
Weiterentwicklung der zerstörungsfreien Bewertung struktureller Substanz von Asphaltsschichten mit dem Falling Weight Deflectometer

Vom Fachbereich Bau- und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Nguyen, Anh Duc, M.Sc.
aus **Ho-Chi-Minh-Stadt, Vietnam**

Referenten: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald
Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald

Datum der Einreichung: 12.01.2022

Datum der Prüfung: 01.04.2022

Darmstadt 2022

Nguyen, Anh Duc:

Weiterentwicklung der zerstörungsfreien Bewertung struktureller Substanz von Asphaltsschichten mit dem Falling Weight Deflectometer

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tupriints-233733

URI: <https://tupriints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/23373>

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

Tag der mündlichen Prüfung: 01.04.2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswegebau, Technische Universität Darmstadt.

An dieser Stelle möchte ich zuerst allen Kollegen am Institut für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald für seine Förderung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats.

Ganz besonders danke ich meiner Familie und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Falk Häschel aus Pirna für ihre Unterstützung zur Fertigstellung der Arbeit.

Kurzfassung

Aufgrund des bereits gut ausgebauten Straßennetzes und der gesellschaftspolitischen Aspekte des Umweltschutzes ist in Industrieländern wie Deutschland von einem hohen Anteil an Erhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen an den straßenbezogenen Aufwendungen auszugehen. In diesem Zusammenhang ist die Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltsschichten von großer Bedeutung. Infolge des hohen Aufwands zerstörender Methoden wie Bohrkernentnahme ist es notwendig, eine schnelle und zerstörungsfreie Methode zu entwickeln, die mit geringem Aufwand Ergebnisse liefern kann.

Seit Anfang der 2000er Jahre erforscht das Institut für Straßenwesen (nun Institut für Verkehrswegebau) der Technischen Universität Darmstadt die zerstörungsfreie Bewertung der strukturellen Substanz und Tragfähigkeit von Asphaltstraßen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD). Als Ergebnis von zehn Jahren Forschung wurde 2009 im Rahmen der Habilitation von GRÄTZ an der Technischen Universität Darmstadt ein Verfahren entwickelt. Untersuchungen in der Praxis zeigten jedoch die Notwendigkeit für eine Weiterentwicklung des GRÄTZ-Verfahrens.

Ziel dieser Arbeit ist es, das GRÄTZ-Verfahren weiterzuentwickeln, um strukturelle Substanz von Asphaltsschichten durch FWD-Messungen zu bewerten und daraus die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Straße zerstörungsfrei zu ermitteln.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde zunächst die Entwicklung des Verfahrens von GRÄTZ [2009] analysiert. Anschließend wurden verschiedene Punkte des Verfahrens in Frage gestellt, welche potenzielle Schwachstellen aufzeigen können. Um diese Punkte zu klären, wurde anschließend das Tragverhalten von Asphaltstraßen systematisch mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht.

Den Schwerpunkt der Ergebnisse der FEM-Untersuchungen dieser Arbeit stellt die Aufklärung des Tragverhaltens von Straßen in Abhängigkeit vom Schichtenverbund der Asphaltsschichten dar, was zur Einführung einer neuen Kennzahl für die strukturelle Substanz der Straße führte – die so genannten wirksame Dicke der lastverteilenden Asphaltsschichten h_{wirksam} . Damit konnte festgestellt werden, dass die Schwachstelle des GRÄTZ-Verfahrens in der Vernachlässigung des Schichtenverbunds von Asphaltsschichten liegt und daher die Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ nicht zielführend ist.

Die weiteren Ergebnisse der FEM-Untersuchungen dieser Arbeit, mit denen die Überlagerung der Platten- und Halbraumtragwirkung von Asphaltsschichten im Lastangriffsbereich festgestellt wurde, zeigten auch, dass die in vielen Literaturstellen dargestellte rechnerische Ermittlung der Restnutzungsdauer der Straße, z.B. in [COST 333, 1999], in Bezug auf die Rissbildung an der Unterseite der Asphaltsschichten nicht ausreicht.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde festgelegt, dass die FWD-Messungen zur Bewertung der wirksamen Dicken von Asphaltsschichten h_{wirksam} sowie deren Schichtenverbund herangezogen werden sollen. Die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Straße werden mit den bewerteten h_{wirksam} auf der Grundlage der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen 12 [FGSV, 2012] bewertet.

Mit dieser Festlegung hat der Verfasser die „Darmstädter Methode“ zur Interpretation der FWD-Messungen neu entwickelt. Verifizierungen in der Praxis haben die Methode bestätigt. Durch die in dieser Arbeit empfohlenen Punkte kann die „Darmstädter Methode“ im Hinblick auf Funktionsbauverträge weiterentwickelt werden.

Abstract

Due to the already well-developed road network and the socio-political aspects of environmental protection, a high proportion of maintenance and rehabilitation measures can be assumed in such industrialized countries as Germany. In this context, the evaluation of structural substance of asphalt layers is of great importance. Due to the high effort of such destructive methods like core sampling, it is necessary to develop a fast and non-destructive method, which can provide results with low effort.

Since the early 2000s, the Institute of Road Engineering, Darmstadt University of Technology has been researching the non-destructive evaluation of structural substance and bearing capacity of asphalt layers using the falling weight deflectometer (FWD). As a result of 10 years of research, a method was developed in 2009 as part of GRÄTZ's habilitation. However, the investigations in practice have shown that the GRÄTZ method needs to be further developed.

The aim of this work is to further develop the FWD investigation established by GRÄTZ [2009] for the proper assessment of the structural substance of asphalt layers and thus to determine the bearing capacity and remaining of the service life of asphalt layers non-destructively.

To achieve this goal, the GRÄTZ method was analyzed. Thereby, several points of the method were questioned, from which its weaknesses may arise. To clarify these points, the load behavior of the asphalt road was then systematically investigated using the finite element method (abaqus).

The main focus of the results of the FEM investigations was the clarification of the structural behavior of the asphalt layers depending on its bonding conditions, which led to the establishment of a new structural substance parameter of the road - the so-called effective thickness of asphalt layers h_{wirksam} . On the basis of h_{wirksam} , it could be ascertained that the problem of the GRÄTZ method stems from the neglecting the bonding of the asphalt layers and thus the back-calculation of the stiffness modulus of asphalt $|E|_{\text{asphalt}}$ from FWD measurement is not reasonable.

The other results of the FEM investigations, through which the superposition of the plate and half-space bearing effect of the asphalt layers in the load was clarified, also showed that the previously presented determination of the load carrying capacity and remaining useful life of the road in relation to the fatigue cracking of the asphalt layers, such as in [COST 333, 1999], is not sufficient.

Based on these new findings, it was determined that the FWD measurements should be used to back-calculate the effective thickness of asphalt layer h_{wirksam} and to evaluate their layer bonding. Thus, the bearing capacity and remaining service life of the road are determined based on the empirical experience of the RStO 12 [German guideline for standardization of pavement structures of traffic areas].

As a result of this work, the author has developed the Darmstadt method for interpreting FWD measurements. Verifications in practice with coring have confirmed the evaluation of structural substance of asphalt by this method. By means of the points recommended in this work, the Darmstadt method can be further developed with regard to functional construction contracts.

Inhaltverzeichnis

VORWORT	I
KURZFASSUNG	II
ABSTRACT	IV
INHALTVERZEICHNIS	VI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	X
BILDVERZEICHNIS	XII
TABELLENVERZEICHNIS	XX
1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1 EINLEITUNG	1
1.2 STAND DER TECHNIK UND PROBLEMSTELLUNG	2
1.3 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE	4
1.4 GLIEDERUNG DER ARBEIT.....	4
2 STAND DES WISSENS	7
2.1 EINLEITUNG	7
2.2 ALLGEMEINES ZUR ASPHALTBAUWEISE	7
2.3 TRAGVERHALTEN VON ASPHALTSTRABEN	10
2.3.1 <i>Allgemeines zum Tragverhalten</i>	10
2.3.2 <i>Modellierung des Tragverhaltens der Straße</i>	11
2.3.2.1 Allgemeine Bestimmungsgleichungen	12
2.3.2.2 Modelle für den Boden (Erdstraße)	16
2.3.2.2.1 Bettungsmodell vom Winkler	16
2.3.2.2.2 Homogene Halbraummodell von BOUSSINEQ.....	17
2.3.2.3 Modelle für Asphaltstraßen	19
2.3.2.3.1 Das gebettete Plattenmodell.....	19
2.3.2.3.2 Das mehrschichtige Halbraummodell (engl. elastic multi-layer theory).....	26
2.3.2.3.3 Finite-Element-Methode (FEM).....	27
2.3.2.4 Modell für den Schichtenverbund der Asphaltsschichten von BISAR [SHELL, 1998]	28
2.4 SCHÄDIGUNGSMCHANISMUS UND DIE ERMITTLUNG DER NUTZUNGSDAUER VON ASPHALTSCHICHTEN	32
2.5 ZERSTÖRUNGSFREIE UNTERSUCHUNG STRUKTURELLER SUBSTANZ VON ASPHALTSTRABEN MIT DEM FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD).....	34
2.5.1 <i>Allgemeines</i>	34
2.5.2 <i>FWD-Messung</i>	34

2.5.3	<i>Interpretation der FWD-Messungen</i>	36
2.5.3.1	Mehrschichtige Methode	36
2.5.3.2	Zweischichtige Verfahren (das GRÄTZ-Verfahren)	38
3	ANALYSE DES GRÄTZ-VERFAHRENS UND FORSCHUNGSBEDARF	44
4	VERTIEFTE UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS VON STRAßEN MIT DÜNNER ASPHALTSCHICHT	49
4.1	EINLEITUNG	49
4.2	FEM-UNTERSUCHUNG	49
4.2.1	<i>Herangehensweise</i>	49
4.2.2	<i>Modellierung</i>	49
4.2.3	<i>Ergebnis der Untersuchung</i>	50
4.3	SCHLUSSFOLGERUNG	52
5	VERTIEFTE UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS VON STRAßEN MIT DICKEN ASPHALTSCHICHTEN	57
5.1	EINLEITUNG	57
5.2	FEM-UNTERSUCHUNG	57
5.2.1	<i>Modellierung</i>	57
5.2.2	<i>Ergebnis der Untersuchung</i>	58
5.3	ERWEITERUNG DER FEM-MODELLIERUNG ZUR VERTIEFTEN UNTERSUCHUNG DER ÜBERLAGERUNG DER PLATTEN- UND HALBRAUMTRAGWIRKUNG DER ASPHALTSCHICHT IM LASTANGRIFFSBEREICH	62
5.4	SCHLUSSFOLGERUNG	67
6	VERTIEFTE UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS VON STRAßEN MIT UND OHNE SCHICHTENVERBUND ZWISCHEN ASPHALTSCHICHTEN	72
6.1	EINLEITUNG	72
6.2	FEM-UNTERSUCHUNG	72
6.2.1	<i>Modellierung</i>	72
6.2.2	<i>Ergebnis der Untersuchung</i>	73
6.3	SCHLUSSFOLGERUNG	76
7	VERTIEFTE UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS VON STRAßEN MIT UNVOLLSTÄNDIGEM SCHICHTENVERBUND ZWISCHEN ASPHALTSCHICHTEN	78
7.1	EINLEITUNG	78
7.2	FEM-UNTERSUCHUNG	78
7.2.1	<i>Herangehensweise</i>	78
7.2.2	<i>Modellierung</i>	80

7.2.3	<i>Ergebnis der Untersuchung</i>	82
7.3	SCHLUSSFOLGERUNG	84
8	ENTWICKLUNG DER „DARMSTÄDTER METHODE“ ZUR INTERPRETATION DER FWD-MESSUNGEN	85
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	93
10	ANHANG 1: BAUSTOFF ASPHALT	96
10.1	ZUSAMMENSETZUNG UND HERSTELLUNG DES ASPHALTS	96
10.2	LASTABTRAG DES VERDICHETEN ASPHALTMISCHGUTS.....	96
10.3	MECHANISCHE EIGENSCHAFT DES ASPHALTS.....	97
10.4	RHEOLOGISCHES VERHALTEN DES ASPHALTS	100
10.4.1	<i>Elastisches Verhalten</i>	100
10.4.2	<i>Viskoses Verhalten</i>	101
10.4.3	<i>Viskoelastisches Verhalten</i>	102
11	ANHANG 2: RECHNERISCHE MODELLE ZUR BESCHREIBUNG DES TRAGVERHALTENS VON STRAßEN	104
11.1	HALBRAUMMODELL VON BOUSSINEQ	104
11.2	DAS MEHRSCICHTIGE HALBRAUMMODELL	105
12	ANHANG 3: AUSWERTUNG DER VISKOELASTISCHEN EIGENSCHAFT DES ASPHALTS FÜR DIE UNTERSUCHUNG IM KAPITEL 5.3	111
13	ANHANG 4: ERMÜDUNGSFUNKTIONEN DES ASPHALTS UND ERGEBNISSE DER LABORUNTERSUCHUNGEN ZUR BESTIMMUNG DES $E _{\text{ASPHALT}}$ AUS DER LITERATUR	112
13.1	ERMÜDUNGSFUNKTIONEN DES ASPHALTS AUS VERSCHIEDENEN FORSCHUNGSINSTITUTEN.....	112
13.2	ERGEBNISSE DER LABORUNTERSUCHUNGEN AN DEN BOHRKERNEN ZUR BESTIMMUNG DES $ E _{\text{ASPHALT}}$ ANHAND DER SPALTZUGSCHWELLVERSUCHE	113
13.2.1	<i>FE 04.199/2004/ARB</i>	114
13.2.2	<i>FE 88.0100/2009</i>	116
14	ANHANG 5: ERGEBNISSE DER FEM-MODELLIERUNGEN DES KAPITELS 5	117
14.1	HORIZONTALSPANNUNGSZUSTAND DER ELASTISCHEN ASPHALTSCHICHTEN DER ASPHALTSCHICHTEN IN ABSCHNITT 5.2	117
14.1.1	<i>10-cm-Asphaltschicht</i>	117
14.1.2	<i>24-cm-Asphaltschicht</i>	118
14.1.3	<i>42-cm-Asphaltschicht</i>	120
14.1.4	<i>60-cm-Asphaltschicht</i>	122

14.1.5	100-cm-Asphaltschicht.....	124
14.2	VERFORMUNGEN DER ELASTISCHEN ASPHALTSCHICHTEN (UNTERSUCHUNGEN VOM ABSCHNITT 5.3).....	127
14.2.1	10-cm-Asphaltschicht.....	127
14.2.2	24-cm-Asphaltschicht.....	127
14.2.3	42-cm-Asphaltschicht.....	128
14.2.4	60-cm-Asphaltschicht.....	128
14.2.5	100-cm-Asphaltschicht.....	129
15	LITERATURVERZEICHNIS	130

Abkürzungsverzeichnis

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ADS	Asphaltdeckschicht
Abi.	Asphaltbinderschicht
ATS	Asphalttragschicht
o.ATS	Obere Asphalttragschicht
u.ATS	Untere Asphalttragschicht
AK-Wert	Shear spring compliance
AL-SP Asphalt 09	Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungs-verhaltens von Asphalten mit dem Spaltzugschwellversuch
ARBIT	Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie
bast	Bundesanstalt für Straßenwesen
BK SV	Bauklasse SV nach der RStO
BISAR	Bitumen Structure Analysis in Roads
bzw.	Beziehungsweise
ca.	circa
W ₁₈₀ , W ₄₀	Einsenkungen in einem Abstand von 180 cm und 40 cm vom Lastmittelpunkt
COST	European Cooperation In Science and Technology
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Normen
E _{v2} -Wert	Verformungsmodul des Planums nach RStO
E _{Asphalt}	Steifigkeitsmodul des Asphalts
E _{Boden}	E-Modul des Bodens
E _{Schottragschicht}	E-Modul der Schottertragschicht
FEM	Finite-Element-Methode
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

FWD	Falling Weight Deflectometer
FSS	Frostschuttschicht
h_{wirksam}	Wirksame Dicke der lastverteilenden Asphalttschichten
$\sum h_{\text{Asphalt}}$	Gesamtdicke der lastverteilenden Asphalttschichten
ICAO	International Civil Aviation Organisation
in	inch bzw. zoll
Lkw	Lastkraftwagen
l -Wert	Elastische Länge bzw. Verhältniswert zwischen der Steifigkeit der Platte und des Halbraums
M_0	Schichtmoduli des Halbraums (Boden einschließlich der Schottertragschicht)
M_{Asphalt}	Schichtmoduli von Asphalttschichten
$M_{\text{Asphalt}}^3_{\text{wirksam}}$	Schichtsteifigkeit von Asphalttschichten
o.g.	oben genannt
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Asphaltbefestigungen
RDO Asphalt 09	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten
Sec	Sekunde
SHRP	Strategic Highway Research Program
-t-	tonne
τ -u-Diagramm	Schubspannungs-Verschiebungs-Diagramm
USA	United States of America
u. a.	und andere
ZTV Asphalt-Stb 07	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt
ZEB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen
z.T.	zum Teil
z.B.	zum Beispiel

Bildverzeichnis

Bild 1-1	Die im Rahmen des Forschungsprojekt FE-Nr. 88.0100/2009 [BALD u.a., 2011] durch das GRÄTZ-Verfahren bewerteten Steifigkeitsmodule des Asphalts $ E _{\text{Asphalt}}$ einer 3-jährigen und 8-jährigen Autobahnstrecke 3
Bild 1-2	Gliederung der Arbeit 6
Bild 2-1	Regelquerschnitt einer Asphaltstraße und Aufbau einer Asphaltbefestigung von Autobahnen [FGSV, 2012] 7
Bild 2-2	Herstellung des Asphaltmaterials und Einbau einer mehrschichtigen Asphaltbefestigung [Poster der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie] 9
Bild 2-3	Die Radaufstandsfläche und die Druckverteilung der Radlast des Lkw mit Achslast von 3.75 t [ZANDER, 2007]..... 9
Bild 2-4	Darstellung des Tragverhaltens der Straße mit einer mehrschichtigen Asphaltbefestigung [WIEHLER und WELLNER, 1996]..... 10
Bild 2-5	Die in der Praxis gewonnenen Erfahrungen zur Tragfähigkeit der Straße in Abhängigkeit vom Schichtenverbund der Asphaltsschichten [FGSV, 1990]..... 11
Bild 2-6	Der Spannungszustand eines herausgeschnittenen Würfelements im kartesischen Koordinatensystem (links) und die daraus resultierten Dehnungen (Mitte) und Gleitungen (rechts) (Hinweis: Spannungen auf den Rückenseiten bzw. auf den negativen Schnittufern zur besseren Übersicht nicht dargestellt) 12
Bild 2-7	Axialsymmetrische belastete Raumelement in zylindrischen Koordinaten..... 15
Bild 2-8	Die anhand der Halbraumtheorie von BOUSSINEQ ermittelte Verformung des Bodens [MEIER u.a., 1968]..... 18

Bild 2-9	Die anhand der Halbraumtheorie von BOUSSINEQ ermittelten Horizontal- und Vertikalspannungen unter dem Lastmittelpunkt einer Kreislast $p(a)$ des Halbraummodells in Bild 2-8	18
Bild 2-10	Zweischichtiges Straßenmodell "Platte auf den Federn"	21
Bild 2-11	Mechanische Bedeutung des WESTERGAARDS Radius (l -Werts) im Modell „Platte auf Federn“ [ICAO, 1983].....	22
Bild 2-12	Zweischichtiges Straßenmodell "Platte auf homogenem elastischem Halbraum" mit charakteristischen Spannungszuständen der Asphaltsschicht.....	23
Bild 2-13	Modellierung des Tragverhaltens der Asphaltsschichten unter der Radlast des Lkw mittels der Sensorik von [ZANDER, 2007].....	26
Bild 2-14	Modellierung des Tragverhaltens der dreischichtigen Asphaltstraße (Schicht 1: Asphaltsschicht, Schicht 2: Frostschutzschicht und Schicht 3: Boden) unter einer Topflast anhand des mehrschichtigen Halbraummodells [GERLACH, 1968]	27
Bild 2-15	Mechanische Modell für den Schichtenverbund.....	29
Bild 2-16	Die Einsenkungen der Straße in Abhängigkeit vom Parameter α von BISAR	31
Bild 2-17	Die Dehnungen der Asphaltsschichten in Abhängigkeit vom Parameter α von BISAR.....	31
Bild 2-18	Schädigungsmechanismus von Asphaltsschichten [WANG u.a., 2017].....	32
Bild 2-19	Bewertung der Ermüdung des Asphalts nach ROWE [bast, 2006]	33
Bild 2-20	Gliederung der FWD-Untersuchung	34
Bild 2-21	Beispiel für einen Kraft-Zeit-Verlauf des Impulses vom FWD.....	35
Bild 2-22	Das Falling Weight Deflectometer und sein Messprinzip [GRÄTZ, 2009]	35

Bild 2-23	Das mehrschichtige Verfahren und die Orientierungswerte für die Steifigkeit des Schichtenverbunds von Asphaltsschichten nach [AL HAKIM u. a., 2000].....	37
Bild 2-24	Regressive Rückrechnung des l - und M_0 -Werts des GRÄTZ-Verfahrens	39
Bild 2-25	Bewertung struktureller Substanz und Tragfähigkeit der Straße des GRÄTZ-Verfahrens [GRÄTZ, 2009].....	40
Bild 2-26	Die anhand der FEM berechneten Einsenkungen der Straßen und die regressive Rückrechnung nach GRÄTZ; links: $h_{\text{Asphalt}} = 15 \text{ cm}$ und $E_{\text{Boden}} = 50 \text{ N/mm}^2$; rechts: $h_{\text{Asphalt}} = 25 \text{ cm}$ und $E_{\text{Boden}} = 230 \text{ N/mm}^2$	42
Bild 3-1	Verformung der Asphaltstraße; links: Ergebnisse der Untersuchungen von [STRAUBE u.a., 2010] [Eigene Darstellung]; rechts: die Soll-Verformung der Straße nach dem Plattenmodell	45
Bild 3-2	Die Untersuchungen des Einflusses vom Schichtenverbund der Asphaltsschichten auf die Fahrbahneinsenkungen von [CEYLAN und KIM, 2012].....	46
Bild 4-1	FEM-Modellierung; links: Aufbau der Asphaltstraße, rechts: Modell der Asphaltstraße in abaqus	50
Bild 4-2	Die ausgewerteten Verformungen und Horizontalspannungen der modellierten Erdstraße	51
Bild 4-3	Die ausgewerteten Verformungen und Horizontalspannungen der modellierten Asphaltstraße.....	52
Bild 4-4	Charakteristische Horizontalspannungen der Halbraumtragwirkung: links: unter der Lastangriffsfläche; rechts: neben der Lastangriffsfläche	53
Bild 4-5	Das Gesamttragverhalten von Asphaltstraßen mit dünner Asphaltsschicht.....	54
Bild 4-6	Variante 1: Änderung der Einsenkungen der Straße durch Erhöhung des $ E _{\text{Asphalt}}$	55

Bild 4-7	Variante 2: Änderung der Einsenkungen der Straße durch Erhöhung der h_{Asphalt}	56
Bild 5-1	Die Modellierung der dreischichtigen Asphaltstraße in abaqus.....	57
Bild 5-2	Der Verformungs- und Horizontalspannungszustand der 10 cm dicken Asphalt­schicht und der Schotter­tragschicht.....	59
Bild 5-3	Der Verformungs- und der horizontale Spannungszustand der 24 cm dicken Asphalt­schicht	59
Bild 5-4	Der Verformungs- und der horizontale Spannungszustand der 42 cm dicken Asphalt­schicht	60
Bild 5-5	Der Verformungs- und der horizontale Spannungszustand der 60 cm dicken Asphalt­schicht	60
Bild 5-6	Der Verformungs- und der horizontale Spannungszustand der 100 cm dicken Asphalt­schicht	61
Bild 5-7	Horizontalspannungszustände der in Tabelle 5-2 aufgeführten modellierten Asphalt­schichten unter dem Lastmittelpunkt.....	63
Bild 5-8	Tragverhalten der viskoelastischen Asphalt­schicht unter einer statischen Last	65
Bild 5-9	Tragverhalten der viskoelastischen Asphalt­schicht unter einer quasi statisch berechneten Impulskraft	66
Bild 5-10	Charakteristischer Spannungszustand der Asphalt­schicht unter der Lastangriffsfläche....	68
Bild 5-11	Charakteristischer Spannungszustand der Asphalt­schicht neben der Lastangriffsfläche ..	68
Bild 5-12	Überarbeitete Darstellung des im vorangegangenen Kapitel dargestellten Tragverhaltens von Asphaltstraßen aufgrund des lokalen Effekts der Asphalt­schicht.....	69

Bild 5-13	Vergleichende Berechnung der durch verschiedene Ansätze berechneten Einsenkungen der Asphaltstraße vom Bild 4-1 (Kapitel 4).....	70
Bild 6-1	FEM-Modell in abaqus zur Untersuchung des Schichtenverbunds der Asphaltsschichten	72
Bild 6-2	Die Verformung der in Tabelle 6-1 modellierten Straßen	74
Bild 6-3	Die Einsenkungsmulde der in Tabelle 6-1 aufgeführten modellierten Straßen	74
Bild 6-4	Ausschnitt der Tafel 1 der RStO 01 [FGSV, 2001]	75
Bild 6-5	Die rückgerechneten h_{wirksam} der 8-jährigen Autobahnstrecke in Abschnitt 1.2.....	77
Bild 7-1	Die Schichtgrenze am Bohrkern der Asphalttragschicht und -binderschicht (links) und die durch den Abscherversuch zerstörte Schichtgrenze der Asphaltsschichten (rechts) [Eigene Bilder]	79
Bild 7-2	Die Inhomogenität des Schichtenverbunds der Asphaltsschichten in der Fahrbahn [WILLIS und TIMM, 2006]	80
Bild 7-3	Der Dehnungszustand der Asphaltsschichten der Fälle in Tabelle 7-1	82
Bild 7-4	Die ausgewerteten Einsenkungsmulden der Fälle in Tabelle 7-1	82
Bild 7-5	Modellierung der räumlichen Verteilung des Schichtenverbunds an einzelnen Stellen in abaqus (links) und ihre gerechneten Einsenkungsmulde (recht)	83
Bild 8-1	Die Zusammenhänge zwischen den Fahrbahneinsenkungen und den strukturellen Substanzparametern von Asphaltstraßen	85
Bild 8-2	Ergebnisse der Laboruntersuchungen des $ E _{\text{Asphalt}}$ mit unterschiedlicher Nutzungsdauer im Rahmen des Forschungsprojekts FE 04.119/2004 [RESSEL und WELLNER u.a., 2008] und FE 88.0100/2009 [BALD u.a., 2011]	88

Bild 8-3	Darmstädter Methode zur Interpretation der FWD-Messungen	91
Bild 8-4	Verifizierung der Darmstädter Methode in der Praxis	92
Bild 10-1	Spannungszustand im verdichteten Asphaltmischgut [NGUYEN, 2008]	96
Bild 10-2	Spannungs- und Verformungsverhalten der viskosen elastischen Eigenschaft [LITZKA u.a., 1999].....	98
Bild 10-3	Zusammensetzung des komplexen Moduls E^* des Asphalts [FGSV, 2006].....	99
Bild 10-4	Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Federelementes bei einer konstanten Spannung ...	100
Bild 10-5	Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Dämpferelementes bei einer konstanten Spannung	101
Bild 10-6	Kelvin-Voigt-Gruppe und ihre Kriechfunktion [VORMWALD, 2009].....	102
Bild 10-7	Maxwell-Gruppe und ihre Relaxationsfunktion [VORMWALD, 2009].....	103
Bild 11-1	Das N-schichtige Halbraummodell [LÜCKE, 1966]	106
Bild 12-1	Relaxationsversuch von Hot-Maxtis-Asphalt bei 15°C von [MINHOTO u. a., 2007] und die Auswertung der Relaxation des Asphalts anhand der Maxwell-Reihe (siehe Abschnitt 10.4.3)	111
Bild 14-1	Horizontalspannung in der Lastachse	117
Bild 14-2	Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last	117
Bild 14-3	Horizontalspannung in Abstand von 80 cm zur Last	118
Bild 14-4	Horizontalspannung in der Lastachse	118
Bild 14-5	Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last	119

Bild 14-6	Horizontalspannung in Abstand von 50 cm zur Last.....	119
Bild 14-7	Horizontalspannung in Abstand von 120 cm zur Last.....	120
Bild 14-8	Horizontalspannung in der Lastachse	120
Bild 14-9	Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last.....	121
Bild 14-10	Horizontalspannung in Abstand von 50 cm zur Last.....	121
Bild 14-11	Horizontalspannung in Abstand von 120 cm zur Last.....	122
Bild 14-12	Horizontalspannung in der Lastachse	122
Bild 14-13	Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last.....	123
Bild 14-14	Horizontalspannung in Abstand von 50 cm zur Last.....	123
Bild 14-15	Horizontalspannung in Abstand von 120 cm zur Last.....	124
Bild 14-16	Horizontalspannung in der Lastachse	124
Bild 14-17	Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last.....	125
Bild 14-18	Horizontalspannung in Abstand von 50 cm zur Last.....	125
Bild 14-19	Horizontalspannung in Abstand von 180 cm zur Last.....	126
Bild 14-20	Verformung der 10-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}	127
Bild 14-21	Verformung der 24-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}	127
Bild 14-22	Verformung der 42-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}	128
Bild 14-23	Verformung der 60-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}	128

Bild 14-24 Verformung der 100-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Die von GRÄTZ [2009] vorgeschlagenen Orientierungswerte für den l -Wert zur Bewertung der Tragfähigkeit der Straße und struktureller Substanz der Asphalt-schichten [Habilitation von GRÄTZ, 2009].....	41
Tabelle 5-1	Die Untersuchungsvarianten der elastischen Asphalt-schicht unter statischer Belastung.....	58
Tabelle 5-2	Erweiterung der FEM-Modellierung der elastischen Asphalt-schichten unter statischer Belastung.....	62
Tabelle 6-1	Die untersuchten Fälle des Schichtenverbunds der Asphalt-schichten.....	73
Tabelle 7-1	Modellierungen der räumlichen Verteilung des vollen und fehlenden Schichtenverbunds zur Untersuchung des teilweise vorhandenen Schichtenverbunds von Asphalt-schichten.....	81
Tabelle 13-1	Die mittels des Laborversuchs vorgeschlagenen Parameter für die Ermüdungsfunktion in Formel (13-1) von COST 333 [1999].....	113
Tabelle 13-2	Informationen der untersuchten Strecken des Forschungsprojekts FE 04.199/2004/ARB.....	114
Tabelle 13-3	Die im Labor mittels des Spaltzug-Schwell-Versuchs bestimmten $ E _{\text{Asphalt}}$ von Asphalt-schichten im Rahmen des Forschungsprojekts FE 04.199/2004/ARB [RESSEL, WELLNER u.a., 2008].....	115
Tabelle 13-4	Die Nutzungsdauer der untersuchten Strecken und der im Labor bestimmte $ E _{\text{Asphalt}}$ bei $t_{\text{Asphalt}} = 5^\circ \text{ C}$ aus der Bohrkernuntersuchung des FE 88.0100/2009 [BALD u.a., 2011].....	116

1 Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Ein funktionierendes Infrastruktursystem ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Erfolg einer dynamischen Wirtschaft bzw. für ein nachhaltiges wirtschaftliches Wachstum. Dabei kommt dem Straßenverkehr in der gesamten Infrastruktur nach wie vor eine wesentliche Rolle zu. Die enge Verflechtung und gegenseitige Abhängigkeit der Wirtschaftslage mit dem Straßennetz zeigt sich in den von Land zu Land unterschiedlichen Ausbaugraden und -konzepten.

