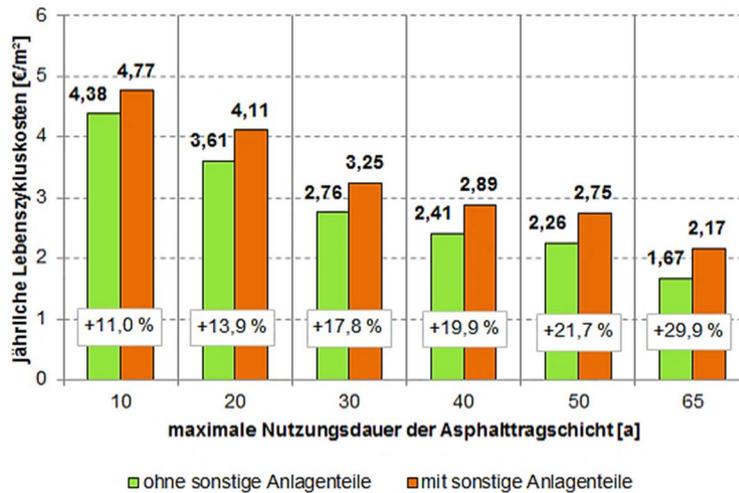


Abbildung 4-51: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen (Vollsperrung)

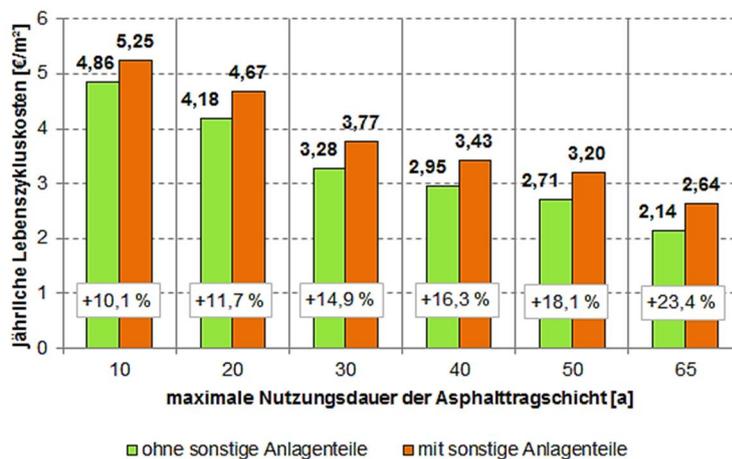


Abbildung 4-52: Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen (halbseitige Sperrung)

Der funktionale Zusammenhang zwischen der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht und der prozentualen Erhöhung der Lebenszykluskosten bei Berücksichtigung der Kosten für die sonstigen Anlagenteile ist in Abbildung 4-53 dargestellt. Hierbei stellt sich wie bei den anderen Straßenkategorien ein mit steigender Nutzungsdauer der Asphalttragschicht zunehmend degressi-

ver Verlauf ein. Der Einfluss der Kosten für die sonstigen Anlagenteile ist wiederum am geringsten, wenn eine Sicherung der Arbeitsstelle eingerichtet werden muss.

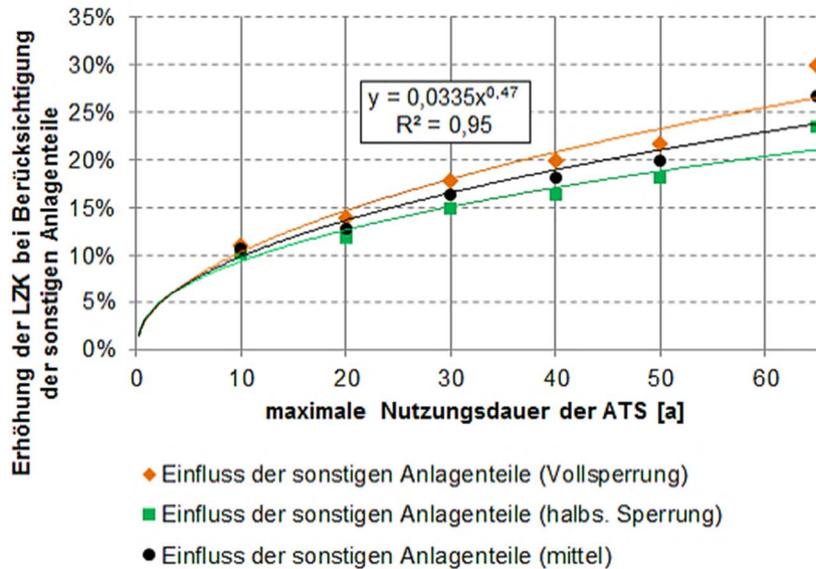


Abbildung 4-53: Funktionen zur Beschreibung des Einflusses der Kosten für die sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten von Landesstraßen in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

4.4.5 VERGLEICH DER ERGEBNISSE DER LEBENSZYKLUSKOSTENBERECHNUNGEN ZWISCHEN DEN STRASSENKATEGORIEN

In den vorherigen Kapiteln wurden die Lebenszykluskosten für verschiedene Straßenkategorien in Abhängigkeit von definierten Einflussfaktoren bestimmt. Die Ergebnisse unterscheiden sich erwartungsgemäß je nachdem, ob Autobahnen, Bundes- oder Landesstraßen Gegenstand der Betrachtungen sind. In diesem Kapitel werden deshalb die Lebenszykluskosten sowie die hieraus ermittelten Zusammenhänge vergleichend dargestellt und bewertet.

In Abbildung 4-54 sind die absoluten jährlichen Lebenszykluskosten pro Quadratmeter von Autobahnen mit 2- und 3-streifiger Richtungsfahrbahn, Bundesstraßen sowie Landesstraßen dargestellt. Die angegebenen Werte für Bundes- und Landesstraßen verstehen sich dabei jeweils als Mittelwerte der Kosten bei Vollsperrung und halbseitiger Sperrung der Arbeitsstelle. Abbildung 4-55 gibt die relativen Lebenszykluskosten der betrachteten Straßenkategorien als prozentualen Wert bezogen auf die (höchsten) Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn wider.

Aufgrund der dicken Asphalttragschicht, der Verwendung hochwertiger Baumaterialien, einer hohen Ausstattung mit sonstigen Anlagenteilen und der aufwendigen Sicherung der Arbeitsstelle bei Erhaltungsmaßnahmen, weisen Autobahnen die mit Abstand höchsten jährlichen Lebenszykluskosten auf. Diese sind bei 3-streifiger Richtungsfahrbahn im Mittel um etwa 9 % geringer als bei 2-streifigen Autobahnquerschnitten. Ursächlich hierfür ist vor allem die Festlegung, dass die

restlichen Fahrstreifen unabhängig vom Hauptfahrstreifen immer gemeinsam erneuert werden. Da bei 3-streifiger Richtungsfahrbahn die beiden restlichen Fahrstreifen also zeitgleich von Erhaltungsmaßnahmen betroffen sind, werden die resultierenden Kosten auf eine größere Einbaufäche verteilt, was trotz absolut gesehen höheren Aufwendungen für die Maßnahme bezogen auf einen Quadratmeter wirtschaftlicher ist.

Die jährlichen Lebenszykluskosten von Bundesstraßen pro Quadratmeter Fläche betragen unabhängig von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht rund 50 %, von Landesstraßen sogar nur etwa 30 % der berechneten jährlichen Kosten von Autobahnen. Dies liegt in beiden Fällen u.a. an der geringeren Dicke des Oberbaus, besonders bei Landesstraßen, da hier aufgrund der geringeren Verkehrsbelastung komplett auf eine Binderschicht verzichtet werden kann. Auch die Sicherung der Arbeitsstelle ist aufgrund des gewählten Regelplans für einbahnige Querschnitte wesentlich kostengünstiger. Bei Landesstraßen kommt hinzu, dass standardmäßig keine passiven Schutzrichtungen vorgesehen werden und diese dementsprechend während des Lebenszyklus nicht erhalten werden müssen.

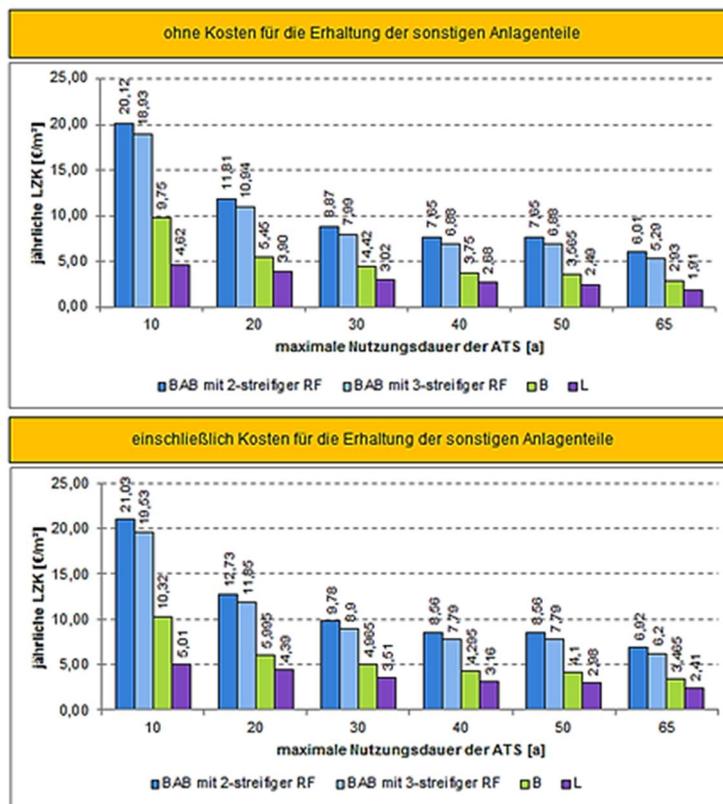


Abbildung 4-54: Vergleich der absoluten jährlichen Lebenszykluskosten [€/m²] der Straßenkategorien in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

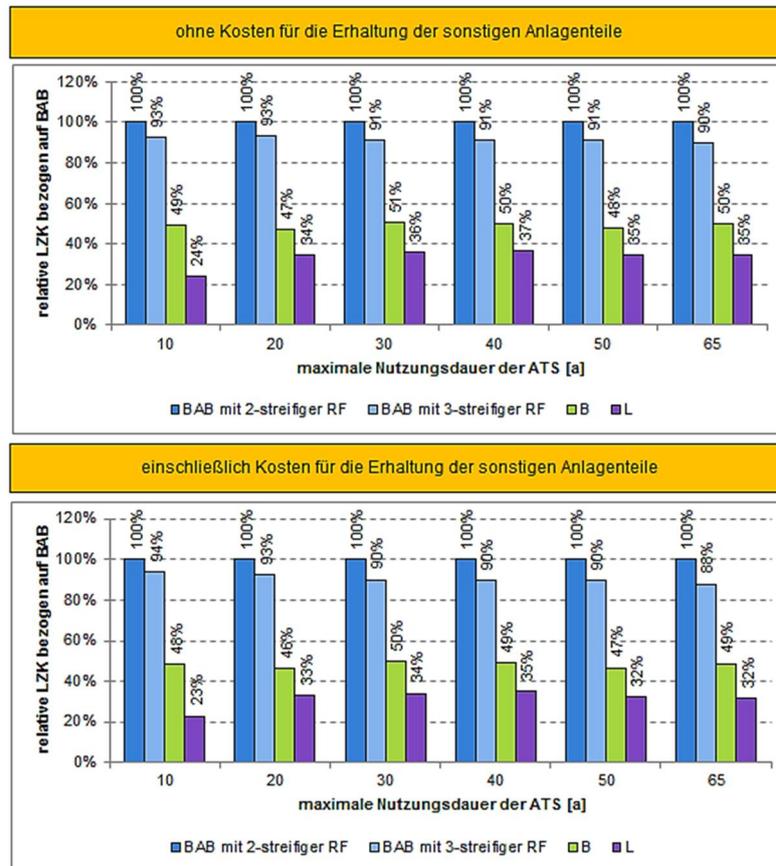


Abbildung 4-55: Relative Lebenszykluskosten verschiedener bezogen auf die jährlichen Lebenszykluskosten [€/m²] von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn

Vergleicht man die aus den Ergebnissen der Lebenszykluskostenberechnungen abgeleiteten Sigmoid-Funktionen für die verschiedenen Straßenkategorien miteinander, ergibt sich der in Abbildung 4-56 dargestellte Zusammenhang. Die gezeigten Kurven sind jeweils die Mittelwertfunktionen aller Betrachtungsfälle⁶.

Unabhängig von der Straßenkategorie ermöglicht eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht über die übliche Lebensdauer von 30 Jahren hinaus eine Reduzierung der Lebenszykluskosten um maximal rund 30 %. Sinkt die Nutzungsdauer hingegen, steigen besonders bei Autobahnen und Bundesstraßen die Kosten überproportional an. Bei einer angenommenen Lebensdauer der Asphalttragschicht von weniger als 10 Jahren erhöhen sich die Kosten gegenüber dem Referenzwert bei Autobahnen um rund 120 bis 130 %, bei Bundesstraßen um etwas über 110 %. Auf Landesstraßen lassen sich demgegenüber auch bei geringen Nutzungsdauern der Tragschicht verhältnismäßig wirtschaftliche Erhaltungsstrategien umsetzen, denn hier steigen die Kosten bei Nutzungsdauern kleiner dem Referenzwert von 30 Jahren nur maximal um etwa 50 % an. Da für den Oberbau von Landesstraßen keine Binderschicht vorgesehen wird, ergibt sich bei der Erhaltung ein „Zwangspunkt“ weniger, an dem eine Erhaltungsmaßnahme durchgeführt wer-

⁶ vgl. Autobahnen: Tabelle 4-1, Tabelle 4-2, Bundesstraßen: Tabelle 4-8, Tabelle 4-9, Landesstraßen: Tabelle 4-13, Tabelle 4-14

den muss. Hieraus resultieren besonders für die Deckschicht größere Optimierungspotenziale, da weniger vorgezogene Maßnahmen mit entsprechendem Wertverlust in Kauf genommen werden müssen.

