Rechnerische Dimensionierung als Basis für ganzheitliche, nachhaltige Asphaltbefestigungen

Dipl.-Ing. Volker Schäfer
Tobias Di Turi, M. Sc.

Schäfer Consult
Ulmenstraße 42, 26135 Oldenburg (Oldb)
Tel.: +49 (0)441 / 77 91 97 20
E-Mail: info@schaefer-consult.com

Im Sinne der Nachhaltigkeit ist die Asphaltbauweise der Betonbauweise in vielen Punkten überlegen. Gründe hierfür sind die vollständige Wiederverwendbarkeit des Baustoffs Asphalt und der sehr hohe Energieaufwand bei der, für den Beton erforderlichen, Zementherstellung. Dabei stellen der Grad der Wiederverwendung und in noch größerem Maße die Dauerhaftigkeit der Asphaltstraßen wichtige Stellschrauben für die Reduktion des CO_2-Fußabdrucks im Asphaltstraßenbau dar (Zander, 2024). Vor diesem Hintergrund ist es in jedem Fall lohnenswert ein besonderes Augenmerk auf diese Aspekte bereits bei der Planung von zukünftigen Maßnahmen des Neubaus, der Erhaltung oder der Erneuerung zu legen. Mit den RDO Asphalt 09/24 (FGSV, 2024b) *steht im Katalog des FGSV-Regelwerks ein Werkzeug zur Verfügung, welches geeignet ist, bereits im Vorfeld einer Baumaßnahme die vorgesehenen Asphalte und Oberbaukonzept so zu optimieren, dass mit einem minimalen Verbrauch an Ressourcen eine maximale Dauerhaftigkeit erzielt werden kann. Neben dem Straßenbau kann die RDO Asphalt 09/24 auch für die Optimierung von Flächenbefestigungen für Hafen-, Logistik- und Industrieflächenbefestigungen verwendet werden, die so genau auf die vorgesehene Nutzung zugeschnitten werden können. Die derzeit noch häufig vorliegende Überdimensionierung der Flächen kann so verhindert und der Verbrauch an Ressourcen reduziert werden. Die RDO Asphalt 09/24 ist somit geeignet, die CO_2-Emissionen in der Lebenszeitbetrachtung einer Asphaltbefestigung deutlich zu reduzieren und kann damit immens zur Nachhaltigkeit der Bauweise beitragen. Die mittlerweile vorliegenden Erfahrungen aus 15 Jahren Anwendung seit der Einführung der RDO Asphalt 09 bieten hierfür eine umfangreiche Grundlage, sodass einer breiten Anwendung der rechnerischen Dimensionierung nichts mehr im Wege steht.*

1 Einleitung

Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt werden überwiegend nach den RStO 12/24 (FGSV, 2024c) geplant, die auf Erfahrungswerten aus mittlerweile mehreren Jahrzehnten beruhen und für definierte Belastungsklassen und Konzepte für den Aufbau der Schichten unterhalb der Asphaltbefestigung verschiedene Empfehlungen für die Dicken der einzelnen Asphaltschichten geben. Diese Grundlage ermöglicht eine relativ einfache und schnelle Abschätzung der erforderlichen Schichtdicken. Sofern die Verkehrsbeanspruchungen nicht deutlich größer sind als in der Planung angenommen, lassen sich mit den Schichtdicken nach den RStO 12/24 Asphaltbefestigungen herstellen, die für einen Nutzungszeitraum von mindestens 30 Jahren geeignet sind.
Aufgrund des zunehmenden Schwerverkehrs auf Bundesautobahnen, wird jedoch häufig eine dimensionierungsrelevante Beanspruchung von B = 100 Mio. äquivalenten 10-t-Achsübergängen überschritten, die die obere Grenze der Belastungsklasse Bk100 nach den RStO 12/24 darstellt. Dies hat zur Folge, dass auch der zugrunde liegende Erfahrungshintergrund verlassen wird. Verkehrsflächenbefestigungen mit einer dimensionierungsrelevanten Beanspruchung von mehr als 100 Mio. äquivalenten 10-t-Achsübergängen, sollten daher nach den RDO Asphalt 09/24 rechnerisch dimensioniert werden. In der Praxis erfolgt dies jedoch bisher nur in wenigen Ausnahmefällen, da viele Planer und Ingenieurbüros mit der Anwendung der rechnerischen Dimensionierung nicht vertraut sind. Häufig funktionieren die Konzepte nach den RStO 12/24 dennoch, da diese ein großes Vorhaltemaß enthalten und moderne Asphaltmischgutkonzepte ein besseres Ermüdungsverhalten aufweisen als die zugrunde liegenden Asphalte. Eine belegbare Grundlage hierzu gibt es allerdings nicht und es wird gegebenenfalls ein vorhandenes Optimierungspotential nicht genutzt.
Ein weiterer Bedarf für die Anwendung der RDO Asphalt 09/24 ergibt sich für die Konzeption von Flächenbefestigungen aus Asphalt für Hafen-, Logistik- und Industrieflächen. Hier besteht derzeit ein Vakuum im Technischen Regelwerk, da lediglich für die Betonbauweise mit dem M VAB, Teil 3 *(FGSV, 2018a)* einheitliche Regelungen für entsprechenden Flächen definiert wurden. Hieraus resultiert, dass die Asphaltbefestigungen auch für diese Anwendungsfälle nach den RStO 12/24 dimensioniert werden und aus diesem Grund häufig deutlich zu dick ausgebildet sind.
Die rechnerische Dimensionierung wird insbesondere durch den Erstautor bereits seit 15 Jahren, also seit dem Erscheinen der RDO Asphalt 09, die im Jahr 2024 durch die RDO Asphalt 09/24 abgelöst wurde, regelmäßig für verschiedenste Projekte im Bereich der Bundesautobahnen, Bundesstraßen sowie Hafen,- Logistik- und Industrieflächenbefestigungen konsequent angewendet. Durch die inzwischen langjährige Anwendung der RDO Asphalt konnte mittlerweile eine sehr umfangreiche Datenbank mit Steifigkeits- und Ermüdungskennwerten aufgebaut werden, die unterschiedlichste Asphaltzusammensetzungen aus vielen Regionen Deutschlands bis hin zu den derzeit modernsten Rezepturen enthält. Bereits 2017 konnten durch Schäfer & Rosauer umfangreiche Erkenntnisse, die im vorangegangenen Zeitraum gesammelt wurden am Beispiel der BAB 14 zwischen der AS Löbejün und Altmödewitz präsentiert werden *(Schäfer & Rosauer, 2017)*. Dabei wurden auch die Zusammenhänge zwischen der Zusammensetzung des Asphaltmischguts und den Ergebnissen der rechnerischen Dimensionierung aufgezeigt. Seither sind weitere umfangreiche Praxiserfahrungen gesammelt worden. Der Erfolg der Methode zeigt sich daran, dass noch auf keiner der durch die Autoren rechnerisch dimensionierten Flächen eine vorzeitige Ermüdungsrissbildung festgestellt wurde. Durch die Definition entsprechender Anforderungen an das Asphaltmischgut und die baupraktische Umsetzung kann dabei sichergestellt werden, dass geeignete Asphalte in der erforderlichen Qualität eingebaut werden, um die Ergebnisse der rechnerischen Dimensionierung auch mit den ermittelten Steifigkeits- und Ermüdungseigenschaften an Bohrkernen aus der fertigen Schicht zu verifizieren.
In den folgenden Abschnitten soll das Prinzip der rechnerischen Dimensionierung in einer komprimierten Form präsentiert werden. Im Anschluss wird das Vorgehen anhand von zwei Beispielen präsentiert, um das Verfahren verständlich darzustellen.