Aufgrund zahlreicher Vorzüge bei der Herstellung wird die Asphaltbauweise derzeit sowohl für Neubauten als auch für Erhaltungsmaßnahmen bevorzugt angewandt. In der gesamten Straßenbefestigung haben die Asphaltsschichten aufgrund ihrer hohen Steifigkeit einen großen Einfluss auf die Nutzungsdauer der Straße. In diesem Zusammenhang ist die strukturelle Substanz der Asphaltbefestigung für die Erhaltung der Straße von großem Interesse.

Bisher wird der Zustand der Asphaltbefestigung während der Nutzung regelmäßig durch die Richtlinien für Zustandserfassung und -bewertung der Straße (ZEB) anhand von Beobachtungen an der Fahrbahnoberfläche bewertet [FGSV ZEB, 2006]. Im Rahmen der ZEB werden neben Längs- und Querebenheit lediglich die Substanzmerkmale an der Fahrbahnoberfläche erfasst. Eine Aussage über den Zustand der Asphaltbefestigung wird demnach anhand der Zahl der Risse, Flickstellen sowie Ausbrüchen getroffen. Eine solche Bewertung ist jedoch nicht ausreichend, weil der strukturelle Zustand von Asphaltsschichten, der sich nicht an der Fahrbahnoberfläche widerspiegelt, jedoch von großer Bedeutung für die Tragfähigkeit sowie die Nutzungsdauer der Straße ist, dabei nicht berücksichtigt werden kann. Dies können zum Beispiel Ermüdungsrisse oder mangelhafter Schichtenverbund zwischen den Asphaltsschichten sein.

Bislang konnte die strukturelle Substanz der Asphaltsschichten lediglich anhand von Bohrkernen untersucht und bewertet werden. Infolge des hohen Aufwands bei zerstörenden Verfahren sowie der daraus nicht repräsentativen Bewertung wurden in letzter Zeit verschiedene zerstörungsfreie Prüfmethothen entwickelt, um die strukturelle Substanz von Asphaltsschichten schneller und genauer zu bewerten. Die Methode, die auf der Analyse des Verformungsverhaltens von Straßen basiert, ist eine davon [siehe mehr dazu in TRB, 2012].

1.2 Stand der Technik und Problemstellung

Die zerstörungsfreie Untersuchung struktureller Substanz eines Bauwerks anhand seiner Verformung wurde schon früh entwickelt und hat sich bei Brücken bewährt. Für Straßen sind seit den 1980er Jahren verschiedene Verfahren - von stationären bis zu fahrenden Messsystem - entwickelt worden, z.B. der Benkelmann-Balken, das Falling Weight Deflectometer (FWD), das Curviametro und das Transport Speed Deflectometer (TSD).

Obwohl sich die Technik der Messverfahren unterscheidet, basieren sie letztlich auf dem gleichen Prinzip: Eine vordefinierte Belastung wird auf der Fahrbahn aufgebracht und die daraus resultierende Fahrbahnverformung wird gemessen. Mit Hilfe der Elastizitätstheorie werden aus der gemessenen Verformung die E-Module der Schichten und der Schichtenverbund der Asphaltsschichten ausgewertet. Damit werden die Tragfähigkeit der Straße und ihre Restnutzungsdauer zerstörungsfrei bewertet.

Derzeit wird das FWD weltweit zur Untersuchung struktureller Substanz der Straße eingesetzt. Der Vorteil des FWD gegenüber den anderen Geräten ist, dass es die gesamte Einsenkungsmulde der Fahrbahn abbilden kann, wodurch die strukturelle Substanz der Straße genauer bewertet werden kann.

Seit Anfang der 1990er Jahre wird die FWD-Untersuchung in Deutschland intensiv erforscht. Als Ergebnis der langjährigen Forschung wurden 1995 an der Uni Karlsruhe das JENDIA-Verfahren und 2009 an der Technischen Universität Darmstadt das GRÄTZ-Verfahren auf Basis des gebetteten Plattenmodells entwickelt, mit denen die strukturelle Substanz von Asphaltsschichten und deren Tragfähigkeit mittels FWD-Messungen zerstörungsfrei bewertet werden kann [FGSV 2014, Teil C 2.1].

Im Rahmen des Innovationsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast) wollte das Institut für Verkehrswegebau der TU Darmstadt im Jahr 2010 das GRÄTZ-Verfahren weiterentwickeln, um die Nutzungsdauer der Straße durch das FWD zerstörungsfrei zu ermitteln. Dazu hat das Institut im Rahmen des Forschungsprojekts FE-Nr. 88.0100/2009 die Einsenkungen von verschiedenen Autobahnen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern gemessen und damit die strukturelle Substanz von Asphaltsschichten mit dem GRÄTZ-Verfahren bewertet. Mithilfe von Bohrkernuntersuchungen soll die zerstörungsfreie Ermittlung der Restnutzungsdauer der Straße mit dem FWD erarbeitet werden. Dieses gesetzte Ziel konnte aber nicht erreicht werden, da die zerstörungsfreie Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltsschichten durch das GRÄTZ-Verfahren teilweise zu nicht plausiblen Ergebnissen geführt hat.

Als Beispiel zeigt Bild 1-1 die im Rahmen des Forschungsprojekts FE-Nr. 88.0100/2009 durch das GRÄTZ-Verfahren bewerteten Steifigkeitsmodule des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ einer 3-jährigen und 8-jährigen Autobahnstrecke [BALD u.a., 2011]. Aus dem Bild ist ersichtlich, dass $|E|_{\text{Asphalt}}$ der 8-jährigen Strecke deutlich kleiner als $|E|_{\text{Asphalt}}$ der 3-jährigen Strecke sind. Dementsprechend ließen sich die Asphalt-schichten der 8-jährigen Strecke als ermüdet bewerten. Um diese zerstörungsfreie Bewertung der strukturellen Substanz der Asphalt-schichten der 8-jährigen Strecke zu verifizieren, entnahm das Institut an zwei verschiedene Stellen Bohrkerne, deren $|E|_{\text{Asphalt}}$ durch das GRÄTZ-Verfahren ca. 8.000 N/mm^2 bewertet wurde. Die Bohrkerne zeigten jedoch weder Ermüdungsrisse noch Probleme mit dem Schichtenverbund. Darüber hinaus wurde $|E|_{\text{Asphalt}}$ der Tragschicht dieser Strecke anhand eines Spalt-zugschwellversuchs [FGSV AL-SP-Asphalt 09, 2009] auf 14.000 N/mm^2 bestimmt, fast doppelt so viel wie die zerstörungsfreie Bewertung vom FWD durch das GRÄTZ-Verfahren. Auch für die 3-jährige Strecke wurden Bohrkerne entnommen, um die zerstörungsfreie Bewertung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ nach dem GRÄTZ-Verfahren zu verifizieren. Dabei stimmen jedoch die FWD- und Laboruntersuchung mitein-ander überein.

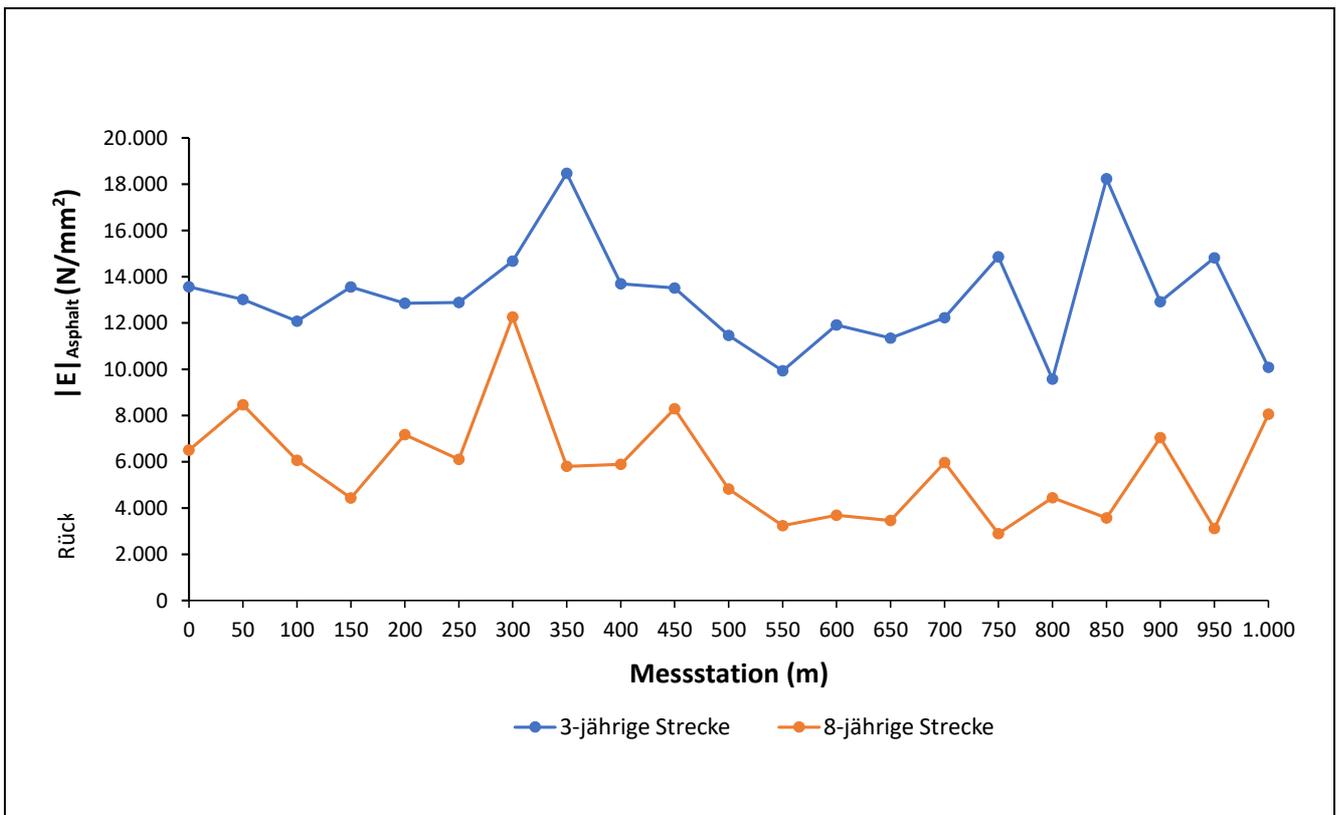


Bild 1-1 Die im Rahmen des Forschungsprojekt FE-Nr. 88.0100/2009 [BALD u.a., 2011] durch das GRÄTZ-Verfahren bewerteten Steifigkeitsmodule des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ einer 3-jährigen und 8-jährigen Autobahnstrecke

Aufgrund der oben beschriebenen unplausiblen Bewertung der strukturellen Substanz der Asphalt-schichten bei der 8-jährigen Strecke sowie der unterschiedlichen Bewertung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ auf verschiedenen Strecken des Verfahrens stellte das Institut fest, dass das GRÄTZ-Verfahren noch Schwächen aufweist und weiterentwickelt werden muss, um die strukturelle Substanz von Asphalt-schichten durch FWD-Messungen zerstörungsfrei bewerten zu können. Erst dann kann die zerstörungs-freie Ermittlung der Tragfähigkeit sowie der Restnutzungsdauer der Straße mit dem FWD in Betracht gezogen werden.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist es, das GRÄTZ-Verfahren weiterzuentwickeln, um das Steifigkeitsmodul des As-phalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ durch FWD-Messungen genau zu bewerten und daraus die Tragfähigkeit und Restnut-zungsdauer der Straße in Bezug auf die Rissbildung durch die Ermüdung von Asphalt-schichten zerstörungsfrei zu ermitteln.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird zunächst die Entwicklung des Verfahrens von GRÄTZ [2009] analysiert. Die daraus ersichtlichen Punkte des Verfahrens, welche dessen Schwächen aufzeigen können, werden anhand der Untersuchungen des Tragverhaltens von Asphaltstraßen aufgeklärt. Darauf bauend werden Schwächen des GRÄTZ-Verfahrens identifiziert sowie das Verfahren weiterentwickelt.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit wird in folgende Kapitel gegliedert, welche in Bild 1-2 dargestellt sind.

Das Kapitel 2 beschreibt den Stand des Wissens. Hier werden der Wissenstand zum Tragverhalten der Asphaltstraße und die darauf aufbauende FWD-Untersuchung beschrieben.

Das Kapitel 3 enthält die Überprüfung des GRÄTZ-Verfahrens, in der die noch bestehenden Schwächen des Verfahrens aufgezeigt werden. Daraus ergibt sich der Forschungsbedarf.

Das Kapitel 4 stellt den ersten Schritt der Untersuchung der Arbeit dar, in dem das Tragverhalten des Gesamttragwerks, der Asphaltstraße, untersucht wird. Damit wird geklärt, ob die Verformung der Straße zur zerstörungsfreien Bewertung struktureller Substanz von Asphalt-schichten geeignet ist.

Das Kapitel 5 stellt den zweiten Schritt der Untersuchung der Arbeit dar, in dem das Tragverhalten der Asphalt­schicht tiefgreifend untersucht wird. Damit wird geklärt, ob die Entwicklung der FWD-Untersuchung mit dem gebetteten Plattenmodell von GRÄTZ [2009] richtig ist.

Die Kapitel 6 und 7 stellen die letzten Schritte der Untersuchungen der Arbeit dar, in denen das Tragverhalten der Asphalt­schichten in Abhängigkeit von ihrem Schichtenverbund untersucht wird, um zu klären, ob das von GRÄTZ [2009] etablierte Prüfverfahren mit dem FWD praxisgerecht ist. Hierbei werden Schwächen des GRÄTZ-Verfahrens deutlich.

Im Kapitel 8 wird, basierend auf der Analyse der Schwächen des GRÄTZ-Verfahrens und den neuen Kenntnissen aus den FEM-Untersuchungen zum Tragverhalten der Asphaltstraße, die „Darmstädter Methode“ zur Interpretation der FWD-Messungen neu entwickelt.

Das abschließende Kapitel 9 enthält die Zusammenfassung der Arbeit und den Ausblick auf die Darmstädter Methode.

Die o.g. Kapitel werden durch folgende Anhänge ergänzt.

- Anhang 1: Charakterisierung von Asphaltmaterial (Zusammensetzung, Herstellung und mechanische Eigenschaften)

- Anhang 2: Detaillierte Beschreibung der rechnerischen Modelle zur Tragverhaltensanalyse von Straßenverkehrsflächen (aus Kapitel 3)

- Anhang 3: Eigene Auswertung der viskoelastischen Eigenschaften des Asphalts aus den Laboruntersuchungen zur Modellierung des Tragverhaltens der Straße in Kapitel 5.

- Anhang 4: Zusammenstellung der Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen der Forschungsprojekten FE04.199/2004/ARB [RESSEL und WELLNER u.a., 2008] und FE 88.0100/2009 [BALD u.a., 2011]

- Anhang 5: Ergebnisse der FEM-Untersuchungen des Kapitels 5

Kapitel 2	<p style="text-align: center;">Stand des Wissens</p> <ul style="list-style-type: none"> • Allgemeines zur Asphaltbauweise • Tragverhalten von Asphaltstraßen <ul style="list-style-type: none"> ○ Darstellung und Modellierung des Tragverhaltens von Asphaltstraßen ○ Schädigungsmechanismen von Asphaltsschichten und die Ermittlung ihrer Nutzungsdauer • Zerstörungsfreie Untersuchung struktureller Substanz von Asphaltstraßen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) <ul style="list-style-type: none"> ○ Allgemeines zur FWD-Untersuchung ○ Interpretation der FWD-Messungen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mehrschichtige Auswerteverfahren ▪ Zweischichtige Auswerteverfahren (das GRÄTZ-Verfahren)
Kapitel 3	<p style="text-align: center;">Analyse des GRÄTZ-Verfahrens und Forschungsbedarf</p>
Kapitel 4	<p style="text-align: center;">Vertiefte Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen mit dünner Asphaltsschicht</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tragverhalten des Bodens • Tragverhalten der Asphaltsschicht • Einfluss der Asphaltsschicht und des Bodens auf die Einsenkungen der Straße
Kapitel 5	<p style="text-align: center;">Vertiefte Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen mit dicken Asphaltsschichten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unterschiedliche h_{Asphalt}, $E _{\text{Asphalt}}$, viskoelastische Eigenschaft des Asphalts • statische und dynamische Last
Kapitel 6	<p style="text-align: center;">Vertiefte Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen mit und ohne Schichtenverbund zwischen Asphaltsschichten</p>
Kapitel 7	<p style="text-align: center;">Vertiefte Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen mit unvollständigem Schichtenverbund zwischen Asphaltsschichten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definition des unvollständigen Schichtenverbunds zwischen Asphaltsschichten • Tragverhalten der Asphaltsschichten beim unvollständigen Schichtenverbund
Kapitel 8	<p style="text-align: center;">Entwicklung der Darmstädter Methode zur Interpretation der FWD-Messungen</p>
Kapitel 9	<p style="text-align: center;">Zusammenfassung und Ausblick</p>

Bild 1-2 Gliederung der Arbeit

2 Stand des Wissens

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden zunächst die wesentlichen Punkte der Asphaltbauweise zusammengefasst, um einen Überblick über den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit, die Asphaltstraße, zu vermitteln. Anschließend werden der Stand des Wissens zum Tragverhalten der Asphaltstraße und die darauf aufbauende zerstörungsfreie Bewertung der strukturellen Substanz und Tragfähigkeit von Asphaltstraßen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) ausführlich beschrieben.

2.2 Allgemeines zur Asphaltbauweise

Der auf dem Untergrund/Unterbau aufliegende Oberbau einer Asphaltstraße besteht in der Regel aus mehreren Schichten, einer Asphaltbefestigung mit mehreren einzelnen Asphaltsschichten und ungebundenen Schichten. Die Asphaltbefestigung spielt aufgrund ihrer hohen Steifigkeit die wichtigste Rolle für die Tragfähigkeit der Straße. Die ungebundenen Schichten verbessern die Tragfähigkeit des anstehenden Bodens und verhindern, dass der Straßenaufbau durch Frost und stauendes Wasser beschädigt wird. Bild 2-1 zeigt den Regelquerschnitt nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen 12 (RStO) [FGSV, 2012] und den Aufbau einer Autobahn.

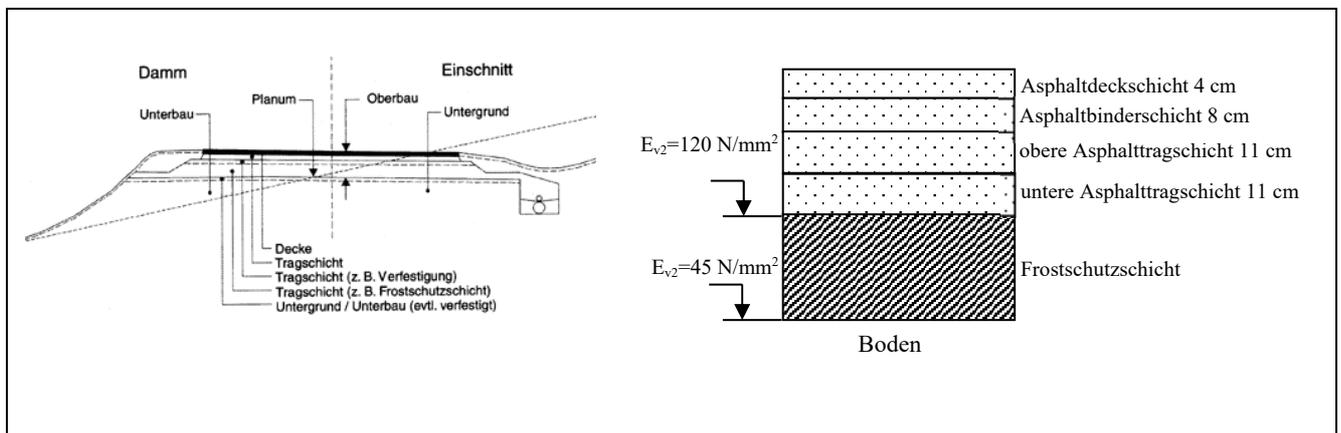


Bild 2-1 Regelquerschnitt einer Asphaltstraße und Aufbau einer Asphaltbefestigung von Autobahnen [FGSV, 2012]

In der Asphaltbefestigung weist die Tragschicht, die aus einem kornabgestuften Mischgut mit Größtkorn bis 32 mm besteht, die größte Steifigkeit auf. Wegen der begrenzten Verdichtungsmöglichkeit wird eine solche dicke Asphalttragschicht von Autobahnen in der Regel zweilagig eingebaut.

Auf die Tragschicht wird bei einer hochbelasteten Straße eine Asphaltbinderschicht mit Größtkorn bis 22 mm eingebaut. Diese Schicht stellt den Übergang zwischen der grobkörnigen und noch nicht ausreichend ebenen Tragschicht und der feinkörnigen Deckschicht mit hohen Ebenheitsanforderungen dar. Deshalb wird die Binderschicht in der Literatur noch als „Ausgleichsschicht“ bezeichnet. In der Binderschicht treten meistens sehr hohe Schubspannungen aus der Verkehrsbelastung auf.

Die Oberfläche der Fahrbahn wird durch eine feinkörnige Asphaltdeckschicht gebildet. Die Asphaltdeckschicht mit Größtkorn bis 11 mm wird für alle Asphaltbefestigungen mit einer Stärke von 3 bis 4 cm verwendet. Da sie einen wesentlichen Einfluss auf die Verkehrssicherheit hat, muss die Asphaltdeckschicht daher höchsten Qualitätsanforderungen in Bezug auf Ebenheit, Griffigkeit und Standfestigkeit genügen.

Eine Fernstraße wie eine Autobahn oder Bundesstraße muss generell Mischverkehr aufnehmen (verschiedene Fahrzeugarten mit unterschiedlichen Beladungen bzw. Eigengewichten). Aus verschiedenen Gründen tragen jedoch die großen Achslasten überproportional zur Schädigung bei. Daher werden die Asphaltdecken mit einer äquivalenten Lkw-Achslast ausgelegt, die länderspezifisch festgelegt wird; z.B. in Deutschland mit 10-t-Achslast, in Frankreich mit 8-t-Achslast und in Spanien mit 12-t-Achslast [COST 336, 2005].

Bild 2-2 und Bild 2-3 zeigen den Einbau der Asphaltdecken in der Praxis und die von ZANDER [2007] mittels der Sensoren ermittelte Aufstandsfläche und die darauf verteilten Druckspannungen eines Lkw-Rads.

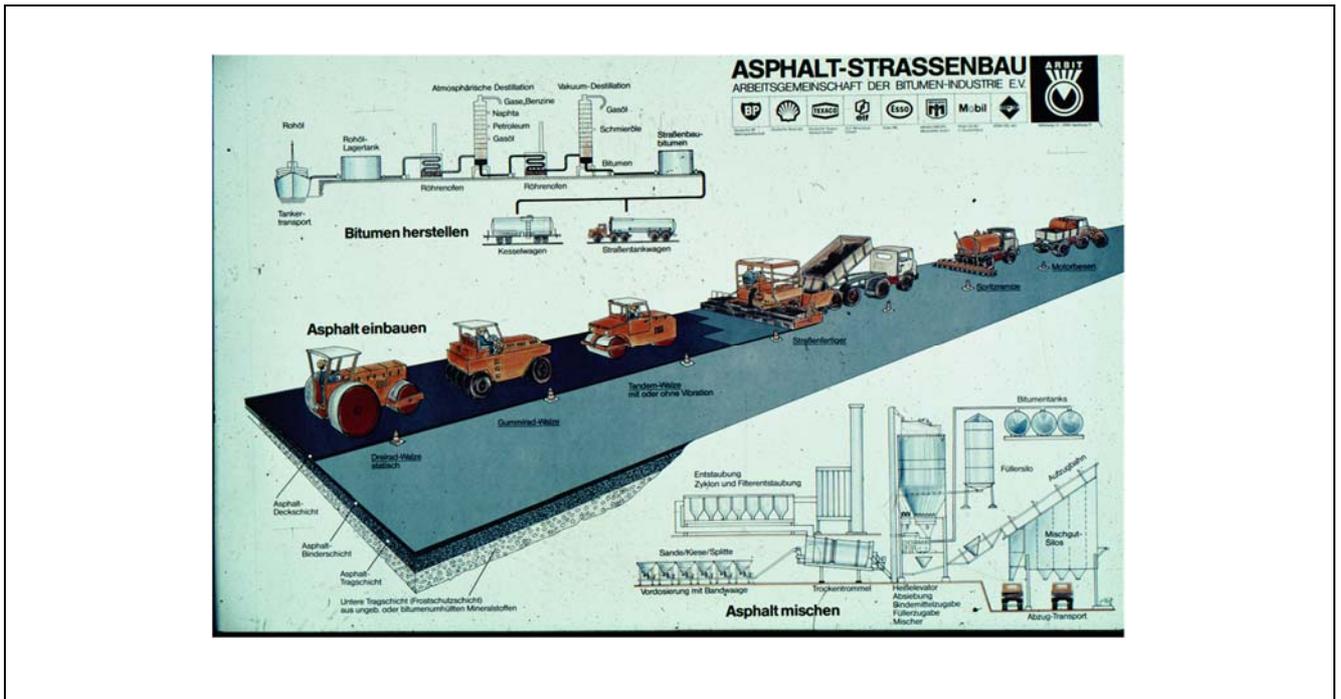


Bild 2-2 Herstellung des Asphaltmaterials und Einbau einer mehrschichtigen Asphaltbefestigung [Poster der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie]

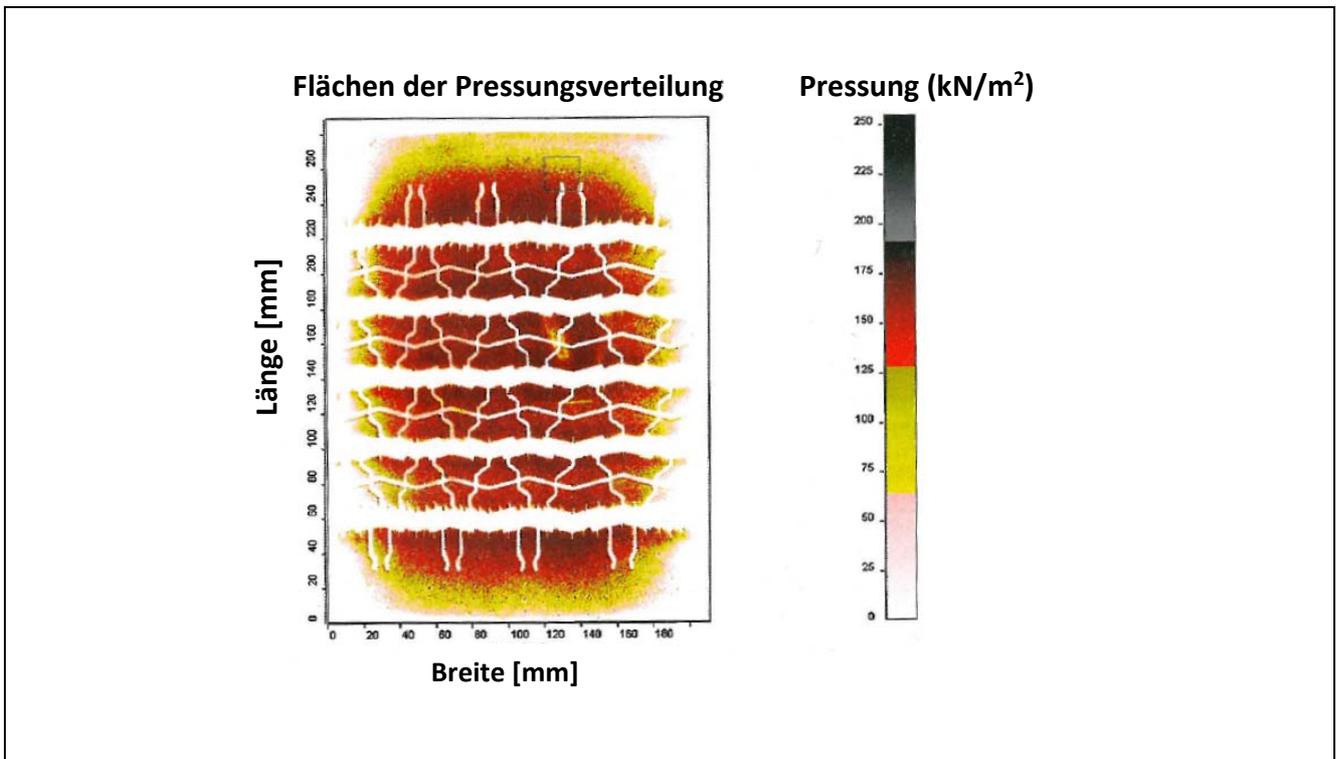


Bild 2-3 Die Radaufstandsfläche und die Druckverteilung der Radlast des Lkw mit Achslast von 3.75 t [ZANDER, 2007]

2.3 Tragverhalten von Asphaltstraßen

2.3.1 Allgemeines zum Tragverhalten

Wie Bild 2-4 zeigt, biegen sich die auf dem nachgiebigen Untergrund liegenden Asphalt-schichten unter der Last durch. Entsprechend ihrer Biegung wird die Last breiter verteilt. Dadurch werden die in den Boden eingeleiteten Druckspannungen reduziert. Unter diesen Druckspannungen wird der Boden zusammengedrückt.

Bei Asphaltstraßen besteht die Schwierigkeit, dass die verschiedenen Schichten der Asphaltbefestigung unter Verkehr gleichmäßig und monolithisch zusammenwirken müssen, was normalerweise durch die beim Einbau angesprühte Bitumenemulsion gewährleistet wird (siehe Bild 2-2 in Abschnitt 2.2). Ist der Verbund zwischen den Asphalt-schichten nicht gegeben, verringert sich ihre Lastverteilung und damit die Tragfähigkeit der Straße. Bild 2-5 zeigt, wie abhängig die Nutzungsdauer der Straße vom Schichtenverbund der Asphalt-schichten ist.