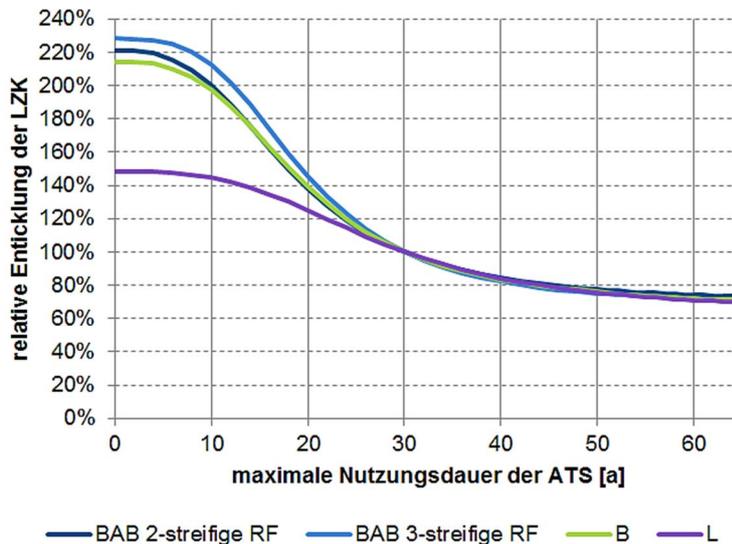


Abbildung 4-56: Vergleich der Entwicklung der Lebenszykluskosten verschiedener Straßenkategorien anhand der ermittelten Sigmoid-Funktionen

Neben der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht haben auch die Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die resultierenden Lebenszykluskosten. In Abbildung 4-57 ist dieser Einfluss für die untersuchten Straßenkategorien dargestellt. Die angegebenen Werte resultieren aus den mittleren Lebenszykluskosten aller Betrachtungsfälle der jeweiligen Straßenkategorie.

Es fällt auf, dass die Auswirkungen der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile auf die Lebenszykluskosten bei Autobahnen am geringsten sind. Betrachtet man das 75 %-Quantil, steigen die Lebenszykluskosten bei Berücksichtigung der Aufwendungen für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile hier um rund 12 % an. Eine entsprechende Erhöhung liegt bei Bundesstraßen mit einem 75 %-Quantil von rund 15 % (im Mittel etwa 13 %) geringfügig höher. Den größten Einfluss auf die Lebenszykluskosten haben die Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile bei Landesstraßen. Bei sehr hohen Nutzungsdauern der Asphalttragschicht kann ein Anstieg um bis zu 27 % festgestellt werden. Mit einem Wert von 19,5 % liegt das 75 %-Quantil noch einmal deutlich höher als bei Bundesstraßen.

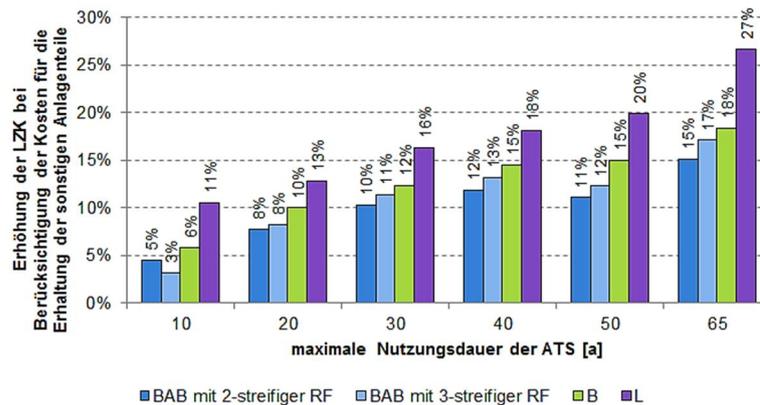


Abbildung 4-57: Relative Erhöhung der Lebenszykluskosten verschiedener Straßenkategorien bei Berücksichtigung der Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile

Besonders bei Bundes- und Landesstraßen werden die Lebenszykluskosten auch davon beeinflusst, ob eine Sicherung der Arbeitsstelle eingerichtet werden muss oder der Verkehr auf einer Umleitungsstrecke um die Baustelle herum geführt werden kann. Wird eine Sicherung der Baustelle notwendig, erhöhen sich die Lebenszykluskosten bei Bundesstraßen um ca. 2 bis 7 % (im Mittel um etwa 5,2 %). Bei Landesstraßen ist der Einfluss noch einmal deutlich stärker ausgeprägt. Das Einrichten und Vorhalten einer Baustellensicherung bewirkt eine Erhöhung der Lebenszykluskosten um 9 bis 20 % (im Mittel um rund 14,8 %), was etwa um den Faktor 2,8 höher ist als auf Bundesstraßen. Einen Überblick gibt Abbildung 4-58.

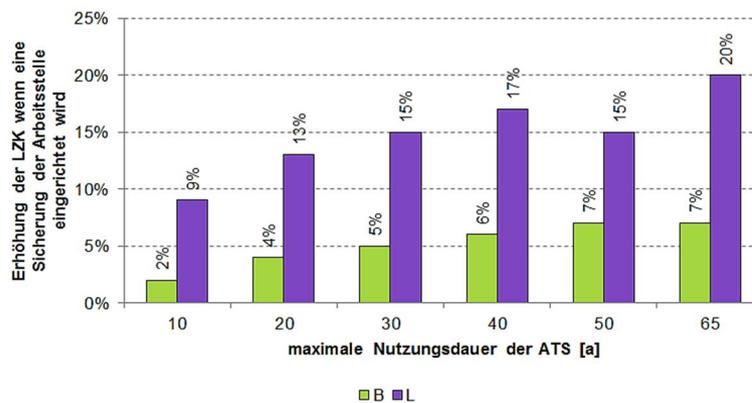


Abbildung 4-58: Relative Erhöhung der Lebenszykluskosten von Bundes- und Landesstraßen, wenn eine Sicherung der Arbeitsstelle eingerichtet und vorgehalten werden muss

Bei Autobahnen muss immer eine Sicherung der Arbeitsstelle eingerichtet werden, entsprechend ist eine Betrachtung wie bei Bundes- und Landesstraßen nicht sinnvoll. Die Kosten für die gewählte Verkehrsführung bei 2- und 3-streifiger Richtungsfahrbahn unterscheiden sich weiterhin nur unwesentlich, sodass von einem etwa gleichen Einfluss auf die Lebenszykluskosten ausgegangen werden kann.

4.5 VERGLEICH DER ERGEBNISSE DER LEBENSZYKLUSKOSTENBERECHNUNGEN MIT DEN LITERATURANGABEN

Auch in der Fachliteratur sowie in den Regelwerken der FGSV werden Angaben zum Finanzbedarf für die Erhaltung von Straßen gemacht. Diese unterscheiden sich jedoch untereinander oftmals nicht unerheblich und sogar maßgeblich von den in dieser Arbeit ermittelten Werten. ZILLENBILLER [79] veröffentlichte Angaben bezüglich der notwendigen Finanzmittel für die Bestandserhaltung von Straßen, die er mit Verweis auf nicht näher genannte Forschungsergebnisse auf rund 0,50 bis 2,00 €/m² bezifferte. Eine Untergliederung nach Straßenkategorien kann dem Bericht dabei nicht entnommen werden. Die Werte korrespondieren jedoch weitestgehend mit dem im Jahr 1999 im Auftrag der FGSV erarbeiteten Bericht von MAERSCHALK zum Projekt „ERHALTUNGSBEDARF FÜR BUNDESFERNSTRASSEN, LANDESSTRASSEN UND KOMMUNALSTRASSEN“ [80]. Der im Zuge dieser Forschungsarbeit kalkulierte Finanzbedarf für die Erhaltung von Straßen ist im Folgenden in Abhängigkeit von der Straßenkategorie aufgeführt (Stand 1999):

- Bundesautobahnen: ca. 2,00 € pro m²/Jahr
- Bundesstraßen: ca. 1,50 € pro m²/Jahr
- Landesstraßen (alte Länder): ca. 1,00 € pro m²/Jahr
- kommunale Straßen (alte Länder): ca. 1,00 € pro m²/Jahr
- Landesstraßen (neue Länder): ca. 2,30 € pro m²/Jahr
- kommunale Straßen (neue Länder): ca. 2,30 € pro m²/Jahr.

Die Werte basieren auf den Ergebnissen der ZEB-Kampagnen von 1993 und 1997/98 und hieraus abgeleiteten Strategiemodellen oder Investitionsrechnungen. Der angegebene Finanzbedarf für die Erhaltung von Straßen basiert demnach offensichtlich nicht auf Lebenszyklusbetrachtungen, sondern auf der Analyse des tatsächlichen Erhaltungsgeschehens über einen Zeitraum von 5 Jahren. Die Bedarfswerte sind dementsprechend ebenfalls Mittelwerte für 5-Jahresintervalle (1993 bis 1997).

Auch den Regelwerken der FGSV kann man Angaben zum Finanzbedarf für die Erhaltung von Straßen entnehmen. Konkrete Werte diesbezüglich finden sich im „MERKBLATT ÜBER DEN FINANZBEDARF DER STRASSENERHALTUNG IN DEN GEMEINDEN“ [81] aus dem Jahr 2004. Als Finanzbedarf im Sinne des Merkblatts werden dabei die Kosten für die bauliche Erhaltung und die betriebliche Unterhaltung einschließlich der Personal- und Gemeinkosten verstanden. Auch sonstige Anlagenteile sind Gegenstand der Ermittlung des Finanzbedarfs (Bankette, Gräben/Mulden, Durchlässe, Regenwasserkanäle, Straßenabläufe, Markierungen, Poller, Schutzplanken). Die angegebenen Kennwerte stellen den Bedarf an Geldmitteln dar, der benötigt wird, um den vorhandenen Zustand eines Straßennetzes aufrechtzuerhalten. Die Angaben zum Finanzbedarf für die Erhaltung aus dem Merkblatt resultieren aus Mittelwerten repräsentativer Umfragen bei deutschen Städten sowie einer Literaturrecherche.

Es werden folgende Angaben zum Finanzbedarf für die Erhaltung von Straßen gemacht:

- Verkehrsstraßen: ca. 1,30 € pro m²/Jahr
- Anliegerstraße: ca. 1,10 € pro m²/Jahr
- Wirtschaftswege: ca. 0,80 € pro m²/Jahr

Das Merkblatt stellt dabei nach wie vor den Stand der Technik dar und die hierin angegebenen Werte bezüglich des Finanzbedarfs für die Erhaltung von Straßen werden nach wie vor in der Fachwelt zitiert (z.B. [82]).

In Tabelle 4-18 ist der Finanzbedarf für die Erhaltung von Straßen aus der Literatur und der vorliegenden Arbeit noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4-18: Vergleich des jährlichen Finanzbedarfs

| Literatur | Finanzbedarf pro Jahr und m² |
|--|--|
| | [€/m ²] |
| Erhaltungsbedarf für Bundesfernstraßen, Bundesstraßen und Kommunalstraßen (1999) [80] | |
| Bundesautobahnen | 2,00 (2,50) |
| Bundesstraßen | 1,50 (1,90) |
| Landesstraßen | |
| alte Bundesländer | 1,00 (1,30) |
| neue Bundesländer | 2,30 (2,90) |
| Kommunalstraßen | |
| alte Bundesländer | 1,00 (1,30) |
| neue Bundesländer | 2,30 (2,90) |
| Merkblatt über den Finanzbedarf der Straßenerhaltung in den Gemeinden (2004) [81] | |
| Verkehrsstraße | 1,30 (1,60) |
| Anliegerstraße | 1,10 (1,40) |
| Wirtschaftsweg | 0,80 (1,00) |
| Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Lebenszykluskosten von Straßen in Asphaltbauweise(2015) | |
| Bundesautobahn | |
| 2-streifige Richtungsfahrbahn | 8,50 |
| 3-streifige Richtungsfahrbahn | 7,73 |
| Bundesstraße | |
| Vollsperrung | 4,85 |
| halbseitige Sperrung | 5,08 |
| Landesstraße | |
| Vollsperrung | 3,25 |
| halbseitige Sperrung | 3,77 |

Werte in Klammern () entsprechen den mittels Baupreisindex auf Ende 2014 hochgerechneten Erhaltungsbedarf

Vergleicht man die obigen Literaturangaben mit den in dieser Arbeit berechneten Lebenszykluskosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren, fällt auf, dass die Werte gemäß MAERSCHALK sowie dem MERKBLATT wesentlich geringer sind. Die Ursachen für

diese Abweichungen müssen einer näheren Betrachtung unterzogen werden, um sie beurteilen und in einen geeigneten Kontext setzen zu können.

Die in dieser Arbeit berechneten jährlichen Lebenszykluskosten sind gegenüber den von MAERSCHALK ermittelten Bedarfswerten bei Bundesautobahnen im Mittel um den Faktor 4, bei Bundesstraßen um den Faktor 3 und bei Landesstraßen etwa um den Faktor 1,5 bis 3,5 höher. Obwohl im Kurzbericht von MAERSCHALK die Annahmen und Eingangsparameter zur Berechnung des Finanzbedarfs nicht ausführlich erläutert sind, können doch einige Gründe für die Abweichungen zu den in dieser Arbeit ermittelten Ergebnissen dargelegt werden.

Das generelle Vorgehen von MAERSCHALK zur Ermittlung des Finanzbedarfs unterscheidet sich von den Lebenszykluskostenberechnungen in dieser Arbeit. Zunächst bildet MAERSCHALK Gruppen, in denen der Straßenbestand mit ähnlichem Verhalten unter Verkehr und damit vergleichbaren Erhaltungsstrategien zusammengefasst werden. Letztere ergeben sich aus der Verknüpfung der Erhaltungsmaßnahmen, ihren Kosten und den empirisch ermittelten Eingreifzeitpunkten. Mit wahrscheinlichkeitsverteilten Nutzungszeiten auf Basis der Altersstruktur wird anschließend die zu erhaltende Fläche ermittelt und mit den Erhaltungskosten verrechnet. Der Betrachtungszeitraum beträgt dabei lediglich 5 Jahre, d.h. während dieser Zeitspanne werden die Kosten für die festgelegten Erhaltungsmaßnahmen aufsummiert und anschließend in jährliche Quadratmeterkosten umgerechnet. Es wird demnach kein Lebenszyklus inklusive dem Neubau bzw. der grundhaften Erneuerung, sondern lediglich die notwendige Erhaltung während des Prognosezeitraums betrachtet.