2 Grundprinzip der rechnerischen Dimensionierung

Die rechnerische Dimensionierung einer Verkehrsflächenbefestigung beruht auf der Hypothese nach Miner (1945), dass bei jedem Lastwechsel eine Teilschädigung der Asphaltbefestigung auftritt, die sich so lange akkumuliert, bis es zu einer Materialermüdung, also dem Versagen kommt. Zudem wird angenommen, dass diese Teilschädigung an der Unterseite der Asphalttragschicht auftritt, da durch die Verformung beim Achsübergang Zugspannungen genau dort auftreten. Der Spannungsverlauf erfolgt dabei analog zu einem belasteten Biegebalken (Bild 1).

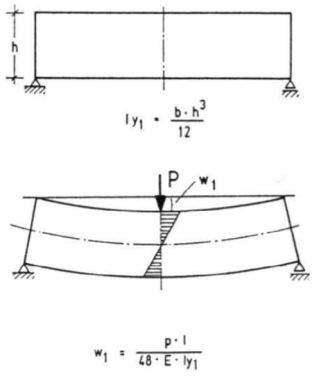


Bild 1: Spannungsverlauf eines Biegebalkens bei vollem Verbund der Schichten (Weber, 1991)

Diese einzelnen Teilschädigungen der Asphalttragschicht summieren sich über die Nutzungszeit auf, bis es zu einer initialen Bildung eines Ermüdungsrisses kommt. Dieser Zeitpunkt ist neben den auftretenden Verkehrsbeanspruchungen auch abhängig von den Temperaturverteilungen, die in der Asphaltbefestigung auftreten. Nach den RDO Asphalt 09/24 können anhand der Achslastverteilungen und der charakteristischen Temperaturprofile insgesamt 4.056 verschiedene Beanspruchungszustände in einer Asphaltbefestigung auftreten. Als Ergebnis der Berechnung ergibt sich ein Ermüdungsstatus, der den Anteil der im Nutzungszeitraum auftretenden Teilschädigungen an der Gesamtsumme der Teilschädigungen, die zum Versagen führen würde, in Prozent angibt. Zusätzlich zum Ermüdungsstatus der Asphaltbefestigung wird auch der Anteil des Kriteriums der maximalen Druckspannung für die darunterliegenden Schichten bestimmt. Beträgt dieser Anteil 100 % würden in den ungebundenen Schichten plastische Verformungen auftreten, die zu Schäden in der Asphaltbefestigung führen könnten.

3 Vorgehen bei der rechnerischen Dimensionierung

Bei der Erstellung eines geeigneten Oberbaukonzepts für den jeweiligen Anwendungszweck, sollte als Ausgangsgröße zunächst von einem Schichtenaufbau nach den RStO 12/24, Tafel 1 ausgegangen werden. Bereits hierbei kann ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer nachhaltigen Verkehrsflächenbefestigung gemacht werden. Unter Berücksichtigung der regionalen Verfügbarkeit von Baustoffen ist es sinnvoll, die ungebundenen Schichten entsprechend abzustimmen, um bestenfalls die anstehenden Schichten verwenden zu können und die Zulieferung weiterer Baustoffe auf ein Mindestmaß zu beschränken. Beispielsweise ist es von Vorteil im Norden Deutschlands eine Bauweise zu wählen, bei der frostsichere Schichten aus enggestuften Sanden verwendet werden. Demgegenüber sind in Süddeutschland die Transportwege aus Steinbrüchen meist kurz, sodass hier auch Frostschutz- oder Schottertragschichten aus gebrochenen Baustoffgemischen eingesetzt werden können.
Aus dem gewählten Aufbau der ungebundenen Schichten ergeben sich dann nach den jeweiligen Regelaufbauten nach den RStO 12/24, Tafel 1, die entsprechenden Schichtdicken für die Asphaltschichten. Diese sollten dann entsprechend in das Tool zur rechnerischen Dimensionierung übertragen werden, um weitere Optimierungen vorzunehmen.

3.1 Dimensionierungsrelevante Beanspruchung

Die Ermittlung der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung von Straßen für die rechnerische Dimensionierung erfolgt üblicherweise nach dem AP EDS-1, Ausgabe 2022 *(FGSV, 2022)* und kann entweder anhand von Verkehrszähldaten, oder von detaillierten Daten aus Achslastwägungen berechnet werden.
Gerade bei Hafen-, Logistik- und Industrieflächen wird jedoch in vielen Fällen aufgrund des nahezu ausschließlich stattfindenden Lkw-Verkehrs gefühlmäßig eine Belastungsklasse Bk10 oder sogar Bk32 angesetzt, um diesem hohen Anteil an Schwerverkehr gerecht zu werden. Bei einer differenzierteren Betrachtung der geplanten Betriebsabläufe kann jedoch meist herausgearbeitet werden, dass mit deutlich geringeren Verkehrsbeanspruchungen zu rechnen ist. Zudem tritt auf diesen Flächen überwiegend kein spurfahrender Verkehr auf, mit Ausnahme des Bereichs direkt vor etwaigen Laderampen. Diese Verteilung des Verkehrs spielt bei Hafenflächen eine umso größere Rolle, da hier Umschlagfahrzeuge betrieben werden, die im beladenen Zustand Achslasten von bis zu 100 t haben können. Bei Anwendung der etablierten Berechnungsmethode entstehen dann extrem hohe dimensionierungsrelevante Beanspruchungen, die gleichzeitig zu großen Dicken der Asphaltbefestigung führen. Auch hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Beanspruchung auf eine große Fläche verteilt, sodass die tatsächlich wirkende Verkehrsbeanspruchung auf einen Punkt der Asphalttragschicht wesentlich geringer zu bewerten ist.
Daher ist es unabdingbar, vor der Durchführung der rechnerischen Dimensionierung, insbesondere für Flächen mit Sondernutzung, eine genaue Betrachtung der vorgesehenen Nutzung und der räumlichen Gegebenheiten durchzuführen, um ein optimiertes Oberbaukonzept zu erstellen. Dabei können in vielen Fällen nicht unerhebliche Mengen an Asphalt eingespart werden, ohne dass es zu Einschränkungen in der Nutzungszeit kommt. Diese Erkenntnisse und Erfahrungen werden auch künftig in dem derzeit noch in der Bearbeitung befindlichen Merkblatt für Planung und Bau von Hafen-, Logistik- und Industrieflächenbefestigungen (M HLI) *(FGSV, 2024a)* abgebildet werden.