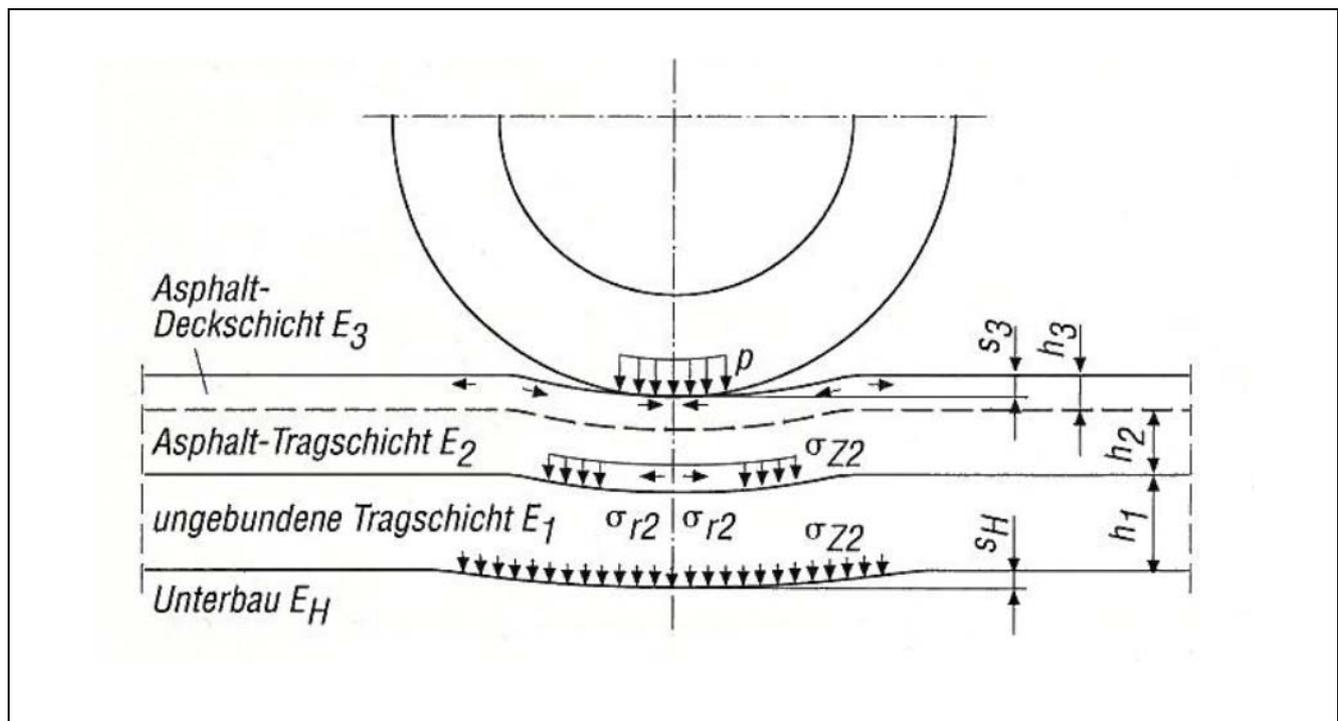


Bild 2-4 Darstellung des Tragverhaltens der Straße mit einer mehrschichtigen Asphaltbefestigung [WIEHLER und WELLNER, 1996]

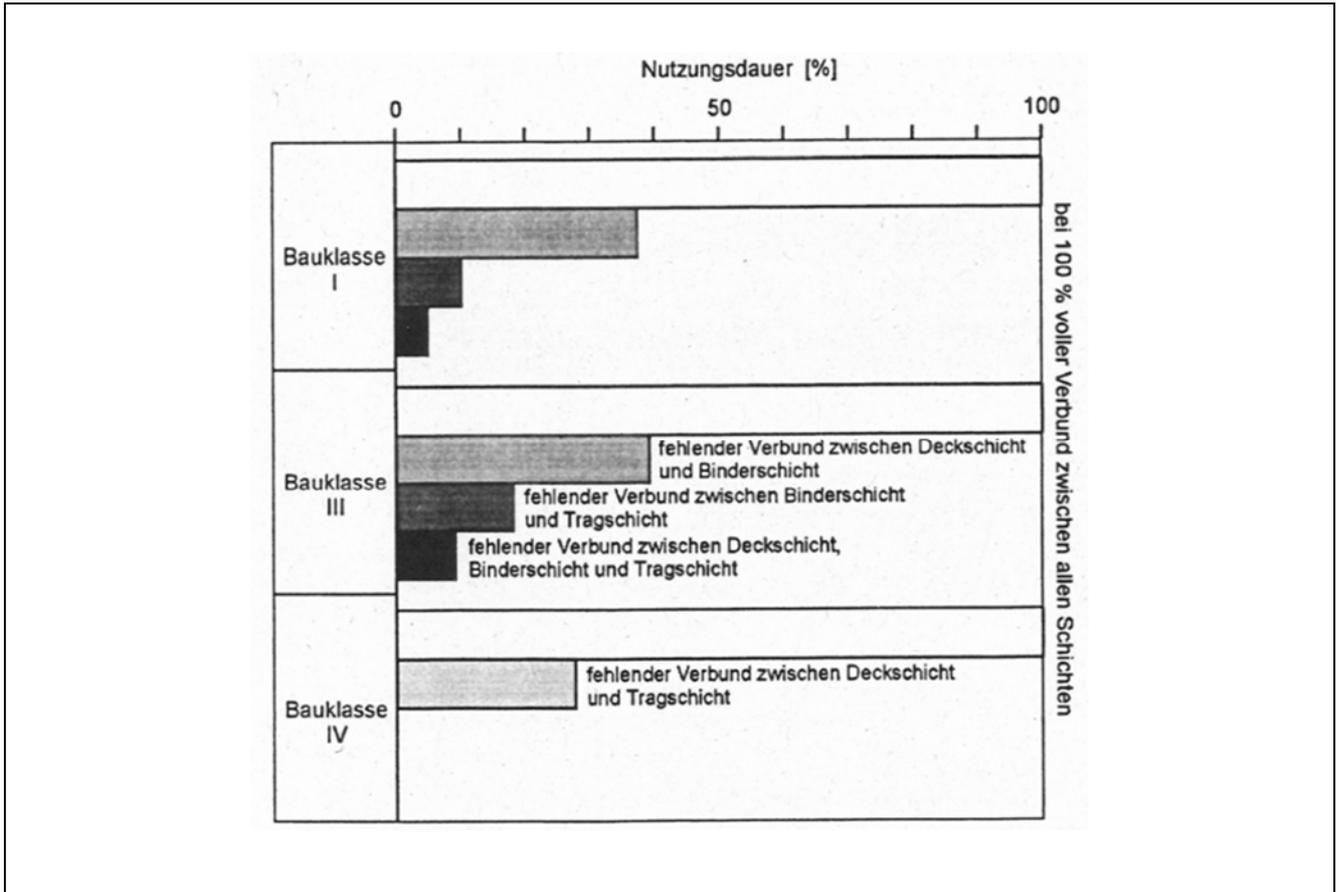


Bild 2-5 Die in der Praxis gewonnenen Erfahrungen zur Tragfähigkeit der Straße in Abhängigkeit vom Schichtenverbund der Asphalt-schichten [FGSV, 1990]

2.3.2 Modellierung des Tragverhaltens der Straße

Um das Tragverhalten der Straße zu modellieren und damit ihre Tragfähigkeit quantitativ sowie qualitativ zu beschreiben, wurden verschiedene Methoden entwickelt. Im Folgenden werden die derzeit verwendeten Ansätze sowohl für die Bemessung der Straße als auch für die zerstörungsfreie Bewertung struktureller Substanz der Straße und ihrer Tragfähigkeit auf der Grundlage gemessener Straßenverformungen beschrieben.

Das Tragverhalten eines beliebigen Festkörpers lässt sich durch ein Differentialgleichungssystem aus 15 Gleichungen der Kontinuumsmechanik beschreiben, das bisher nicht in geschlossener Form lösbar ist. Die verschiedenen Lösungsansätze beruhen auf Vereinfachungen. Je nach Fragestellungen müssen die Ansätze gewählt werden, deren Annahme zur Fragestellung passt. Um hier eine geeignete Auswahl zu treffen, ist es erforderlich, das grundlegende Differentialgleichungssystem zu kennen und zu verstehen. Daher wird darauf in den nächsten Unterkapitel eingegangen.

2.3.2.1 Allgemeine Bestimmungsgleichungen

An einem Würfелеlement der Straße wird dargestellt, welche Spannungen durch die Belastung auftreten. Aus den Verschiebungen u , v , w in x -, y - und z -Richtung lassen sich die entsprechenden Dehnungen ϵ und Gleitungen γ ableiten wie in Bild 2-6 dargestellt.

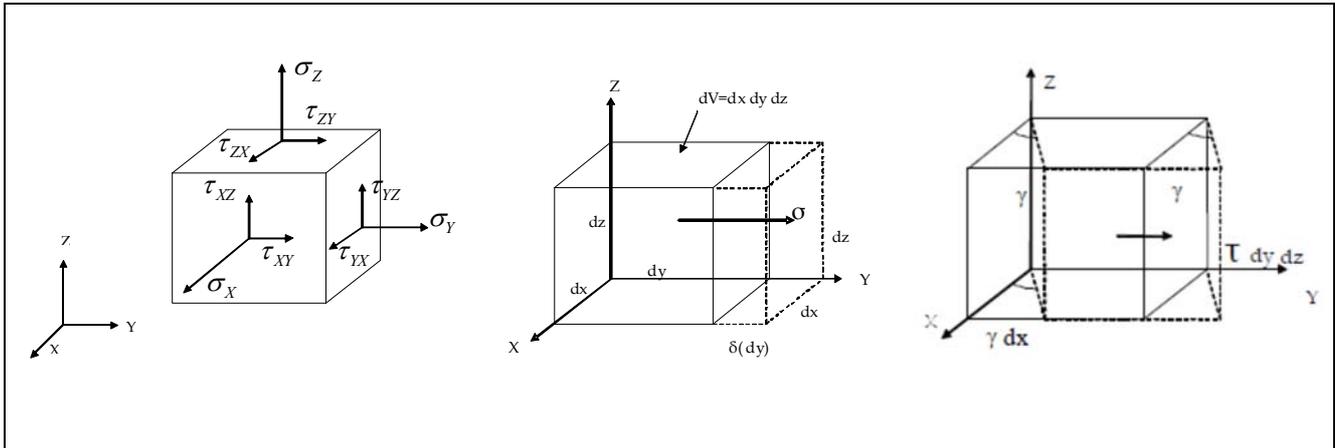


Bild 2-6 Der Spannungszustand eines herausgeschnittenen Würfелеlements im kartesischen Koordinatensystem (links) und die daraus resultierten Dehnungen (Mitte) und Gleitungen (rechts) (Hinweis: Spannungen auf den Rückenseiten bzw. auf den negativen Schnittufern zur besseren Übersicht nicht dargestellt)

Dazu lassen sich die 15 Differentialgleichungen wie folgt angeben [GERLACH, 1968]:

Drei Gleichungen der Dehnungen:

$$\epsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} \quad (2-1)$$

$$\epsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y} \quad (2-2)$$

$$\epsilon_z = \frac{\delta w}{\delta z} \quad (2-3)$$

Drei Gleichungen der Gleitungen:

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \quad (2-4)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta z} \quad (2-5)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \quad (2-6)$$

Drei Gleichungen des Gleichgewichts für ein Würfelement mit den Komponenten der auf die Raumeinheit wirkenden Massenkräfte (Schwere, Trägheitskräfte) X, Y, Z:

$$\frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{yx}}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta z} + X = 0 \quad (2-7)$$

$$\frac{\delta \tau_{xy}}{\delta x} + \frac{\delta \sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{zy}}{\delta z} + Y = 0 \quad (2-8)$$

$$\frac{\delta \tau_{xz}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{yz}}{\delta y} + \frac{\delta \sigma_z}{\delta z} + Z = 0 \quad (2-9)$$

Sechs Gleichungen aus dem Werkstoffverhalten, z.B. für das isotrop-elastische Werkstoffverhalten:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

Zwischen dem Elastizitätsmodul E , der Querdehnzahl μ und dem Schubmodul G besteht folgender Zusammenhang:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2-11)$$

Durch den Einsatz der Elastizitätstheorie in die Gleichgewichtsbedingungen erhält man unter der Einführung des Laplace Operators Δ :

$$\Delta \equiv \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \quad (2-12)$$

und der Volumendilatation e :

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} \quad (2-13)$$

Damit ergeben sich die Differentialgleichungen der Verschiebungen im kartesischen Koordinatensystem wie folgt:

$$\Delta u + \left(\frac{1}{1 - 2\mu} \right) \cdot \frac{\delta e}{\delta x} + \frac{X}{G} = 0 \quad (2-14)$$

$$\Delta v + \left(\frac{1}{1 - 2\mu} \right) \cdot \frac{\delta e}{\delta y} + \frac{Y}{G} = 0 \quad (2-15)$$

$$\Delta w + \left(\frac{1}{1 - 2\mu} \right) \cdot \frac{\delta e}{\delta z} + \frac{Z}{G} = 0 \quad (2-16)$$

Für die Untersuchung der Verformung von Straßenbefestigungen ist dabei insbesondere die Auswertung der Gleichung (2-16) von Interesse.

Bei rotationsymmetrischen Fragestellungen können in zylindrischen Koordinaten in Bild 2-7 die weiteren Vereinfachungen erreicht werden.

Dann lauten die Verschiebungen ε_r , ε_φ , ε_z und Verzerrungen γ eines Raumelements [LÜCKE, 1966]:

$$\varepsilon_r = \frac{\delta u}{\delta r} \quad (2-17)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} \quad (2-18)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\delta w}{\delta z} \quad (2-19)$$

$$\gamma = \gamma_{rz} = \frac{\delta w}{\delta r} + \frac{\delta u}{\delta z} \quad (2-20)$$

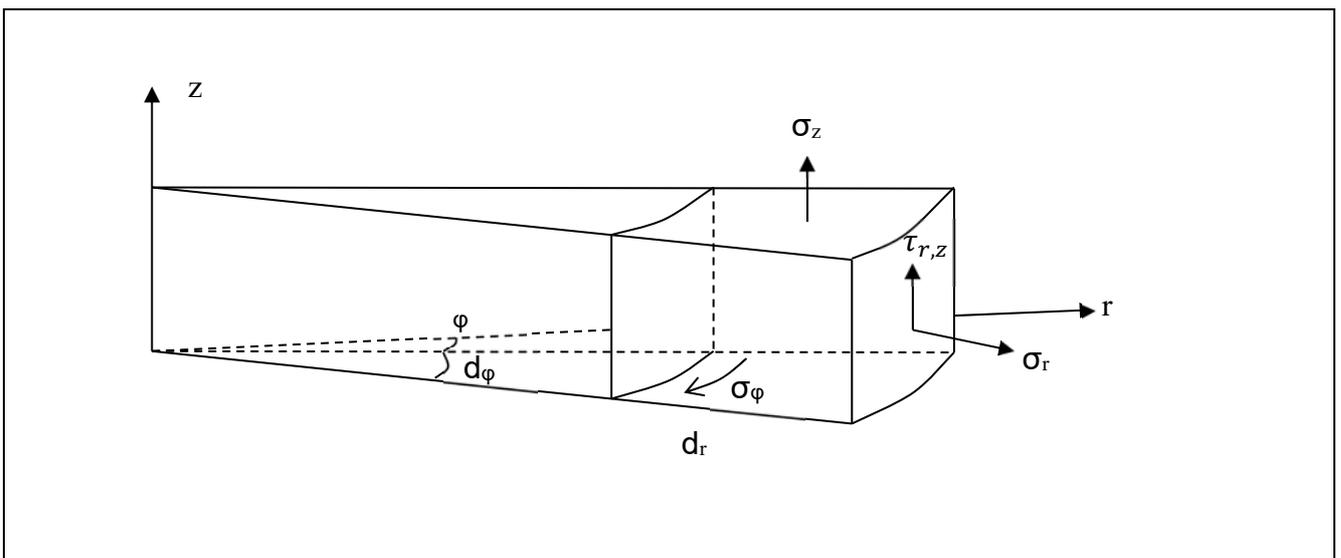


Bild 2-7 Axialsymmetrische belastete Raumelement in zylindrischen Koordinaten

Die Gleichgewichtsbedingungen an einem Raumelement lauten:

$$\left(\frac{\delta \sigma_r}{\delta r} + \frac{\delta \tau_{rz}}{\delta z} \right) \cdot r + \sigma_r - \sigma_\varphi = 0 \quad (2-21)$$

$$\left(\frac{\delta\tau_{rz}}{\delta r} + \frac{\delta\sigma_z}{\delta z}\right) \cdot r + \tau_{rz} = 0 \quad (2-22)$$

Die partiellen Differentialgleichungen von (2-14) bis (2-16) sowie (2-21) und (2-22) sind der Ausgangspunkt für die Modellierung des Tragverhaltens der Straße.

Wie oben bereits geschrieben, ist eine geschlossene Lösung für die Integration dieser partiellen Differentialgleichungen jedoch nicht möglich. Daher wurden verschiedene Ansätze entwickelt, um die partiellen Differentialgleichungen zu approximieren.

2.3.2.2 Modelle für den Boden (Erdstraße)

Den wesentlichen Anteil am Tragverhalten von Asphaltstraßen hat der durch anstehenden Boden gebildete Untergrund / Unterbau. Daher ist es sinnvoll, zunächst einmal zusammenzustellen, wie das Tragverhalten dieser Unterlage, also der Erdschichten, beschrieben werden kann. Modelle dazu wurden bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelt.

2.3.2.2.1 Bettungsmodell vom Winkler

Die einfachste Methode, das Tragverhalten von Boden zu beschreiben, ist ihn als eine Menge nebeneinander stehender senkrechter Federn (mit linear elastischem Werkstoffverhalten) zu betrachten. Dieser Ansatz wurde zuerst von WINKLER zur Modellierung des Tragverhalten von Eisenbahnstrecken gewählt [KURRER, 2016].

Beim WINKLER'schen Ansatz sind die Federn nicht miteinander gekoppelt. Daher kann er nicht die Lastverteilung im Boden berücksichtigen, die sich durch den Zusammenhalt nebeneinander liegender Bodenabschnitte ergibt. Er ist allerdings anwendbar, wenn im Gesamtsystem ein lastverteilendes Element (wie z.B. die Eisenbahnschiene bei Winkler) für eine gleichmäßige Einsenkung sorgt (siehe auch den Abschnitt 4.2.3 in Kapitel 4).

Nach WINKLER ergibt sich der sogenannte Bettungsmodul des Bodens k_s wie folgt:

$$k_s = \frac{\sigma_0}{s} \quad (2-23)$$

mit

σ_0 : Vertikale Normalspannung (MN/m^2)

s : Setzung (m)

k_s : Bettungsmodul des Bodens (MN/m^3)

Der Bettungsmodul k_s kann leicht mit dem E-Modul des Bodenmaterials verwechselt werden, da die Gleichung (2-23) der Gleichung (2-10) in Abschnitt 2.3.2.1 sehr ähnlich ist. Tatsächlich ist er aber nur ein Ersatzmodul, der zwar mit dem E-Modul des Bodens zusammenhängt, in den aber auch noch viele andere Einflussgrößen (wie z.B. die Größe der Lastplatte) eingehen. Der WINKLER'sche Ansatz wird heute noch im Straßenbau zur Auswertung des sogenannten statischen Plattendruckversuchs [DIN 18134] zur Überprüfung der Verdichtung des Erd-/ sowie Schotterplanums verwendet.

2.3.2.2.2 Homogene Halbraummodell von BOUSSINESQ

BOUSSENEQ hat 1868 eine Lösung für die Spannungsverteilung für den unendlich ausgedehnten isotropen Halbraum beschrieben, die den oben angeführten Differenzialgleichungen genügt [GERLACH, 1968].

In der Mathematik bedeutet der Begriff „Halbraum“, dass ein dreidimensionaler Raum durch eine gedachte Hyperebene in zwei unterschiedliche Bereiche geteilt wird. Der obere Teil ist leer, während der untere Teil – der Halbraum – mit Stoffen gefüllt ist.

BOUSSINESQ musste dabei als Annahmen treffen:

- Der Halbraum ist gewichtlos und seitlich unendlich ausgedehnt.
- Das HOOKE'sche Elastizitätsgesetz gilt ohne Beschränkung.
- Der Halbraum ist isotrop und homogen, d.h. sein E-Modul und die Querdehnzahl μ an jedem Punkt im Halbraum bezüglich jeder Richtung sind gleich groß.

Aus der Spannungsverteilung kann die Verformung hergeleitet werden. Daher ist es mit dem Halbraummodell von BOUSSINESQ möglich, die Einsenkung des Bodens an verschiedenen Stellen zu ermitteln.

Bild 2-8 und Bild 2-9 zeigen den anhand der Gleichungen von BOUSSINEQ ermittelten Verformungs- und Spannungszustand des Bodens unter einer Kreislast. Die Entwicklung des Halbraummodells von BOUSSINEQ ist in Anhang 2 (Abschnitt 11.1) ausführlich beschrieben.

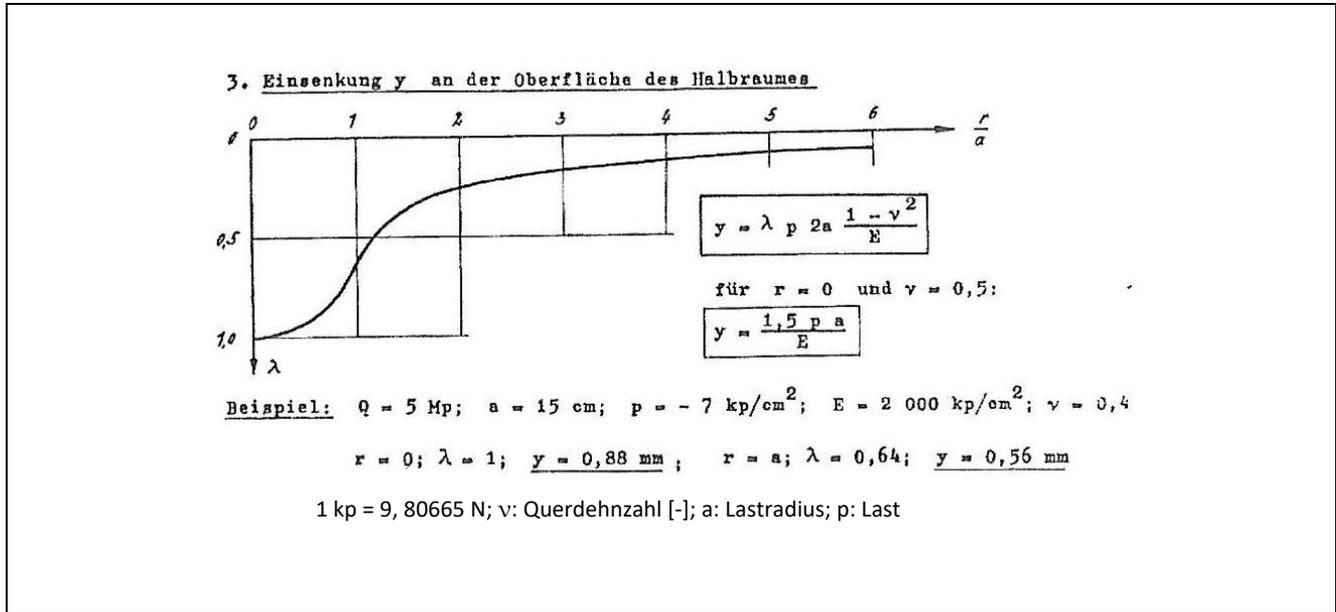


Bild 2-8 Die anhand der Halbraumtheorie von BOUSSINEQ ermittelte Verformung des Bodens [MEIER u.a., 1968]

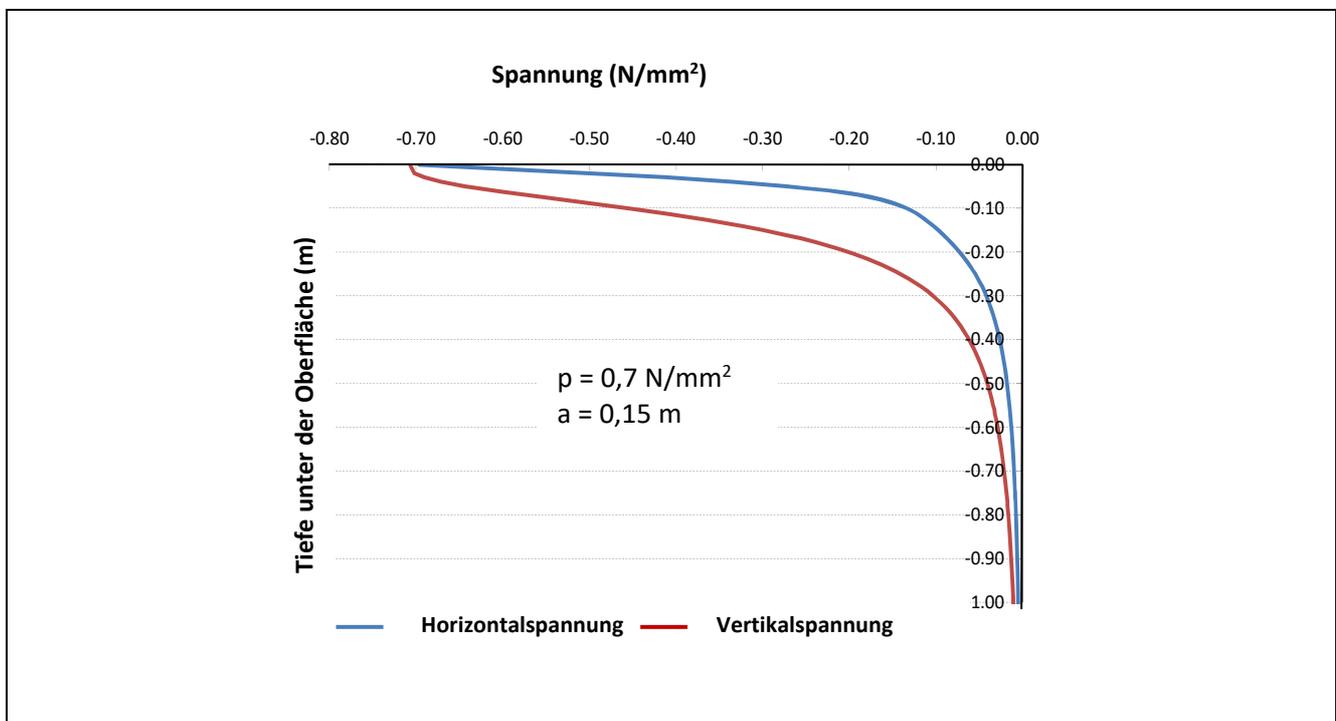


Bild 2-9 Die anhand der Halbraumtheorie von BOUSSINEQ ermittelten Horizontal- und Vertikalspannungen unter dem Lastmittelpunkt einer Kreislast $p(a)$ des Halbraummodells in Bild 2-8

2.3.2.3 Modelle für Asphaltstraßen

Der Unterschied im Tragverhalten von Straßen (wie von den meisten Verkehrswegen) zu reinem Boden oder Erdstraßen ist, dass nun ein Oberbau mit einer erkennbaren Schichtsteifigkeit (bei Asphaltstraßen bestehend aus Asphaltsschichten) die Last verteilt. Das Tragsystem ist also nicht mehr homogen, sondern mehrschichtig.

2.3.2.3.1 Das gebettete Plattenmodell

Bei den ersten Versuchen (in der Mitte des 20. Jhdts.), das Tragverhalten von Straßen rechnerisch zu modellieren, wurde die schon im 19. Jahrhundert entwickelte Plattentheorie auch auf den Straßenoberbau übertragen. Dabei werden die Asphaltsschichten als eine homogene Platte behandelt, die auf einem elastischen homogenen Halbraum gelagert ist. Für die Modellierung des Halbraums wurde zunächst das WINKLER'sche Modell, später das rechnerisch anspruchsvollere BOUSSENESQ'sche Modell verwendet.

Das elastisch gebettete Plattenmodell ist nur für ein Zweischichtsystem anwendbar und kann daher den Schichtenverbund der Asphaltsschichten nicht berücksichtigen. Gemäß den Randbedingungen der Plattentheorie wird Folgendes angenommen:

- Die Verkehrslast wirkt senkrecht zu der Mittelebene des Asphaltbelags ein.
- Der Querschnitt des Asphaltbelags ist unter der Radlast nicht verformt.
- Das HOOKE'sche Elastizitätsgesetz gilt ohne Beschränkung.
- Die Reibung zwischen dem Asphaltbelag und dem unten liegenden elastischen Halbraum ist vernachlässigt.

Die allgemeinen Bestimmungen der Einsenkung w einer gebetteten Platte in kartesischen Koordinaten unter einer kreisförmigen Pressung $p(r)$ lauten wie folgt [GERLACH, 1968]:

$$\frac{\delta^4 w}{\delta x^4} + 2 \frac{\delta^4 w}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta^4 w}{\delta y^4} - \frac{p(r)}{D} = 0 \quad (2-24)$$

mit:

D : Biegesteifigkeit der Platte

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (2-25)$$

Ersetzt durch Laplace Operator:

$$\Delta \equiv \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} \quad (2-26)$$

dann lauten die Einsenkung w der Straße wie folgt:

$$D \cdot \Delta \Delta w = p(r) - q(r) \quad (2-27)$$

mit:

$p(r)$: kreisförmige Pressung mit Radius r

$q(r)$: Pressung an der Unterseite der Platte

Für den Fall von zwei Platten, die aber nicht miteinander verbunden sind, setzt sich die äquivalente Biegesteifigkeit der Platten D in der Gleichung (2-27) wie folgt zusammen [PANC, 1975]:

$$D = \sum_1^i D_i \quad (2-28)$$

Analog zur partiellen Differentialgleichung (2-16) ist es auch für die Differentialgleichungen (2-27) unmöglich, eine geschlossene Lösung zu finden. Hierzu wurden zwei weitere Näherungsansätze entwickelt.

Der erste Ansatz ist das Modell „Platte auf den Federn“ von WESTERGAARD [1948] in [Bild 2-10].

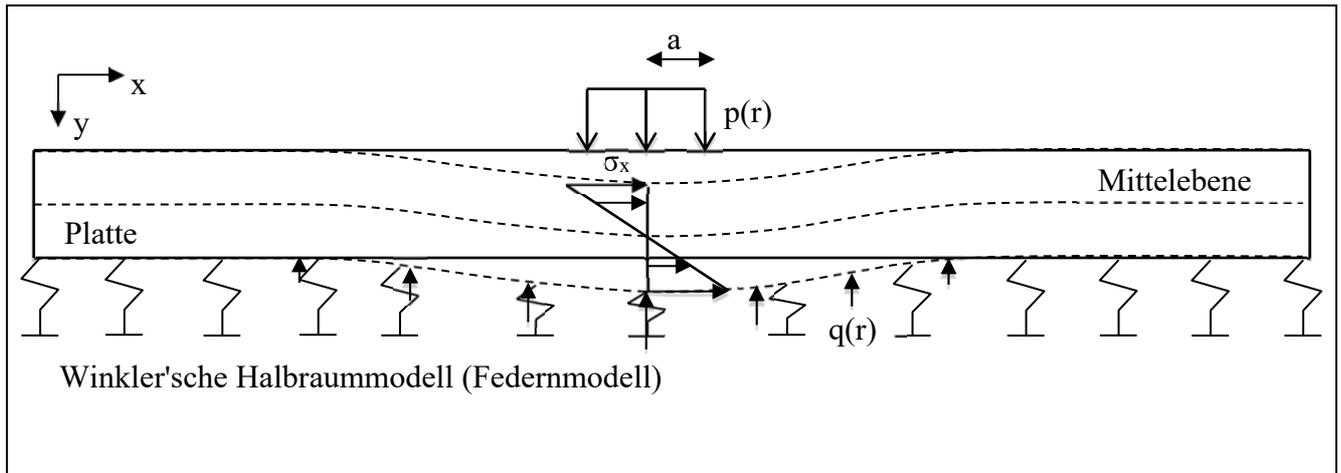


Bild 2-10 Zweischichtiges Straßenmodell "Platte auf den Federn"

Nach WESTERGAARD [1948] lautet die Einsenkung der Straße in der Lastachse w_0 unter einer Kreislast $p(r)$ mit dem Radius a wie folgt:

$$w_0 = \left[\frac{p(r) \cdot a}{8 \cdot k_s \cdot l^2} \right] \cdot \left[1 + \left(\left(0,3665 \cdot \lg \left(\frac{a}{l} \right) - 0,2174 \right) \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right) \right] \quad (2-29)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_{\text{Platte}} \cdot h_{\text{Platte}}^3}{12 \cdot (1 - \mu_{\text{Platte}}^2) \cdot k_s}} \quad (2-30)$$

mit:

l : Radius der relativen Steifigkeit [m]

$p(r)$: Kreisförmige Belastung [N/m^2]

a : Radius der Belastung [m]

k_s : Bettungsmoduln [MN/m^3] (siehe Abschnitt 2.3.2.2)

E_{Platte} : E-Modul der Platte [MN/m^2]

h_{Platte} : Dicke der Platte [m]

μ_{Platte} : Querdehnzahl der Platte [-]

Der im Ansatz von WESTERGAARD [1948] genannte l -Wert ist ein relativer Wert zwischen den Steifigkeiten der Platte und der Feder. Für die Verformung der Straße soll er den Abstand zwischen dem Lastmittelpunkt und dem Wendepunkt der Einsenkungsmulde der Straße angeben, wo die Krümmung der Platte ihre Richtung wechselt (Bild 2-11).