Auch wenn sie von MAERSCHALK als Teil des Erhaltungsbedarfs aufgeführt werden, finden die Kosten für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile augenscheinlich keinen direkten Eingang in die berechneten Werte. Hierfür spricht auch, dass der Erhaltungsbedarf aus den Ergebnissen verschiedener ZEB-Kampagnen abgeleitet wird, die die sonstigen Anlagenteile von Straßen nicht systematisch berücksichtigen.

Einen signifikanten Einfluss auf die Lebenszykluskosten hat weiterhin die gewählte Verzinsungsrate und ob überhaupt eine solche angesetzt wird. Darüber hinaus ist entscheidend, ob eine Askontierung oder eine Diskontierung vollzogen wird. Aus dem Kurzbericht von MAERSCHALK geht nicht hervor, wie mit diesem Sachverhalt umgegangen wird. Es muss jedoch aufgrund der Größenordnung der Werte davon ausgegangen werden, dass entweder keine Verteuerungen durch Inflation berücksichtigt oder zukünftige Investitionen sogar abgezinst wurden. Auch aktuellere Forschungsprojekte arbeiten bei Lebenszykluskostenberechnungen mit einer Diskontierung, beispielsweise RESSEL ET. AL. [25]. Allerdings hat die Arbeit von RESSEL ET. AL die Beurteilung der Gesamtwirtschaftlichkeit, also inklusive der Nutzerkosten zum Gegenstand. Entsprechende Fragestellungen sind für den Baulastträger in der Regel von untergeordneter Bedeutung und nicht gleichzusetzen mit der Berechnung eines tatsächlichen Bedarfs an Geldmitteln. Eine Diskontierung erscheint vor diesem Hintergrund und je nach konkreter Aufgabenstellung zunächst also durchaus angemessen. Bei der eigentlichen Bewertung einer Restsubstanz gehen RESSEL ET. AL. [22] jedoch auch von einer Verteuerung und damit Askontierung aus.

Um diesen Sachverhalt zumindest in erster Näherung weiter zu untersuchen, wurden die in dieser Arbeit berechneten Lebenszykluskosten für Autobahnen noch einmal ohne Verzinsung und mit einer Diskontierung von 3 % ermittelt. Gleichzeitig wurden die Kosten für den Neubau bzw. die grundhafte Erneuerung zum Zeitpunkt $t=0$ nicht mit eingerechnet, ebenso wenig wie die Aufwendungen für die Erhaltung der sonstigen Anlagenteile. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in Abbildung 4-59 dargestellt.

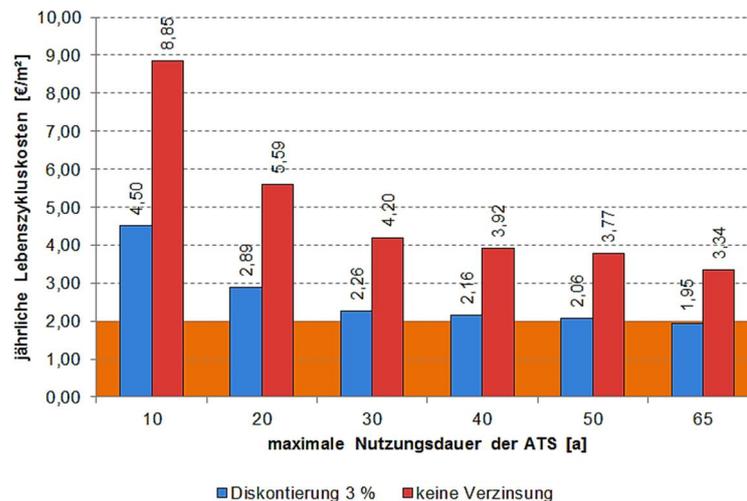


Abbildung 4-59: Jährliche Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn bei einer Diskontierung von 3 % und ohne Verzinsung in Abhängigkeit von der maximalen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht

Es ist zu erkennen, dass die in dieser Arbeit berechneten Lebenszykluskosten von Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn bei einer Diskontierung von 3 % durchaus der Größenordnung von MAERSCHALK entsprechen, wenn die Nutzungsdauer der Asphalttragschicht mehr als 30 Jahre beträgt. Wird hingegen auf eine Verzinsung verzichtet, liegen die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Lebenszykluskosten auch bei der maximalen Nutzungsdauer der Tragschicht von 65 Jahren rund 1,34 €/m² (bzw. etwa 67 %) über den Angaben gemäß dem Forschungsbericht von MAERSCHALK. Weitere Testrechnungen in der vorliegenden Arbeit ergaben darüber hinaus, dass bei Bundes- und Landesstraßen – besonders bei höheren Nutzungsdauern der Asphalttragschicht – ähnliche Kosten wie von MAERSCHALK ermittelt werden, wenn keine Verzinsung angesetzt wird. Es kann deshalb angenommen werden, dass der berechnete Finanzbedarf von MAERSCHALK keine Verzinsung beinhaltet. Weiterhin kann vermutet werden, dass weiterhin höhere Nutzungsdauern für die Deck- und Binderschicht angesetzt wurden.

Das MERKBLATT ÜBER DEN FINANZBEDARF DER STRASSENERHALTUNG IN DEN GEMEINDEN hat die Straßenerhaltung von Gemeinden zum Gegenstand. Deshalb ist ein Vergleich mit den in dieser Arbeit berechneten Lebenszykluskosten von Bundesautobahnen und Bundesstraßen nicht sinnvoll. Trotzdem fällt auf, dass auch der in der vorliegenden Dissertation berechnete Finanzbedarf für Landesstraßen rund 2,5 bis 2,9-mal höher ist, als gemäß dem Regelwerk. Auch wenn die-

ses keine vollständigen Angaben darüber macht, welche Randbedingungen den angegebenen Werten zugrunde liegen, können folgende Gründe für die Abweichungen genannt werden:

- Der Kostenstand des Merkblatts ist das Jahr 2002. Nimmt man den Baupreisindex als Indikator, sind die dort angegebenen Kosten bezogen auf das Ende des Jahres 2014 rund 26 % niedriger. Gleichzeitig sind in den Werten des Merkblatts jedoch Mehrwertsteuern in Höhe von 16 % enthalten. Diese sind in den in der vorliegenden Arbeit ermittelten Kosten noch nicht beaufschlagt.
- Es ist unklar welche Erhaltungsstrategien den Werten des Merkblatts zugrunde liegen. Die im Regelwerk enthaltenen Beispiele lassen jedoch vermuten, dass in Anlehnung an die Vorgaben der RPE-STRA sehr hohe Nutzungsdauern für die Schichten zugrunde gelegt werden (vgl. Abbildung 4-60). Hieraus ergeben sich während des Lebenszyklus weniger kostenintensive Erhaltungsmaßnahmen und damit ein niedrigerer Finanzbedarf.
- Angaben zu den Dicken der Schichten des Straßenoberbaus oder des verwendeten Mischguts können dem Merkblatt nicht entnommen werden. Gleiches gilt für die angenommene Ausstattung mit sonstigen Anlagenteilen.
- Im Merkblatt werden keine kalkulatorischen Kosten berücksichtigt, d.h. auch keine Verzinsung. Dieser Umstand hat deutlich geringere Kosten zur Folge.

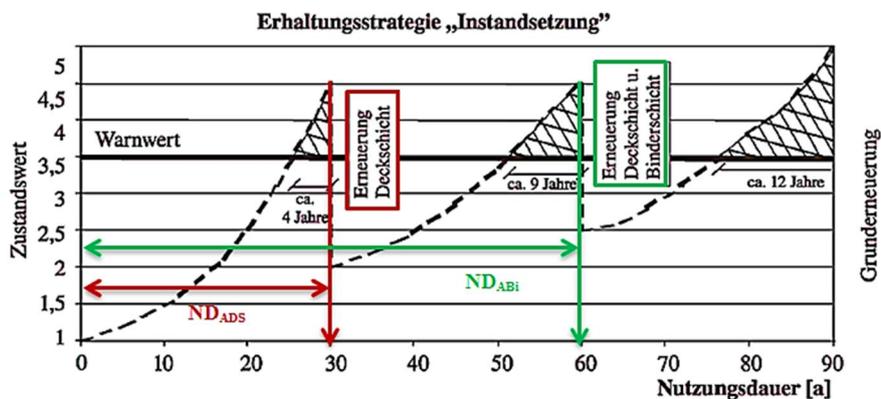


Abbildung 4-60: Beispiel für eine Erhaltungsstrategie gemäß dem Merkblatt über den Finanzbedarf von Straßen in den Gemeinden [81]

5 SCHLUSSBETRACHTUNG

5.1 LEBENSZYKLUSKOSTEN VON STRASSENBEFESTIGUNGEN

Die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus einer Straßenbefestigung ist ein zentrales Anliegen der Straßenbaulasträger. Entsprechende Ansätze erlauben es, die Kosten für die Erstellung und Erhaltung einer Verkehrsverbindung so gering wie möglich zu halten.

Lange Zeit hatten die erarbeiteten Bewertungsverfahren für die Behandlung konkreter Restsubstanzen einer Straßenbefestigung keine befriedigende Lösung. Entweder wurden Restnutzungsdauern beispielsweise auf der Grundlage von Befragungen [18] oder anhand des nicht mehr zeitgemäßen Arbeitspapiers Substanzwert (Bestand) [23] vorgenommen. Entsprechende Ansätze können allenfalls für eine globale Betrachtung auf Netzebene herangezogen werden, für eine praxisgerechte Beurteilung konkreter Straßenbefestigungen im Einzelfall sind sie nicht geeignet.

Da man sich dieses Defizits bewusst war, wurde das Forschungsprojekt „GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG DER DIMENSIONIERUNGSRELEVANTEN EIGENSCHAFTEN UND DER WIRTSCHAFTLICHKEIT VON OBERBAUBEFESTIGUNGEN AUS ASPHALT“ [5] (im Weiteren als FE Wirtschaftlichkeit bezeichnet) initiiert und im Jahr 2014 abgeschlossen. Im Zuge dessen wurde ein Verfahren erarbeitet, das in Anlehnung an das Vorgehen der zeitgleich entstehenden RSO ASPHALT [4] eine Berechnung der Lebenszykluskosten von Straßenbefestigungen unter Einbeziehung der strukturellen Substanz ermöglicht. Durch eine umfangreiche Erstanwendung konnten in dem Projekt bereits wichtige Erkenntnisse bezüglich der Lebenszykluskosten von Straßen sowie wichtiger Einflussfaktoren gewonnen werden.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an und erweitert die Ergebnisse des FE Wirtschaftlichkeit um wichtige Aspekte, wie beispielsweise verschiedene Straßenkategorien und die Lebenszykluskosten der sonstigen Anlagenteile. Andere Einflussfaktoren, die in dem Forschungsprojekt bereits näher untersucht wurden, werden in dieser Arbeit hingegen nicht noch einmal detailliert behandelt. Dementsprechend ist eine Verknüpfung der Ergebnisse sinnvoll, um diese in einem gemeinsamen Kontext zu betrachten und möglichst viele Randparameter in die Lebenszykluskostenberechnungen mit einzubeziehen. Dies ist jedoch zunächst nur für Autobahnen möglich, da Bundes- und Landesstraßen im FE Wirtschaftlichkeit nicht untersucht wurden. Falls sinnvoll, wird aber versucht, die Erkenntnisse auch auf die anderen Straßenkategorien zu übertragen.

5.1.1 EINFLUSS DER NUTZUNGSDAUER DER ASPHALTTRAGSCHICHT

Die Ergebnisse des FE Wirtschaftlichkeit und der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die maximale Nutzungsdauer der Asphalttragschicht signifikanten Einfluss auf die Lebenszykluskosten einer Straßenbefestigung hat. Für die weiteren Betrachtungen in diesem Kapitel wird davon ausgegangen, dass die Asphalttragschicht eine übliche Nutzungsdauer von 30 Jahren aufweist. Dieser Betrachtungsfall dient dann als Referenz, um einen jährlichen Nutzen in Form von höheren oder

niedrigeren Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht auszuweisen.

In Abbildung 5-1 ist die prozentuale Erhöhung bzw. Verringerung der Lebenszykluskosten von Autobahnen bezogen auf die berechneten Kosten bei einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren dargestellt. Die graue Kurve visualisiert die Ergebnisse des FE Wirtschaftlichkeit, wird jedoch aufgrund teilweise abweichender Eingangsparameter trotz guter Korrelation mit den Ergebnissen dieser Arbeit nicht in die in Tabelle 5-1 zusammengefasste Auswertung mit einbezogen.