3.2 Materialkennwerte

Generell stehen in den RDO Asphalt 09/24, Anhang 4 die Vergleichswerte für die Kalibrierasphalte zur Verfügung, die zur Ermittlung der Anpassungsfaktoren genutzt werden. Diese entsprechen jedoch theoretischen Kennwerten und bilden nicht das Gebrauchsverhalten von realen Asphalten ab. Aus diesem Grund sind für die rechnerische Dimensionierung Materialkennwerte zu verwenden, die mit dem Spaltzug-Schwellversuch nach den TP Asphalt-StB, Teil 24 *(FGSV, 2018b)*, bzw. den TP Asphalt-StB, Teil 26 *(FGSV, 2018c)* bestimmt werden. Für eine erste Abschätzung können hierbei Kennwerte verwendet werden, die von vergleichbaren Bauvorhaben, wenn möglich mit regionalem Bezug stammen. Hierbei sollte darauf geachtet werden, nicht die bestmöglichen Kennwerte zu verwenden, sondern ein Asphaltmischgut zu wählen, welches den Durchschnitt der bekannten Asphalte abbildet. Auf diese Art und Weise kann bereits im Vorfeld einer Baumaßnahme ein rechnerisch dimensioniertes Oberbaukonzept erstellt werden.
Gleichwohl sollte im Rahmen der Erstellung der Eignungsnachweise für die tatsächlich zur Verwendung vorgesehenen Asphalte erweiterte Untersuchungen durchgeführt werden, um das Gebrauchsverhalten zu bestimmen. Von besonderer Relevanz sind hierbei wie vorstehend genannt die Steifigkeits-Temperatur-Funktion und die Ermüdungsfunktion, sowie das Kälteverhalten. Sollten sich hierbei signifikante Abweichungen zu den angenommenen Materialkennwerten und hieraus ein Ermüdungsstatus von über 100 % ergeben, ist entweder eine Optimierung des Asphaltmischguts oder eine Anpassung des Oberbaukonzepts erforderlich.

3.3 Zielwerte

Die Schichtdicken der Asphaltbefestigung, die in der rechnerischen Dimensionierung bestimmt werden, sind Absolutwerte, sodass die Toleranzen der ZTV Asphalt-StB 07/13 *(FGSV, 2013)*

aufgrund der derzeit noch üblichen Bauvertragsgestaltung zwar gelten, jedoch beim vollständigen Ausnutzen im Bezug auf die Mindestschichtdicke zu eklatanten Abweichungen in den Ergebnissen der rechnerischen Dimensionierung führen. Daher ist es zwingend erforderlich, bei der Festlegung der Schichtdicken ein ausreichendes Vorhaltemaß vorzusehen, um die bautechnisch bedingten Schwankungen der Schichtdicke zu berücksichtigen. Als zweckmäßiges Vorgehen hat sich hier bewährt, einen zusätzlichen Rechengang durchzuführen, bei der die Dicke der Asphalttragschicht um 2 cm reduziert wird. Um die Dicke des frostsicheren Oberbaus nicht zu ändern, erfolgt der Dickenausgleich in der untersten Lage der ungebundenen Schichten. Bei dieser Betrachtung sollte ein Ermüdungsstatus von etwa 75 % nicht überschritten werden. Die Erfahrung zeigt, dass hierdurch in der Regel sichergestellt wird, dass bei einer späteren Überprüfung der Ergebnisse der rechnerischen Dimensionierung mit Asphaltkennwerten aus den eingebauten Schichten, ein Ermüdungsstatus von 100 % nicht überschritten wird.

4 Praxisbeispiele

Zur besseren Veranschaulichung des Vorgehens, sollen im Folgenden zwei Beispiele dargestellt werden, die der Praxis entlehnt wurden. Dabei wird sowohl eine typische Autobahn als auch eine Spezialanwendung im Bereich der Industrieflächen dargestellt. Hiermit soll demonstriert werden, wie die RDO Asphalt 09/24 für die verschiedenen Anwendungsfälle genutzt werden kann, um das bestgeeignete Oberbaukonzept zu entwickeln. Die präsentierten Ergebnisse stellen dabei jedoch keine allgemeingültige Empfehlung da und sind nur unter den getroffenen Annahmen und den entsprechend angesetzten Materialkennwerten zutreffend. Die zur Berechnung angesetzten Asphalte wurden seinerzeit für die jeweilig vorherrschenden Beanspruchungen schon so zusammengesetzt, wie in der Fortschreibung der TL Asphalt-StB *(FGSV, 2024d)* vorgesehen, da diese verbesserte Zusammensetzung des Asphaltmischguts dazu geeignet ist, das Gebrauchsverhalten wesentlich zu verbessern. Die Steifigkeits-Temperaturfunktionen und die Ermüdungsfunktionen aller in den folgenden Berechnungen verwendeten Asphalte sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt. Zum Vergleich sind auch die entsprechenden Funktionen der Kalibrierasphalte aus den RDO Asphalt 09/24 in den Diagrammen enthalten.

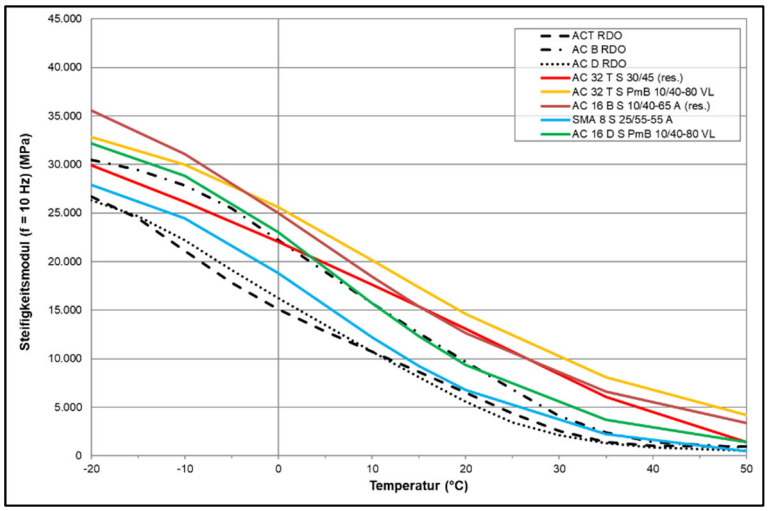


Bild 2: Steifigkeits-Temperaturfunktionen der Asphalte, die für die rechnerischen Dimensionierungen in den folgenden Abschnitten genutzt wurden