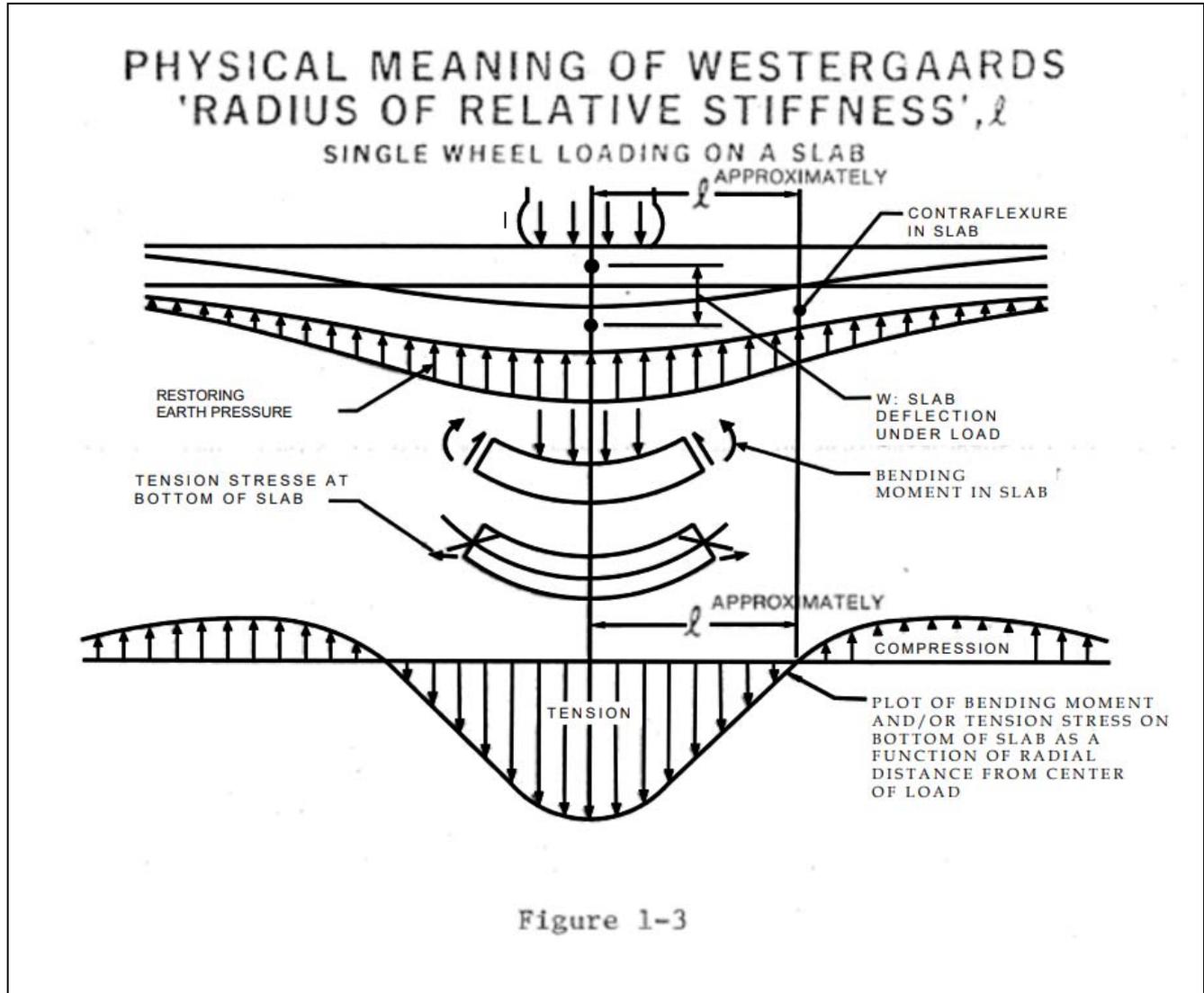


Bild 2-11 Mechanische Bedeutung des WESTERGAARDs Radius (l -Werts) im Modell „Platte auf Federn“ [ICAO, 1983]

E_{Platte} : E-Modul der Platte [MN/m²]

h_{Platte} : Dicke der Platte [m]

μ_{Platte} : Querdehnzahl der Platte [-]

μ_{Halbraum} : Querdehnzahl des Halbraums [-]

J_0 und J_1 : Besselfunktion null und erste Ordnung

GRÄTZ [2009] entwickelte Im Rahmen seiner Habilitation die Exponentialgleichung (2-33) für gängige Geometrie- und Steifigkeitswerte von Asphaltstraßen als Approximation der o.g. Integralgleichung (2-32) von [LI u.a., 1997]. Mit dieser lassen sich die Einsenkungen der Straße außerhalb des Lastangriffsbereichs wie folgt beschreiben:

$$w(r) = \frac{Q}{M_0 \cdot l} \cdot \left[0,392948 \cdot e^{-\left(0,398483 \frac{r}{l}\right)} + 0,0137024 \right] \quad (2-33)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot M_{\text{Asphalt}} \cdot h_{\text{Asphalt}}^3}{M_0}} \quad (2-34)$$

$$M_0 = \frac{E_{\text{Halbraum}}}{(1 - \mu_{\text{Halbraum}}^2)} \quad (2-35)$$

$$M_{\text{Asphalt}} = \frac{E_{\text{Asphalt}}}{(1 - \mu_{\text{Asphalt}}^2)} \quad (2-36)$$

mit:

w : Einsenkung der Straße [m]

r : Abstand vom Lastmittelpunkt [m]; $r > \text{Lastradius}$

Q : Belastung [N]

E_{Halbraum} : E-Modul des Halbraums [N/m²]

M_0 : Schichtmoduli des Halbraums [N/m²]

μ_0 : Querdehnzahl des Halbraums [-]

E_{Asphalt} : E-Modul des Asphalts [N/m^2]

M_{Asphalt} : Schichtmoduli der Asphaltsschichten [MN/m^2]

μ_{Asphalt} : Querdehnzahl der Asphaltsschichten [-]

h_{Asphalt} : Dicke der Asphaltsschichten [m]

l : Elastische Länge [m]

In dem Ansatz von GRÄTZ [2009] wurde der l -Wert anders benannt als bei WESTERGAARD [1948] und LI u.a. [1997]. Aus den Gleichungen (2-32) und (2-34) ist trotzdem ersichtlich, dass die von GRÄTZ genannte „Elastische Länge“ eigentlich dem l -Wert (dem relativen Verhältnis der Steifigkeit der Platte und des Halbraums) in der Lösung von LI u.a. [1997] entspricht.

In der angelsächsischen Literatur zur Bemessung von Asphaltbelägen, die weitgehend auf Überlegungen zum Bau von Militärflughäfen während des Zweiten Weltkriegs zurückgeht, wird streng zwischen „flexible Pavement“ (Asphalt) und „rigid Pavement“ (Beton) unterschieden [vgl. ICAO, 1983]. Das gebettete Plattenmodell darf in diesem Zusammenhang nur auf „starre Beläge“ angewandt werden; die Lösungen von [WESTERGAARD, 1948] und [LI u.a., 1997] wurden zur Bemessung und Interpretation der Verformung von Betonstraßen entwickelt. Diese Unterscheidung galt sicherlich für die Zeit des Zweiten Weltkriegs, als Asphaltbeläge im Allgemeinen nur wenige Zentimeter dick gebaut wurden und daher nur eine geringe Plattentragfähigkeit aufwiesen (die Tragfähigkeit dieser Beläge stammte aus speziell verarbeiteten ungebundenen Schichten). Zu dieser Zeit entwickelten nur Betonbeläge („starre Beläge“) eine ausreichende Tragfähigkeit, um bei der Planung berücksichtigt zu werden. Heute werden sehr viel dickere Asphaltpakete gebaut (in Deutschland für Straßen 14 cm bis 34 cm). Auch wenn diese in der amerikanischen Literatur bis heute noch nicht berücksichtigt werden, entwickeln diese dickeren Asphaltpakete durchaus Plattentragwirkung. ZANDER [2007] hat mit Hilfe von Sensoren das Tragverhalten der Asphaltsschichten bemessen. Aus seinen Ergebnissen lässt sich die Plattentragwirkung von Asphaltsschichten feststellen (vgl. Bild 2-13). Daher ist die Verwendung der Lösung von GRÄTZ [2009] auch für die Interpretation der Verformung von Asphaltstraßen angemessen (dies wird in Abschnitt 2.5.3.2 ausführlich geschrieben).

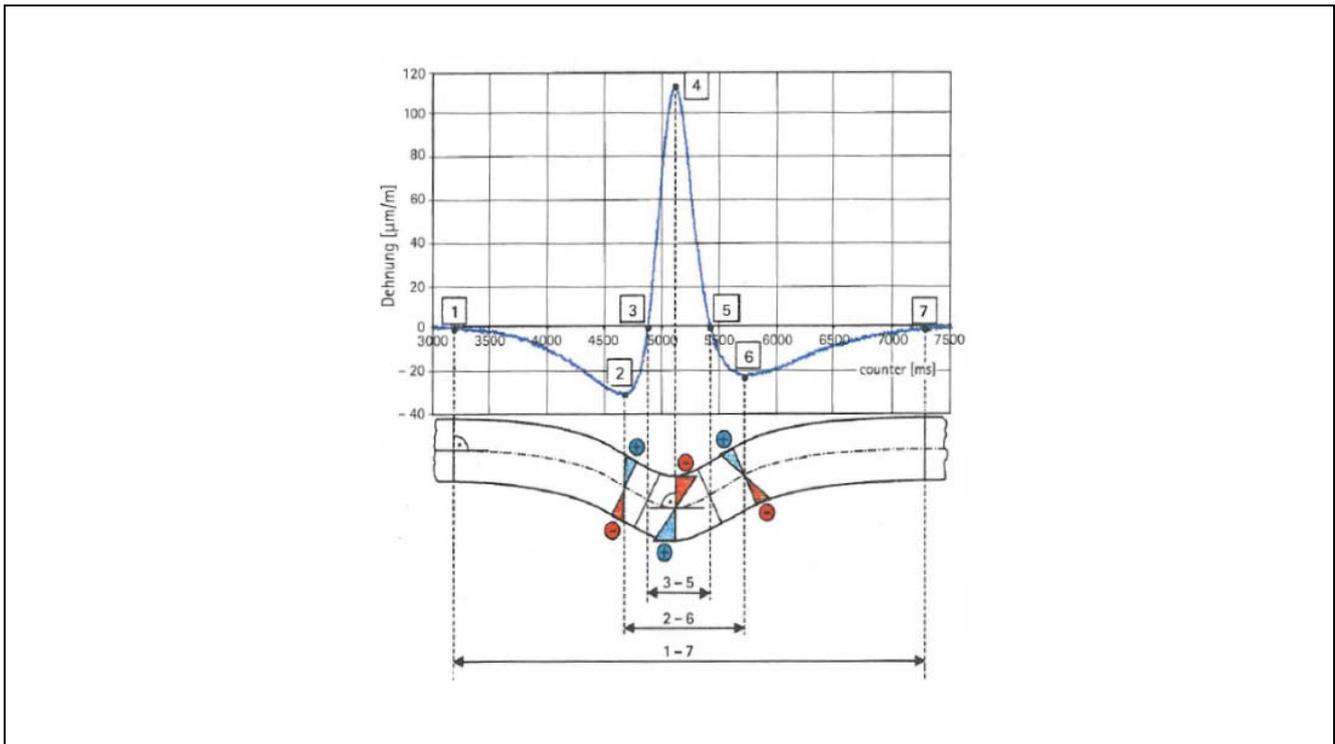


Bild 2-13 Modellierung des Tragverhaltens der Asphalt-schichten unter der Radlast des Lkw mittels der Sensorik von [ZANDER, 2007]

2.3.2.3.2 Das mehrschichtige Halbraummodell (engl. elastic multi-layer theory)

LÜCKE [1966] entwickelte im Rahmen seiner Dissertation auf der Grundlage der Halbraumtheorie von BOUSSINEQ einen Ansatz, der die Analyse des Tragverhaltens einer mehrschichtigen Straße ermöglicht. Dabei handelt sich es um einen inhomogenen Halbraum, der aus verschiedenen Schichten mit unterschiedlichen Steifigkeiten besteht. Im Gegensatz zum Plattenmodell wird bei diesem Ansatz nicht von einem ebenen Querschnitt der Asphalt-schichten unter Last ausgegangen. Die Entwicklung des mehrschichtigen Halbraummodells von LÜCKE ist in Anhang 2 (Abschnitt 11.2) ausführlich beschrieben.

Um das Tragverhalten eines mehrschichtigen Straßenaufbaus zu analysieren, werden dabei zunächst die Spannungen der obersten Halbraumschicht ermittelt. Diese werden dann sukzessive auf die darunter liegenden Halbraumschichten in Abhängigkeit von deren Verbundeigenschaften übertragen. Aus den für die unterste Schicht ermittelten Beanspruchungen ergibt sich deren Verformung und damit auch die Verformungen der ihr aufliegenden Schichten. Daran können die Spannungen der oberen Schichten und ihre Verteilung nach unten angepasst werden. So können Spannungen und Verformungen in den einzelnen Schichten des Straßenaufbaus iterativ ermittelt werden.

GERLACH [1968] untersuchte im Rahmen seiner Dissertation das Tragverhalten einer dreischichtigen Asphaltstraße mit dem Ansatz von LÜCKE [1966] und fasste die Ergebnisse der Untersuchung in Bild 2-14 zusammen. Aus den so berechneten waagerechten Normalspannungen in dem Bild lässt sich erkennen, dass trotz der unterschiedlichen Betrachtung für die Asphalt-schicht auch hier die Plattentragwirkung der Asphalt-schicht erkannt werden kann.

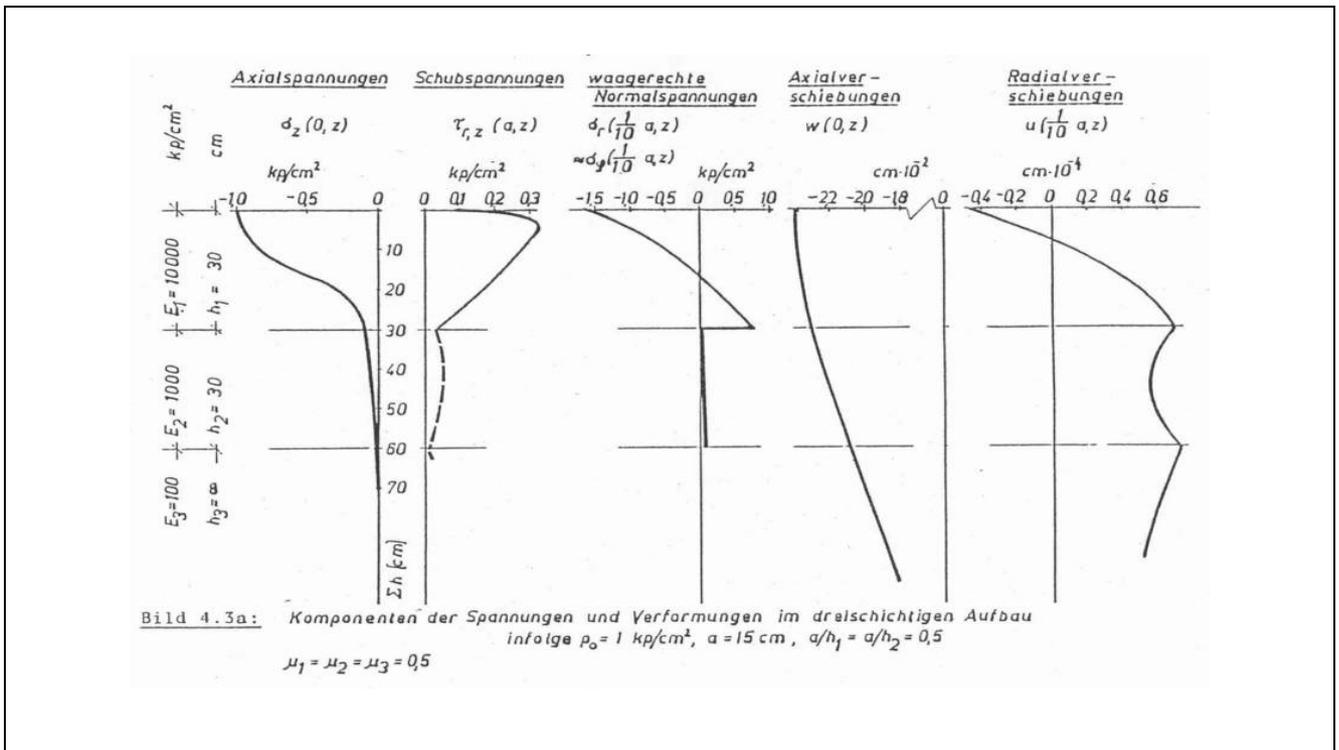


Bild 2-14 Modellierung des Tragverhaltens der dreischichtigen Asphaltstraße (Schicht 1: Asphalt-schicht, Schicht 2: Frostschutzschicht und Schicht 3: Boden) unter einer Topflast anhand des mehrschichtigen Halbraummodells [GERLACH, 1968]

2.3.2.3.3 Finite-Element-Methode (FEM)

FEM ist ein numerischer Ansatz und wurde ebenfalls entwickelt, um die in Abschnitt 2.3.2.1 beschriebenen partiellen Differentialgleichungen der Kontinuumsmechanik annäherungsweise zu lösen. Diese Methode wurde in letzter Zeit auch häufiger verwendet, um das Tragverhalten der Asphaltstraße zu analysieren.

Bei der FEM werden die Differentialgleichungen nicht mit auf der Infinitesimalrechnung beruhenden funktionalen Integration gelöst, sondern numerisch innerhalb endlich großer Teilbereiche, den finiten Elementen. Das Verhalten der einzelnen Elemente wird dann mit Hilfe eines in der Regel sehr großen

numerischen Gleichungssystems zum Systemverhalten zusammengefasst, dessen Lösung zur gewünschten Analyse führt. Die Annäherung der FEM besteht darin, dass (meist für die Verformung) nur annähernde funktionale Ansätze gewählt werden.

Der Vorteil der FEM gegenüber dem Plattenmodell sowie mehrschichtigen Halbraummodell ist, dass prinzipiell beliebig geformte Körper mit beliebigem Werkstoffverhalten modelliert werden können. Die einzige Einschränkung (neben der numerischen Stabilität) ist der mit zunehmender Komplexität überproportional zunehmende Rechenaufwand. Der Nachteil der FEM ist genau dieser Rechenaufwand, der sich besonders stark auf die Interpretation der Messungen vom Falling Weight Deflectometer (FWD) stark auswirkt – die Analyse des Materialverhaltens aus Verformungsmessungen (die Interpretation der FWD-Messung wird in Abschnitt 2.5.3 ausführlich beschrieben).

Die Grundlagen der FEM sind in vielen Literaturstellen, z.B. [MEISSNER und MAURIAL, 2000] bzw. in [abaqus] ausführlich beschrieben. Die mechanischen und rheologischen Eigenschaften des Asphaltmaterials, die als Grundlage der Modellierung von Asphaltstraßen dienen, sind dem Anhang 1 (Abschnitt 10) zu finden.

2.3.2.4. Modell für den Schichtenverbund der Asphaltsschichten von BISAR [SHELL, 1998]

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, hat der Schichtenverbund der Asphaltsschichten einen wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Straße. Daher ist die Modellierung des Schichtenverbund auch eine der wesentlichen Aufgaben bei der Analyse des Tragverhaltens von Asphaltstraßen. Mit dem Ansatz von LÜCKE [1966] kann man für den Schichtenverbund von Asphaltsschichten nur die beiden Extremwerte „voller Schichtenverbund“ oder „fehlender Schichtenverbund“ modellieren. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass in realen Straßen auch Zwischenstufen zu beobachten sind.

Um die unterschiedliche Qualität des Schichtenverbunds der Asphaltsschichten zu modellieren, hat die Firma Shell eine Lösung basierend auf dem Modell von GOODMAN u.a. [1968] für den Schichtenverbund der Asphaltsschichten entwickelt [Al HAKIM u. a., 2000]. Dabei wird der Schichtenverbund der Asphaltsschicht als eine homogene virtuelle Schicht mit einer Dicke t wie in Bild 2-15 dargestellt betrachtet.

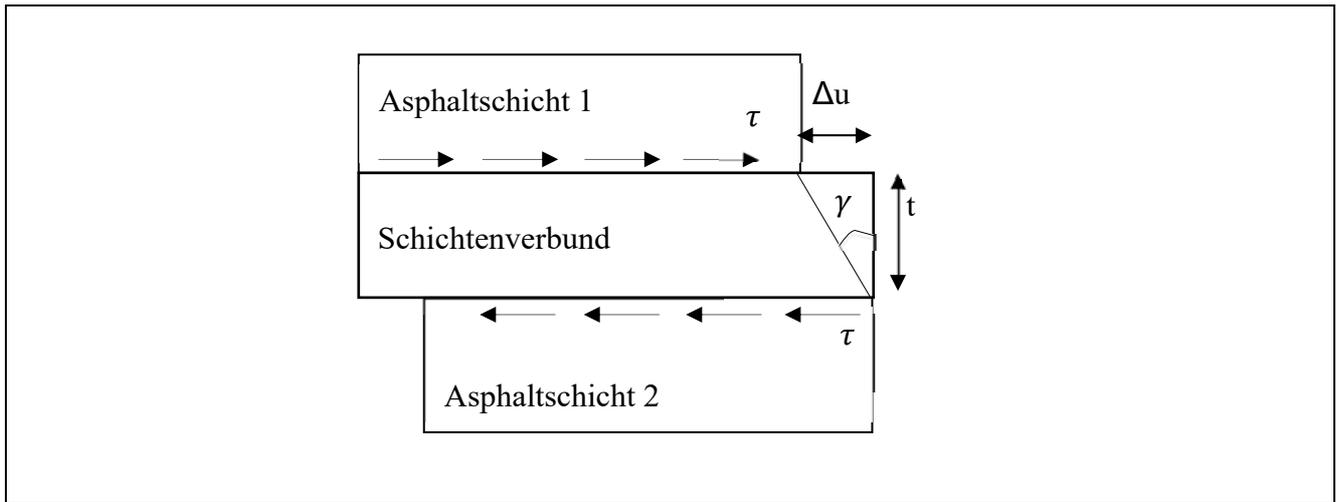


Bild 2-15 Mechanische Modell für den Schichtenverbund

Die Bestimmungsgleichungen der virtuellen Verbundschicht in Bild 2-15 lauten wie folgt:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2-37)$$

mit

G : das Schubmodul der Verbundschicht

γ : die Verzerrung der Verbundschicht

Aus dem Bild 2-15 lässt sich ableiten:

$$\tau = \frac{G}{t} \cdot \Delta u \quad (2-38)$$

$$\tau = K_S \cdot \Delta u \quad (2-39)$$

mit:

K_S : Schubsteifigkeit des Schichtenverbunds in $[N/m^3]$

Nach SHELL [1998] hängt die Schubsteifigkeit des Schichtenverbunds K_S von verschiedenen Faktoren wie der Lastgeometrie, der Steifigkeit der darüber liegenden Schicht und der Reibung zwischen den Schichten ab. Dies beschreibt SHELL wie folgt:

$$AK = \frac{1}{K_S} = \left[\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right] \cdot \left[\frac{1 + \mu}{E} \right] \cdot a \quad (2-40)$$

mit:

AK: Verbundfaktor (engl. shear spring compliance) [m³/N]

a: Radius der Flächenlast [m]

E: E-Modul der Schicht oberhalb der Schichtgrenze [MN/m²]

μ: Querdehnzahl dieser Schicht [-]

α: Reibungsparameter der Schichten und liegt zwischen 0 % und 100 %:

α = 0 %: Vollständiger Schichtenverbund

α = 100%: Fehlender Schichtenverbund

0 % < α < 100%: Teilweise vorhandener Schichtenverbund

Nach SHELL [1998] ist der Parameter α nicht äquivalent zum konventionellen Reibungskoeffizienten (Mohr-Coulomb-Reibungskoeffizient), da dieser für solche kurzzeitige Belastung wie eine Verkehrsüberrollung nicht anwendbar ist. Daher ist ein solcher Abscherversuch wie nach [FGSV ALP A-StB, Teil 4, 1999] nicht heranziehbar, um den Parameter α zu ermitteln.

Mit diesem Ansatz hat Firma SHELL auf der Grundlage des mehrschichtigen Halbraummodells (vgl. Abschnitt 2.3.2.3.2) das Programm BISAR (Bitumen Structure Analysis in Roads) entwickelt, mit dem das Tragverhalten einer Straße mit bis zu zehn Schichten analysiert werden kann. Um den Ansatz vom SHELL [1998] zu veranschaulichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit mit BISAR eine Parameterstudie durchgeführt, bei der das Tragverhalten der Straße in Abhängigkeit von der Qualität des Schichtenverbunds der Asphaltsschichten untersucht wurde. Dazu wurde das Parameter α der Asphaltsschichten zwischen 0% und 100% variiert, was nach BISAR dem vollständigen, teilweise vorhandenen und fehlenden Schichtenverbund entspricht. Als Ergebnis der Untersuchung wurden die Einsenkungen der Straße und die Dehnungen der Asphaltsschichten in Bild 2-16 und Bild 2-17 jeweils dargestellt. Die Bilder zeigen, dass die Plattentragwirkung der Asphaltsschichten durch einen schwächeren Schichtenverbund (Parameter α) tatsächlich reduziert wird, wie es auch in der Praxis zu beobachten war (vgl. Bild 2-5 in Abschnitt 2.3.1). Daraus ist es ersichtlich, dass das Verbundmodell von SHELL bzw. BISAR plausibel und praxisgerecht ist.

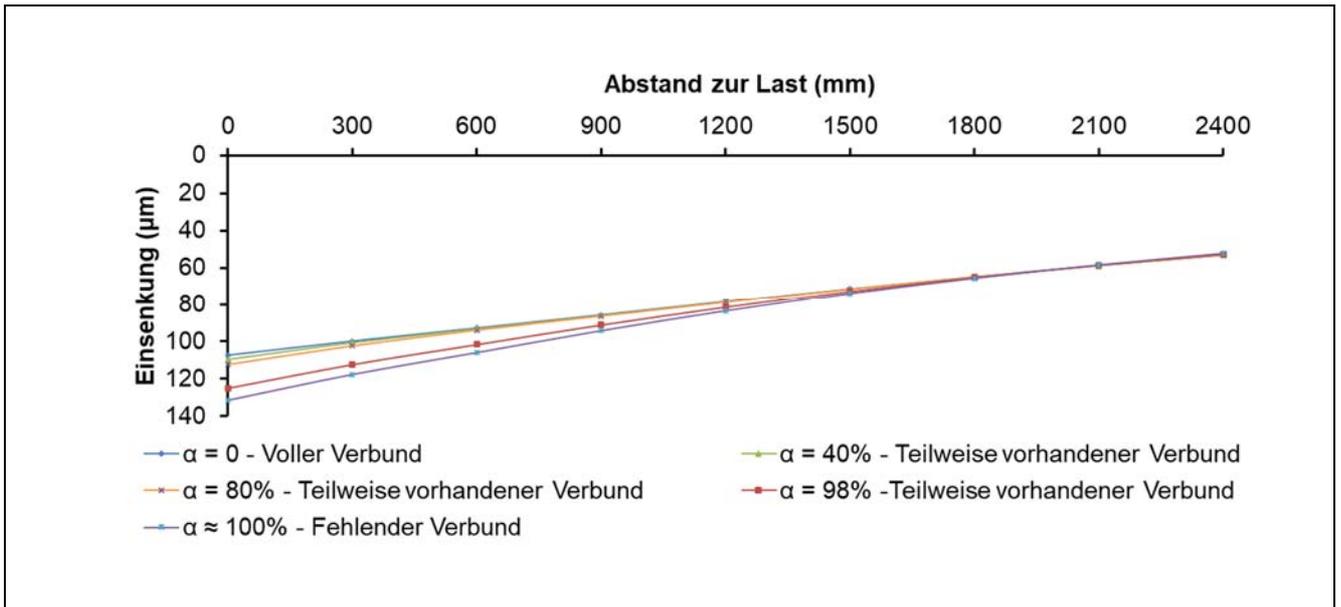


Bild 2-16 Die Einsenkungen der Straße in Abhängigkeit vom Parameter α von BISAR

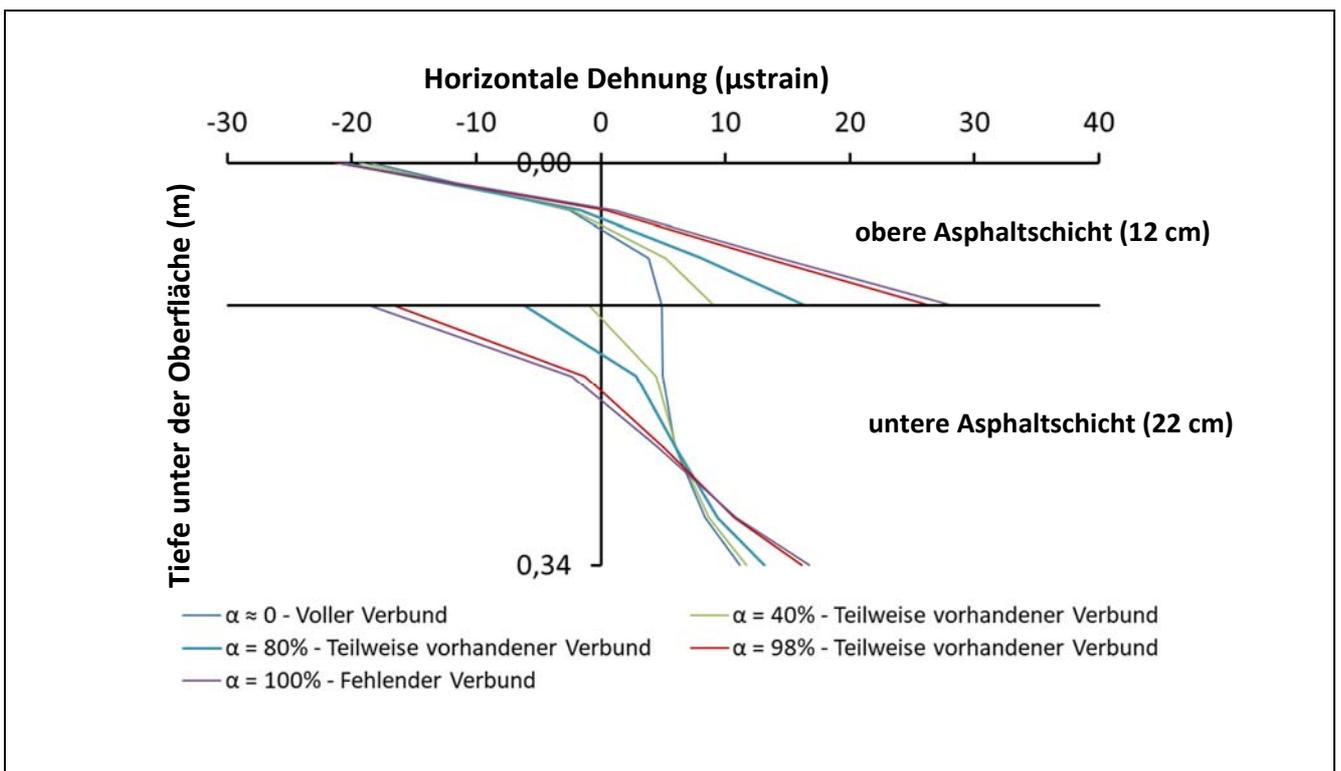


Bild 2-17 Die Dehnungen der Asphalt-schichten in Abhängigkeit vom Parameter α von BISAR

2.4 Schädigungsmechanismus und die Ermittlung der Nutzungsdauer von Asphaltsschichten

Die Asphaltsschichten sind in der Regel während ihrer Lebensdauer Millionen von Überrollungen des Verkehrs ausgesetzt, die nach ihrer kurzzeitigen Belastung eine mikroskopische Strukturänderung sowie Schädigung im Asphalt hinterlassen. Im Laufe der Nutzung akkumulieren sich solche Mikroschädigungen, was nach einer bestimmten Anzahl von Überrollungen des Verkehrs zum Versagen in Form von Rissen in der Asphaltsschichten führen. In Bild 2-18 zeigen WANG u.a. [2017] den Schädigungsmechanismus von Asphaltstraßen.