Es ist zu erkennen, dass eine Verkürzung der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht um 1 Jahr gegenüber der üblichen Nutzungsdauer von 30 Jahren bei Autobahnen mit 2-streifiger Richtungsfahrbahn eine Erhöhung der Lebenszykluskosten um etwa 3,2 bis 6,0 % (im Mittel 4,6 %) und bei Autobahnen mit 3-streifiger Richtungsfahrbahn um rund 3,5 bis 6,4 % (im Mittel 5 %) bewirkt. Eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht um 1 Jahr gegenüber der üblichen Nutzungsdauer von 30 Jahren ermöglicht bei Autobahnen mit 2- und 3-streifiger Richtungsfahrbahn hingegen eine Verringerung der Lebenszykluskosten um rund 0,6 bis 1,3 % (der Mittelwert beträgt 0,9 %)

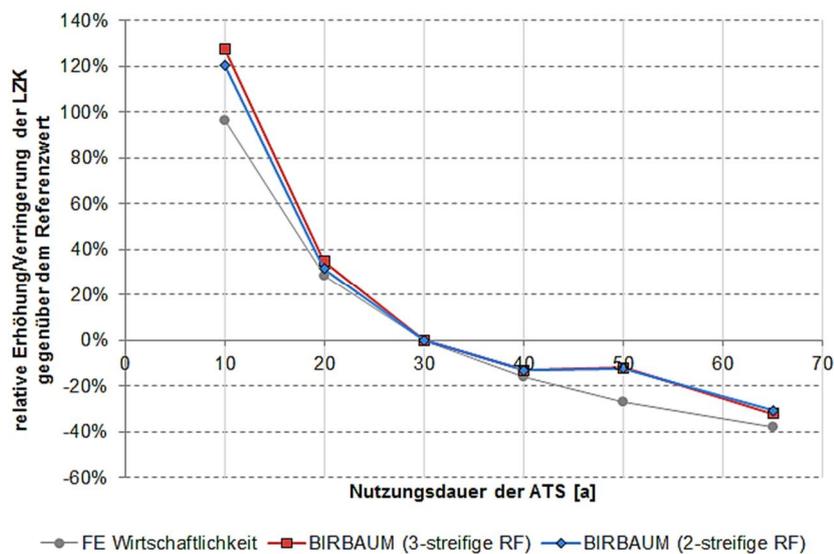


Abbildung 5-1: Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten von Autobahnen, ausgehend von einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich der sonstigen Anlagenteile)

Tabelle 5-1: Prozentuale Entwicklung der Lebenszykluskosten von Autobahnen, bezogen auf eine übliche Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich der sonstigen Anlagenteile)

| tatsächliche Nutzungsdauer der ATS [a] | relative Entwicklung der Lebenszykluskosten | | relative Entwicklung der Lebenszykluskosten pro Jahr | | |
|--|---|----------------|--|----------------|-------|
| | 2-streifige RF | 3-streifige RF | 2-streifige RF | 3-streifige RF | |
| 10 | +120,6 % | +127,7 % | +6,0 % | +6,4 % | |
| 20 | +31,6 % | +34,9 % | +3,2 % | +3,5 % | |
| 30 | ± 0 % | ± 0 % | ± 0 % | ± 0 % | |
| 40 | -13,1 % | -13,1 % | -1,3 % | -1,3 % | |
| 50 | -12,4 % | -11,9 % | -0,6 % | -0,6 % | |
| 65 | -30,7 % | -32,0 % | -0,9 % | -0,9 % | |
| Mittel | ND _{ATS} < 30 a | +76,1 % | +81,3 % | +4,6% | +5,0% |
| | ND _{ATS} > 30 a | -18,7 % | -19,0 % | -0,9% | -0,9% |

Auch für Bundesstraßen wurde zunächst die Erhöhung bzw. Verringerung der Lebenszykluskosten bezogen auf eine übliche Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren ermittelt und in Abbildung 5-2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Art der Sicherung der Arbeitsstelle keinen signifikanten Einfluss auf diese Entwicklung hat, beide Kurven sind nahezu identisch. Die graue Linie im Diagramm stellt noch einmal die Ergebnisse des FE Wirtschaftlichkeit dar, auch wenn diese aufgrund der Ausrichtung des Forschungsprojekts streng genommen nur für Autobahnen gilt. Trotzdem korrelieren die Kurven gut.

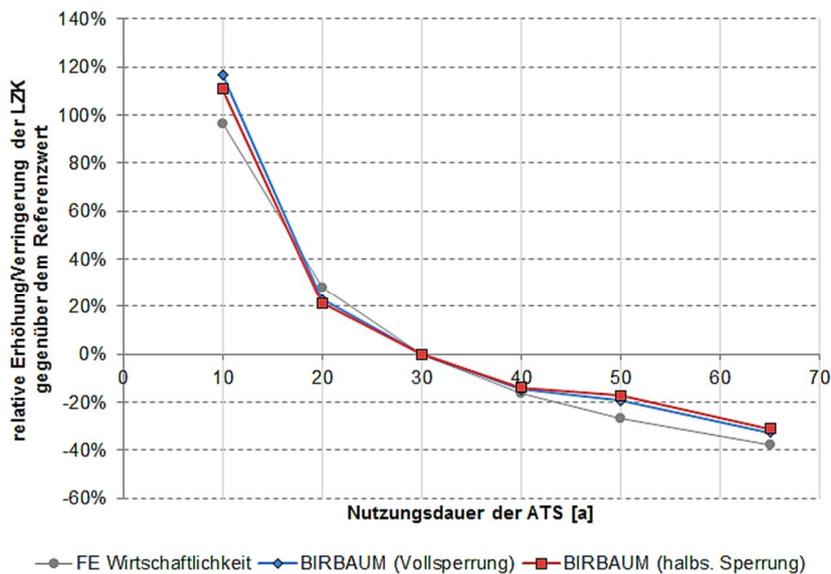


Abbildung 5-2: Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten von Bundesstraßen, ausgehend von einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich der sonstigen Anlagenteile)

Tabelle 5-2: Prozentuale Entwicklung der Lebenszykluskosten von Bundesstraßen, bezogen auf eine übliche Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich sonstiger Anlagenteile)

| tatsächliche Nutzungsdauer der ATS [a] | relative Entwicklung der Lebenszykluskosten | | relative Entwicklung der Lebenszykluskosten pro Jahr | | |
|--|---|-----------------|--|-----------------|-------|
| | Vollsperrung | halbs. Sperrung | Vollsperrung | halbs. Sperrung | |
| 10 | 117% | 111% | 5,9% | 5,6% | |
| 20 | 23% | 21% | 2,3% | 2,1% | |
| 30 | ± 0 % | ± 0 % | ± 0 % | ± 0 % | |
| 40 | -15% | -14% | -1,5% | -1,4% | |
| 50 | -19% | -17% | -1,0% | -0,9% | |
| 65 | -33% | -31% | -0,9% | -0,9% | |
| Mittel | ND _{ATS} < 30 a | 70,0% | 66,0% | 4,1% | 3,8% |
| | ND _{ATS} > 30 a | -22,3% | -20,7% | -1,1% | -1,0% |

Aus Tabelle 4-2 kann entnommen werden, dass eine gegenüber dem Referenzwert von 30 Jahren um ein Jahr verkürzte Nutzungsdauer der Asphalttragschicht jährlich höhere Lebenszykluskosten in einer Größenordnung von 2,1 bis 5,9 % (im Mittel etwa 4,0 %) bewirkt. Kann die Lebensdauer der Asphalttragschicht gegenüber dem Referenzwert hingegen um ein Jahr erhöht werden, reduzieren sich die resultierenden Lebenszykluskosten der Befestigung um etwa 0,9 bis 1,5 %. Dies entspricht einem Mittelwert von rund 1,0 %.

Die relative Erhöhung bzw. Verringerung der Lebenszykluskosten von Landesstraßen, ausgehend von einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren, ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Wie auch bei Bundesstraßen hat die Art der Sicherung der Arbeitsstelle nur einen geringen Einfluss auf den Kurvenverlauf, beide sind nahezu identisch bzw. liegen nah beieinander. Bezüglich der Entwicklung der Lebenszykluskosten von Landesstraßen zeigt sich, dass eine Verkürzung der Nutzungsdauer um 1 Jahr gegenüber dem Referenzwert von 30 Jahren einhergeht mit einer Erhöhung der Lebenszykluskosten der Straßenbefestigung um rund 2,2 bis 2,8 % (im Mittel etwa um 2,6 %).

Wird die Nutzungsdauer der Tragschicht bezogen auf den Referenzwert verlängert, sinken die Lebenszykluskosten pro Jahr um ca. 0,9 bis 2,7 %. Das entspricht einem Mittelwert von etwa 1,0 %.

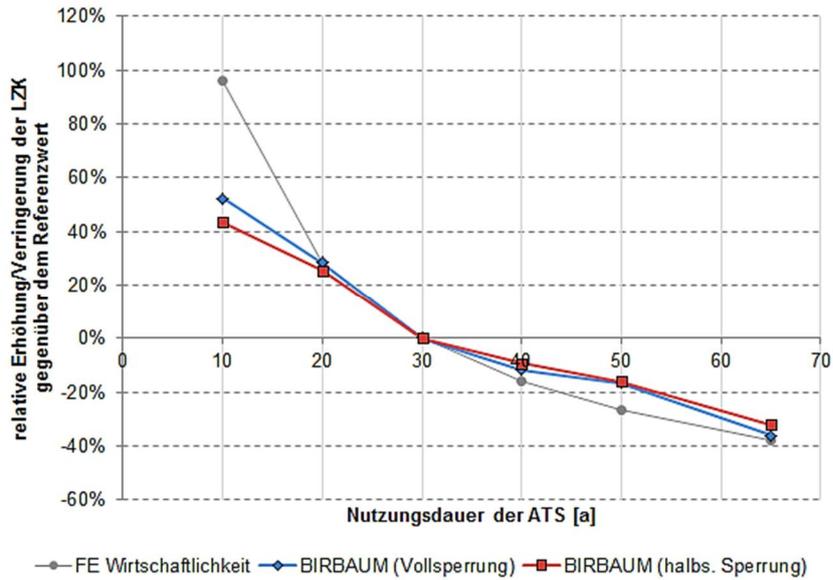


Abbildung 5-3: Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten von Landesstraßen, ausgehend von einer üblichen Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren

Tabelle 5-3: Prozentuale Entwicklung der Lebenszykluskosten von Landesstraßen, bezogen auf eine übliche Nutzungsdauer der Asphalttragschicht von 30 Jahren (einschließlich sonstiger Anlagenteile)

| tatsächliche Nutzungsdauer der ATS [a] | relative Entwicklung der Lebenszykluskosten | | relative Entwicklung der Lebenszykluskosten pro Jahr | | |
|--|---|-----------------|--|-----------------|-------|
| | Vollsperrung | halbs. Sperrung | Vollsperrung | halbs. Sperrung | |
| 10 | +52% | +43% | 2,6% | 2,2% | |
| 20 | +28% | +26% | 2,8% | 2,6% | |
| 30 | ± 0% | ± 0% | ± 0% | ± 0% | |
| 40 | -12% | -10% | -1,2% | -1,0% | |
| 50 | -17% | -16% | -0,9% | -0,8% | |
| 65 | -36% | -32% | -1,0% | -0,9% | |
| Mittel | ND _{ATS} < 30 a | 40,0% | 34,5% | 2,7% | 2,4% |
| | ND _{ATS} > 30 a | -21,7% | -19,3% | -1,0% | -0,9% |

Tabelle 5-4 fasst die Entwicklung der Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von der Straßenkategorie noch einmal zusammen.

Tabelle 5-4: Lebenszykluskostenveränderung bei Veränderung der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht pro Jahr

| | Straßenkategorie | | |
|--------------------------|------------------|---------------|---------------|
| | Autobahnen | Bundesstraßen | Landesstraßen |
| ND _{ATS} < 30 a | +4,8 % | +4,0 | +2,6 |
| ND _{ATS} > 30 a | -0,9 % | -1,0 | -0,9 |

5.1.2 EINFLUSS DER NUTZUNGSDAUER UND KOSTEN DER ASPHALTDECKSCHICHT

Im FE Wirtschaftlichkeit wurden weiterführende Untersuchungen bezüglich des Einflusses variierender Nutzungsdauern der Asphaltdeckschicht sowie der Kosten für die Herstellung der Deckschicht durchgeführt.

Das Forschungsprojekt kam zu dem Ergebnis, dass der Kostenvorteil einer um ein Jahr verlängerten Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht höhere Kosten für die Herstellung dieser Schicht in einer Größenordnung von 6,8 % zulässt. Darüber hinaus kann die dreifach variierte Nutzungsdauer der Deckschicht jedoch auch dafür genutzt werden, die hieraus resultierenden Lebenszykluskosten funktional zu beschreiben. Es ergibt sich der nahezu konstante Zusammenhang gemäß Abbildung 5-4, wenn man eine Nutzungsdauer der Deckschicht von 12 Jahren als Referenz ansetzt.

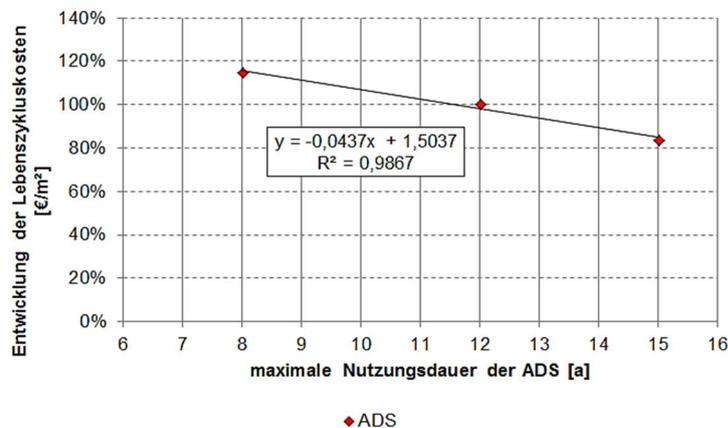


Abbildung 5-4: Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten der Straßenbefestigung in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht (in Anlehnung an [5])

Anhand der somit bekannten Funktionsparameter kann dann die (relative) Entwicklung der jährlichen Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von weiteren Nutzungsdauern der Asphaltdeckschicht ermittelt und mit den Ergebnissen dieser Arbeit verknüpft werden. Hierzu wurden die mittels der Sigmoid-Funktion berechnete Entwicklung der Lebenszykluskosten von Autobahnen in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht mit dem relativen Anstieg bzw. der Verringerung der Kosten aufgrund der Lebensdauer der Deckschicht kombiniert.

Hieraus ergeben sich die in Abbildung 5-5 dargestellten Hüllkurven. Eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht über den in dieser Arbeit verwendeten Referenzwert von 12 Jahren hinaus, wirkt sich folglich positiv auf die Lebenszykluskosten aus und umgekehrt. Der Zusammenhang zwischen der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht, der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht und der Entwicklung der Lebenszykluskosten von Autobahnen ist in Abbildung 5-6 als Flächendiagramm visualisiert.