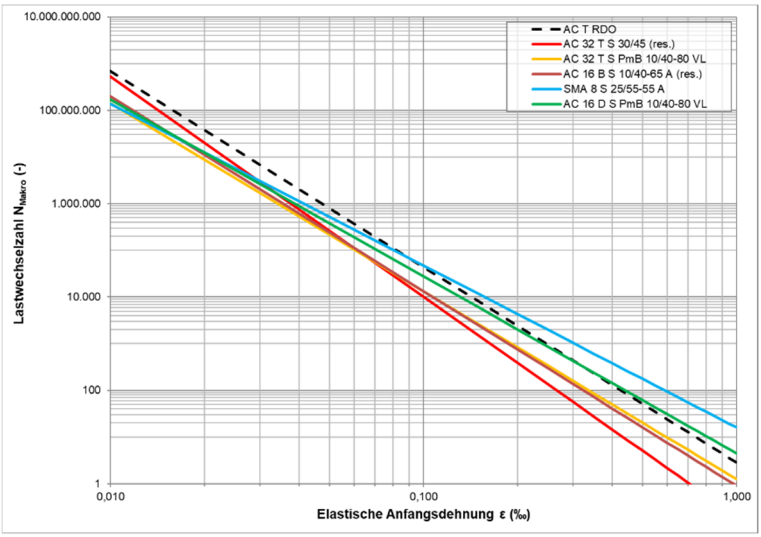


Bild 3: Ermüdungsfunktionen der Asphalte, die für die rechnerischen Dimensionierungen in den folgenden Abschnitten genutzt wurden

4.1 Beispiel Bundesautobahn

Im Bereich der Bundesautobahnen wurde für die Beispielrechnung ein Streckenabschnitt mit einer dimensionierungsrelevanten Beanspruchung von B = 150 Mio. äquivalenten 10-t-Achsübergängen in einem Nutzungszeitraum von 30 Jahren angenommen. Zudem wurde vorgesehen, die Asphaltschichten auf einer Schottertragschicht und einer Frostschutzschicht in Anlehnung an die RStO 12/24, Tafel 1, Zeile 3 herzustellen, sodass dies den Referenzaufbau für die Dimensionierungsberechnungen darstellt.
Dementsprechend wäre eine Asphaltbefestigung mit einer Asphaltdecke in 12 cm Dicke, eine Asphalttragschicht in 18 cm Dicke und eine Schottertragschicht in einer Dicke von 15 cm vorzusehen, auf deren Oberfläche ein Verformungsmodul E_{V2} von mindestens 150 MPa zu erreichen ist. Unterhalb ist eine Frostschutzschicht anzuordnen, deren Verformungsmodul mindestens 120 MPa betragen muss. Hierfür ergibt sich eine Mindestdicke von 30 cm bei einem Verformungsmodul von 45 MPa auf dem Planum. Für diesen Aufbau kann aufgrund des langjährigen Erfahrungshintergrunds davon ausgegangen werden, dass mit üblichen Asphalten, die anforderungskonform eingebaut wurden ein Nutzungszeitraum von 30 Jahren bei einer dimensionierungsrelevanten Beanspruchung von bis zu 100 Mio. äquivalenten 10-t-Achsübergängen sicher erreicht werden kann.
Die avisierten 150 Mio. äquivalenten 10-t-Achsübergänge für dieses Beispiel liegen 50 % höher als die obere Grenze der Bk100, sodass hier eine rechnerische Dimensionierung durchgeführt werden sollte. Die Parameter, die für das Erzielen dieser dimensionierungsrelevanten Beanspruchung angewendet wurden, sind in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Angewendete Dimensionierungsparameter

Dimensionierungsparameter	
$DTV^{(SV)}$	13.650 Kfz/24h
f_A	4,38
f_1	0,5
f_2	1,0
f_3	1,02
p_Z	0,02
Achslastkollektiv	BAB „Fern“
KiST-Zone	2

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, stehen für die rechnerische Dimensionierung zunächst die Kalibrierasphalte zur Verfügung, die den Erfahrungshintergrund der RStO abbilden. Werden diese Materialkennwerte nun für die dimensionierungsrelevante Beanspruchung von B = 150 äquivalenten 10-t-Achsübergängen und den vorstehend beschriebenen Aufbau angesetzt, so wird plausiblerweise in der Asphalttragschicht ein Ermüdungsstatus von 173,53 % erreicht, sodass sich ein Nutzungszeitraum von nur etwa 19 Jahren ergibt. Um den Nutzungszeitraum von 30 Jahren sicher zu erreichen, wäre eine Anpassung der Dicke der Asphalttragschicht um 3 cm auf 21 cm erforderlich.
Um den tatsächlichen Entwicklungsstand der Asphalttechnologie hinreichend berücksichtigen zu können, sollten jedoch anstelle der Kalibrierasphalte, Materialkennwerte von Asphalten aus anderen Projekten angewendet werden, die das zu erwartende Gebrauchsverhalten widerspiegeln. In der hier durchgeführten rechnerischen Dimensionierung sind dies ein AC 32 T S mit einem resultierenden Straßenbaubitumen 30/45 und 60 M.-% Asphaltgranulat, ein Asphaltbinder AC 16 B S mit dem resultierenden Polymermodifizierten Bitumen 10/40-65 A und 50 M.-% Asphaltgranulat und ein Splittmastixasphalt SMA 8 S mit dem Polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A. Unter Anwendung der entsprechenden Materialkennwerte, dem vorstehend beschriebenen Aufbau nach den RStO 12/24, Tafel 1, Zeile 3 ergibt sich für einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren und B = 150 Mio. äquivalente 10-t-Achsübergänge ein Ermüdungsstatus von lediglich 26,72 %, sodass hier ein Nutzungszeitraum von 69 Jahren erreicht wird. Dementsprechend ergibt sich hier sogar noch weiteres Optimierungspotential zur Einsparung von Asphaltmischgut.
Die Optimierung sollte hier nach dem bereits beschriebenen Prinzip erfolgen, bei dem festgelegt wird, dass bei einer Unterschreitung der Soll-Dicke der Asphaltbefestigung von 2 cm ein Ermüdungsstatus von 75 % nicht überschritten wird. Unter dieser Annahme ergibt sich die Möglichkeit, die Dicke der Asphalttragschicht um 2 cm auf 16 cm zu reduzieren, ohne den voraussichtlichen Nutzungszeitraum einzuschränken.
Als weitere Variante wurde der Einbau der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht in Kompaktbauweise in den Vergleich aufgenommen. Es ist bekannt, dass durch die sehr guten Verdichtungseigenschaften des Kompaktasphalts eine sehr hohe Dauerhaftigkeit der so eingebauten Schichten erreicht werden kann, die vergleichbar mit Gussasphaltschichten ist. Zudem ist durch die geringere Dicke der Asphaltdeckschicht die Bildung von bleibenden Verformungen deutlich unwahrscheinlicher *(Schäfer & Rosauer, 2007)*. Beim Einsatz von Kompaktasphalt hat sich bewährt die Dicke der Asphaltdecke auf 10 cm zu reduzieren, und die Dicke der Asphalttragschicht gleichermaßen zu erhöhen. Hierdurch lässt sich häufig eine höhere Wiederverwendungsquote erreichen, da im Asphalttragschichtmischgut größere Zugabemengen von Asphaltgranulat erreicht werden können. Gleichzeitig bietet dieses Vorgehen einen Vorteil bei späteren Erneuerungsmaßnahmen, da zumeist etwas tiefer gefräst wird, als erforderlich und auch so dann eine Einbaudicke von 12 cm möglich ist. Das Ergebnis der rechnerischen Dimensionierung zeigt, dass auch in diesem Fall die Minderdicke der Asphaltdecke mit der Asphalttragschicht ausgeglichen werden kann, sodass sich ein Aufbau von 2 cm Asphaltdeck-, 8 cm Asphaltbinder-, und 18 cm Asphalttragschicht ergibt. Für einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren wird hiermit ein Ermüdungsstaus von 38,20 % erreicht.
In Bild 4 sind die vorstehend beschriebenen Varianten der Asphaltbefestigung nochmals mit dem zugehörigen Ermüdungsstatus zum Vergleich gegenübergestellt.
Hieraus lässt sich klar erkennen, dass durch die konsequente Anwendung der RDO Asphalt 09/24 bei der Dimensionierung von Autobahnen einerseits sichergestellt werden kann, ob der Regelaufbau nach den RStO 12/24 überhaupt geeignet ist, um die zu erwartende Verkehrsbeanspruchung aufzunehmen und andererseits ein häufig vorhandenes Optimierungspotential auszuschöpfen.
Gerade im Hinblick auf die „Ewigkeitsstraße“ und den immer mehr vorherrschenden Nachhaltigkeitsgedanken kann es auch sinnvoll sein, längere Nutzungszeiträume als die üblicherweise angesetzten 30 Jahre zu betrachten. Auch hierfür ist die Anwendung der RDO Asphalt 09/24 bestens geeignet. Durch die Verlängerung des Nutzungszeitraums im oben vorgestellten Berechnungsbeispiel auf 50 Jahre, ergibt sich eine dimensionierungsrelevante Beanspruchung von B = 312,8 Mio. äquivalenten 10-t-Achsübergängen. Mit dieser Verkehrsbeanspruchung