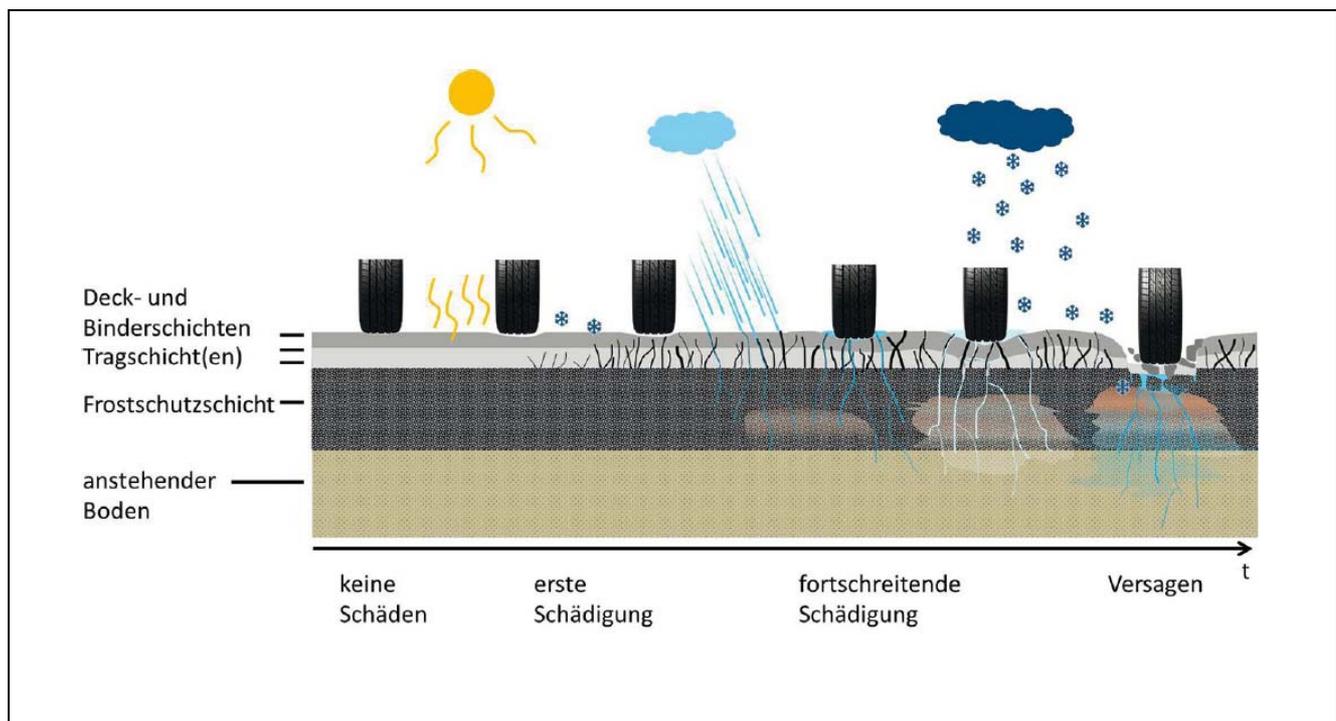


Bild 2-18 Schädigungsmechanismus von Asphaltsschichten [WANG u.a., 2017]

Der in Bild 2-18 dargestellte Schädigungsmechanismus beruht auf dem Postulat von ROWE über das Langzeitverhalten vom Asphalt unter wiederholter Belastung. ROWE [1993] postulierte nämlich aufgrund von Laborversuchen, dass der Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ bei wiederholter Belastung bis zum Zeitpunkt der Bildung von Mikrorissen nahezu konstant bleibt. Während sich die Mikrorisse entwickeln, nimmt $|E|_{\text{Asphalt}}$ deutlich ab, bis sich Makrorisse bilden [bast, 2006]. Mit der Entstehung der Makrorisse gilt der Asphalt als versagend. Bild 2-19 zeigt die Bewertung der Ermüdung des Asphalts nach [ROWE, 1993] unter einer wiederholten Belastung.

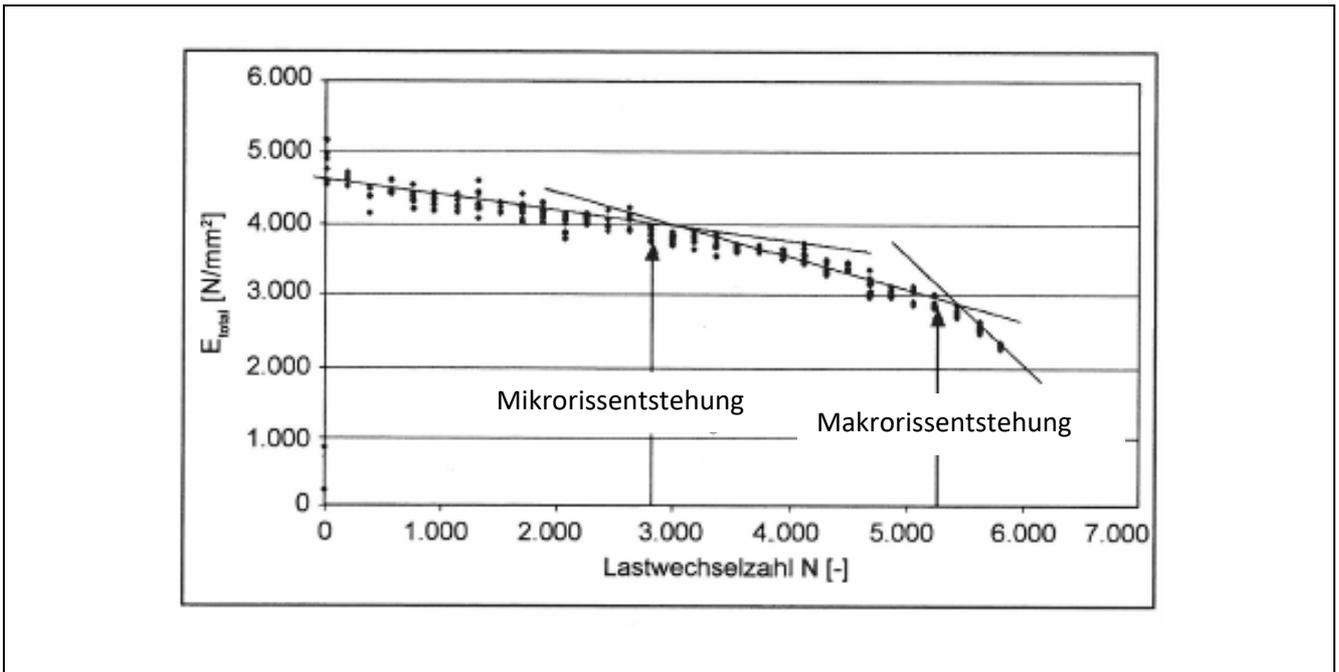


Bild 2-19 Bewertung der Ermüdung des Asphalts nach ROWE [bast, 2006]

Auf Grundlage des ROWE-Postulats wurde die rechnerische Ermittlung der Nutzungsdauer von Asphaltsschichten entwickelt, z.B. die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht von Deutschland, kurz RDO Asphalt 09 [FGSV, 2009]. Dazu wird das Langzeitverhalten des Asphalts bis zum Zeitpunkt der Entstehung von Mikrorissen durch eine sogenannte Ermüdungsfunktion beschrieben, die in der Regel sich als Gerade in doppellogarithmischer Form (Gleichung 2-43) darstellen lässt. Die Materialeinflussfaktoren k_1 und n in der Ermüdungsfunktion werden mit Hilfe von Laborversuchen bestimmt (FGSV AL-SP-Asphalt, 2009). Durch das Einsetzen der bemessenen elastischen Dehnungen von Asphaltsschichten in die Ermüdungsfunktion kann die (Rest-) Nutzungsdauer von Asphaltsschichten hinsichtlich der Rissbildung ermittelt werden.

$$N_f = k_1 \cdot \varepsilon^n \quad (2-41)$$

mit:

N_f : Lastwechselzahl bis zur Mikrorissentstehung [-]

ε : Initiale elastische Zugdehnung der Asphaltsschichten [%]

k_1, n : Materialeinflussfaktor des Asphalts [-]

2.5 Zerstörungsfreie Untersuchung struktureller Substanz von Asphaltstraßen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD)

2.5.1 Allgemeines

Ziel der FWD-Untersuchung ist es, aus den durch das FWD gemessenen Einsenkungen der Fahrbahn auf die tief unter der Fahrbahn befindlichen Substanz von Asphaltstraßen, wie z.B. die Ermüdung und den mangelhaften Schichtenverbund von Asphaltschichten sowie die unzureichende Verdichtung des Planums der Unterlage, zu schließen. Damit werden die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Straße zerstörungsfrei bewertet. Bild 2-20 zeigt den Ablauf der FWD-Untersuchung. Die Schritte der Untersuchung werden im Folgenden detailliert beschrieben.

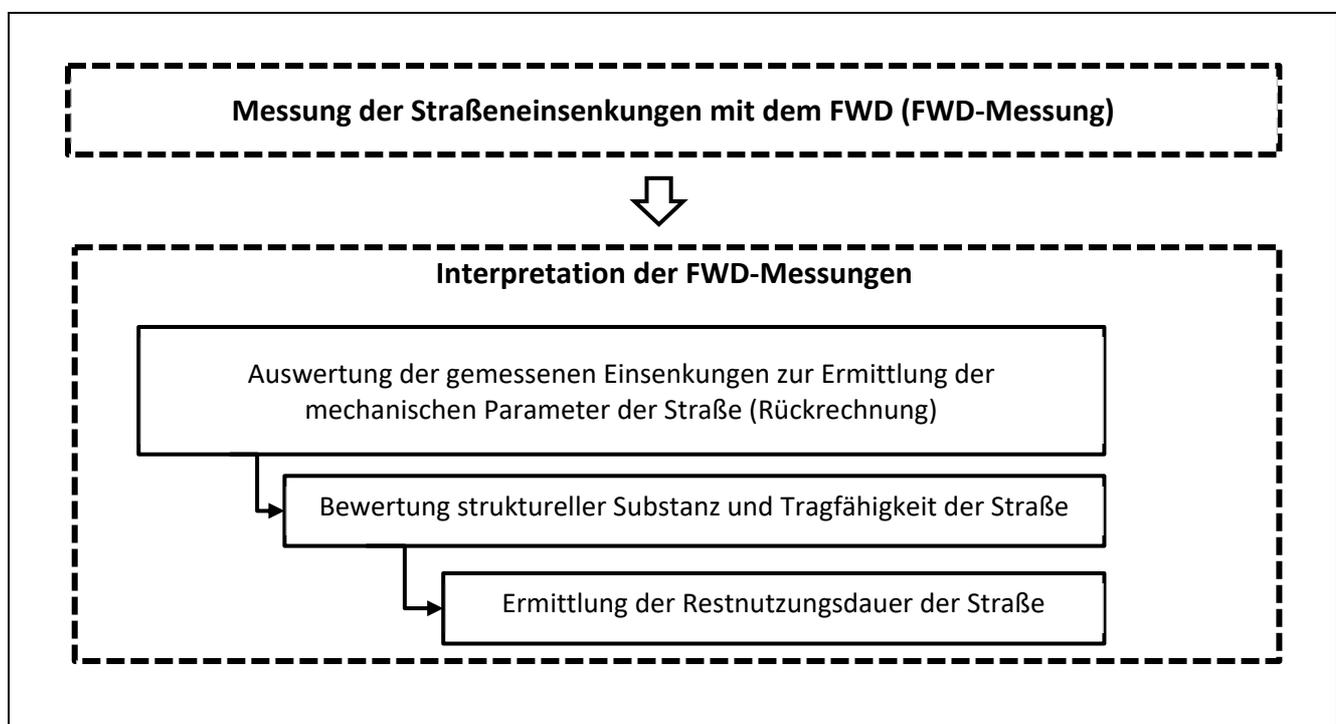


Bild 2-20 Gliederung der FWD-Untersuchung

2.5.2 FWD-Messung

Das Falling Weight Deflectometer (FWD) ist ein dynamisches Messgerät, bei dem ein Kraftimpuls über eine Lastplatte auf die Fahrbahn aufgebracht wird (vgl. Bild 2-21). Die dynamische Reaktion der Fahrbahn wird von den Geophonen an verschiedenen Abständen von der Last aufgezeichnet, wodurch die gesamte Einsenkungsmulde der Fahrbahn abgebildet wird (vgl. Bild 2-22).

Die Geophone sind Sensoren, mit denen die vertikale Beschleunigung eines Punkts der Fahrbahn, die durch das Fallgewicht vom FWD erzeugt wird, als Funktion von der Zeit gemessen wird. Durch zweimaliges Integrieren der Beschleunigung nach der Zeit werden die Einsenkungen ermittelt.

Bei normalen Verkehrsstraßen wird die Last mit etwa 50 kN auf die Fahrbahn aufgebracht, was der 10-t-Achlast eines Lkw entspricht. Bei Flugbetriebsflächen soll die Last mit bis zu 250 kN aufgebracht werden. Die Abstände zur Last, in denen die Einsenkung zu erfassen ist, sind weltweit unterschiedlich vorgeschrieben. In Deutschland wird empfohlen, die Einsenkung im Lastmittelpunkt (0 cm) und in 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 und 240 cm vom Lastmittelpunkt zu messen [FGSV 2014, Teil B 2.1].

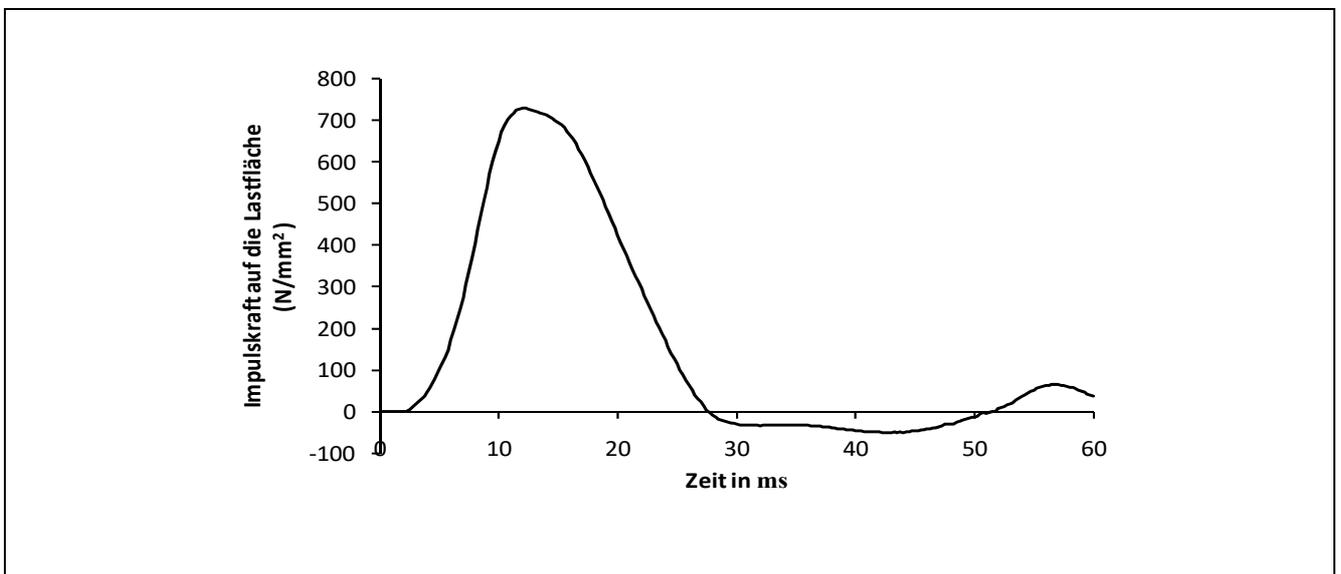


Bild 2-21 Beispiel für einen Kraft-Zeit-Verlauf des Impulses vom FWD

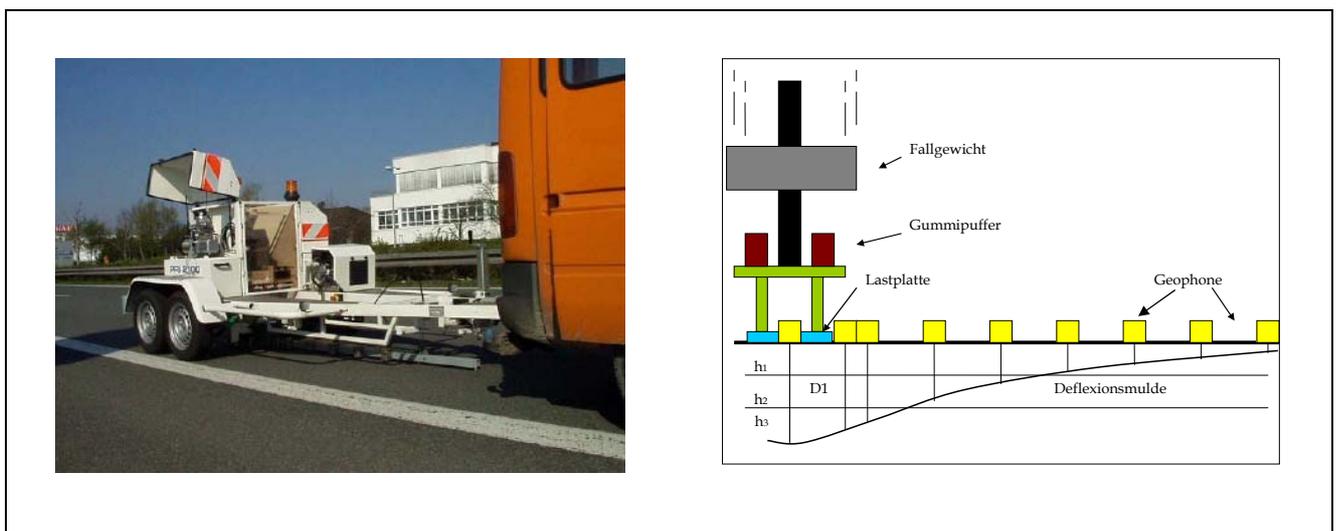


Bild 2-22 Das Falling Weight Deflectometer und sein Messprinzip [GRÄTZ, 2009]

2.5.3 Interpretation der FWD-Messungen

Wie bereits in Bild 2-20 dargestellt, umfasst die Interpretation der FWD-Messungen die Auswertung der gemessenen Einsenkungen zur Ermittlung der mechanischen Parameter der Straße, die Bewertung struktureller Substanz und Tragfähigkeit der Straße und die darauf beruhende Ermittlung der Restnutzungsdauer dieser. Wesentlich ist die Auswertung der gemessenen Einsenkungen, die in der Literatur oft auch als Rückrechnung (engl. back-calculation) bezeichnet wird. Üblicherweise wird dabei versucht, aus den vom FWD gemessenen Einsenkungen die E-Moduli der Schichten und die Steifigkeit des Schichtenverbunds der Asphaltsschichten zurückzurechnen. Die Rückrechnung basiert entweder auf dem gebetteten Plattenmodell oder dem mehrschichtigen Halbraummodell. Je nachdem, welches Modell für die Rückrechnung verwendet wird, kann ein Verfahren oder eine Methode zur Interpretation der FWD-Messungen als zweischichtig oder mehrschichtig bezeichnet werden.

2.5.3.1 Mehrschichtige Methode

Die meisten der zur Interpretation der FWD-Messungen entwickelten Methoden sind mehrschichtige Methode, die auf dem mehrschichtigen Halbraummodell basieren (Abschnitt 2.3.2.3.2). Mit ihnen können die E-Moduli aller Schichten der Straße sowie die Steifigkeit des Schichtenverbunds der einzelnen Asphaltsschichten zurückgerechnet werden. Dazu sind Informationen über den Straßenaufbau erforderlich.

Bei einer mehrschichtigen Rückrechnung werden zunächst die Einsenkungen der Straße iterativ mit Annahmen für den E-Modul der Schichten und die Steifigkeit des Schichtenverbunds der Asphaltsschichten berechnet. Bis die berechneten und gemessenen Einsenkungen übereinstimmen, werden diese Parameter der Straße festgelegt. Bild 2-23 zeigt beispielhaft die mehrschichtige Rückrechnungsmethode von [AL HAKIM u.a., 2000].

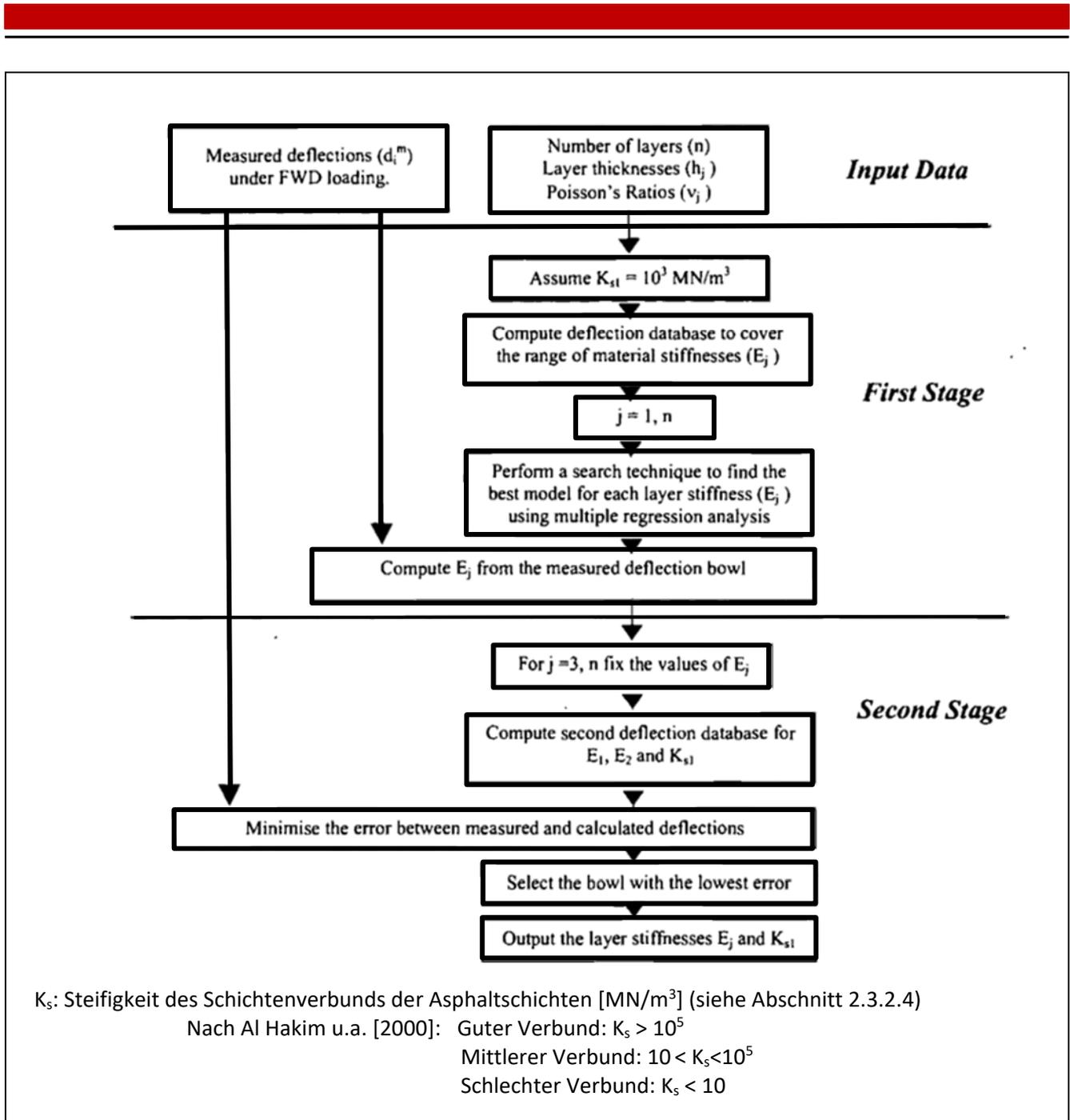


Bild 2-23 Das mehrschichtige Verfahren und die Orientierungswerte für die Steifigkeit des Schichtenverbunds von Asphalt-schichten nach [AL HAKIM u. a., 2000]

Zur Bewertung der strukturellen Substanz von Asphalt-schichten werden die rückgerechneten $|E|_{\text{Asphalt}}$ mit einem üblichen Wert vom $|E|_{\text{Asphalt}}$ verglichen, um die Ermüdung des Asphalts festzustellen. Hinsichtlich des Verbunds von Asphalt-schichten wird die rückgerechnete Steifigkeit des Schichtenverbunds mit den vom Entwickler vorgeschlagenen Werten, z.B. in Bild 2-23, verglichen, wodurch sich der Zustand des Schichtenverbunds von Asphalt-schichten beurteilen lässt. Für die Bewertung der Tragfähigkeit

der Straße und ihrer Restnutzungsdauer wird das Tragverhalten der Straße mit den rückgerechneten Parametern bemessen.

Derzeit sind solche mehrschichtigen Methoden wie ELMOD, EVECAL, BAKFAA in der Industrie weitgehend verbreitet. Neben den vorgenannten Methoden mit dem mehrschichtigen Halbraummodell gibt es auch mehrschichtige Methoden mit der Finite-Element-Methode, z.B. wie in [WANG, OESER u.a., 2017], [LI und WANG, 2018] und [GHANIZADEH u.a., 2020], die sich allerdings noch in der Entwicklung befinden und in der Industrie noch nicht angewendet werden.

2.5.3.2 Zweischichtige Verfahren (das GRÄTZ-Verfahren)

Anders als in anderen Ländern wurde in Deutschland die Interpretation für FWD-Messungen mit zwei Schichten auf der Grundlage des gebetteten Plattenmodells entwickelt. Dabei wird der mehrschichtige Asphaltbelag als homogene Platte und die Schottertragschicht mit dem Boden als homogener Halbraum angenommen. Informationen über den Straßenaufbau sind hier nicht erforderlich wie bei den mehrschichtigen Verfahren.

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2.3.1 beschrieben, hat GRÄTZ im Rahmen seiner Habilitation die dort genannte Integralgleichung (2-31) durch eine Exponentialgleichung (2-33) approximiert. Mit seiner Näherungsgleichung können die Schichtmoduli der Unterlage (der M_0 -Wert) und ein Verhältniswert der Schichtsteifigkeiten der Asphaltplatte und Unterlage (der sogenannte l -Wert) relativ einfach regressiv aus den gemessenen Einsenkungen zurückgerechnet werden.

Da bei Einsenkungsmessungen mit dem FWD der konkave Bereich der Einsenkungsmulde im Lasteinleitungsbereich durch die starre Lastplatte verzerrt wird und nur zwei Messpunkte angeordnet werden können, hat GRÄTZ zur Rückrechnung die Verformung des umgebenden konvexen Rings der Fahrbahndecke herangezogen, die in ähnlicher Weise durch die Materialparameter beeinflusst wird (zur Form der Verformungsmulde siehe auch Bild 2-11 in Abschnitt 2.3.2.3.1). Damit stehen für die Approximation der Exponentialfunktion auch die Verformungswerte mehrerer Messpunkte zur Verfügung.

Bild 2-24 zeigt ein Beispiel für die regressiv Rückrechnung nach dem GRÄTZ-Verfahren.

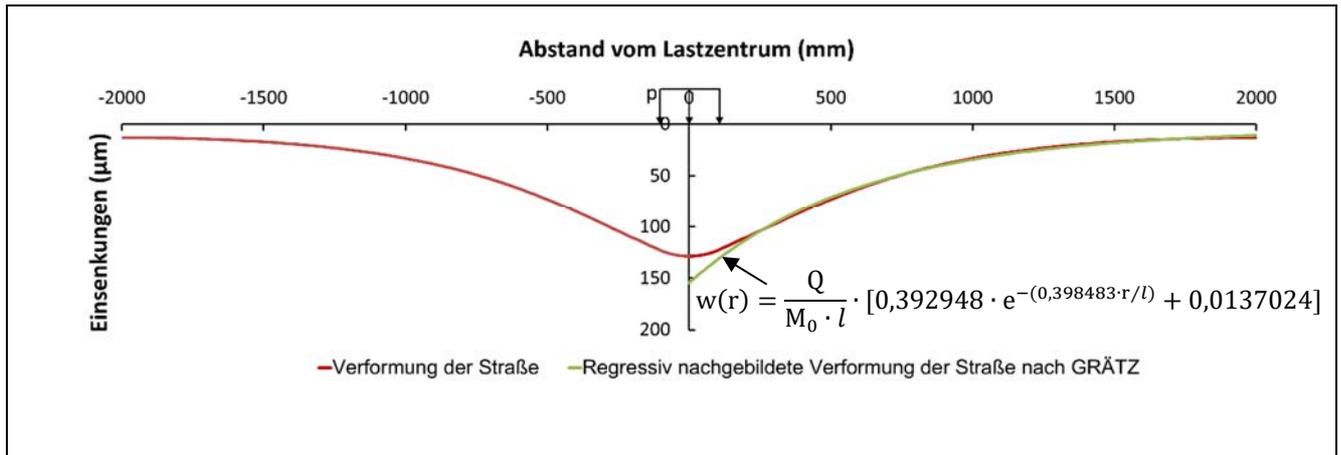


Bild 2-24 Regressive Rückrechnung des l - und M_0 -Werts des GRÄTZ-Verfahrens

Aus den rückgerechneten M_0 - und l -Werten und der bekannten Asphaltstärke lässt sich, wie bei den mehrschichtigen Verfahren, ein mittlerer Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ berechnen und damit die Ermüdung der Asphaltdecken und die Tragfähigkeit der Straße bewerten. Nach GRÄTZ ist dieser Schritt jedoch nicht notwendig, da seiner Auffassung nach der l -Wert bereits ausreichende Rückschlüsse auf die Ermüdung der Asphaltdecken sowie die Tragfähigkeit der Straße zulässt: je höher der l -Wert ist, umso breiter ist die Lastverteilung von Asphaltdecken und desto höher sei die Tragfähigkeit der Straße. Daher kann man mit diesem Wert direkt die Tragfähigkeit der Straße bewerten, ohne dass der $|E|_{\text{Asphalt}}$ bestimmt und das Tragverhalten der Straße bemessen werden muss.

Mit dieser Auffassung definierte GRÄTZ den l -Wert als einen neuen strukturellen Parameter von Asphaltdecken und postulierte, dass dieser Wert durch die Ermüdung von Asphaltdecken abnimmt und bei Rissbildung in den Asphaltdecken nur noch etwa 50% des Neubauwerts beträgt. Die entsprechenden Orientierungswerte für die neu gebauten Asphaltdecken gewann er durch vergleichende Messungen für die Modellstraßen von der Bundesanstalt für Straßen (bast). Bild 2-25 und Tabelle 2-1 zeigen die von GRÄTZ etablierte Bewertung der strukturellen Substanz und Tragfähigkeit der Straße mit dem rückgerechneten l -Wert.