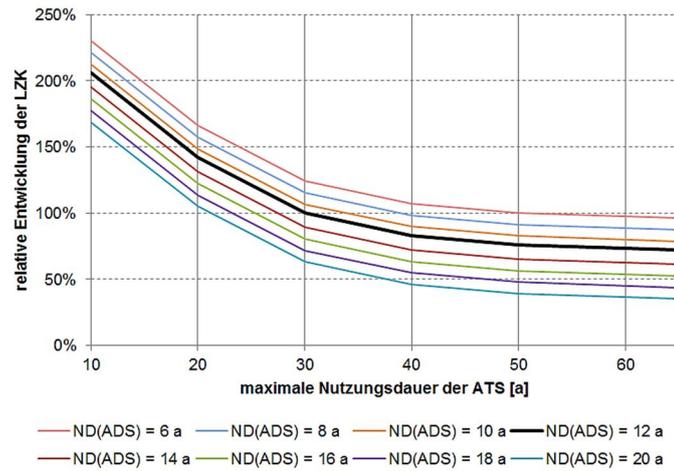


Abbildung 5-5: Einfluss der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen

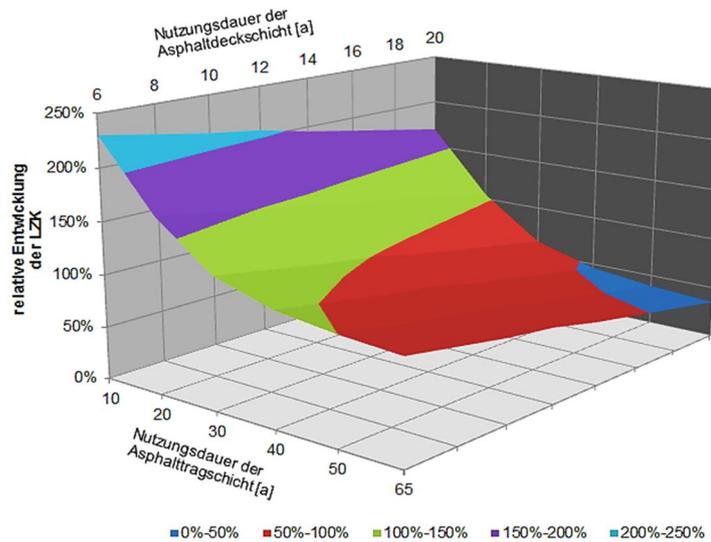


Abbildung 5-6: Einfluss der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen (Flächendiagramm)

Der Einfluss der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen ist in Tabelle 5-5 übersichtlich als Wertematrix dargestellt.

Tabelle 5-5: Einfluss der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten von Autobahnen

| Nutzungsdauer der ATS [a] | Nutzungsdauer der ADS [a] | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 10 | 230% | 221% | 213% | 206% | 195% | 186% | 178% | 169% |
| 20 | 166% | 157% | 149% | 142% | 131% | 122% | 114% | 105% |
| 30 | 124% | 115% | 107% | 100% | 89% | 80% | 72% | 63% |
| 40 | 107% | 98% | 90% | 83% | 72% | 63% | 55% | 46% |
| 50 | 100% | 91% | 83% | 76% | 65% | 56% | 48% | 39% |
| 65 | 96% | 87% | 79% | 72% | 61% | 52% | 44% | 35% |

Referenzwert

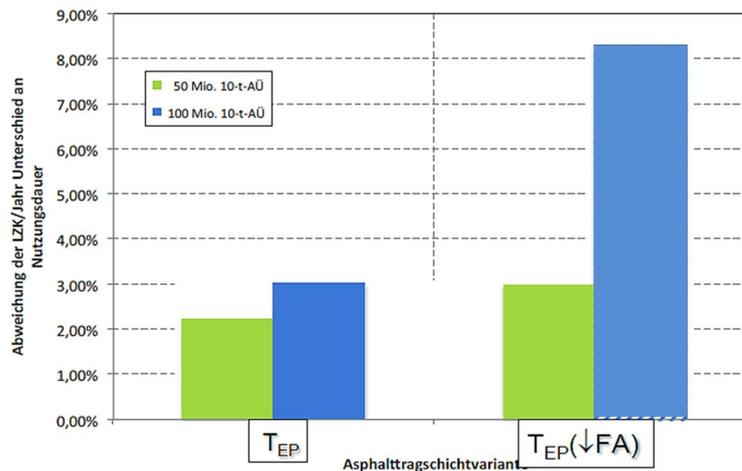
Auch der Einfluss der Kosten für die Herstellung der Asphaltdeckschicht auf die Lebenszykluskosten wurde in dem FE Wirtschaftlichkeit untersucht. Unterschiede ergaben sich dabei durch die Variation der Mischgutzusammensetzung, die jeweils in den zulässigen Grenzen der DIN EN 13108-21 [39] lag. Hieraus resultierten Schwankungen der Kosten für die Deckschicht von etwa $\pm 6,5\%$. Als Ergebnis der Lebenszykluskostenberechnungen ergab sich, dass 10 % höhere Kosten der Asphaltdeckschicht bei unveränderter Nutzungsdauer rund 2,5 % höhere Lebenszykluskosten für die Befestigung zur Folge haben. Der Einfluss der Kosten ist also deutlich geringer als beispielsweise die Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht und kann als weniger signifikant angesehen werden.

Wie bereits erwähnt, beschränken sich die Untersuchungen des FE Wirtschaftlichkeit auf Autobahnen. Inwieweit sich die darin gewonnenen Erkenntnisse auf die anderen Straßenkategorien übertragen lassen, sollte in weiteren Untersuchungen eruiert werden. Aufgrund einer ähnlichen Entwicklung der Lebenszykluskosten der verschiedenen Straßenkategorien in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Asphalttragschicht kann jedoch zumindest in erster Näherung vermutet werden, dass sich auch der Einfluss der Lebensdauer der Deckschicht bei Bundes- und Landesstraßen ähnlich verhält.

5.1.3 EINFLUSS DES EINBAUS

Um die Lebenszykluskosten einer neu zu errichtenden Straßenbefestigung anhand der strukturellen Substanz zu bestimmen, ist es notwendig, im Labor Probekörper aus den vorgesehenen Asphaltmischgütern herzustellen und an diesen die materialspezifischen Parameter – besonders die Steifigkeits-Temperaturfunktion sowie die Ermüdungskurve – zu ermitteln. Ob die im Labor ermittelten dimensionierungsrelevanten Eingangsparameter und damit die zugrunde gelegten Nutzungsdauern auch tatsächlich erreicht werden, wird im weiteren Prozess jedoch maßgeblich durch die Qualität des Einbaus bedingt. Um die Auswirkungen quantifizieren zu können, wurden im FE Wirtschaftlichkeit auch diesbezüglich Untersuchungen vorgenommen. Der Einfluss des Einbaus

ist dabei durchaus bedeutend, wie Abbildung 5-7 zeigt. Hierin ist die Erhöhung bzw. Verringerung der Lebenszykluskosten angegeben, wenn sich die Nutzungsdauer der Asphalttragschicht um 1 Jahr gegenüber der Dimensionierung verändert.



T_{EP} Befestigung mit Asphalttragschichtmischgut gemäß Erstprüfung
 T_{EP} (↓FA) Befestigung mit Asphalttragschichtmischgut mit gröberer Korngrößenverteilung

Abbildung 5-7: Einfluss einer von der Dimensionierung abweichenden Nutzungsdauer am Bohrkern auf die jährlichen Lebenszykluskosten [5]

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts müssen aufgrund des begrenzten Umfangs der Untersuchungen sowie der resultierenden Ergebnisse als nur eingeschränkt repräsentativ angesehen werden. Es wurde in dem FE Wirtschaftlichkeit in erster Näherung abgeschätzt, dass sich die Erhöhung oder Verringerung der Nutzungsdauer am Bohrkern um ein Jahr gegenüber der Dimensionierung auf die jährlichen Lebenszykluskosten mit einer Veränderung von rund 2 bis 3 % auswirkt.

Solche Erkenntnisse sind von großer Bedeutung für Lebenszyklusbetrachtungen. Lassen sich die Materialparameter von im Labor hergestellten Probekörpern nicht auch in der tatsächlichen Befestigung – also an entnommenen Bohrkernen – nachweisen, sind Lebenszykluskostenberechnungen mit großen Unsicherheiten behaftet.

5.2 FAZIT

In dem FE Wirtschaftlichkeit [5] wurden bereits wichtige Erkenntnisse bezüglich der Berechnung von Lebenszykluskosten von Straßen in Asphaltbauweise gewonnen. Ein auf der strukturellen Substanz aufbauendes Bewertungsverfahren wurde einer umfangreichen Erstanwendung unterzogen und wichtige Ergebnisse bezüglich der verschiedenen Einflussfaktoren gewonnen. Das Forschungsvorhaben beschränkte sich bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen jedoch auf die Straßenkategorie der Autobahnen und legte den Berechnungen eine Reihe von Vereinfachungen zugrunde. So wurden beispielsweise die sonstigen Anlagenteile bei der Ermittlung der Lebenszyk-

luskosten nicht berücksichtigt und bei den gewählten Erhaltungsmaßnahmen wurde pauschal mit einer Einbaubreite von 7,5 m gerechnet. Dementsprechend fand auch keine Unterscheidung zwischen Querschnitten mit 2- bzw. 3-streifiger Richtungsfahrbahn einschließlich unterschiedlicher Regelpläne zur Sicherung der Arbeitsstelle statt.

Durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit konnten diese Defizite weitestgehend eliminiert werden. Die Verknüpfung der Erkenntnisse des FE Wirtschaftlichkeit und dieser Arbeit ermöglichen für Autobahnen die Ermittlung von Lebenszykluskosten unter Einbeziehung verschiedener wichtiger Randparameter und Einflussfaktoren. Trotzdem besteht vor allem für die Straßenkategorien der Bundes- und Landesstraßen noch weiterer Forschungsbedarf, um in Zukunft Lebenszykluskosten unter Einbeziehung möglichst aller relevanten Einflussfaktoren ermitteln zu können.

5.3 WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Zwar wurden in dieser Dissertation umfassende Untersuchungen bezüglich der Lebenszykluskosten verschiedener Straßenkategorien durchgeführt, trotzdem existiert bezüglich der Thematik der Wirtschaftlichkeit von Straßenkonstruktionen noch großer Forschungsbedarf. Die wichtigsten Forschungsgebiete werden im Folgenden ohne spezifische Reihenfolge aufgeführt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit den Lebenszykluskosten von Straßen in Asphaltbauweise. Dabei bleibt zunächst unberücksichtigt, dass entsprechende Ansätze auch dazu genutzt werden können, konkurrierende Bauweisen bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit miteinander zu vergleichen. Entsprechende Fragestellungen haben nach wie vor eine große Relevanz, da eine wirtschaftliche Gegenüberstellung von Straßen in Asphalt- und Betonbauweise nur auf Grundlage von Lebenszykluskosten möglich ist. Die alleinige Betrachtung der Investitionskosten für die Herstellung der Straßenkonstruktion würde immer zu Ungunsten der teureren Betonbauweise ausfallen, wohingegen die Berücksichtigung verschiedener Erhaltungsstrategien und -maßnahmen durchaus eine andere Beurteilung möglich macht. Gegenstand weiterer Forschung sollte es deshalb sein, das entwickelte Vorgehen auch auf Straßen in Betonbauweise zu übertragen und einen entsprechenden Erfahrungshintergrund zu erarbeiten. Hierdurch wird ein Bauweisenvergleich auf Basis von Lebenszykluskostenrechnungen ermöglicht.

Bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten der untersuchten Oberbaukonstruktionen in Asphaltbauweise wird als ein maßgebender Einflussfaktor die Nutzungsdauer der Asphalttragschicht mehrfach variiert. Die Zeitspanne bis zum Ausfall der Deck- und Binderschicht wurde hingegen als unveränderlicher Wert angenommen. Die Untersuchungen in [5] zeigen jedoch, dass auch die Lebensdauer der anderen Schichten Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnungen haben. Um die Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten quantifizieren und beurteilen zu können, sollten deshalb weitere Szenarien mit variierten Nutzungsdauern der Deck- und Binderschicht untersucht werden. Dies gilt besonders für Bundes- und Landesstraßen, da hier noch keine dezidierten Erkenntnisse vorliegen.

Weiterhin sollte der Einfluss des Einbaus auf die dimensionierungsrelevanten Eingangsparameter und damit letztlich die Nutzungsdauern, die den Lebenszykluskostenberechnungen zugrunde ge-

legt werden, weiter erforscht werden. Das FE Wirtschaftlichkeit lässt vermuten, dass es hier zu signifikanten Abweichungen zwischen den Ergebnissen an Laborprobekörpern und aus der Befestigung entnommenen Bohrkernen kommen kann.

Die Ergebnisse aus [5] zeigen weiterhin, dass die Variation der Mischgutzusammensetzung selbst im Rahmen der zulässigen Toleranzen großen Einfluss auf die rechnerisch ermittelte Nutzungsdauer einer Straßenbefestigung hat. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass die in dieser Arbeit angenommenen, teilweise sehr hohen Lebensdauern der Asphalttragschicht nur durch den Einsatz hochwertiger Materialien und eine auf die Substanz abgestimmten Zusammensetzung möglich werden. Dies kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden, beispielsweise durch die Verwendung von polymermodifiziertem Bitumen auch in der Tragschicht und/oder einem höheren Bindemittelgehalt. Beides verursacht jedoch zusätzliche Kosten und macht das Asphaltmischgut teurer. Das Verhältnis zwischen den zusätzlichen Kosten und einer hieraus resultierenden höheren Lebensdauer wurde in dieser Arbeit keiner näheren Betrachtung unterzogen, entsprechende Einflüsse sollten jedoch erforscht werden.

Weiterhin hat die Höhe der Verzinsung Einfluss auf die Lebenszykluskosten, vor allem dann, wenn gegen Ende des Betrachtungszeitraums aufwändige Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Der in dieser Arbeit gewählte Askontierungssatz von 3 % stellt eine übliche Größenordnung aus der Praxis dar und kann zudem verschiedener Literatur entnommen werden. Aktuelle Teuerungsraten liegen jedoch unter diesem Wert und haben – wie durch erste Testrechnungen in dieser Arbeit gezeigt werden konnte – einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Wahl einer wirtschaftlichen Erhaltungsstrategie. Die Auswirkungen der Verzinsung auf die Lebenszykluskosten sollten deshalb durch weitere Forschungsarbeiten dezidierter untersucht werden.

Ein weiterer Aspekt, der in dieser Arbeit vernachlässigt wird, sind die Nutzerkosten. Von besonderem Interesse sind dabei u.a. die Mehrkosten durch die Veränderung des Unfallgeschehens und die Erhöhung der Fahrtzeiten aufgrund von baustellenbedingten Behinderungen. Da sich beispielsweise die Anzahl an Unfällen innerhalb eines Baustellenbereichs signifikant erhöht, kann die Berücksichtigung entsprechender Aufwendungen bei der Wahl einer wirtschaftlichen Erhaltungsstrategie zu einer anderen Entscheidung führen, als wenn lediglich Investitionskosten berücksichtigt werden. Um eine gesamtwirtschaftliche Bewertung vorzunehmen, sollten hierüber hinaus in Anlehnung an die EWS ggf. weitere Nutzerkomponenten einbezogen werden. Hierzu wurde 2015 eine Forschungsarbeit mit dem Titel „KENNZAHLEN FÜR DIE GESAMTWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG VON ERHALTUNGSSTRATEGIEN“ [83] veröffentlicht, die eine geeignete Grundlage für weitere Überlegungen darstellt.