beträgt der Ermüdungsstatus für den vorstehend beschriebenen optimierten Aufbau in Kompaktbauweise 79,64 %, sodass dieser bei Einhaltung der Soll-Dicken auch prinzipiell geeignet wäre. Gleichwohl sollte auch hier bei einer Unterschreitung der Gesamtdicke von 2 cm ein Ermüdungsstatus von etwa 75 % nicht überschritten werden. Hieraus ergibt sich, dass die Dicke der Asphalttragschicht um 3 cm auf 21 cm erhöht werden muss. Nach dieser Anpassung wird bei einem Nutzungszeitraum von 50 Jahren ein Ermüdungsstatus von 44,80 % erreicht.
Diese Betrachtung zeigt, dass der Mehraufwand für eine erhebliche Verlängerung des Nutzungszeitraums, insbesondere gegenüber einem nicht weiter optimierten Aufbau, sehr gering ist, sodass mit modernen Asphaltmischgutkonzepten sehr dauerhafte Asphaltbefestigungen hergestellt werden können. Unter der Annahme, dass insgesamt die Dauerhaftigkeit den größten Einfluss auf den CO2-Fußabdruck eines Straßenbauprojekts hat, sollte diese Nutzungszeitverlängerung also auf jeden Fall berücksichtigt werden.
Gleichzeitig ist sind die RDO Asphalt 09/24 prinzipiell auch dazu geeignet eine Erfolgskontrolle, nach der Herstellung der Asphaltbefestigung durchzuführen. Bewährt hat sich dabei den Ermüdungsstatus an der dünnsten Stelle der Asphaltbefestigung im Hauptfahrstreifen zu berechnen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Anpassungsfaktoren, die für die rechnerische Dimensionierung im Vorfeld der Baumaßnahme angewendet werden, auch die Unschärfe der Labormischung gegenüber dem großtechnisch hergestellten Asphaltmischgut berücksichtigen, die bei Ermittlung der Steifigkeits-Temperatur- und Ermüdungsfunktion an der fertigen Schicht so nicht mehr vorhanden sind. Aus diesem Grund ist eine Korrektur des Anpassungsfaktors erforderlich. Bewährt hat sich hierbei der Faktor von 1,43, um den der Anpassungsfaktor erhöht wird, also in diesem Beispiel für eine Asphaltbefestigung auf einer Schottertragschicht von 3.000 auf 4.920. Die Erfahrung zeigt, dass mit dieser Methode eine sehr gute Abschätzung des tatsächlichen Ermüdungsverhaltens möglich ist.

4.2 Beispiel Industrieflächenbefestigung

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, können über die rechnerische Dimensionierung nach den RDO Asphalt 09/24 individuelle Lösungen für den Einsatz von Asphaltflächenbefestigungen auf Hafen-, Logistik- und Industrieflächen konzipiert werden. Dabei können die Besonderheiten der Beanspruchung auf diesen Flächen sehr exakt berücksichtigt werden, sodass eine Überdimensionierung, wie sie bisher häufig vorkommt, vermieden wird. Beispielsweise kann für Flächen mit überwiegend langsam fahrendem Verkehr zumeist auf die Asphaltbinderschicht verzichtet werden, da durch den Betrieb nur wenige Schubkräfte in dieser Tiefe auftreten, die üblicherweise auf Brems-, Beschleunigung- und Lenkvorgänge zurückzuführen sind.
Zudem hat sich in der Praxis gezeigt, dass es insbesondere bei hoch beanspruchten Flächen sinnvoll ist, die Dicke der Asphaltdeckschicht auf 6 cm zu erhöhen, um hier einen Asphaltbeton AC 16 D S einzusetzen, der weniger empfindlich gegen oberflächliche Scherbeanspruchungen und bleibende Verformungen ist. Bewährt hat sich außerdem der Einsatz von Hochleistungsbitumen, auch in der Asphalttragschicht, um hier eine höhere Elastizität zu gewährleisten. Hierdurch kann nochmals eine signifikante Reduktion des Ermüdungsstatus erreicht werden. Dabei muss immer das Ziel sein, dem Betreiber der Fläche, für den diese ein Betriebsmittel darstellt, die beste Kombination aus Wirtschaftlichkeit und Dauerhaftigkeit zu bieten.
Innerhalb der letzten 15 Jahre wurde zunächst vor allem durch den Erstautor auch ein breites Spektrum von Hafen-, Logistik-, und Industrieflächenbefestigungen rechnerisch dimensioniert. Die Projekte umfassen dabei Multi-Purpose-Terminals, Containerterminals, wie beispielsweise das Container-Terminal-Wilhelmshaven oder auch Containerterminals im Binnenbereich, Schwerlasttrassen und Logistikhöfe. Im folgenden Beispiel wurde eine dieser Baumaßnahmen herausgegriffen, bei der besonders hohe Verkehrsbeanspruchungen vorliegen, um aufzuzeigen, für welches Anwendungsspektrum die Asphaltbauweise mit der richtigen Planung und Umsetzung der Baumaßnahmen geeignet ist.