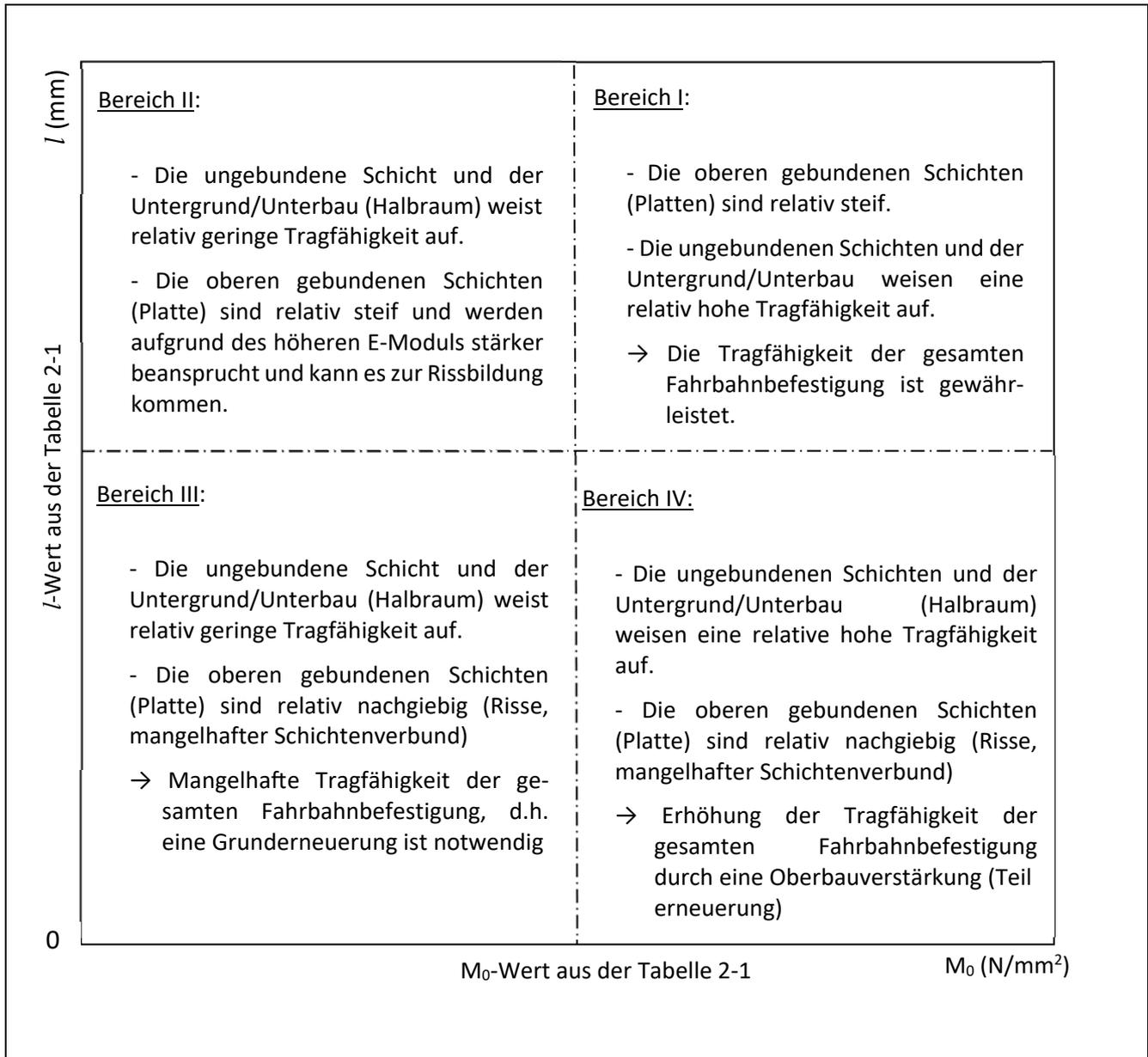


Bild 2-25 Bewertung struktureller Substanz und Tragfähigkeit der Straße des GRÄTZ-Verfahrens [GRÄTZ, 2009]

Bauklasse nach der RStO 01 [FGSV, 2001] [-]	<i>l</i> -Wert zur Bewertung der Tragfähigkeit der neu gebauten Asphaltsschichten [mm]	<i>l</i> -Wert bei Rissbildung in den Asphaltsschichten [mm]	Mindestwert für M_0 [N/mm ²]
SV	600	300	150
I	550	275	150
II	500	250	150
III	400	200	150
IV	350	175	150
V	300	150	125

Tabelle 2-1 Die von GRÄTZ vorgeschlagenen Orientierungswerte für den *l*-Wert zur Bewertung der Tragfähigkeit der Straße und struktureller Substanz von Asphaltsschichten [GRÄTZ, 2009]

Als innovativer Punkt des GRÄTZ-Verfahrens gegenüber den mehrschichtigen Methoden kann die Interpretation der FWD-Messungen ohne Informationen über den bestehenden Aufbau der Straße genannt werden. Im Jahr 2010 wollte das Institut für Verkehrswegebau der TU Darmstadt das GRÄTZ-Verfahren weiterentwickeln, um die Restnutzungsdauer der Straße mit dem *l*-Wert zu bewerten und dadurch die Reihe der FWD-Untersuchungen zu vervollständigen (vgl. Bild 2-20). Das Verfahren zeigte jedoch Schwächen:

1. Unplausible Bewertung der Tragfähigkeit der Straße mit dem l -Wert

Aus der Gleichung (2-30) des gebetteten Plattenmodells (vgl. Abschnitt 2.3.2.3.1) ist feststellbar, dass der l -Wert kein richtiger struktureller Parameter von Asphaltschichten ist. Ebenso enthält er auch den Einfluss des Bodens und ändert sich somit auch bei einer homogenen Asphaltplatte, wenn sich die Tragfähigkeit des Bodens verändert, was in der Praxis sehr häufig der Fall ist. Umgekehrt ist es auch möglich, dass Straßen mit unterschiedlichen Asphaltstärken trotzdem den gleichen l -Wert aufweisen, weil sich die Tragfähigkeit des darunter liegenden Bodens unterscheidet. Daher kann die Tragfähigkeit der Straße mit diesem Wert nicht präzise bewertet werden und ihre Restnutzungsdauer nicht bestimmt werden.

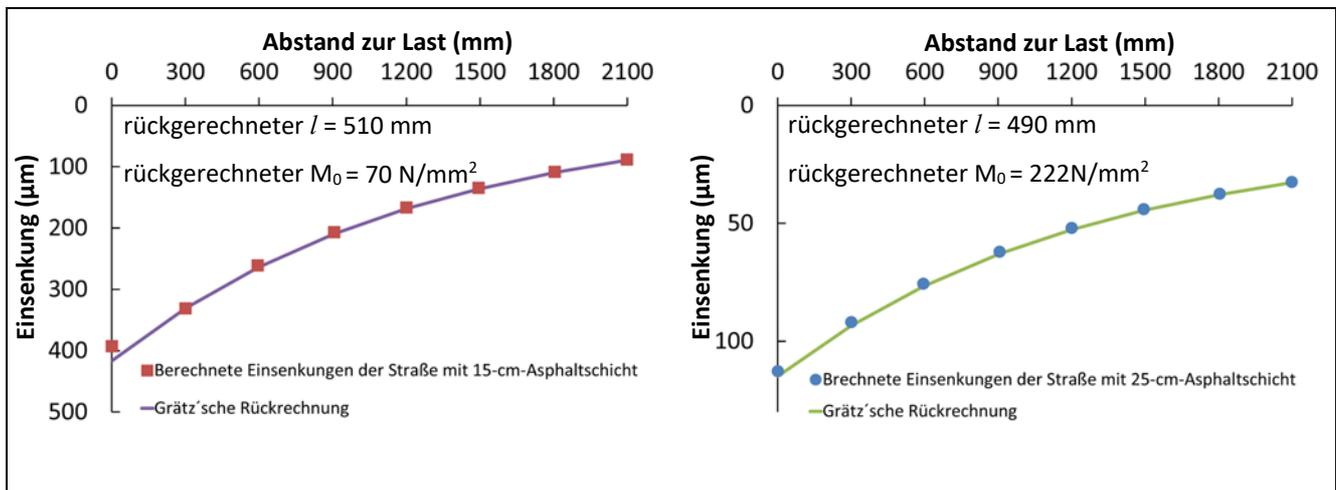


Bild 2-26 Die anhand der FEM berechneten Einsenkungen der Straßen und die regressive Rückrechnung nach GRÄTZ; links: $h_{\text{Asphalt}} = 15$ cm und $E_{\text{Boden}} = 50$ N/mm²; rechts: $h_{\text{Asphalt}} = 25$ cm und $E_{\text{Boden}} = 230$ N/mm²

Um diesen Zusammenhang zu veranschaulichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Parameterstudie durchgeführt, in der die Einsenkungen von zwei verschiedenen Asphaltstraßen mit unterschiedlicher Asphaltstärken sowie Tragfähigkeit des Bodens, deren l -Wert nach dem gebetteten Plattenmodell von 500 mm betragen soll, mit der Finite-Elemente-Methode berechnet wurden (vgl. Bild 2-26). Anschließend wurden der l - und M_0 -Wert der Straßen aus den berechneten Einsenkungen mit dem GRÄTZ-Verfahren zurückgerechnet. Bild 2-26 zeigt, dass die Straßen trotz unterschiedlicher Asphaltstärken durch die Rückrechnung von GRÄTZ tatsächlich nahezu identische l -Werte aufweisen. Nach Tabelle 2-1 ist die Tragfähigkeit der beiden Straßen gleich einzustufen, nämlich als Bauklasse II. Diese Bewertung ist jedoch nicht zutreffend, da die Tragfähigkeit und Nutzungsdauer in Bezug auf die Anzahl der Verkehrsbelastung einer Straße mit 15 cm dicker Asphaltstärken und einer Straße mit 25 cm dicker Asphaltstärken sicherlich völlig unterschiedlich ist (vgl. Tafel 1 von RStO 12 in [FGSV 2012]).

Deshalb kann dieser Wert zur Bewertung der Tragfähigkeit der Straße sowie ihrer Restnutzungsdauer nicht herangezogen werden.

2. Unterschiedliche Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ bei verschiedenen Strecken

Um das Problem der ungenauen Bewertung der Tragfähigkeit der Straße mit dem l -Wert zu lösen, wurde das GRÄTZ-Verfahren vom Institut auf die Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ umgestellt (vgl. Gleichung 2-44, hergeleitet aus der Definitionsgleichung des l -Wertes bzw. der Gleichung 2-35 in Abschnitt 2.3.2.3.1). Ziel der Umstellung war es, mit dem rückgerechneten $|E|_{\text{Asphalt}}$ die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Asphaltsschichten wie bei den mehrschichtigen Verfahren zu bewerten. Wie bereits in Abschnitt 1.2 geschrieben, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts FE-Nr. 88.0100/2009 $|E|_{\text{Asphalt}}$ von verschiedenen Autobahnstrecken mit unterschiedlichen Nutzungsdauern durch die FWD-Messungen bewertet. Die Bohrkernuntersuchungen zeigten jedoch, dass der so rückgerechnete $|E|_{\text{Asphalt}}$ bei verschiedenen Strecken unterschiedlich ausfiel und somit auch die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer von Asphaltsschichten nicht bewertet werden können [BALD u.a., 2011]. Daraus schloss das Institut, dass das GRÄTZ-Verfahren weiterentwickelt werden muss, um die strukturelle Substanz von Asphaltsschichten durch FWD-Messungen zutreffend zu bewerten. Erst dann kann eine zerstörungsfreie Ermittlung der Restnutzungsdauer der Straße mit FWD in Betracht gezogen werden.

$$|E|_{\text{Asphalt}} = \frac{6 \cdot l^3 \cdot M_0}{h_{\text{Asphalt}}^3} \cdot (1 - \mu_{\text{Asphalt}}^2) \quad (2-42)$$

mit:

l - und M_0 : Ergebnisse der regressiven Rückrechnung des GRÄTZ-Verfahrens

h_{Asphalt} : Dicke der Asphaltsschichten

μ_{Asphalt} : Querdehnzahl der Asphaltsschichten (In der Regel mit 0,35 angenommen)

3 Analyse des GRÄTZ-Verfahrens und Forschungsbedarf

Wie in Abschnitt 1.3 geschrieben, ist das Ziel dieser Arbeit, das GRÄTZ-Verfahren weiterzuentwickeln, um den Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ durch FWD-Messungen zutreffend zurückzurechnen und damit die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Straße im Hinblick auf Rissbildung in Asphalt-schichten zerstörungsfrei zu ermitteln. Um dieses Ziel zu erreichen, muss zunächst die ungenaue Rückrechnung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ des Verfahrens bei der 8-jährigen Autobahnstrecke aufgeklärt werden (Abschnitt 1.2). Dazu ist die Entwicklung des Prüfverfahrens von GRÄTZ [2009] zu analysieren.

In Abschnitt 1.2 wurde auch beschrieben, dass die Rückrechnung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ nach GRÄTZ auf verschiedenen Autobahnstrecken sehr unterschiedlich ausfiel. Dies deutet auf einen „blinden Fleck“ in diesem Verfahren hin, der vermutlich aus einer Interpretationslücke im gebetteten Plattenmodell resultiert, mit dem GRÄTZ sein Verfahren entwickelt hat. Im vorangegangenen Kapitel erscheinen das gebettete Plattenmodell sowie die Verwendung dieses Modells zur Interpretation der FWD-Messung sehr plausibel. Die Analyse der folgenden Untersuchungen verschiedener Literaturquellen zeigt jedoch, dass es tatsächlich lückenhaft ist.

1. Untersuchung von STRAUBE u. a. [2010]

Die Autoren untersuchten mit BISAR die Verformung der Straße in Abhängigkeit vom Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$, deren Ergebnisse in Bild 3-1 dargestellt sind. Aus dem Bild ist ersichtlich, dass die Einsenkungen der Straße in einem Abstand von ca. 180 cm zum Lastmittelpunkt (w_{180}) nicht mehr vom $|E|_{\text{Asphalt}}$ geprägt sind. Dies widerspricht dem Plattenmodell, denn nach diesem Modell ist das Tragverhalten der Asphaltstraße so, dass sich die Asphalt-schicht unter der Last durchbiegt und der Boden zusammengedrückt wird (vgl. Bild 2-11 in Abschnitt 2.3.2.3.1). Wenn dies zutrifft, muss die gesamte Einsenkungsmulde mit der Änderung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ entsprechend geändert werden, wie in der rechten Seite vom Bild 3-1 dargestellt. Allerdings haben die Autoren den Grund für dieses Verformungsverhalten der Straße nicht erläutert.

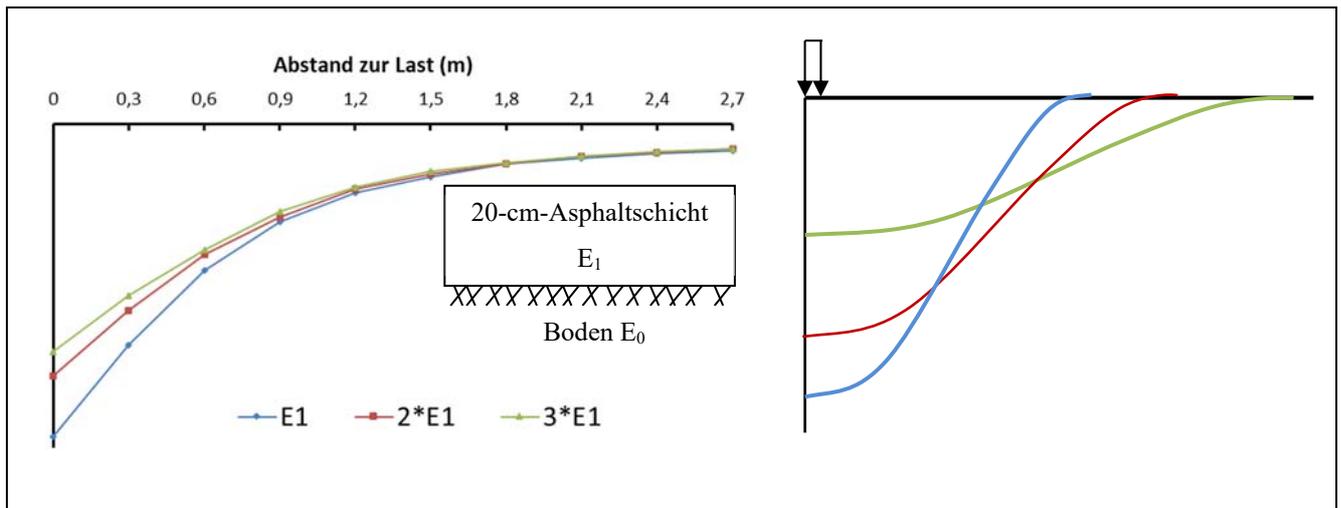


Bild 3-1 Verformung der Asphaltstraße; links: Ergebnisse der Untersuchungen von [STRAUBE u.a., 2010] [Eigene Darstellung]; rechts: die Soll-Verformung der Straße nach dem Plattenmodell

2. Untersuchung von GERLACH [1968]

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2.3.2 geschrieben, hat GERLACH in seiner Dissertation das Tragverhalten einer dreischichtigen Asphaltstraße mit dem mehrschichtigen Halbraummodell untersucht. Die Biegespannungen der Asphalttschicht, die auf ihre Plattentragwirkung zurückzuführen sind, sind zwar in seinem Ergebnis zu sehen (vgl. Bild 2-14). Wenn man jedoch den Verlauf der Biegespannungen genauer betrachtet, wird feststellen, dass sie sich nicht nichtlinear über den Querschnitt verteilen. Hinzu kommt, dass die Biegedruckspannungen an der Oberseite um ein Vielfaches größer als die Biegezugspannungen an der Unterseite sind. Dies entspricht jedoch nicht einer charakteristischen Plattentragwirkung und widerspricht auch der Untersuchung von [ZANDER, 2007]. Hier liegen die Biegespannungen der Asphalttschicht linear über den Querschnitt verteilt und die Biegedruck- und Biegezugspannung verlaufen symmetrisch über die Mittelebene der Asphalttschicht (vgl. Bild 2-13 in Abschnitt 2.3.2.3.1.1). Diesen Sachverhalt hat GERLACH nicht erläutert.

3. Untersuchung von CEYLAN und KIM [2012]

Im Rahmen eines Forschungsprojekts untersuchten die Autoren auch mit BISAR die Einsenkungen von Asphaltstraßen, jedoch in Abhängigkeit der Qualität des Schichtenverbunds von Asphalttschichten, deren Ergebnisse in Bild 3-2 zusammengestellt sind. In dem Bild ist ersichtlich, dass trotz ähnlicher Gesamtasphalttsdicke völlig unterschiedliche Einsenkungen aufgrund des fehlenden Schichtenverbunds auftreten. Der Fall mit Schichtenverbund (Non-Delaminated) zwischen den Asphalttschichten weist die höchste Tragfähigkeit (Lastverteilung) und damit kleinste Einsenkungen unter der Last auf. Bei den drei

Fällen mit fehlendem Schichtenverbund ist besonders auffällig, dass die Fälle Delaminated_2 und Delaminated_3 identische Einsenkungen zeigen, obwohl die Stelle des fehlenden Schichtenverbunds im Asphaltpaket völlig unterschiedlich ist, während der Fall Delaminated_1 deutlich größere Einsenkungen aufweist als die der beiden anderen Fälle. Diese Sachverhalte sind weder von den Autoren erklärt noch durch das Verbundmodell von BISAR (Abschnitt 2.3.2.4) nachvollziehbar. Hier zeigt sich eine Wissenslücke zum Schichtenverbund von Asphaltsschichten: Der Schichtenverbund beeinflusst offensichtlich die Lastverteilung von Asphaltsschichten, was seit langem bekannt ist, aber die mechanischen Wechselwirkungen sind noch nicht diskutiert.

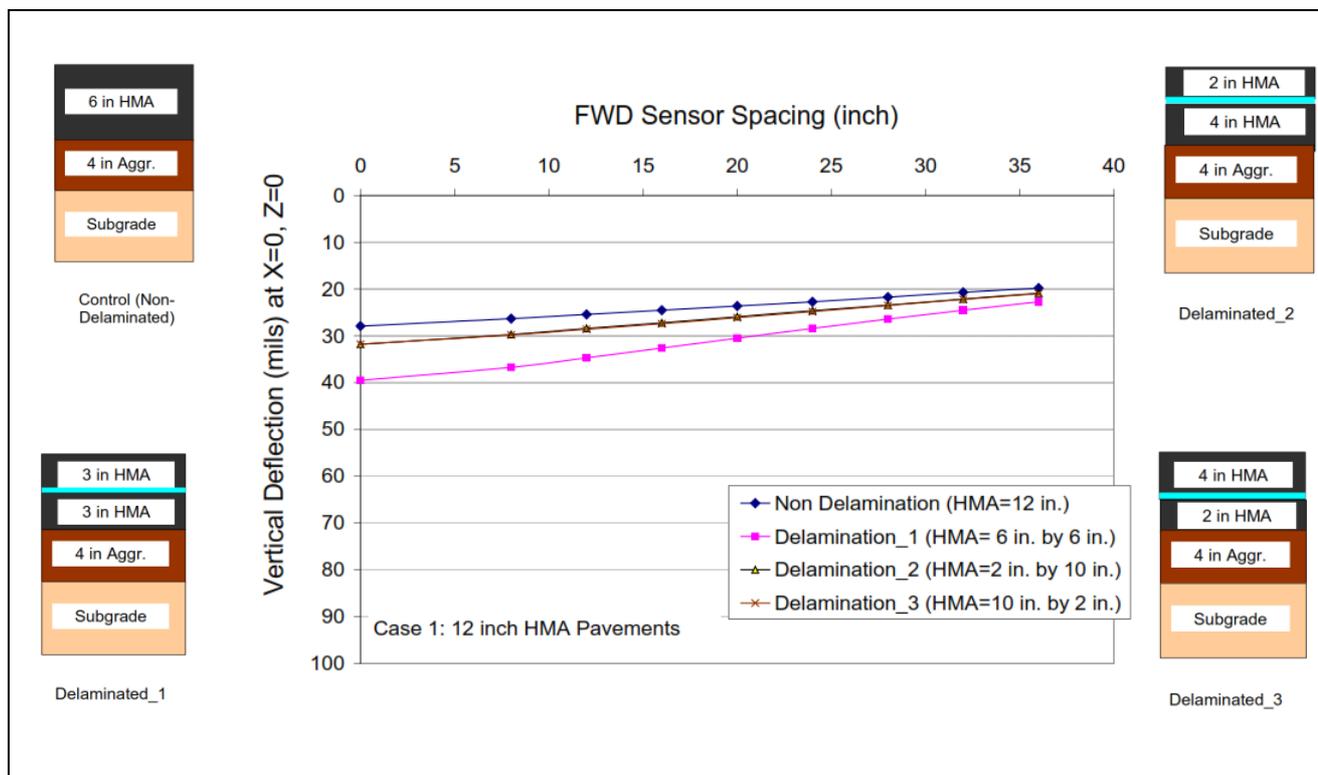


Bild 3-2 Die Untersuchungen des Einflusses vom Schichtenverbund der Asphaltsschichten auf die Fahrbahneinsenkungen von [CEYLAN und KIM, 2012]

Aus den oben genannten Unklarheiten zum Tragverhalten der Straße sind die folgenden Punkte des GRÄTZ-Verfahrens zu hinterfragen, die die Ursachen für dessen ungenaue Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ bei der 8-jährigen Autobahnstrecke in Abschnitt 1.2 sein können:

- a) Sind die Einsenkungen der Straße zur Bewertung struktureller Substanz von Asphaltsschichten wirklich geeignet? Ein Zusammenhang zwischen der Straßenverformung und struktureller Substanz von

Asphaltschichten wie dem $|E|_{\text{Asphalt}}$ oder dem Schichtenverbund kann durch die Untersuchungen von STRAUBE u.a. [2010] und CEYLAN und KIM [2012] nicht hergestellt werden.

- b) Ist die Verwendung des gebetteten Plattenmodells für die Rückrechnung der FWD-Messungen geeignet? Aus der Untersuchung von GERLACH [1968] geht hervor, dass es sich bei der Asphalt-schicht nicht um eine Platte handelt. Außerdem wird dieses Modells, wie in Abschnitt 2.3.2.3.1 erläutert, hauptsächlich für Betonstraßen verwendet. Es bietet sich an das mehrschichtige Halbraummodell zur Rückrechnung zu verwenden, welches in den meisten anderen Ländern eingesetzt wird.
- c) Ist die von GRÄTZ entwickelte Exponentialgleichung bzw. die Gleichung (2-34) (Abschnitt 2.3.2.3.1) zur Approximation der Differentialgleichung des Plattenmodells plausibel? Es gibt bisher weder in der Habilitation von GRÄTZ noch in einer sonstigen Literaturquelle einen Hinweis darauf, dass diese Gleichung mit den anderen Ansätzen vergleichbar ist.
- d) Ist die von GRÄTZ etablierte regressive Rückrechnungsmethode sinnvoll? Aus Bild 3-1 sowie Bild 3-2 ist der Wendepunkt der Einsenkungsmulde nicht zu erkennen, dessen Abstand zum Lastmittel-punkt dem durch das GRÄTZ-Verfahren ermittelten l -Wert entsprechen soll. Außerdem sind die Einsenkungen im Lastangriffsbereich in der Regel sehr wichtig für die Rückrechnung, z.B. JENDIA-Verfahren [FGSV 2014, Teil C 2.1]. In der GRÄTZ-Rückrechnung werden sie jedoch nicht berück-sichtigt.
- e) Ist die Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ anhand der Gesamtsphaltdicken ($\sum h_{\text{Asphalt}}$) sinnvoll? Aus der Untersuchung von CEYLAN und KIM [2012] erscheint, dass die Last beim fehlenden Schichtenverbund nicht vom gesamten Asphaltpaket verteilt wird (vgl. Bild 3-2).

Um diese Fragen zu beantworten und damit den „blinden Fleck“ in dem GRÄTZ-Verfahren genau zu bestimmen, muss der Zusammenhang der Untersuchungen von STRAUBE u.a. [2010], GERLACH [1968] und CEYLAN und KIM [2012] geklärt werden. Dazu ist das Tragverhalten von Asphaltstraßen systematisch zu untersuchen.

In der Regel wird in Deutschland zur Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen das mehrschichtige Halbraummodell herangezogen und das Programm BISAR verwendet, wie z.B. GERLACH [1968], WELLNER [1995], STÖCKERT [2001] und JOHANNSEN [2012]. Die unterschiedlichen Dar-

stellungen des Tragverhaltens der Asphalttschicht zwischen ZANDER [2007] und GERLACH [1968] werfen jedoch die Frage auf, ob das mehrschichtige Halbraummodell überhaupt praxisgerecht ist (vgl. Bild 2-13 und Bild 2-14 in Abschnitt 2.3.2.3). Es erscheint daher sinnvoll, das Tragverhalten der Straße mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) zu untersuchen.

Dabei wird zunächst das Tragverhalten von Straßen mit einer dünnen Asphalttschicht untersucht (wie bei den ersten so „staubfrei“ gemachten Asphaltstraßen in der Mitte des 20. Jahrhunderts). Anschließend wird das Tragverhalten von Straßen mit einem dicken Asphaltpaket (wie bei den heutigen Autobahnen und Bundesstraßen) vertiefend untersucht.

4 Vertiefte Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen mit dünner Asphalt-schicht

4.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird das Tragverhalten der Straße mit einer dünnen Asphalt-schicht untersucht, um zu prüfen, ob die Einsenkungen von Straßen wirklich geeignet sind, die strukturelle Substanz von Asphalt-schichten zu bewerten.

4.2 FEM-Untersuchung

4.2.1 Herangehensweise

Das Tragverhalten von Asphaltstraßen wird durch die Eigenschaften des stützenden Bodens und der lastverteilenden Asphalt-schichten beeinflusst. Um das Gesamtsystem besser verstehen zu können, wird zunächst das Tragverhalten des Bodens allein - die Erdstraße - untersucht. Anschließend wird das Tragverhalten der Straße mit dünner Asphalt-schicht weiter untersucht. Ausgehend von dem in der voran-gangenen Untersuchung erklärten Tragverhalten des Bodens, wird das Tragverhalten der Asphalt-straße genauer erklärt. Außerdem werden Spannungen der Straßen nicht nur unter dem Lasteintrags-punkt, sondern auch in verschiedenen Abständen zur Last untersucht. Die Einsenkung der Straße wird nicht aus Einzelpunkten gebildet, sondern als Ganzes. Mit dieser großflächigeren Analyse kann das Tragverhalten der Straße besser bewertet werden.

4.2.2 Modellierung

In abaqus wurde der homogene Boden unter der Ausnutzung der Symmetrie ein Quader mit einer Abmessung von 200 cm x 200 cm x 600 cm als ein Viertel einer Straßenfläche von 400 cm x 400 cm x 600 cm modelliert (vgl. Bild 4-1). Auf der Oberfläche des Bodens wurde dann eine 10 cm dicke Asphalt-schicht modelliert, wodurch eine zweischichtige Asphaltstraße simuliert wurde. Die FEM-Modelle wurden durch eine quadratische Flächenlast ($p = 0,707 \text{ N/mm}^2$, $a = 10 \text{ cm}$) belastet, die der Radauf-standsfläche in Bild 2-3 (Abschnitt 2.2) entspricht.

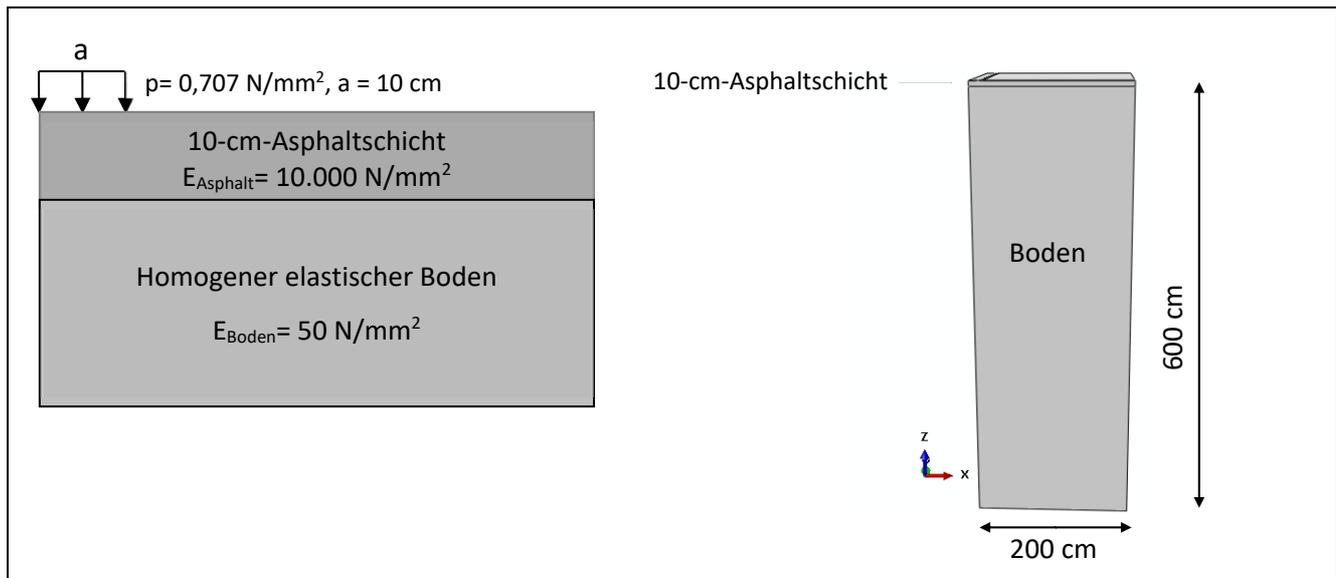


Bild 4-1 FEM-Modellierung; links: Aufbau der Asphaltstraße, rechts: Modell der Asphaltstraße in abaqus

4.2.3 Ergebnis der Untersuchung

In Bild 4-2 und Bild 4-3 sind die Horizontalspannungen und Verformungen der modellierten Erd- und Asphaltstraße dargestellt. Zunächst ist in Bild 4-2 eine ähnliche Verformung des Bodens wie nach der Halbraumtheorie von BOUSSINEQ (vgl. Bild 2-8 in Abschnitt 2.3.2.2.2) zu erkennen. Die Belastung führt zu einer Verformung des Bodens, die aus einem zentralen schüsselförmig nach oben gekrümmten (konvexen) Bereich und einem darum angeordneten nach unten gekrümmten (konkaven) Bereich besteht. Im Schnitt sind diese beiden Bereiche durch einen Wendepunkt voneinander getrennt. Weiterhin ist hier zu erkennen, dass der horizontale Spannungszustand des Bodens in diesen beiden Verformungsbereichen völlig unterschiedlich ist. Unter dem Lastmittelpunkt ist die Spannungsverteilung hyperbolisch mit einem Höchstwert an der Oberfläche, wie aus der Halbraumtheorie bekannt. In dem nach unten gekrümmten Bereich hat sie einen Höchstwert etwa bei der Tiefe der Lastbreite (10 cm).