Weiterhin sollte geprüft werden, welche sonstigen Anlagenteile noch sinnvoll in Lebenszykluskostenberechnungen integriert werden sollten. Hier sind z.B. die Entwässerungseinrichtungen – also Mulden und Gräben aber auch Regenrückhaltebecken usw. – zu nennen, die aufgrund ihrer Vielfältigkeit sowie einer mangelhaften Datengrundlage in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „Statistisches Bundesamt,“ [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/UnternehmenInfrastrukturFahrzeugbestand/Tabellen/Verkehrsinfrastruktur.html>. [Zugriff am 20.10.2014].
- [2] FGSV, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 2013), Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2013.
- [3] FGSV, Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO - Asphalt 09), Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2009.
- [4] FGSV, Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RSO Asphalt 12), Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2014.
- [5] F. Wellner, U. Zander, I. Dragon, J. Birbaum und M. Buch, Grundlagen für die Beurteilung der dimensionierungsrelevanten Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von Oberbaubefestigungen aus Asphalt, Schlussbericht zum FE 07.0236/2010/AGB, Dresden, Siegen, 2014.
- [6] W. Mügge, „Ein Beitrag zur Kostenvergleichsrechnung,“ *Straße und Autobahn, Heft 6*, p. 245 ff, 1960.
- [7] A. Schmuck, „Zur Nutzungszeit von Straßenbefestigungen,“ *Straße und Autobahn, Heft 3*, 1981.
- [8] E. Moosmayer, „Ökonomische Systemanalyse von Straßenprojekten (Ein Beitrag zur Effizienz staatlicher Investitionsplanung),“ *Straße und Autobahn, Heft 9*, 1982.
- [9] K. Hinsch, M. Günther und C. Pingel, Untersuchungen zur Häufigkeitsverteilung von Erhaltungsmaßnahmen und Erhaltungsintervallen aufgrund von Netzanalysen zur Fortschreibung der Bedarfsermittlung für Bundesfernstraßen, Bonn-Bad Godesberg: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 584, 1990.
- [10] G. Maerschalk und J. Rübensam, Auswertung von Straßenzustandsmerkmalen im Straßennetz des ehemaligen DDR-Gebietes, Aachen-Berlin-München: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 632, 1992.
- [11] S. Dorando und J. Rübensam, Auswertung der bautechnischen Angaben zu Erhaltungsarbeiten an Bundesautobahnen für das Erhaltungsmanagement, München, Aachen, Berlin: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 707, 1995.
- [12] J. Rübensam und F. Schulze, Auswertung von Langzeitbeobachtungsdaten zur Beantwortung von Fragestellungen des Managements der Straßenerhaltung, Aachen-Berlin: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 712, 1994.
- [13] H. Beckedahl, S. Xu und G. Kube, Auswirkungen von Erhaltungsmaßnahmen auf die Entwicklung der Zustandsmerkmale Tragfähigkeit, Quer- und Längsebenheit, Schlussbericht zum FE 04.169 G94B, Wuppertal, 1997.
- [14] B. Grätz, Rücksetzbereiche und Folgeverhalten von Erhaltungsmaßnahmen, Schlussbericht FE 04.173 G95B, Darmstadt, 1997.
- [15] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/1996 (ARS 5/1996), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 1996.
- [16] G. Steinhoff und H. Pätzold, Dokumentation zur Langzeitbewährung von Deckschichten aus Splittmastixasphalt (SMA) und Gussasphalt (GA) auf Straßen mit getrennten Richtungsfahrbahnen-Eine Pilotstudie, Siegen/Nienburg, 98.
- [17] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 35/1998 (ARS 35/1998), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 1998.
- [18] J. Rübensam, L. Hellmann, D. Staroste und J. Stoltz, Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit und bautechnischen Bewährung von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt und Beton auf bestehenden Bundesautobahnen, Schlussbericht zum FE 09.121/2000/MGB, Bonn: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 914, 2005.
- [19] U. Zander, Empfehlungen zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung unterschiedlicher Bauweisen vor dem Hintergrund einer Neufassung des ARS 5/1996, Schlussbericht zum Arbeitsprojekt S4 03 384, Bergisch Gladbach, 2005.

- [20] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 05.2005 (ARS 5/2005), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2005.
- [21] K. Hinsch, G. Krause, G. Maerschalk und J. Rübensam, Katalogisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen, München, Berlin: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 915, 2005.
- [22] W. Ressel, A. Benner, F. Wellner, S. Werkmeister und S. Lipke, Vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Asphaltbefestigungen nach langjähriger Verkehrsnutzung, Stuttgart/Dresden: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 1003, 2008.
- [23] FGSV-Arbeitspapier Nr. 9/S zur Erhaltung, Reihe S: Substanzwert (Bestand), Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2003.
- [24] J. Rübensam, S. Schwiethal und G. Maerschalk, Erarbeitung eines Prototypen eines technisch-wirtschaftlichen Kostenminimierungsmoduls für das Erhaltungsmanagement (PMS), Berlin: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1028, 2010.
- [25] W. Ressel, K. Tejkl und C. Klöpfe, Methodenstudie zur Life-Cycle Bewertung von Straßenbefestigungen, Schlussbericht zum FE 09.140/2005/MRB, Stuttgart: Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, Universität Stuttgart, 2011.
- [26] T. Wermuth, Lebenskostenplanung für den Straßenoberbau mittels Markov-Prozess vor dem Hintergrund des Public Private Partnerships, Braunschweig, 2012.
- [27] G. Maerschalk, Erstellung einer ablauffähigen Folge von Algorithmen für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen und der Mittelverwendung im Rahmen eines PMS, München-Aachen-Berlin: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 751, 1997.
- [28] FGSV, Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Str 01), Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2001.
- [29] FGSV, ZTV BEA-StB 09: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen – Asphaltbauweisen, Köln: FGSV-Verlag, 2009.
- [30] FGSV, ZTV BEB-StB 09: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen – Betonbauweisen, Köln: FGSV-Verlag, 2009.
- [31] U. Zander, „Bericht zum FE 09.121: "Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit und bautechnischen Bewährung von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt und Beton auf bestehenden Bundesautobahnen" UNVERÖFFENTLICHT,“ Bergisch-Gladbach, 2005.
- [32] J. Rübensam, G. Maerschalk und F. Schulze, Erarbeitung eines Verfahrens zur Bildung von Erhaltungsabschnitten für das Erhaltungsmanagement (PMS) auf Basis von Zustands- und Aufbaudaten, Berlin/München: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 972, 2007.
- [33] J. Rübensam und F. Schulze, Entwicklung einer Methodik zur zweckmäßigen Zusammenfassung maßnahmenbedürftiger Abschnitte der BAB-Betriebsstrecken auf der Grundlage von Zustands- und Bestandsdaten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 736, 1997.
- [34] G. Maerschalk, S. Heller, M. Socina, C. Komma, G. Krause und J. Rübensam, Datenstrukturen des PMS: Einordnung in den Objektkatalog Straße (OKSTRA) und Fortschreibung der Festlegungen in der Anweisung Straßendatenbank (ASB); Kurzbericht, Darmstadt, 2003.
- [35] J. Rübensam, F. Schulze und S. Lindner, Kriterien für die Berücksichtigung zusätzlicher Fahrstreifen bei Erhaltungsmaßnahmen an mehrstreifigen Riktungsfahrbahnen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 825, 2001.
- [36] C. Queiroz, S. Carapetis, H. Grace und W. Paterson, Observed Behaviour of Bituminous-Surfaced Low-Volume Laterite Pavements, Transportation Research Record 1291, 1991.
- [37] E. Eger, Langzeitverhalten von Betondecken, Straße und Autobahn, 11/95, 1995.
- [38] J. Rübensam und F. Schulze, Zeitreihenanalyse visueller Zustandsaufnahmen und -bewertung von Straßen, Bonn, Bad Gosenberg: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 816, 2001.
- [39] DIN EN 13108-21 Asphaltmischgut-Mischgutanforderungen-Teil 21: Werkseigene Produktionskontrolle, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2006.
- [40] J. Birbaum und U. Zander, „Aktualisierung der Kostendaten,“ Siegen, 2012.

- [41] I. Dragon, Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf die Ermüdungsbeständigkeit von Verkehrsflächen aus Asphalt-Dissertation, Dresden: Technische Universität Dresden, 2015.
- [42] Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS), Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV), 1997.
- [43] W. R. A. PIARC, La Defense: 2000, Whole Life Costing of Roads, Flexible Pavements, PIARC Committee C8, 08.09. B.
- [44] *California Department of Transportation: California Life-Cycle Benefit/Cost Analysis Model (Cal-B/C), Technical Supplements to User's Guide, Volume 2*, California, 2000.
- [45] *Colorado Department of Transportation: Life-Cycle Cost Analysis State-of-the-Practice, Report No. CDOT-RI-R-00-E*, Aurora, California, 2000.
- [46] F. H. A. US. Department of Transportation, Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design-In Search of Better Investment Decisions, 1998.
- [47] M. Hayes, T. PJ und H. Bowman, A study of the safety performance of major motorway roadwork layouts, TRL Project Report 81, Crowthorne, England: Transport Research Laboratory, 1994.
- [48] G. Oefner, Zeitverluste und Kraftstoffverbrauch infolge von Unfällen an Autobahn-Baustellen, München: Informationen Verkehrsplanung und Strassenwesen, Festschrift, Heft 29, 1988.
- [49] National Highway System Designation Act; Life-Cycle Analysis Requirements, Administration, United States Department of Transportation-Federal Highway, 1996.
- [50] Transfound Project Evaluation Manual, The World Bank, 1997.
- [51] K. Ozbay, D. Jawad, N. Parker und S. Hussain, Life-Cycle Cost Analysis: State-of-the-Art, Washington: Transportation Research Board 1864, 2004.
- [52] COBA11 user manual, Department of Transport, 2004.
- [53] T. Häkkinen und K. Mäkele, Environmental adaption of concrete - Environmental impact on concrete and asphalt pavements, VTT Research notes 1752, 1998.
- [54] Stripple, Life Cycle Assessment of Road - A Pilot Study for Inventory Analysis, Göteborg: Swedish Environmental Research Institute (IVL), 2001.
- [55] FGSV, Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2008.
- [56] FGSV, Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), Forschungsgesellschaft Straßen- und Verkehrswesen, 2008.
- [57] FGSV, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 07/13), Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2007.
- [58] U. Zander, J. Birbaum und S. Schmidt, Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagenteile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Voraussetzung eines umfassenden Asset Managements - Schlussbericht zum FE 04.0214/2008/MGB, Siegen, 2013.
- [59] Der Elsner, Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen, Berlin: Otto Elsner Verlagsgesellschaft, 2014.
- [60] FGSV, Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Querschnitte (RAS-Q), Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1996.
- [61] D. Alfes, Analyse zur Wirtschaftlichkeit und der Sicherheit verschiedener Schutzplanken in Beton- und Stahlbauweise, Siegen: Bachelor-Thesis am Institut für Straßenwesen der Universität Siegen, 2014.
- [62] DIN EN 1317-2:2010, Rückhaltesysteme an Straßen - Teil 2: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen und Fahrzeugbrüstungen, 2010.
- [63] FGSV, Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS), Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2009.
- [64] Straßenverkehrs-Ordnung (StVO), 2013.
- [65] J. S. Bald, Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen (HAV), Bonn, 1999.
- [66] FGSV, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen von Straßen, Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2013.

- [67] FGSV, Richtlinien für die Markierung von Straßen, Forschungsgesellschaft für Strassenwesen, 1980.
- [68] M. Balmberger, W. Maibach, H. Schüller, A. Dahl und T. Schäder, Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen über den gesamten Lebenszyklus, Bergisch Gladbach: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe "Verkehrstechnik", Heft V243, 2015.
- [69] T. Richter und B. Zierke, Ergänzung der Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) zur Anwendung beim am Bestand orientierten Um- und Ausbau, Berlin, 2010.
- [70] „IT-ZEB Server,“ Heller Ing.-GmbH, 2009-2014. [Online]. Available: http://www.itzeb.heller-ig.de/zeb_erfassungsplan_2007.html. [Zugriff am 01 04 2015].
- [71] M. Hoffmann und T. Krause, Zahlentafeln für den Baubetrieb 8. Auflage, Vieweg+Teubner, 2011.
- [72] W. u. V. Ministerium für Wissenschaft, „www.landesrechnungshof-sh.de,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.landesrechnungshof-sh.de/file/bm2011-tz20.pdf>. [Zugriff am 02 03 2015].
- [73] M. Schmidt und R. Keppler, Ersetzung von Verkehrsschildern durch markierte Verkehrszeichen - Ein Beitrag zur Lichtung des Schilderwaldes?, Bergisch Gladbach: Verkehrstechnik 10.2008, 2008.
- [74] Ministerium für Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr, Straßenmarkierungen weitestgehend unsichtbar, Landesrechnungshof Schleswig-Holstein - Bemerkungen 2011, 2011.
- [75] Kirschbaum, Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA), Kirschbaum Verlag, 1995.
- [76] M. Socina und C. Komma, Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien, Schlussbericht zum FE 04.231/2009/MGB, Darmstadt: Heller Ingenieurgesellschaft mbH, 2012.
- [77] G. Oefner, Kostenermittlung für Erhaltungsmaßnahmen zur Bestimmung der Kosteneingangsgrößen für das PMS (Pavement Management System), Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 2004.
- [78] R. Schmerbeck, Verteilung des (Schwer-)Verkehrs auf die Fahrstreifen, München: Autobahndirektion Südbayern, 2013.
- [79] H. Zillenbiller, „Straßenzustandserfassung-Erhaltungsstrategien,“ *Asphalt, Heft 3*, pp. 20-24, 2000.
- [80] G. Maerschalk, Erhaltungsbedarf für Bundesfernstraßen, Landesstraßen und Kommunalstraßen, Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 1999.
- [81] FGSV, Merkblatt über den Finanzbedarf der Straßenerhaltung in den Gemeinden, Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2004.
- [82] B. Best, Erhaltungsmanagement als Chance - Vortrag auf dem 22. VSVI Verkehrssymposium, Mainz, 2014.
- [83] M. Socina und C. Komma, Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1113, 2015.
- [84] K.-H. Daehre, Bericht der Kommission "Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung", 2012.