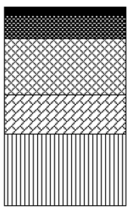
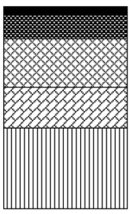
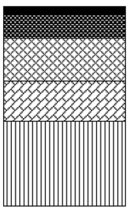
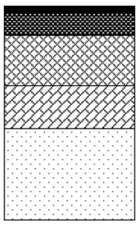
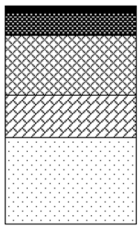
Aufbau RStO mit Kalibrierasphalt  3,0 cm Asphaltdeckschicht, Kalibrierasphalt 9,0 cm Asphaltbinderschicht, Kalibrierasphalt 21,0 cm Asphalttragschicht, Kalibrierasphalt 15,0 cm Schottertragschicht, $E_{V2} \geq 150$ MPa 27,0 cm Frostschutzschicht, $E_{V2} \geq 120$ MPa **75,0 cm Gesamtdicke** anstehender Boden / Planum, $E_{V2} \geq 45$ MPa	**Ermüdungsstatus nach 30 Jahren:** **B = 150,0 Mio. äquivalente 10-t-Achs.** Asphalttragschicht: 93,38 % **Kriterium max. Druckspannung:** Schottertragschicht: 0,00 % Frostschutzschicht: 0,00 % Planum: 20,45 %
Aufbau RStO mit optimierten Asphalten  3,0 cm Asphaltdeckschicht, SMA 8 S, 25/55-55 A 9,0 cm Asphaltbinderschicht, AC 16 B S, 10/40-65 A 18,0 cm Asphalttragschicht, AC 32 T S, 30/45 15,0 cm Schottertragschicht, $E_{V2} \geq 150$ MPa 30,0 cm Frostschutzschicht, $E_{V2} \geq 120$ MPa **75,0 cm Gesamtdicke** anstehender Boden / Planum, $E_{V2} \geq 45$ MPa	**Ermüdungsstatus nach 30 Jahren:** **B = 150,0 Mio. äquivalente 10-t-Achs.** Asphalttragschicht: 26,72 % **Kriterium max. Druckspannung:** Schottertragschicht: 0,00 % Frostschutzschicht: 0,00 % Planum: 0,01 %
Optimierter Aufbau nach RDO Asphalt  3,0 cm Asphaltdeckschicht, SMA 8 S, 25/55-55 A 9,0 cm Asphaltbinderschicht, AC 16 B S, 10/40-65 A 16,0 cm Asphalttragschicht, AC 32 T S, 30/45 15,0 cm Schottertragschicht, $E_{V2} \geq 150$ MPa 32,0 cm Frostschutzschicht, $E_{V2} \geq 120$ MPa **75,0 cm Gesamtdicke** anstehender Boden / Planum, $E_{V2} \geq 45$ MPa	**Ermüdungsstatus nach 30 Jahren:** **B = 150,0 Mio. äquivalente 10-t-Achs.** Asphalttragschicht: 40,20 % **Kriterium max. Druckspannung:** Schottertragschicht: 0,00 % Frostschutzschicht: 0,00 % Planum: 0,04 % **Ermüdungsstatus, Unterschreitung der Gesamtdicke Asphalt um 2 cm: 67,64 %**
Optimierter Aufbau nach RDO Asphalt Kompaktasphalt  2,0 cm Asphaltdeckschicht, SMA 8 S, 25/55-55 A 8,0 cm Asphaltbinderschicht, AC 16 B S, 10/40-65 A 18,0 cm Asphalttragschicht, AC 32 T S, 30/45 15,0 cm Schottertragschicht, $E_{V2} \geq 150$ MPa 32,0 cm Frostschutzschicht, $E_{V2} \geq 120$ MPa **76,0 cm Gesamtdicke** anstehender Boden / Planum, $E_{V2} \geq 45$ MPa	**Ermüdungsstatus nach 30 Jahren:** **B = 150,0 Mio. äquivalente 10-t-Achs.** Asphalttragschicht: 38,20 % **Kriterium max. Druckspannung:** Schottertragschicht: 0,00 % Frostschutzschicht: 0,00 % Planum: 0,03 % **Ermüdungsstatus, Unterschreitung der Gesamtdicke Asphalt um 2 cm: 63,81 %**
Optimierter Aufbau nach RDO Asphalt Kompaktasphalt „Ewigkeitsstraße“  2,0 cm Asphaltdeckschicht, SMA 8 S, 25/55-55 A 8,0 cm Asphaltbinderschicht, AC 16 B S, 10/40-65 A 21,0 cm Asphalttragschicht, AC 32 T S, 30/45 15,0 cm Schottertragschicht, $E_{V2} \geq 150$ MPa 30,0 cm Frostschutzschicht, $E_{V2} \geq 120$ MPa **76,0 cm Gesamtdicke** anstehender Boden / Planum, $E_{V2} \geq 45$ MPa	**Ermüdungsstatus nach 50 Jahren:** **B = 312,8 Mio. äquivalente 10-t-Achs.** Asphalttragschicht: 44,80 % **Kriterium max. Druckspannung:** Schottertragschicht: 0,00 % Frostschutzschicht: 0,00 % Planum: 0,00 % **Ermüdungsstatus, Unterschreitung der Gesamtdicke Asphalt um 2 cm: 64,62 %**

Bild 4: Zusammenstellung der verschiedenen Oberbaukonzepte für eine Bundesautobahn

Die Fläche liegt in Norddeutschland an der Unterweser und wird für die Produktion und den Transport von Monopiles verwendet. Hierbei handelt es sich um Gründungselemente für Offshore-Windkraftanlagen. Hierbei handelt es sich im Prinzip um große Stahlrohre, die sich an einem Ende verjüngen und mit dem dickeren Ende in den Meeresboden gerammt werden. Die derzeitige Generation von Monopiles hat dabei Gewichte von bis zu 2.500 t, Längen bis 120 m und einen Durchmesser von etwa 10 m. Der Transport der Monopiles erfolgt aufgrund der großen Länge und des hohen Gewichts üblicherweise auf self propelled modular transporter (SPMT) mit Achslasten von derzeit bis zu etwa 35 t und zukünftig bis zu 48 t bei maximal zweckmäßiger Ausladung. In Bild 5 ist beispielhaft der Transport eines Monopiles mit einem Gewicht von 2.300 t auf 24 x 3 Achslinien dargestellt.