Dieser Verformungs- sowie Spannungszustand des Bodens erklärt sich daraus, dass der Boden unter dem Lasteintragspunkt in vertikaler Richtung zusammengedrückt wird. Aufgrund der Zusammendrückung will er sich dort in horizontaler Richtung ausdehnen, was aber durch die angrenzenden Bodenbereiche größtenteils verhindert wird. Diese Verhinderung führt zu einer Überlagerung der Zusammendrückung des Bodens in vertikaler und horizontaler Richtung im Bereich neben dem Lasteintragspunkt sowie zu einer solchen hyperbolischen Verteilung der Horizontalspannung in diesem Bereich, wie in Bild 4-2 festgestellt wurde.

Ein solches Verformungsverhalten des Bodens ist auch bei der Asphaltstraße zu beobachten, es unterscheidet sich jedoch aufgrund der Asphalt-schicht geringfügig vom dem der Erdstraße. Die Asphalt-schicht „verteilt“ die Last auf eine größere Breite, was dazu führt, dass der konkave Bereich des Bodens größer ist und somit der Wendepunkt der Einsenkungsmulde bei der Asphaltstraße in einem größeren Abstand zur Last liegt als bei der Erdstraße (vgl. Bild 4-3). Auch hier ist zu beobachten, dass der Radius des konkaven Bereichs der Einsenkungsmulde der Asphaltstraße (der Abstand zwischen der Last und dem Wendepunkt der Mulde) tatsächlich dem im gebetteten Plattenmodell beschriebenen l -Wert entspricht.

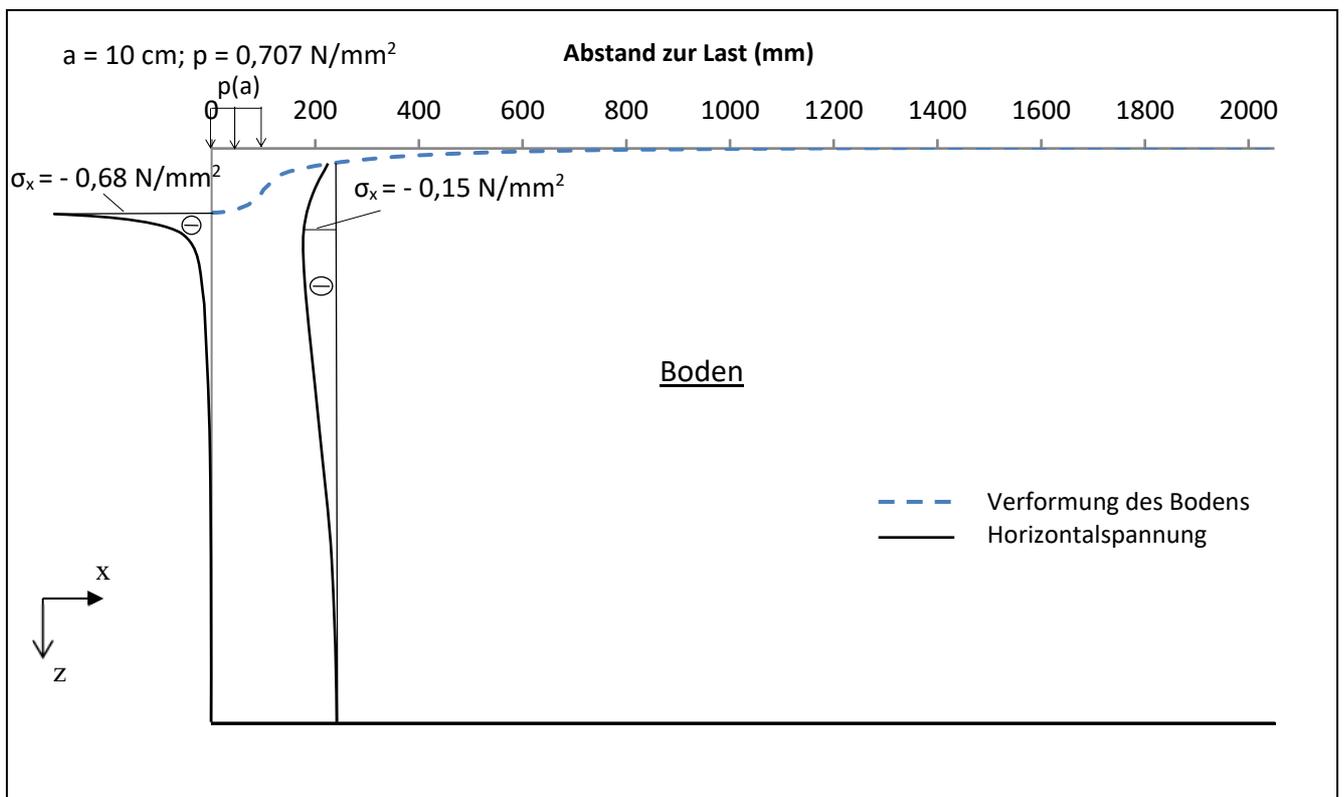


Bild 4-2 Die ausgewerteten Verformungen und Horizontalspannungen der modellierten Erdstraße

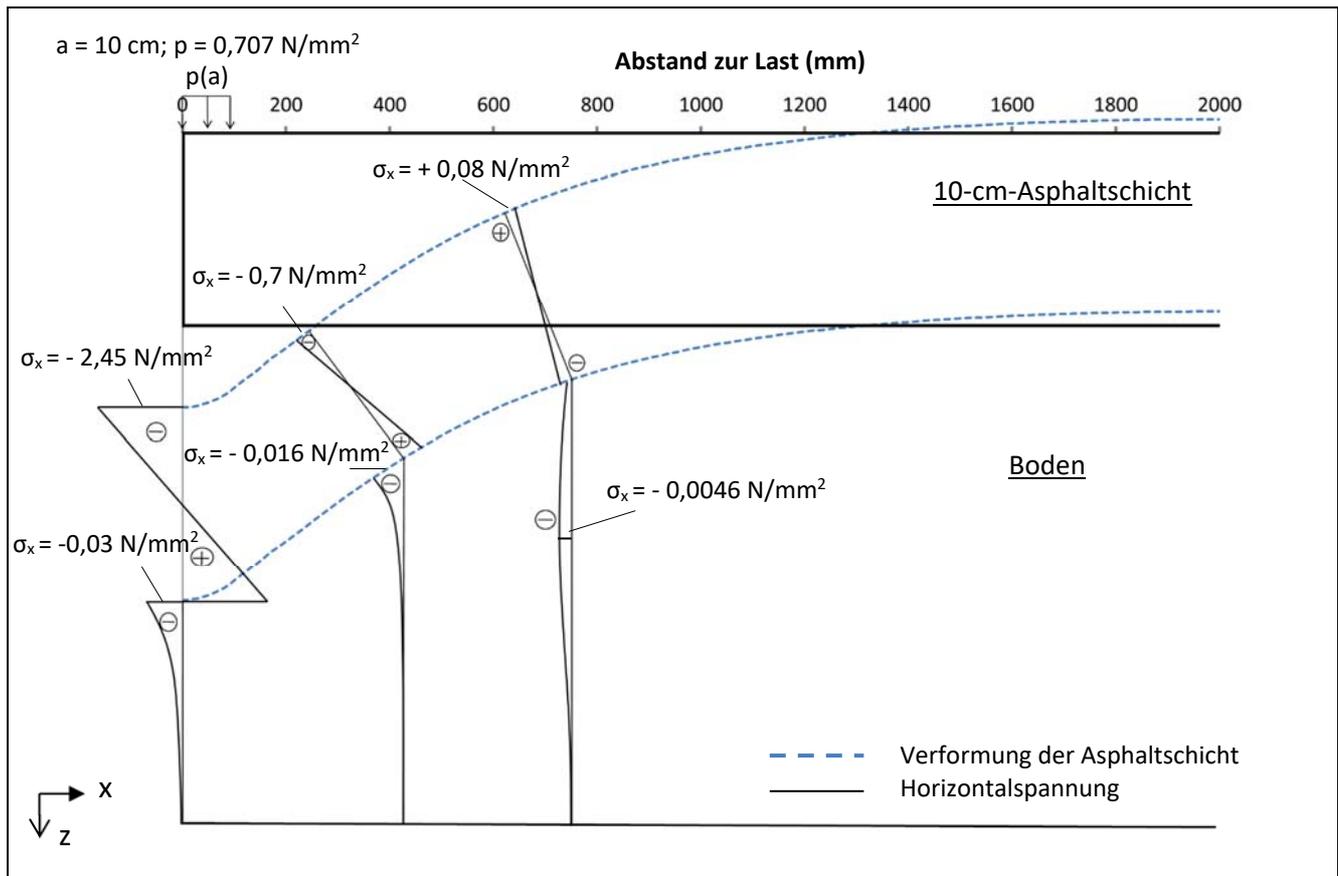


Bild 4-3 Die ausgewerteten Verformungen und Horizontalspannungen der modellierten Asphaltstraße

4.3 Schlussfolgerung

Zusammenfassend lassen sich aus diesem Kapitel die folgenden Punkte feststellen:

Erstens geht es beim Tragverhalten des Bodens nicht nur um die vertikale Zusammendrückung unter dem Lastangriffspunkt, wie in vielen Literaturstellen beschrieben wurde (vgl. Bild 2-4 in Abschnitt 2.3.1 bzw. Bild 2-11 in Abschnitt 2.3.2.3.1), sondern auch um die Überlagerung der vertikalen und horizontalen Zusammendrückung im Bereich neben dem Lastangriffspunkt. Die Verformung einer Straße, unabhängig davon, ob es sich um eine Erdstraße oder eine Asphaltstraße handelt, ist somit immer durch eine Einsenkungsmulde gekennzeichnet, die aus zwei verschiedenen Bereichen mit unterschiedlicher Krümmung besteht, wie bisher immer erläutert wurde.

In diesem Zusammenhang wird das Tragverhalten des Bodens bzw. einer Straßenschicht, dass sie sich vertikal unter der Lastangriffsfläche und horizontal neben der Lastangriffsfläche zusammendrückt, im weiteren Verlauf der Arbeit vom Verfasser als Halbraumtragwirkung bezeichnet. Bild 4-4 zeigt die

charakteristischen Spannungszustände der Halbraumtragwirkung in Abhängigkeit vom Verformungsbereich von Straßen.

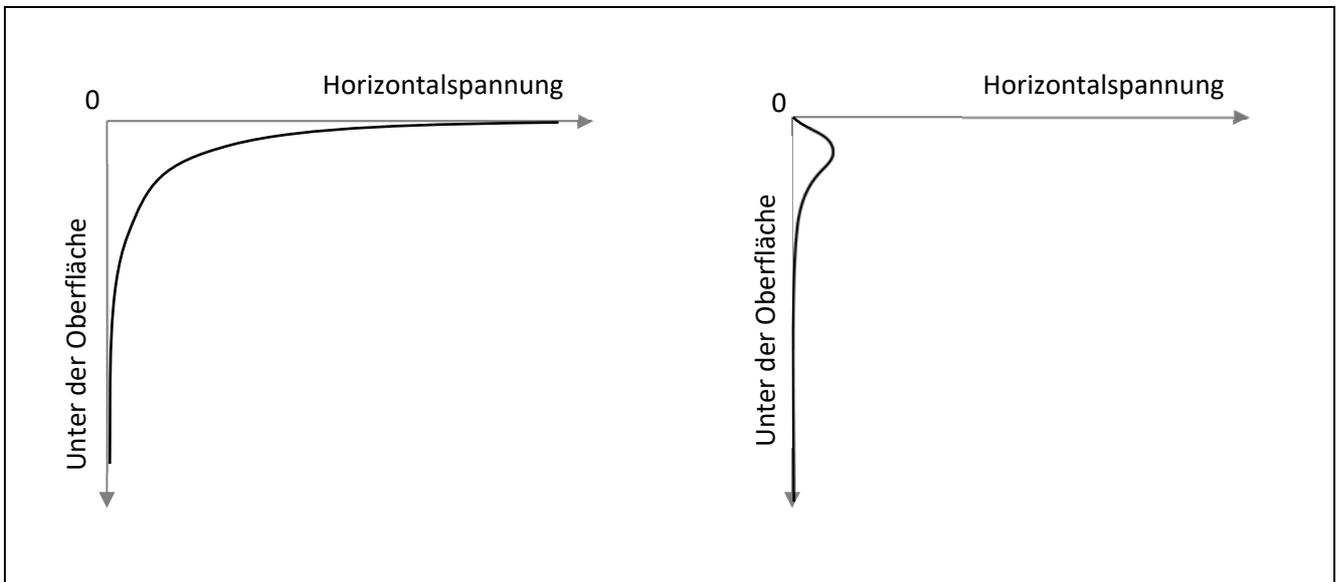


Bild 4-4 Charakteristische Horizontalspannungen der Halbraumtragwirkung: links: unter der Lastangriffsfläche; rechts: neben der Lastangriffsfläche

Zweitens lässt sich das Gesamttragverhalten der Asphaltstraße so erklären, dass die Asphaltdecke und der Boden eine Gesamtkonstruktion bilden, in der die Last verteilt wird. Die Asphaltdecke übernimmt aufgrund ihrer Plattentragwirkung die Rolle der lastverteilenden Schicht der Konstruktion. Wie oben beschrieben, erfolgt die Lastverteilung auch im Boden. Dementsprechend ist die Einsenkungsmulde der Asphaltstraße durch einen konkaven und konvexen Bereich gekennzeichnet. Wenn man den Radius des konkaven Bereichs der Mulde aus der Untersuchung der Verformung von Straßen feststellen kann, lassen sich der $|E|_{\text{Asphalt}}$ und E_{Boden} durchaus möglichst zerstörungsfrei bewerten. Die Idee von GRÄTZ, diesen Radius (den l -Wert) aus den vom FWD gemessenen Einsenkungen zu bestimmen, ist daher sinnvoll.

In Bild 4-5 ist das Gesamttragverhalten von Asphaltstraßen mit einer dünnen Asphaltdecke dargestellt.

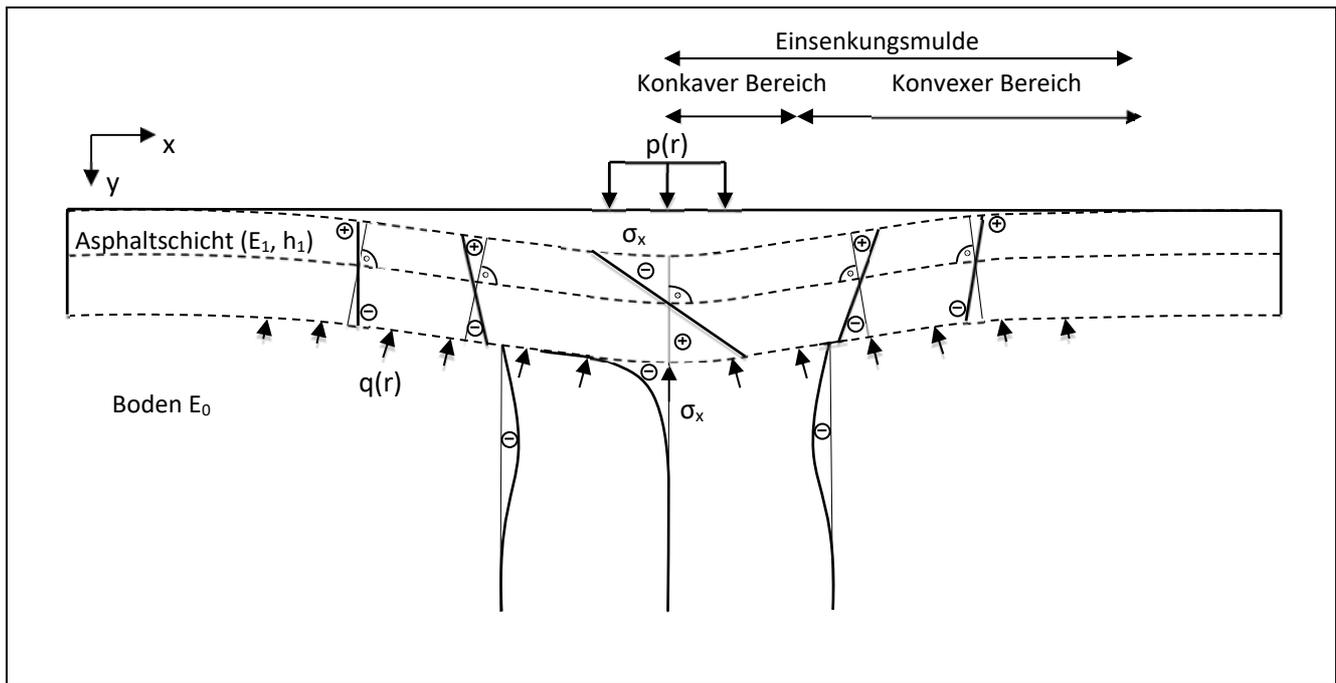


Bild 4-5 Das Gesamttragverhalten von Asphaltstraßen mit dünner Asphaltdecke

Drittens bewirkt die Lastverteilung der Straße durch die Asphaltdecke eine horizontale Vergrößerung der Einsenkungsmulde (der Wendepunkt zwischen den konkaven und konvexen Bereichen ist weiter vom Lastmittelpunkt entfernt und die Einsenkung unter dem Lasteintragungspunkt ist geringer). Das erklärt möglicherweise auch die in Kapitel 3 aufgezeigten Fragen im Zusammenhang mit der Untersuchung von STRAUBE u.a. [2010] (vgl. Bild 3-1). Bei dem von den Autoren untersuchten Oberbau befindet sich der Wendepunkt der Einsenkungsmulde in einem Abstand von etwa 90 cm zur Last. Erhöht man die Steifigkeit der Asphaltdecke, so ändern sich auch die Einsenkungen im konvexen Bereich der Mulde und damit auch die Einsenkung im Abstand 180 cm zur Last (w_{180}). Der von den Autoren untersuchte Einfluss des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ auf die Lastverteilung der Asphaltdecke ist jedoch gering. Daher war die Änderung von w_{180} mit der Erhöhung vom $|E|_{\text{Asphalt}}$ nicht nachweisbar. Wird in diesem Fall anstelle von $|E|_{\text{Asphalt}}$ die Asphaltdecke (h_{Asphalt}) erhöht, soll die Änderung der w_{180} deutlich sein, da die h_{Asphalt} die Größenordnung den l -Wert bestimmt.

Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs wurde die FEM-Modellierung in Abschnitt 4.2.2, bei der der Wendepunkt der Mulde in einem Abstand von ca. 40 cm (w_{40}) zur Last (vgl. Bild 4-3) liegt, mit zwei verschiedenen Varianten fortgesetzt. Die Variante 1 ist ähnlich wie bei STRAUBE u.a. [2010], indem der Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ variiert wurde. In Variante 2 wurde die Asphaltdecke h_{Asphalt} verändert. Die Einsenkungsmulden dieser zwei Varianten wurden in Bild 4-6 und Bild 4-7 zu-

sammengestellt. Die Bilder zeigen, dass in Variante 1 mit der Erhöhung vom $|E|_{\text{Asphalt}}$ der Radius des konkaven Bereichs vergrößert wurde, was zu einer Änderung der w_{40} führt, die allerdings sehr gering ist. Bei Variante 2 ist die Änderung der Einsenkungen hinter der w_{40} einschließlich der w_{180} mit der Erhöhung der Asphaltstärke deutlich erkennbar.

Daraus ist ersichtlich, dass die Einsenkungen der Straße zwar im engen Zusammenhang mit ihren strukturellen Substanzparametern stehen, dass es aber nicht ausreicht, sie ausschließlich anhand einer Einsenkung zu bewerten, unabhängig davon, ob diese in dem konkaven oder konvexen Bereich der Mulde liegt. Vielmehr muss die gesamte Mulde - zumindest der ganze konkave oder konvexe Bereich der Mulde - berücksichtigt werden.

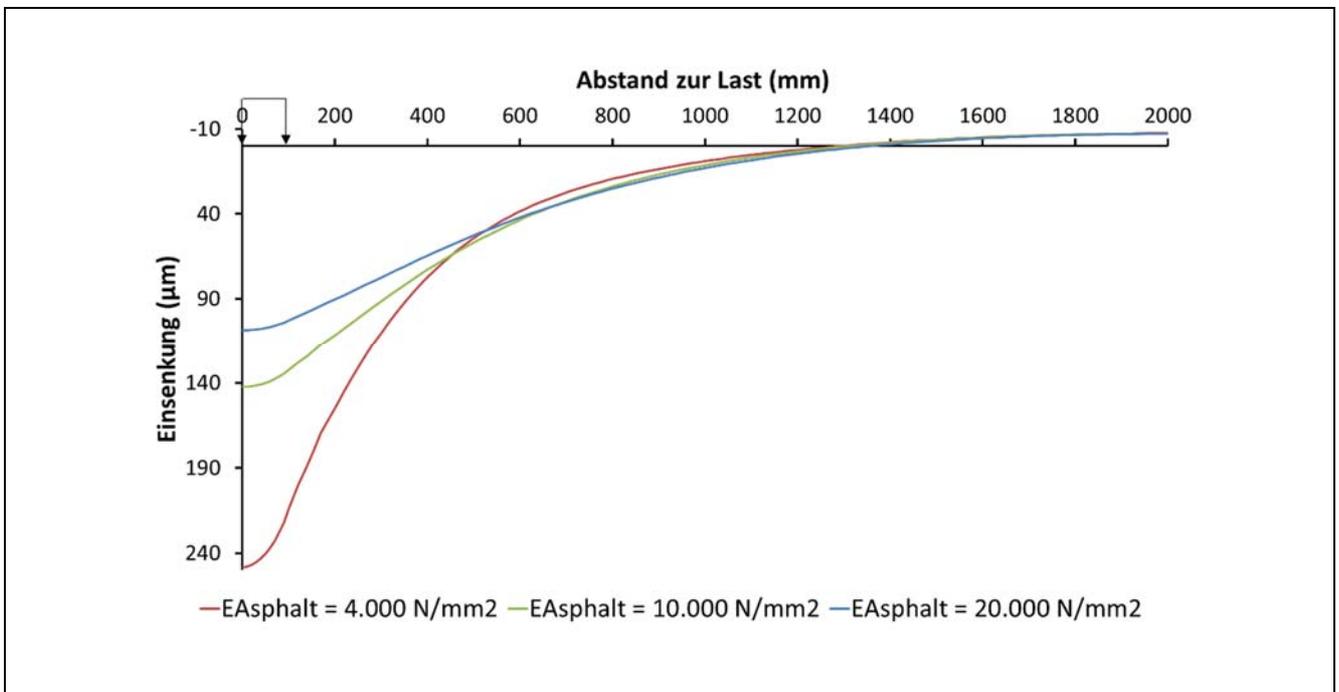


Bild 4-6 Variante 1: Änderung der Einsenkungen der Straße durch Erhöhung des $|E|_{\text{Asphalt}}$

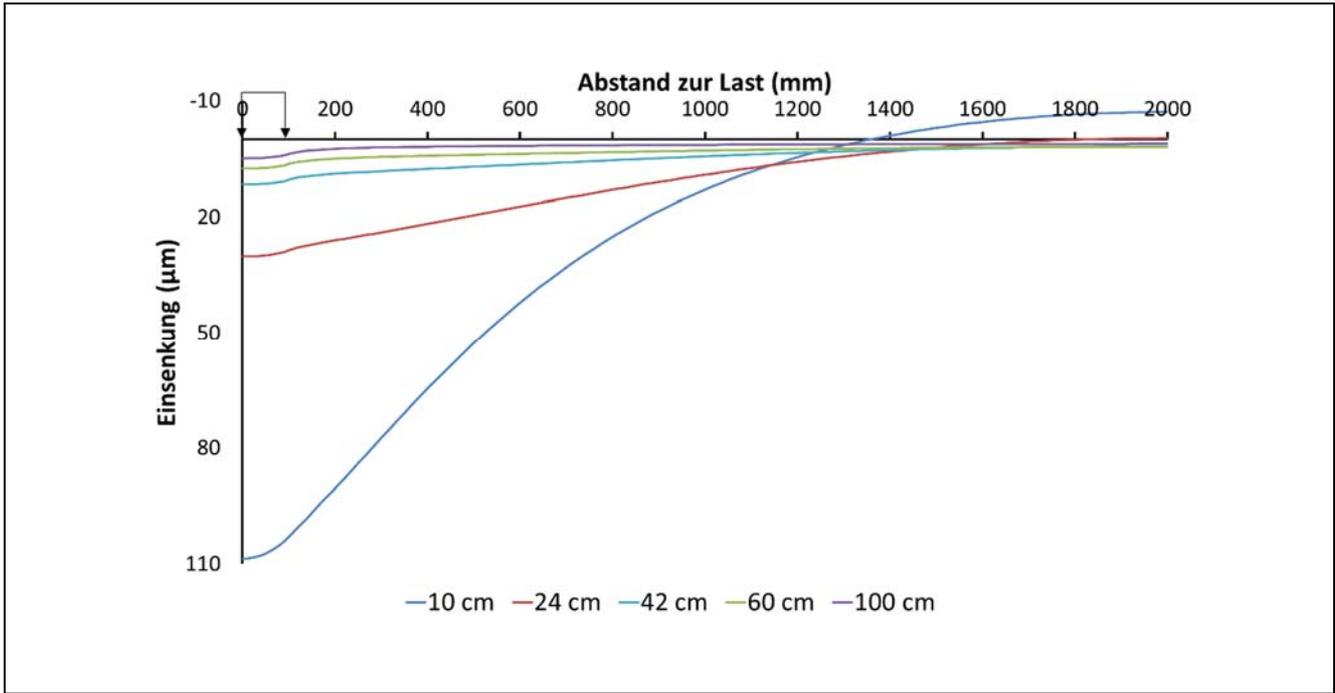


Bild 4-7 Variante 2: Änderung der Einsenkungen der Straße durch Erhöhung der h_{Asphalt}

5 Vertiefte Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen mit dicken Asphaltsschichten

5.1 Einleitung

Im vorangegangenen Kapitel war deutlich zu erkennen, dass sich in der Asphaltsschicht eine Plattentragwirkung ausbildet. Die Frage ist nun, wie das mit den Ergebnissen von GERLACH [1968] in Einklang zu bringen ist, der mit dem mehrschichtigen Halbraummodell gearbeitet hat. Der wesentliche Unterschied ist, dass GERLACH dickere Asphaltsschichten modelliert hat. Je nach Dicken und Steifigkeiten dürften lastverteilende Asphaltsschichten ein unterschiedliches Tragverhalten aufweisen. Deswegen werden in diesem zweiten Schritt der Untersuchung der Arbeit die Asphaltsschichten mit unterschiedlichen Dicken h_{Asphalt} und Steifigkeitsmodulen des Asphaltmaterials $|E|_{\text{Asphalt}}$ umfangreich modelliert, um ihr Tragverhalten tiefer zu bewerten. So kann geprüft werden, ob die Entwicklung der Rückrechnungsmethode mit dem gebetteten Plattenmodell von GRÄTZ [2009] sachgerecht ist.

5.2 FEM-Untersuchung

5.2.1 Modellierung

Hierfür wurde eine dreischichtige Asphaltstraße modelliert, um auch den Einfluss der ungebundenen Tragschicht auf die Einsenkungen der Fahrbahn zu berücksichtigen. Die Dicke der ungebundenen Tragschicht wurde mit 50 cm und ihr E-Modul in Anlehnung an die RDO Asphalt 09 mit 100 N/mm^2 angenommen. Die Straße wird von einer vertikal statischen quadratischen Flächenlast ($p = 0,707 \text{ N/mm}^2$, $a = 10 \text{ cm}$) belastet. Bild 5-1 zeigt das FEM-Modell der so modellierten dreischichtigen Asphaltstraße.

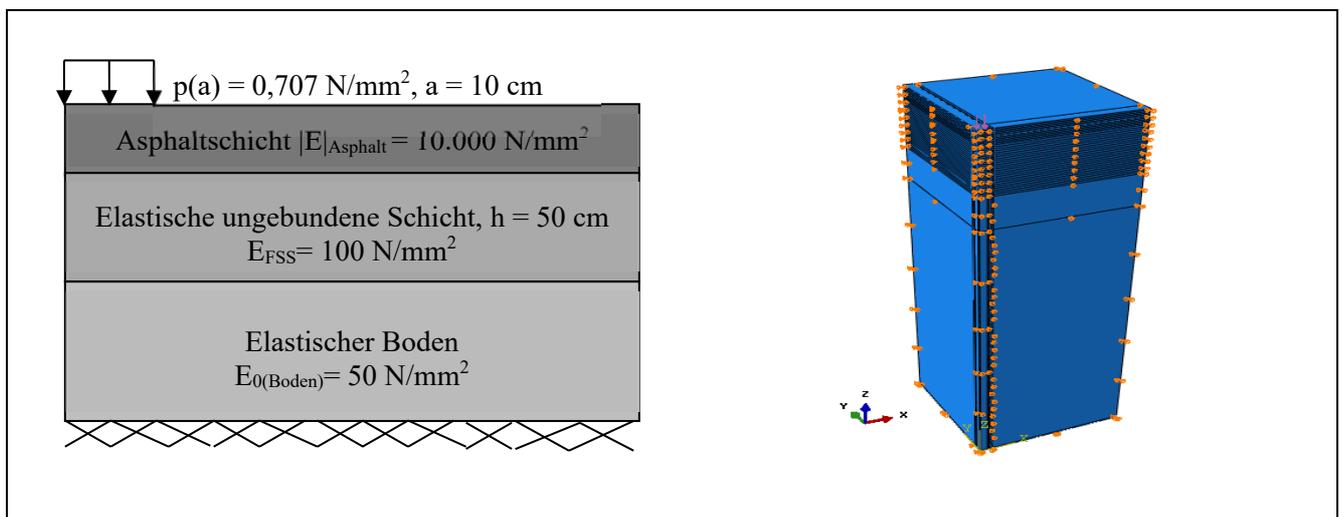


Bild 5-1 Die Modellierung der dreischichtigen Asphaltstraße in abaqus

Tabelle 5-1 fasst die Untersuchungsvarianten zusammen. Die untersuchten Asphaltstärken orientieren sich an der RStO [FGSV, 2012]: 10 cm für Anliegerstraßen, 24 cm für Hauptstraßen, 42 cm für Autobahn, 60 cm und 100 cm sind für Flugbetriebsflächen. Der Steifigkeitsmodul des Asphalts E_{Asphalt} wurde mit 10.000 N/mm^2 angenommen, der einem üblichen Verhältnis zwischen der Asphalt- und Frostschutzschicht von etwa 100 entspricht.

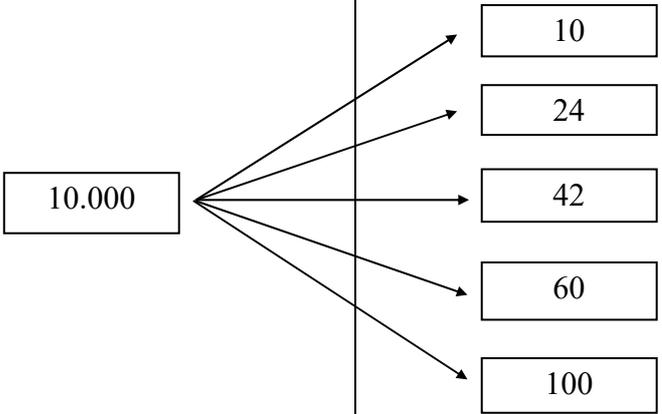
Eigenschaft des Asphalts	Belastung	$E_{\text{Asphalt}} [\text{N/mm}^2]$	$h_{\text{Asphaltschicht}} [\text{cm}]$
Elastisch	statisch	10.000	

Tabelle 5-1 Die Untersuchungsvarianten der elastischen Asphaltstärken unter statischer Belastung

5.2.2 Ergebnis der Untersuchung

Als Ergebnis der FEM-Modellierungen wurden die Verformungen und Spannungen der Asphalt- und Schottertragschicht der in Tabelle 5-1 modellierten Asphaltstraßen in den Bildern von 5-2 bis 5-6 zusammengestellt. Die genauen Werte der Spannungen und Verformungen der modellierten Asphaltstärken sind in Anhang 5 (Abschnitt 14) zu finden.