ANHANG

Anhangverzeichnis

Anhang I

- a Herstellkosten des Oberbaus von Autobahnen
- b Herstellkosten des Oberbaus von Bundes- und Landesstraßen
- c Ausbaukosten der Schichten des Oberbaus

Anhang II gewählte Verkehrsbelastung

Anhang III mittels Regressionsfunktionen berechnete Lebenszykluskosten

Anhang I

a: Herstellkosten der Schichten des Oberbaus von Autobahnen

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|----------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 120,000 | 4,03 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | |
| Material | 1,000 | t | 38,00 | 1,000 | 38,00 |
| <i>AC 32 T S (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 38,00 | 1,000 | 38,00 |

| | |
|--------------------------------|--------------|
| ATS 0/32 Fertigereinbau | 42,03 |
| WuG + AGK (18 %) | 49,60 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|----------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 120,000 | 4,03 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | |
| Material | 1,000 | t | 39,00 | 1,000 | 39,00 |
| <i>AC 22 T S (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 39,00 | 1,000 | 39,00 |

| | |
|--------------------------------|--------------|
| ATS 0/32 Fertigereinbau | 43,03 |
| WuG + AGK (18 %) | 50,78 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|----------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 120,000 | 4,03 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | |
| Material | 1,000 | t | 38,00 | 1,000 | 38,00 |
| <i>AC 22 T N (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 38,00 | 1,000 | 38,00 |

| | |
|--------------------------------|--------------|
| ATS 0/32 Fertigereinbau | 42,03 |
| WuG + AGK (18 %) | 49,60 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|-------------------------------|--------------|----------------------|--------------|----------|-------------|
| reinigen und anspitzen | 1,000 | m² | 77,52 | | 0,39 |
| <i>Kehrmaschine</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1500,000 | 0,13 |
| <i>Anspritzen</i> | 0,001 | <i>t</i> | 12,00 | | 0,01 |
| <i>Anspritzmittel</i> | 1,000 | | 0,25 | | 0,25 |

Anhang I

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 60,000 | 8,06 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | <i>5,200</i> | <i>Std.</i> | <i>33,00</i> | <i>1,000</i> | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | <i>1,000</i> | <i>h</i> | <i>116,82</i> | <i>1,000</i> | |
| <i>LKW Sattel</i> | <i>3,000</i> | <i>Std.</i> | <i>65,00</i> | <i>1,000</i> | |
| Material | 1,000 | t | 49,00 | 1,000 | 49,00 |
| <i>AC 22 B S (25/55-55)</i> | <i>1,000</i> | <i>t</i> | <i>49,00</i> | <i>1,000</i> | <i>49,00</i> |

| | |
|-------------------------------|--------------|
| AB 0/16 Fertigereinbau | 57,06 |
| WuG + AGK (18 %) | 67,33 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 60,000 | 8,06 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | <i>5,200</i> | <i>Std.</i> | <i>33,00</i> | <i>1,000</i> | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | <i>1,000</i> | <i>h</i> | <i>116,82</i> | <i>1,000</i> | |
| <i>LKW Sattel</i> | <i>3,000</i> | <i>Std.</i> | <i>65,00</i> | <i>1,000</i> | |
| Material | 1,000 | t | 45,00 | 1,000 | 45,00 |
| <i>AC 22 B S (30/45)</i> | <i>1,000</i> | <i>t</i> | <i>45,00</i> | <i>1,000</i> | <i>45,00</i> |

| | |
|-------------------------------|--------------|
| AB 0/16 Fertigereinbau | 53,06 |
| WuG + AGK (18 %) | 62,61 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 60,000 | 8,06 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | <i>5,200</i> | <i>Std.</i> | <i>33,00</i> | <i>1,000</i> | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | <i>1,000</i> | <i>h</i> | <i>116,82</i> | <i>1,000</i> | |
| <i>LKW Sattel</i> | <i>3,000</i> | <i>Std.</i> | <i>65,00</i> | <i>1,000</i> | |
| Material | 1,000 | t | 44,00 | 1,000 | 44,00 |
| <i>AC 16 B N (50/70)</i> | <i>1,000</i> | <i>t</i> | <i>44,00</i> | <i>1,000</i> | <i>44,00</i> |

| | |
|-------------------------------|--------------|
| AB 0/16 Fertigereinbau | 52,06 |
| WuG + AGK (18 %) | 61,43 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--------------------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------|-------------|
| reinigen und anspritzen | 1,000 | m² | 77,52 | | 0,39 |
| <i>Kehrmaschine</i> | <i>3,000</i> | <i>Std.</i> | <i>65,00</i> | <i>1500,000</i> | <i>0,13</i> |
| <i>Anspritzen</i> | <i>0,001</i> | <i>t</i> | <i>12,00</i> | | <i>0,01</i> |
| <i>Anspritzmittel</i> | <i>1,000</i> | | <i>0,25</i> | | <i>0,25</i> |

Anhang I

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 60,000 | 8,06 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | |
| Material | 1,000 | t | 69,00 | 1,000 | 69,00 |
| <i>SMA 8 S (25/55-55)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 69,00 | 1,000 | 69,00 |
| AB 0/11 Fertigerereinbau | | | | | 77,06 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | 90,93 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 60,000 | 8,06 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | |
| Material | 1,000 | t | 65,00 | 1,000 | 65,00 |
| <i>SMA 8 S (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 65,00 | 1,000 | 65,00 |
| AB 0/11 Fertigerereinbau | | | | | 73,06 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | 86,21 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 60,000 | 8,06 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | |
| Material | 1,000 | t | 62,00 | 1,000 | 62,00 |
| <i>AC 11 D S (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 62,00 | 1,000 | 62,00 |
| AB 0/11 Fertigerereinbau | | | | | 70,06 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | 82,67 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 60,000 | 8,06 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | |
| Material | 1,000 | t | 62,00 | 1,000 | 62,00 |
| <i>AC 11 D N (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 62,00 | 1,000 | 62,00 |
| AB 0/11 Fertigerereinbau | | | | | 70,06 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | 82,67 |

Anhang I

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | H/UPOS | Kosten/Pos. |
|-------------------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | m³ | | /50,000 | 311,05 | 6,22 |
| <i>Lohn Straße+Maschinist</i> | <i>3,200</i> | <i>Std.</i> | <i>33,00</i> | | <i>105,60</i> | |
| <i>Raupe</i> | <i>1,000</i> | <i>Std.</i> | <i>56,26</i> | | <i>56,26</i> | |
| <i>W-Zug</i> | <i>1,000</i> | <i>Std.</i> | <i>19,19</i> | | <i>19,19</i> | |
| <i>LKW Sattel</i> | <i>2,000</i> | <i>Std.</i> | <i>65,00</i> | | <i>130,00</i> | |
| Material | 1,000 | m³ | | | 12,90 | 12,90 |
| <i>FSS 0/45</i> | <i>2,150</i> | <i>t</i> | <i>6,00</i> | | <i>12,90</i> | <i>12,90</i> |
| Einbau FSS 0/45 | | | | | | 19,12 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | | 22,56 |

Anhang I

b: Herstellkosten der Schichten des Oberbaus von Bundes- und Landesstraßen

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 50,000 | 9,67 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | 3,432 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | 2,336 |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | 3,900 |
| Material | 1,000 | t | 38,00 | 1,000 | 38,00 |
| <i>AC 32 T S (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 38,00 | 1,000 | 38,00 |

| | |
|--------------------------------|--------------|
| ATS 0/32 Fertigereinbau | 47,67 |
| WuG + AGK (18 %) | 56,25 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 50,000 | 9,67 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | 3,432 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | 2,336 |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | 3,900 |
| Material | 1,000 | t | 39,00 | 1,000 | 39,00 |
| <i>AC 22 T S (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 39,00 | 1,000 | 39,00 |

| | |
|--------------------------------|--------------|
| ATS 0/32 Fertigereinbau | 48,67 |
| WuG + AGK (18 %) | 57,43 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 483,42 | 50,000 | 9,67 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | 3,432 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | 2,336 |
| <i>LKW Sattel</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | 3,900 |
| Material | 1,000 | t | 38,00 | 1,000 | 38,00 |
| <i>AC 32 T N (50/70)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 38,00 | 1,000 | 38,00 |

| | |
|--------------------------------|--------------|
| ATS 0/32 Fertigereinbau | 47,67 |
| WuG + AGK (18 %) | 56,25 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--------------------------------|--------------|----------------------|--------------|----------|-------------|
| reinigen und anspritzen | 1,000 | m² | 77,52 | | 0,39 |
| <i>Kehrmaschine</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1500,000 | 0,13 |
| <i>Anspritzen</i> | 0,001 | <i>t</i> | 12,00 | | 0,01 |
| <i>Anspritzmittel</i> | 1,000 | | 0,25 | | 0,25 |

Anhang I

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 418,42 | 30,000 | 13,95 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | 5,709 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | 3,894 |
| <i>LKW Sattel</i> | 2,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | 4,333 |
| Material | 1,000 | t | 49,00 | 1,000 | 49,00 |
| <i>AC 22 B S (25/55-55)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 49,00 | 1,000 | 49,00 |

| | |
|-------------------------------|--------------|
| AB 0/16 Fertigereinbau | 63,66 |
| WuG + AGK (18 %) | 75,12 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 418,42 | 30,000 | 13,95 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | 5,709 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | 3,894 |
| <i>LKW Sattel</i> | 2,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | 4,333 |
| Material | 1,000 | t | 45,00 | 1,000 | 45,00 |
| <i>AC 22 B S (30/45)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 45,00 | 1,000 | 45,00 |

| | |
|-------------------------------|--------------|
| AB 0/16 Fertigereinbau | 58,95 |
| WuG + AGK (18 %) | 69,56 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 418,42 | 30,000 | 13,95 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | <i>Std.</i> | 33,00 | 1,000 | 5,709 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | <i>h</i> | 116,82 | 1,000 | 3,894 |
| <i>LKW Sattel</i> | 2,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1,000 | 4,333 |
| Material | 1,000 | t | 44,00 | 1,000 | 44,00 |
| <i>AC 16 B N (30/45)</i> | 1,000 | <i>t</i> | 44,00 | 1,000 | 44,00 |

| | |
|-------------------------------|--------------|
| AB 0/16 Fertigereinbau | 57,95 |
| WuG + AGK (18 %) | 68,38 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--------------------------------|--------------|----------------------|--------------|----------|-------------|
| reinigen und anspritzen | 1,000 | m² | 77,52 | | 0,39 |
| <i>Kehrmaschine</i> | 3,000 | <i>Std.</i> | 65,00 | 1500,000 | 0,13 |
| <i>Anspritzen</i> | 0,001 | <i>t</i> | 12,00 | | 0,01 |
| <i>Anspritzmittel</i> | 1,000 | | 0,25 | | 0,25 |

Anhang I

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|----------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 418,42 | 30,000 | 13,95 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | Std. | 33,00 | 1,000 | 5,709 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | h | 116,82 | 1,000 | 3,894 |
| <i>LKW Sattel</i> | 2,000 | Std. | 65,00 | 1,000 | 4,333 |
| Material | 1,000 | t | 69,00 | 1,000 | 69,00 |
| <i>SMA 8 S (25/55-55)</i> | 1,000 | t | 69,00 | 1,000 | 69,00 |
| AB 0/11 Fertigerereinbau | | | | | 82,95 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | 97,88 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|----------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 418,42 | 30,000 | 13,95 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | Std. | 33,00 | 1,000 | 5,709 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | h | 116,82 | 1,000 | 3,894 |
| <i>LKW Sattel</i> | 2,000 | Std. | 65,00 | 1,000 | 4,333 |
| Material | 1,000 | t | 65,00 | 1,000 | 65,00 |
| <i>SMA 8 S (50/70)</i> | 1,000 | t | 65,00 | 1,000 | 65,00 |
| AB 0/11 Fertigerereinbau | | | | | 78,95 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | 93,16 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|----------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 418,42 | 30,000 | 13,95 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | Std. | 33,00 | 1,000 | 5,709 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | h | 116,82 | 1,000 | 3,894 |
| <i>LKW Sattel</i> | 2,000 | Std. | 65,00 | 1,000 | 4,333 |
| Material | 1,000 | t | 62,00 | 1,000 | 62,00 |
| <i>AC 11 D S (50/70)</i> | 1,000 | t | 62,00 | 1,000 | 62,00 |
| AB 0/11 Fertigerereinbau | | | | | 75,95 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | 89,62 |

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | Kosten/Pos. |
|--|--------------|----------|---------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | t | 418,42 | 30,000 | 13,95 |
| <i>Lohn Asphalt</i> | 5,200 | Std. | 33,00 | 1,000 | 5,709 |
| <i>Fertiger+Walzer mit Splittstreuer</i> | 1,000 | h | 116,82 | 1,000 | 3,894 |
| <i>LKW Sattel</i> | 2,000 | Std. | 65,00 | 1,000 | 4,333 |
| Material | 1,000 | t | 62,00 | 1,000 | 62,00 |
| <i>AC 11 D N (50/70)</i> | 1,000 | t | 62,00 | 1,000 | 62,00 |
| AB 0/11 Fertigerereinbau | | | | | 75,95 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | 89,62 |

Anhang I

| | Menge | ME | Kosten/E | Faktor | H/UPOS | Kosten/Pos. |
|-------------------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| Lohn | 1,000 | m³ | | /30,000 | 311,05 | 10,37 |
| <i>Lohn Straße+Maschinist</i> | <i>3,200</i> | <i>Std.</i> | <i>33,00</i> | | <i>105,60</i> | |
| <i>Raupe</i> | <i>1,000</i> | <i>Std.</i> | <i>56,26</i> | | <i>56,26</i> | |
| <i>W-Zug</i> | <i>1,000</i> | <i>Std.</i> | <i>19,19</i> | | <i>19,19</i> | |
| <i>LKW Sattel</i> | <i>2,000</i> | <i>Std.</i> | <i>65,00</i> | | <i>130,00</i> | |
| Material | 1,000 | m³ | | | 12,90 | 12,90 |
| <i>FSS 0/45</i> | <i>2,150</i> | <i>t</i> | <i>6,00</i> | | <i>12,90</i> | <i>12,90</i> |
| AB 0/11 Fertigereinbau | | | | | | 23,27 |
| WuG + AGK (18 %) | | | | | | 27,46 |