Bild 5: Transport eines Monopiles auf SPMT

Wie bereits in Bild 5 zu erkennen, liegt die Besonderheit in diesen Transporten für diesen speziellen Fall darin, dass zwischen dem Werksgelände und dem zugehörigen Außenlager der Deich mittels einer Rampe gequert werden muss, deren Gefälle etwa 4,5 % beträgt. Verdeutlich wird dies in Bild 6. Hieraus ergeben sich erhebliche Lasten, die auf die Asphaltbefestigung wirken. Auch für diesen Anwendungsfall wurde ein Oberbaukonzept auf Grundlage der rechnerischen Dimensionierung entwickelt.



Bild 6: Transport eines Monopiles mittels SPMT über eine Deichquerung

Als Grundlage zur Ermittlung der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung wurde seinerzeit die voraussichtliche jährliche Produktionsleistung des Werks angesetzt, sodass sich für einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren eine B-Zahl von 32 Mio. äquivalenten 10-t-

Achsübergängen ergeben hat. Da sich durch die sehr langsame Fahrgeschwindigkeit der SPMT nahezu statische Lasten ergeben, musste zudem berücksichtigt werden, dass eine hinreichende Verteilung dieser Lasten in den Untergrund aus enggestuftem Sand gegeben ist, sodass eine Dicke der Schottertragschicht von 50 cm gewählt wurde und. Zusätzlich wurden hohe Anforderungen an das Baustoffgemisch für Schottertragschichten 0/32 aus Naturstein gewählt, um einen großen Lastabtragungswinkel und eine hohe Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Die Asphaltbefestigung setzt sich aus einer 6 cm dicken Asphaltdeckschicht aus einem Asphaltbeton AC 16 D S mit PmB 10/25 VL und einer 14 cm dicken Asphalttragschicht aus Asphalttragschichtmischgut AC 32 T S mit dem resultierenden Bitumen 30/45 zusammen und hat somit eine Gesamtdicke von lediglich 20 cm (Bild 7), gegenüber einem vergleichbaren Aufbau nach den RStO 12/24, Tafel 1, Zeile 3 mit 26 cm Gesamtdicke. Mit den seinerzeit getroffenen Annahmen ergab sich hieraus ein Ermüdungsstatus der Asphalttragschicht von 57,2 %.

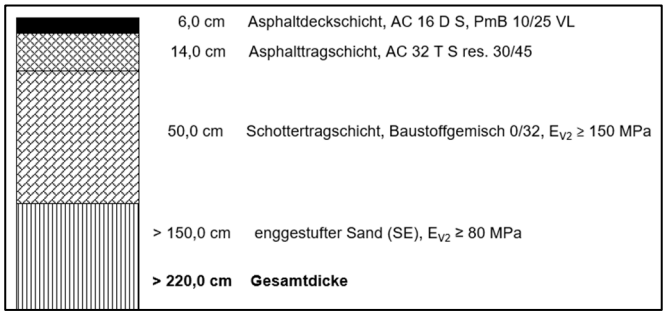


Bild 7: Aufbau der Verkehrsflächenbefestigung für die Deichquerung

Eine Nutzung der so hergestellten Deichquerung erfolgt bereits seit dem Jahr 2015, zunächst mit Monopiles bis etwa 1.000 t. Seit dem Februar 2022 werden Transporte mit einem Gesamtgewicht von bis zu 2.500 t durchgeführt. Aus der bisherigen Nutzung ergeben sich keine Schäden an der Asphaltbefestigung, die durch diese enorm schweren und anspruchsvollen Transporte resultieren. So sind bei der bisherigen Nutzung keinerlei Risse und Verformungen aufgetreten, sodass davon auszugehen ist, dass die rechnerisch dimensionierte Asphaltbefestigung den Ansprüchen gewachsen ist.

Aufgrund neuer Erkenntnisse wird abweichend von dem seinerzeit für die rechnerische Dimensionierung als Eingangsgröße verwendeten Asphaltbeton AC 16 D S mit PmB 10/25 VL nun ein AC 16 D S mit dem Viskositätsveränderten Polymermodifizierten Bitumen PmB 10/40-80 VL eingesetzt. Diese Bitumen bietet eine höhere Polymermodifizierung und ist dementsprechend noch widerstandsfähiger gegen bleibende Verformungen und bietet eine bessere Kälteflexibilität, die gerade bei großen Asphaltflächen aufgrund der temperaturindizierten Materialausdehnungen und -schrumpfungen von Vorteil ist. Die sehr guten Eigenschaften dieses Bitumens konnten im Rahmen von Untersuchungen bestätigt werden, die aufgrund von bundesweit aufgetretenen Spurrinnen nach dem Sommer 2019 umfangreiche Untersuchungen zur Ursache und möglichen Maßnahmen zur Verhinderung dieser Schäden nach sich zogen *(Schäfer, 2022)*.

4.3 Schlussfolgerungen

Die beiden dargestellten Beispiele zeigen, welcher Anwendungsbereich mit den RDO Asphalt 09/24 abgedeckt werden kann. Dieser reicht von Standardanwendungen, im Bereich des Straßenbaus, bis zu hoch spezialisierten und individuell zugeschnittenen Oberbaukonzepte für den Einsatz auf hoch belasteten Flächen.
In beiden Fällen konnte gegenüber einem Aufbau nach den RStO 12/24, welcher für Hafen-, Logistik- und Industrieflächen sowieso nicht anwendbar ist, eine deutliche Einsparung an Asphaltmischgut und somit an Rohstoffen erreicht werden. Durch die Annahme von

Materialkennwerten, die aus Laboruntersuchungen an realen Asphalten ermittelt wurden, lassen sich auch die Eigenschaften von Asphaltmischgut mit hohen Zugaberaten von Asphaltgranulat abbilden, sodass ein negativer Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung ausgeschlossen werden kann.
Aufgrund der Berechnungsmethodik, die den RDO Asphalt 09/24 zugrunde liegt, lassen sich die Asphaltbefestigungen im Prinzip für beliebig lange Nutzungszeiträume rechnerisch dimensionieren. Hierbei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass neben der Ermüdungsrissbildung auch eine Alterung des Bitumens eintritt und gegebenenfalls auch Schäden durch eindringendes Oberflächenwasser auftreten können, wenn die bauliche Erhaltung vernachlässigt wird. Gleichwohl stellt die rechnerische Dimensionierung einen wichtigen Baustein auf dem Weg zur „Ewigkeitsstraße“ dar, mit dem sich anwendungsspezifisch und materialspezifisch die optimale Lösung entwickeln lässt.
Somit kann abschließend festgehalten werden, dass aufgrund der Vielzahl der inzwischen vorliegenden Erfahrungen durchaus der Zeitpunkt gekommen ist, diese innovative und nachhaltige Vorgehensweise bei allen hierfür geeigneten Projekten anzuwenden.