Anhang I

c: Ausbaukosten der Schichten des Oberbaus

Kosten [€/t] für das Ausbauen der Deck- oder Binderschicht (Frästiefe bis 8 cm)

| | Menge | ME | Kosten/Pos. |
|-------------------------------|-------|----|-------------|
| <i>Fräsen und Laden</i> | 1,000 | t | 5,21 |
| <i>LKW Sattel</i> | 1,000 | t | 5,00 |
| <i>Gutschrift für Fräsgut</i> | 1,000 | t | 5,00 |

| | |
|--|-------------|
| <i>Asphaltdeck- oder Binderschicht fräsen</i> | 5,21 |
| zzgl. WuG + AGK (18 %) | 6,15 |

Kosten [€/t] für das Ausbauen der Tragschicht (Frästiefe bis 14 cm)

| | Menge | ME | Kosten/Pos. |
|-------------------------------|-------|----|-------------|
| <i>Fräsen und Laden</i> | 1,000 | t | 3,79 |
| <i>LKW Sattel</i> | 1,000 | t | 5,00 |
| <i>Gutschrift für Fräsgut</i> | 1,000 | t | 3,00 |

| | |
|---|-------------|
| <i>Asphalttragschicht fräsen</i> | 5,79 |
| zzgl. WuG + AGK (18 %) | 6,83 |

Kosten [€/t] für das Ausbauen der Tragschicht (Frästiefe bis 22 cm)

| | Menge | ME | Kosten/Pos. |
|-------------------------------|-------|----|-------------|
| <i>Fräsen und Laden</i> | 1,000 | t | 4,46 |
| <i>LKW Sattel</i> | 1,000 | t | 5,00 |
| <i>Gutschrift für Fräsgut</i> | 1,000 | t | 3,00 |

| | |
|---|-------------|
| <i>Asphalttragschicht fräsen</i> | 6,46 |
| zzgl. WuG + AGK (18 %) | 7,62 |

Kosten [€/m³] für das Ausbauen der ungebundenen Schichten

| | Menge | ME | Kosten/Pos. |
|--------------------------------|-------|----------------|-------------|
| <i>aufbrechen und laden</i> | 1,000 | m ³ | 6,50 |
| <i>LKW Sattel</i> | 1,000 | m ³ | 3,50 |
| <i>Gutschrift für Material</i> | 1,000 | m ³ | 0,50 |

| | |
|--|--------------|
| <i>ungebundene Schicht ausbauen</i> | 10,00 |
| zzgl. WuG + AGK (18 %) | 11,21 |

Anhang II

gewählte Verkehrsbelastung

| ND | B-Zahl [äquiv. 10-t Äü.] | | |
|----|--------------------------|------------|-----------|
| | BAB (HFS) | B | LS |
| 1 | 2.097.637 | 245.718 | 51.429 |
| 2 | 4.258.203 | 496.350 | 103.372 |
| 3 | 6.483.585 | 751.995 | 155.834 |
| 4 | 8.775.730 | 1.012.753 | 208.821 |
| 5 | 11.136.638 | 1.278.726 | 262.338 |
| 6 | 13.568.374 | 1.550.019 | 316.391 |
| 7 | 16.073.062 | 1.826.737 | 370.983 |
| 8 | 18.652.891 | 2.108.990 | 426.122 |
| 9 | 21.310.114 | 2.396.888 | 481.812 |
| 10 | 24.047.055 | 2.690.544 | 538.059 |
| 11 | 26.866.103 | 2.990.072 | 594.868 |
| 12 | 29.769.723 | 3.295.592 | 652.246 |
| 13 | 32.760.451 | 3.607.222 | 710.197 |
| 14 | 35.840.901 | 3.925.084 | 768.728 |
| 15 | 39.013.765 | 4.249.304 | 827.844 |
| 16 | 42.281.815 | 4.580.008 | 887.551 |
| 17 | 45.647.906 | 4.917.326 | 947.855 |
| 18 | 49.114.980 | 5.261.391 | 1.008.762 |
| 19 | 52.686.066 | 5.612.336 | 1.070.279 |
| 20 | 56.364.285 | 5.970.301 | 1.132.410 |
| 21 | 60.152.850 | 6.335.425 | 1.195.163 |
| 22 | 64.055.073 | 6.707.852 | 1.258.544 |
| 23 | 68.074.362 | 7.087.727 | 1.322.558 |
| 24 | 72.214.229 | 7.475.199 | 1.387.212 |
| 25 | 76.478.293 | 7.870.421 | 1.452.513 |
| 26 | 80.870.278 | 8.273.548 | 1.518.467 |
| 27 | 85.394.023 | 8.684.737 | 1.585.081 |
| 28 | 90.053.481 | 9.104.149 | 1.652.360 |
| 29 | 94.852.722 | 9.531.950 | 1.720.313 |
| 30 | 99.795.940 | 9.968.307 | 1.788.944 |
| 31 | 104.901.405 | 10.414.611 | 1.858.263 |
| 32 | 110.174.401 | 10.871.084 | 1.928.274 |
| 33 | 115.620.386 | 11.337.956 | 1.998.986 |
| 34 | 121.244.993 | 11.815.459 | 2.070.404 |
| 35 | 127.054.038 | 12.303.832 | 2.142.537 |
| 36 | 133.053.526 | 12.803.319 | 2.215.391 |
| 37 | 139.249.655 | 13.314.169 | 2.288.974 |
| 38 | 145.648.824 | 13.836.636 | 2.363.292 |
| 39 | 152.257.639 | 14.370.982 | 2.438.354 |
| 40 | 159.082.918 | 14.917.471 | 2.514.166 |
| 41 | 166.131.703 | 15.476.378 | 2.590.737 |
| 42 | 173.411.261 | 16.047.978 | 2.668.073 |
| 43 | 180.929.093 | 16.632.557 | 2.746.183 |
| 44 | 188.692.946 | 17.230.405 | 2.825.073 |
| 45 | 196.710.814 | 17.841.818 | 2.904.753 |
| 46 | 204.990.951 | 18.467.102 | 2.985.229 |
| 47 | 213.541.876 | 19.106.565 | 3.066.510 |
| 48 | 222.372.386 | 19.760.524 | 3.148.604 |
| 49 | 231.491.558 | 20.429.305 | 3.231.519 |
| 50 | 240.908.766 | 21.113.237 | 3.315.263 |

Anhang III

mittels Regressionsfunktionen berechnete Lebenszykluskosten

Autobahnen

| jährliche Lebenszykluskosten [€/m ²] | | | | | |
|---|----------------|--------|----------------|--------|------------|
| ND der ATS [a] | 2-streifige RF | | 3-streifige RF | | Mittelwert |
| | ohne SA | mit SA | ohne SA | mit SA | |
| 0 | 20,12 | 21,03 | 18,93 | 19,53 | 19,90 |
| 2 | 20,10 | 21,01 | 18,92 | 19,52 | 19,89 |
| 4 | 19,97 | 20,88 | 18,86 | 19,46 | 19,79 |
| 6 | 19,63 | 20,55 | 18,65 | 19,27 | 19,53 |
| 8 | 19,04 | 19,96 | 18,24 | 18,87 | 19,03 |
| 10 | 18,19 | 19,10 | 17,57 | 18,23 | 18,27 |
| 12 | 17,12 | 18,03 | 16,65 | 17,35 | 17,29 |
| 14 | 15,92 | 16,83 | 15,52 | 16,26 | 16,13 |
| 16 | 14,68 | 15,60 | 14,29 | 15,07 | 14,91 |
| 18 | 13,50 | 14,41 | 13,05 | 13,86 | 13,71 |
| 20 | 12,42 | 13,33 | 11,87 | 12,72 | 12,59 |
| 22 | 11,46 | 12,37 | 10,82 | 11,69 | 11,59 |
| 24 | 10,64 | 11,55 | 9,92 | 10,80 | 10,73 |
| 26 | 9,94 | 10,85 | 9,15 | 10,05 | 10,00 |
| 28 | 9,36 | 10,27 | 8,51 | 9,42 | 9,39 |
| 30 | 8,87 | 9,78 | 7,99 | 8,90 | 8,89 |
| 32 | 8,46 | 9,37 | 7,56 | 8,47 | 8,47 |
| 34 | 8,13 | 9,03 | 7,21 | 8,12 | 8,12 |
| 36 | 7,84 | 8,75 | 6,92 | 7,84 | 7,84 |
| 38 | 7,60 | 8,51 | 6,68 | 7,60 | 7,60 |
| 40 | 7,40 | 8,31 | 6,49 | 7,40 | 7,40 |
| 42 | 7,24 | 8,14 | 6,32 | 7,24 | 7,24 |
| 44 | 7,09 | 8,00 | 6,19 | 7,10 | 7,10 |
| 46 | 6,97 | 7,88 | 6,07 | 6,99 | 6,98 |
| 48 | 6,86 | 7,77 | 5,97 | 6,89 | 6,87 |
| 50 | 6,77 | 7,68 | 5,89 | 6,81 | 6,79 |
| 60 | 6,47 | 7,50 | 5,63 | 6,54 | 6,54 |

Anhang III

Bundesstraßen

| jährliche Lebenszykluskosten [€/m²] | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------|
| ND der ATS [a] | ohne sonstige Anlagenteile | | mit sonstigen Anlagenteilen | | Mittelwert |
| | Vollsperrung | halbseitige Sperrung | Vollsperrung | halbseitige Sperrung | |
| 0 | 9,62 | 9,88 | 10,21 | 10,43 | 10,04 |
| 2 | 9,61 | 9,87 | 10,20 | 10,42 | 10,03 |
| 4 | 9,56 | 9,82 | 10,15 | 10,37 | 9,98 |
| 6 | 9,43 | 9,69 | 10,02 | 10,24 | 9,85 |
| 8 | 9,19 | 9,45 | 9,78 | 10,00 | 9,61 |
| 10 | 8,82 | 9,09 | 9,42 | 9,64 | 9,24 |
| 12 | 8,35 | 8,62 | 8,94 | 9,17 | 8,77 |
| 14 | 7,80 | 8,07 | 8,39 | 8,62 | 8,22 |
| 16 | 7,22 | 7,49 | 7,81 | 8,04 | 7,64 |
| 18 | 6,65 | 6,92 | 7,23 | 7,46 | 7,07 |
| 20 | 6,11 | 6,38 | 6,69 | 6,92 | 6,53 |
| 22 | 5,63 | 5,90 | 6,21 | 6,43 | 6,04 |
| 24 | 5,21 | 5,47 | 5,78 | 6,01 | 5,62 |
| 26 | 4,85 | 5,11 | 5,42 | 5,64 | 5,26 |
| 28 | 4,54 | 4,81 | 5,11 | 5,34 | 4,95 |
| 30 | 4,29 | 4,55 | 4,85 | 5,08 | 4,69 |
| 32 | 4,08 | 4,34 | 4,63 | 4,87 | 4,48 |
| 34 | 3,90 | 4,16 | 4,45 | 4,69 | 4,30 |
| 36 | 3,75 | 4,01 | 4,30 | 4,54 | 4,15 |
| 38 | 3,63 | 3,88 | 4,18 | 4,41 | 4,03 |
| 40 | 3,52 | 3,77 | 4,07 | 4,31 | 3,92 |
| 42 | 3,43 | 3,68 | 3,98 | 4,22 | 3,83 |
| 44 | 3,36 | 3,61 | 3,90 | 4,14 | 3,75 |
| 46 | 3,30 | 3,54 | 3,84 | 4,08 | 3,69 |
| 48 | 3,24 | 3,49 | 3,78 | 4,02 | 3,63 |
| 50 | 3,19 | 3,44 | 3,73 | 3,97 | 3,58 |
| 60 | 3,04 | 3,28 | 3,58 | 3,83 | 3,43 |

Anhang III

Landesstraßen

| jährliche Lebenszykluskosten [€/m²] | | | | | |
|---|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------|
| ND der ATS [a] | ohne sonstige Anlagenteile | | mit sonstigen Anlagenteilen | | Mittelwert |
| | Vollsperrung | halbseitige Sperrung | Vollsperrung | halbseitige Sperrung | |
| 0 | 4,38 | 4,86 | 4,77 | 5,25 | 4,82 |
| 2 | 4,38 | 4,86 | 4,77 | 5,25 | 4,82 |
| 4 | 4,37 | 4,86 | 4,76 | 5,25 | 4,81 |
| 6 | 4,35 | 4,84 | 4,74 | 5,23 | 4,79 |
| 8 | 4,31 | 4,82 | 4,70 | 5,21 | 4,76 |
| 10 | 4,24 | 4,77 | 4,64 | 5,17 | 4,71 |
| 12 | 4,15 | 4,70 | 4,56 | 5,10 | 4,63 |
| 14 | 4,03 | 4,60 | 4,45 | 5,01 | 4,52 |
| 16 | 3,88 | 4,47 | 4,31 | 4,89 | 4,39 |
| 18 | 3,72 | 4,32 | 4,17 | 4,75 | 4,24 |
| 20 | 3,55 | 4,15 | 4,01 | 4,59 | 4,08 |
| 22 | 3,38 | 3,97 | 3,84 | 4,43 | 3,91 |
| 24 | 3,21 | 3,78 | 3,68 | 4,25 | 3,73 |
| 26 | 3,05 | 3,60 | 3,53 | 4,08 | 3,57 |
| 28 | 2,90 | 3,44 | 3,38 | 3,92 | 3,41 |
| 30 | 2,76 | 3,28 | 3,25 | 3,77 | 3,27 |
| 32 | 2,64 | 3,14 | 3,13 | 3,63 | 3,14 |
| 34 | 2,53 | 3,01 | 3,02 | 3,51 | 3,02 |
| 36 | 2,43 | 2,90 | 2,93 | 3,40 | 2,92 |
| 38 | 2,34 | 2,81 | 2,84 | 3,31 | 2,83 |
| 40 | 2,27 | 2,73 | 2,77 | 3,23 | 2,75 |
| 42 | 2,20 | 2,65 | 2,70 | 3,16 | 2,68 |
| 44 | 2,15 | 2,59 | 2,65 | 3,09 | 2,62 |
| 46 | 2,10 | 2,54 | 2,60 | 3,04 | 2,57 |
| 48 | 2,05 | 2,49 | 2,55 | 3,00 | 2,52 |
| 50 | 2,01 | 2,45 | 2,52 | 2,96 | 2,49 |
| 60 | 1,88 | 2,37 | 2,38 | 2,82 | 2,36 |