5 Zusammenfassung

Mit den RDO Asphalt 09/24 steht für die Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt ein Werkzeug zur Verfügung, dass durch mittlerweile verfügbare Softwarelösungen benutzerfreundlich angewendet werden kann. Gegenüber einem Oberbau nach den RStO 12/24 wird durch die Betrachtung der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchungen in Verbindung mit charakteristischen Temperaturprofilen berechenbare Beanspruchungszustände ermittelt, die für den Ermüdungsnachweis geeignet sind. Durch die gleichzeitige Nachweisführung mit materialspezifischen Kennwerten, die am Asphaltmischgut, welches in der Verkehrsflächenbefestigung eingesetzt werden soll, kann sehr präzise der Widerstand gegen eine Ermüdungsrissbildung an der Unterseite der Asphalttragschicht bestimmt werden. Aufgrund dieser präzisen Berechnungsmethode können zum Teil nicht unerhebliche Optimierungen der Oberbaukonzepte vorgenommen werden, die gleichzeitig zu einer Einsparung von Asphalt im Zentimeterbereich führen. Durch die konsequente Anwendung der rechnerischen Dimensionierung nach den RDO Asphalt 09/24 bei der Planung von Bundesautobahnen und Asphaltbefestigungen für sondergenutzte Flächen, können so in einem großen Maß Ressourcen eingespart werden. Zugleich lassen sich deutlich detaillierte Angaben zum erwarteten Nutzungszeitraum der Asphaltbefestigung treffen.
In zwei Praxisbeispielen wurde aufgezeigt, welcher Optimierungsbedarf durch die rechnerische Dimensionierung entsteht.
Einerseits wurde durch die Verwendung von Asphalten mit sehr guten Gebrauchseigenschaften die Dicke einer Asphaltbefestigung für eine Bundesautobahn mit einer dimensionierungsrelevanten Beanspruchung von B = 150 Mio. äquivalenten 10-t-Achsübergängen, welche oberhalb des Erfahrungshintergrunds der RStO 12/24 liegt, um einen Zentimeter reduziert. Gleichzeitig kann durch eine Mehrdicke von 3 cm ein Nutzungszeitraum von 50 Jahren, gegenüber den standardmäßig betrachteten 30 Jahren erreicht werden. Zusätzlich wurde aufgrund der größeren Dauerhaftigkeit auch die Möglichkeit des Einbaus von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht als Kompakte Asphaltbefestigung in Betracht gezogen.
Andererseits wurde dargestellt, dass auch auf höchst beanspruchten Flächen eine Asphaltbefestigungen mit einer Dicke von nur 20 cm zur Aufnahme von extremen Beanspruchungen, die aus dem Transport von Monopiles über eine Schräge mit einem Längsgefälle von 4,5 % mittels SPMT resultieren, geeignet sind.
Diese beiden Beispiele stellen nur einen kleinen Ausschnitt des großen Anwendungsbereichs der rechnerischen Dimensionierung dar, bieten aber bereits einen sehr deutlichen Einblick, welche Möglichkeiten hierdurch resultieren. Gerade im Hinblick auf die Nachhaltigkeit lässt sich für die Asphaltbauweise hier, durch die Möglichkeit Materialkennwerte von Asphalten mit hohen Wiederverwendungsraten zu verwenden und lange Nutzungszeiträume zu gewährleisten ein großer Beitrag leisten.

Danksagung

Der Erstautor möchte sich an dieser Stelle ausdrücklich bei allen öffentlichen und privaten Auftraggebern für das frühzeitige Interesse an dieser innovativen und nachhaltigen Art der Dimensionierung von Asphaltbefestigungen verbunden mit der Möglichkeit, die hier in Bezug genommenen Daten zu gewinnen, bedanken, ohne die die Erarbeitung dieses Beitrages nicht möglich gewesen wäre.

Literaturverzeichnis

FGSV. (2013). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 07/13). FGSV Verlag, Köln.

FGSV. (2018a). Merkblatt für Planung, Konstruktion und Bau von Verkehrsflächen aus Beton—Teil 3: Container- und Logistikflächen, Ausgabe 2018 (M VaB). FGSV Verlag, Köln.

FGSV. (2018b). Technische Prüfvorschriften für Asphalt—Teil 24 Spaltzug-Schwellversuch—Beständigkeit gegen Ermüdung, Ausgabe 2018 (TP Asphalt-StB, Teil 24). FGSV Verlag, Köln.

FGSV. (2018c). Technische Prüfvorschriften für Asphalt—Teil 26 Spaltzug-Schwellversuch—Bestimmung der Steifigkeit, Ausgabe 2018 (TP Asphalt-StB, Teil 26). FGSV Verlag, Köln.

FGSV. (2022). Arbeitspapier Eingangsgrößen für die Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz—Teil 1: Verkehrsbelastung, Ausgabe 2022 (AP EDS-1). FGSV Verlag, Köln.

FGSV. (2024a). Merkblatt für Planung und Bau von Hafen-, Logistik- und Industrieflächenbefestigungen (M HLI), Entwurf (Stand 11.09.2024). FGSV Verlag, Köln.

FGSV. (2024b). Richtlinien für die Rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise, Ausgabe 2009/Fassung 2024 (RDO Asphalt 09/24). FGSV Verlag, Köln.

FGSV. (2024c). Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012/Fassung 2024 (RStO 12/24). FGSV Verlag, Köln.

FGSV. (2024d). Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2025, Schlussentwurf 14.03.2024 (TL Asphalt-StB 25). FGSV Verlag, Köln.

Miner, M. A. (1945). Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, 3, 159–164.

Schäfer, V. (2022). Asphalt im Klimawandel—Erkenntnisse und Herausforderungen. Straße und Autobahn, 3.2022, 191–206.

Schäfer, V., & Rosauer, V. (2007). Kompaktasphalt—Eine Bauweise etabliert sich, Lösung für hoch belastete Verkehrsflächen. asphalt, 6/2007, 65–71.

Schäfer, V., & Rosauer, V. (2017). Erkenntnisse aus der Anwendung der RDO Asphalt im Hinblick auf die Performance-Eigenschaften von Asphaltschichten. 5. Dresdner Asphalttage, Tagungsband, 11 p.

Zander, U. (2024). Potenziale umsetzen für den nachhaltigen Straßenbau [Vortrag]. 22. Deutsche Asphalttage, Berchtesgaden.