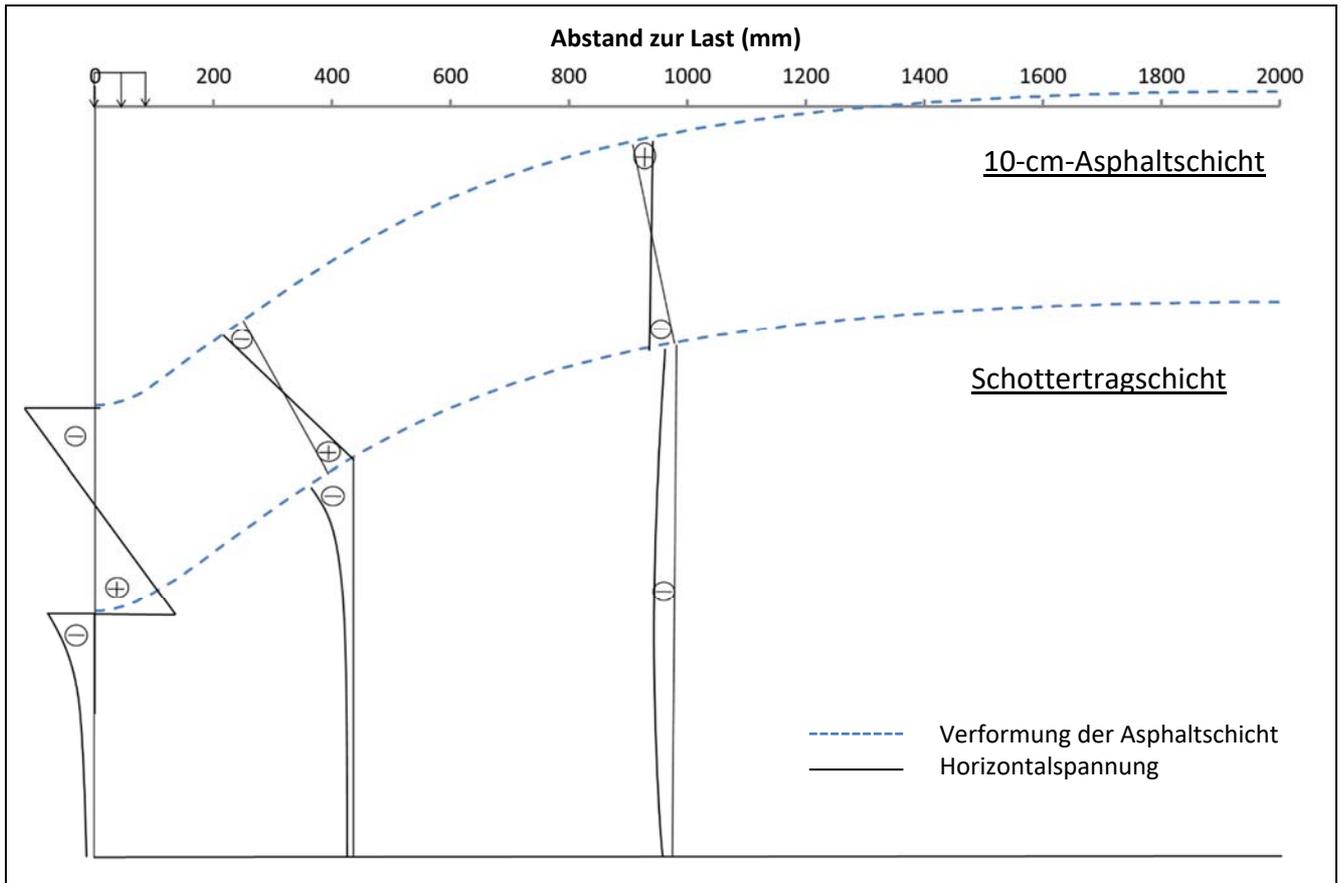


Bild 5-2 Der Verformungs- und Horizontalspannungszustand der 10 cm dicken Asphaltschicht und der Schottertragschicht

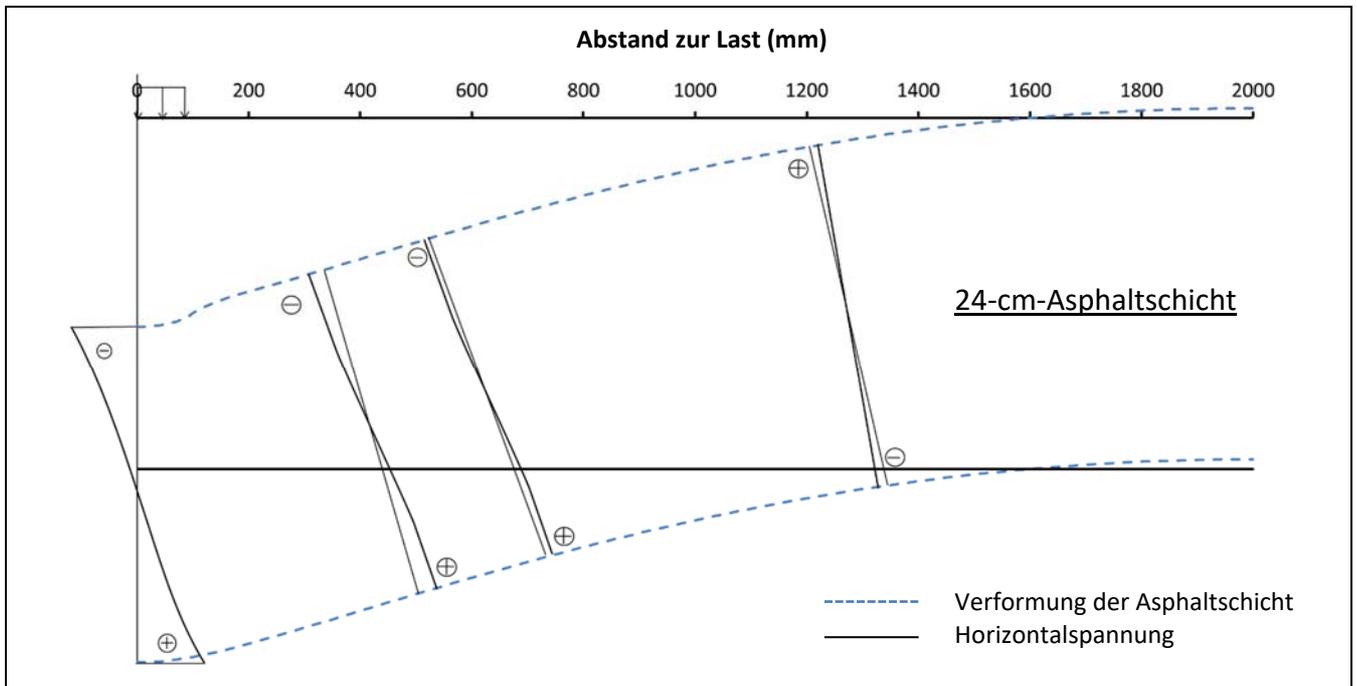


Bild 5-3 Der Verformungs- und der horizontale Spannungszustand der 24 cm dicken Asphaltschicht

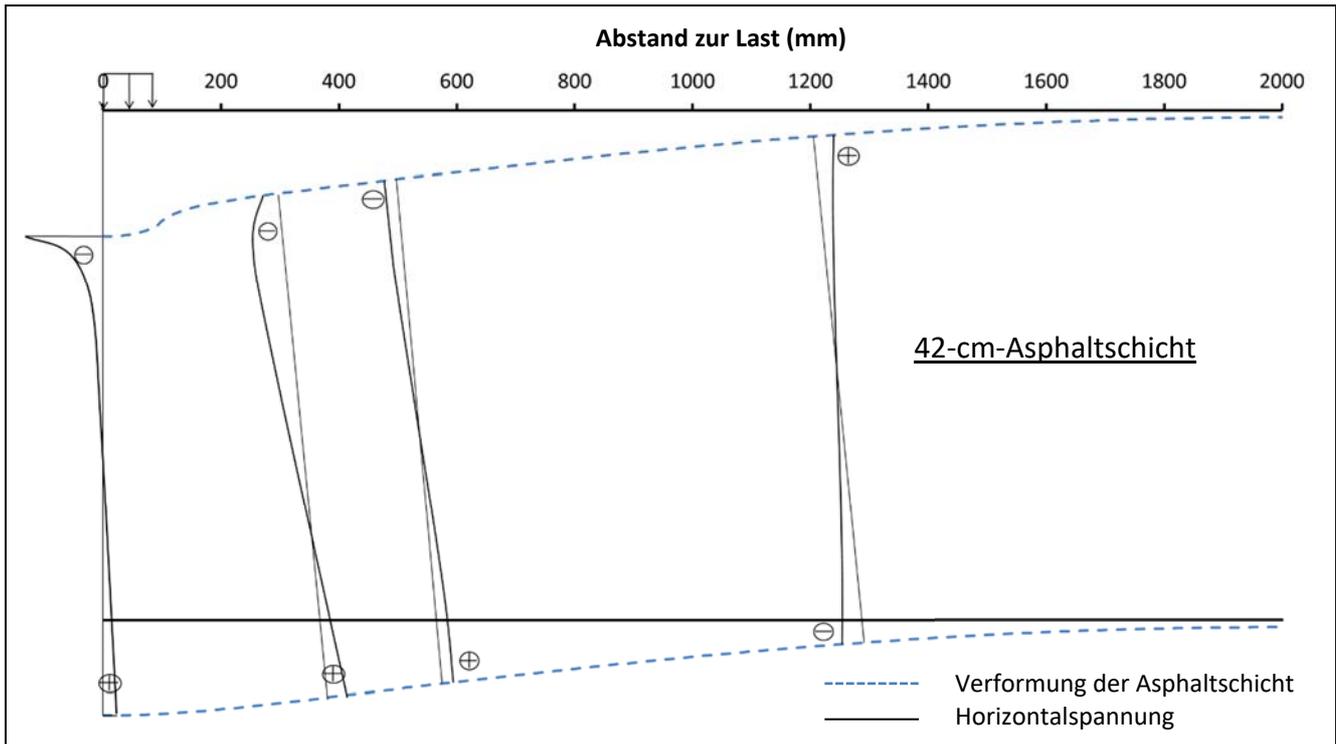


Bild 5-4 Der Verformungs- und der horizontale Spannungszustand der 42 cm dicken Asphaltschicht

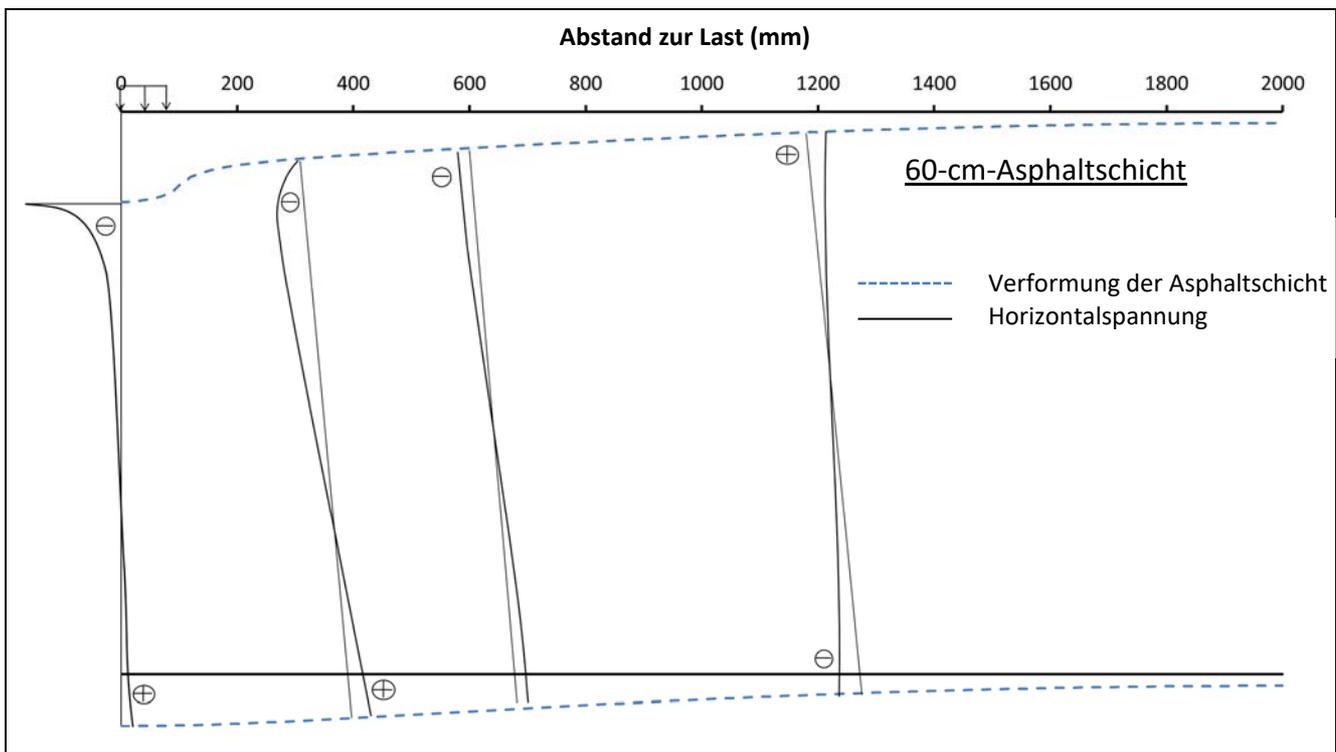


Bild 5-5 Der Verformungs- und der horizontale Spannungszustand der 60 cm dicken Asphaltschicht

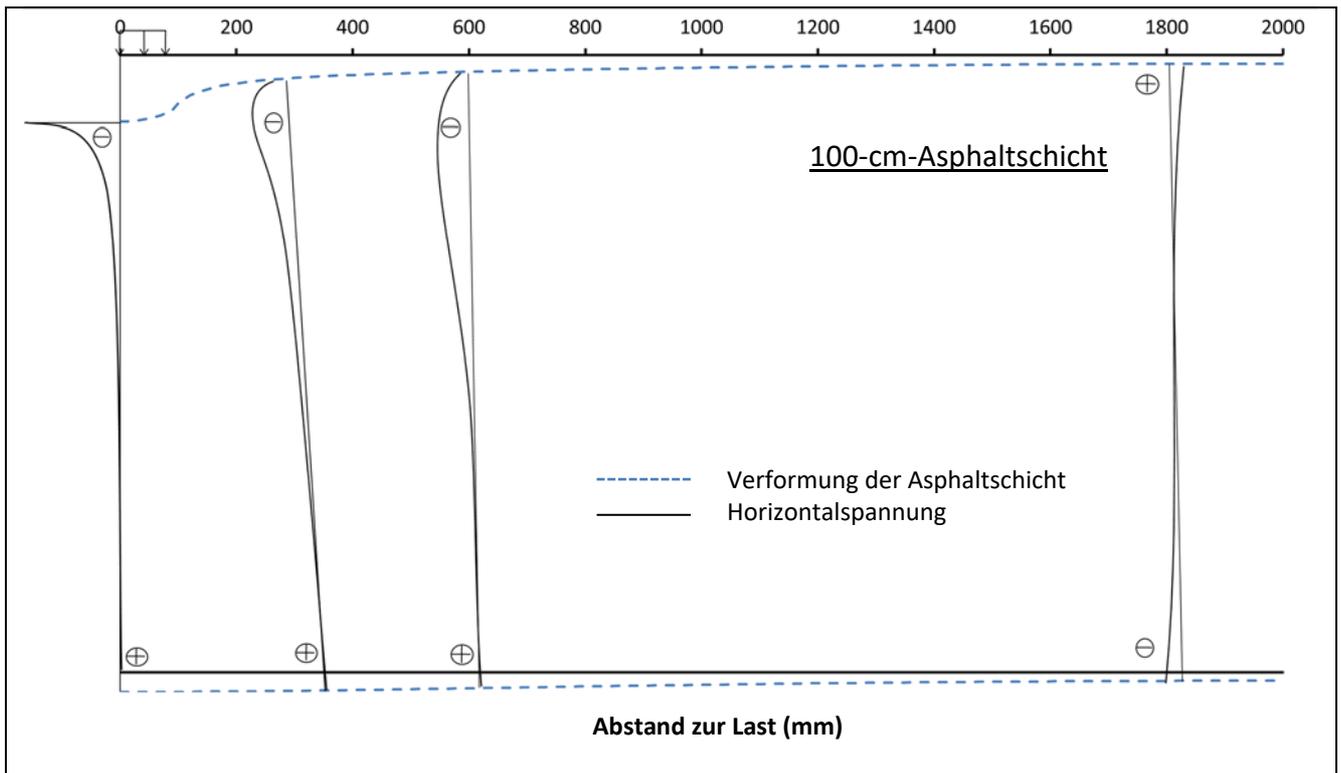


Bild 5-6 Der Verformungs- und der horizontale Spannungszustand der 100 cm dicken Asphaltdecke

Zunächst zeigt Bild 5-2, dass die Schottertragschicht eine Halbraumtragwirkung aufweist. Als nächstes ist aus den Bildern 5-3 bis 5-6 ersichtlich, dass bei Dicken, die den bei [GERLACH, 1968] angesetzten (30 cm) entsprechen, ein ähnliches Tragverhalten der Asphaltdecke im Lastangriffsbereich zu beobachten ist, d.h. die Belastung führt in diesem Bereich zu einem nichtlinearen und die Biegedruckspannung an der Oberseite ist um ein Vielfaches größer als die Biegezugspannung an der Unterseite. Durch die im vorherigen Kapitel festgestellte Halbraumtragwirkung kann hier festgehalten werden, dass diese nichtlinearen Spannungszustände der Asphaltdecken aus der Überlagerung der Platten- und Halbraumtragwirkung herrühren. Der Grund dafür ist, dass sich die Asphaltdecke unter dem Lastangriffsbereich durchbiegt. Zugleich wird sie dort aber auch zusammengedrückt. Die Durchbiegung der Asphaltdecke erzeugt die Biegespannungen, während die Zusammendrückung diese Spannungen nichtlinear macht (vgl. die Verformung der Asphaltdecke in den Bildern 5-3 bis 5-6).

Die Erklärung, dass sich die Spannungsverteilung aus einer Überlagerung von Platten- und Halbraumtragwirkung ergibt, wird auch dadurch unterstützt, dass bei allen Dicken außerhalb des Lastangriffsbereichs – zumindest ab einer Entfernung von der doppelten Dicke der lastverteilenden Asphaltdecke, eine Plattentragwirkung deutlich erkennbar ist.

Diese Überlagerung ändert sich jedoch sehr stark bei unterschiedlicher Asphaltstärke. Daher erschien es sinnvoll, die FEM-Modellierung fortzusetzen, um das Tragverhalten der Asphaltstärke im Lastangriffsbereich tiefer zu untersuchen. Mit den daraus gewonnenen neuen Erkenntnissen können die verkehrsbedingten Schäden an den Asphaltstärken sowie ihre Nutzungsdauer besser verstanden werden.

5.3 Erweiterung der FEM-Modellierung zur vertieften Untersuchung der Überlagerung der Platten- und Halbraumtragwirkung der Asphaltstärke im Lastangriffsbereich

Die FEM-Modellierung in Bild 5-1 wurde zunächst mit verschiedenen $|E|_{\text{Asphalt}}$ fortgesetzt. In Bild 5-7 sind die ausgewerteten Horizontalspannungen der Asphaltstärken im Lastmittelpunkt entsprechend den Szenarien (Fällen) in Tabelle 5-2 zusammengestellt.

Eigenschaft vom Asphalt	Belastung	$E_{\text{Asphalt}} [\text{N/mm}^2]$	$h_{\text{Asphaltstärke}} [\text{cm}]$
Elastisch	Statisch	200	10
		4.000	24
		10.000	42
		20.000	60
			100

Tabelle 5-2 Erweiterung der FEM-Modellierung der elastischen Asphaltstärken unter statischer Belastung

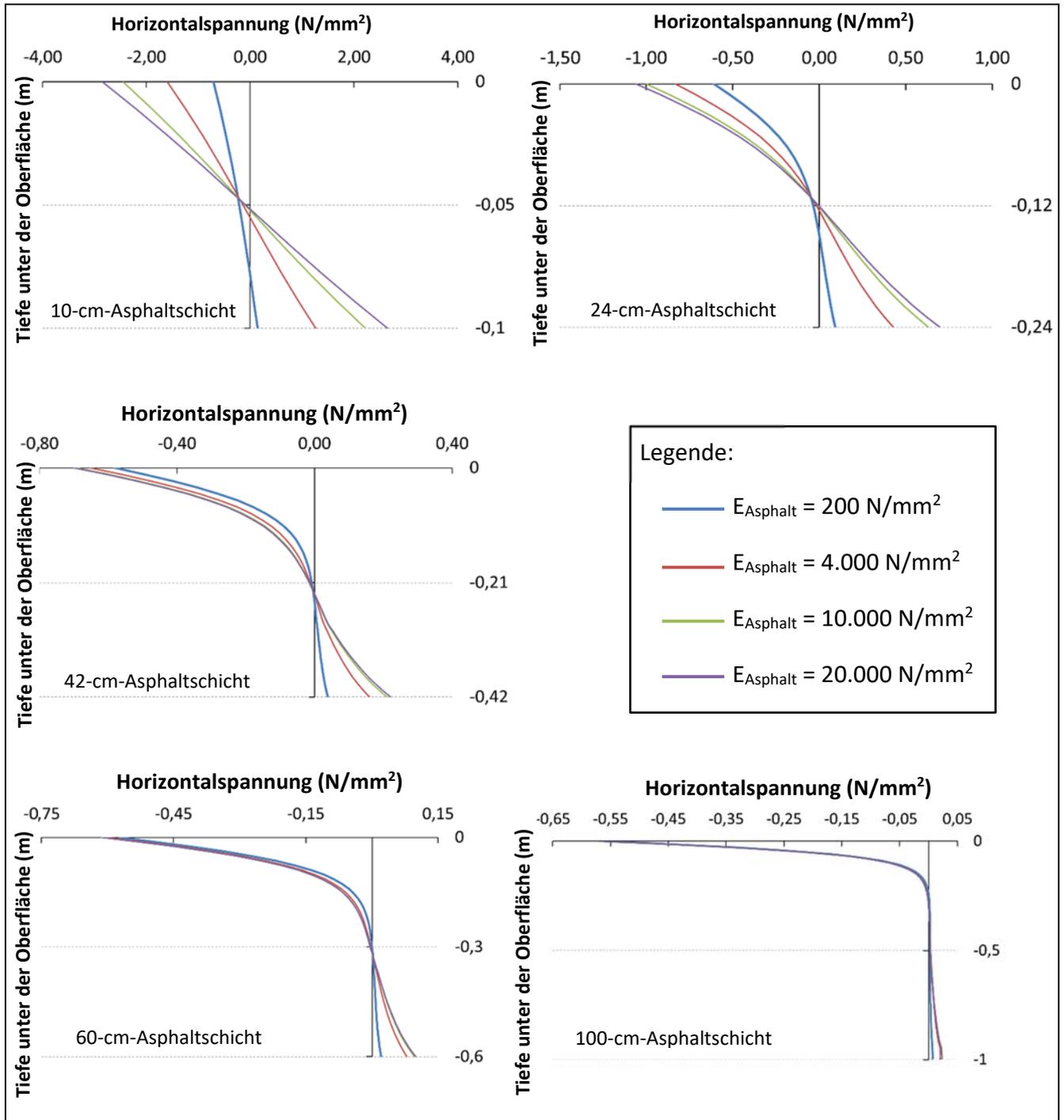


Bild 5-7 Horizontalspannungszustände der in Tabelle 5-2 aufgeführten modellierten Asphalt-schichten unter dem Lastmittelpunkt

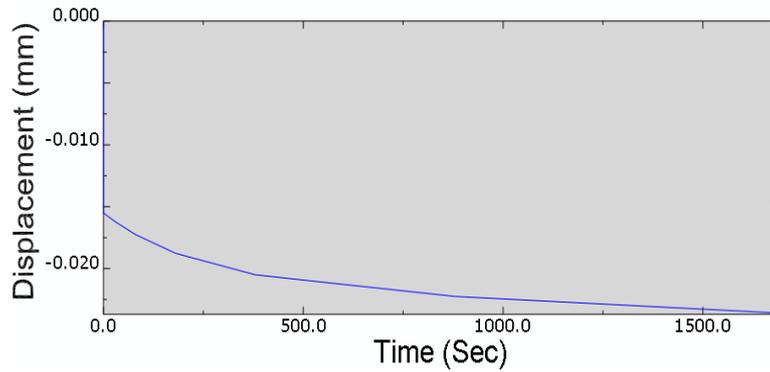
Bild 5-7 zeigt, dass sich bei Asphaltsteifigkeiten, die nur geringfügig über denen der darunter liegenden Schichten liegen (blaue Linien im Bild), unabhängig von der Dicke eine ausgeprägte Halbraumtragwirkung ergibt: direkt unter der Last hohe Druckspannungen in der Höhe der Belastungsspannungen; an der Unterseite vergleichsweise kleine Zugspannungen; dazwischen die charakteristische kurvenförmige Abnahme.

Je steifer das Asphaltmaterial bzw. je höher der $|E|_{\text{Asphalt}}$ (und damit ihre Lastverteilungswirkung) ist, desto größer werden die überlagernden Biegespannungen, also Druckspannungen an ihren Ober- und Zugspannungen an ihrer Unterseite. Die Dicke der Asphaltsschicht wirkt sich in zweierlei Richtung aus: sie führt zum einen zur besseren Lastverteilung, was zwar auch zu größeren Biegemomenten in der Schicht führt, aber damit auch zu kleineren Verformungen. Diese Lastverteilung erlaubt vor allem (und dieser Effekt überwiegt) über die größeren inneren Hebelarme, so dass diese Biegemomente mit kleineren Spannungen an Ober- und Unterseite aufgenommen werden können. In der Summe führen damit größere Dicken zu kleineren Spannungen aus der Plattentragwirkung sowie zu kleineren horizontalen Zugspannungen an der Unterseite der Asphaltsschicht, was auf eine Erhöhung der Lebensdauer der Asphaltsschicht im Hinblick auf die Rissbildung hindeutet (Abschnitt 2.4). Andererseits führt dies aber dazu, dass die verkehrsbedingten Schäden der Asphaltsschicht mit der Bildung von Spurrinnen auf der Fahrbahn deutlicher werden. Bei sehr dicken Schichten ist die Zugspannung an der Unterseite der Asphaltsschicht fast nicht mehr erkennbar.

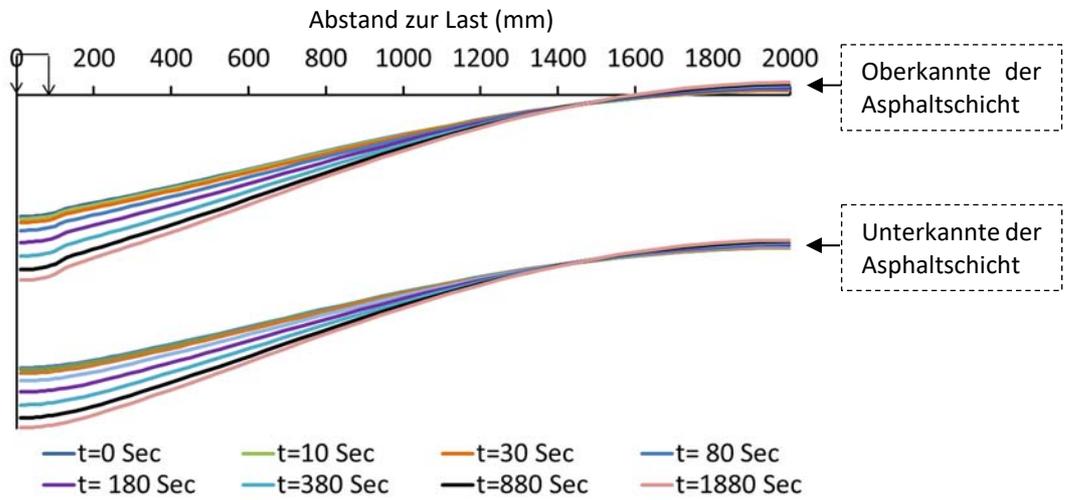
Die Frage ist nun noch, inwieweit die viskoelastischen Eigenschaften des Asphalts sich auf die Überlagerung der Halbraum- und Plattentragwirkung der Asphaltsschichten auswirken. Dazu wurde die 24 cm dicke Asphaltsschicht mit einem viskoelastischen Materialmodell für den Fall $|E|_{\text{Asphalt}} = 20.000 \text{ N/mm}^2$ modelliert und ihr Tragverhalten unter einer statischen Belastung und einer Impulskraft untersucht. Die für die Modellierung verwendeten viskoelastischen Parameter des Asphalts wurden anhand eines Relaxationsversuchs von MINHOTO u.a. [2007] ausgewertet (vgl. Abschnitt 12).

In Bild 5-8 und Bild 5-9 sind die Verformung und die Spannungen der modellierten 24 cm dicken viskoelastischen Asphaltsschicht jeweils unter einer statischen Belastung und einer quasi statisch berechneten Impulskraft zusammengestellt.

Einsenkung der Straße unter dem Lastmittelpunkt je nach der Belastungsdauer



Verformung der Asphaltsschicht je nach der Belastungsdauer



Horizontalspannungen der Asphaltsschicht unter dem Lastmittelpunkt (links) und im Abstand von 30 cm vom Lastmittelpunkt (rechts)

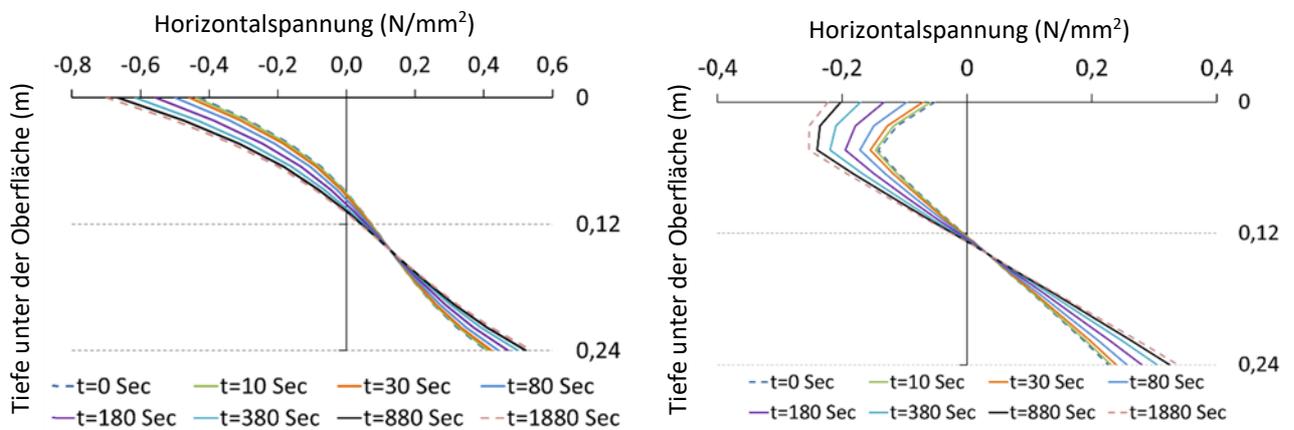


Bild 5-8 Tragverhalten der viskoelastischen Asphaltsschicht unter einer statischen Last

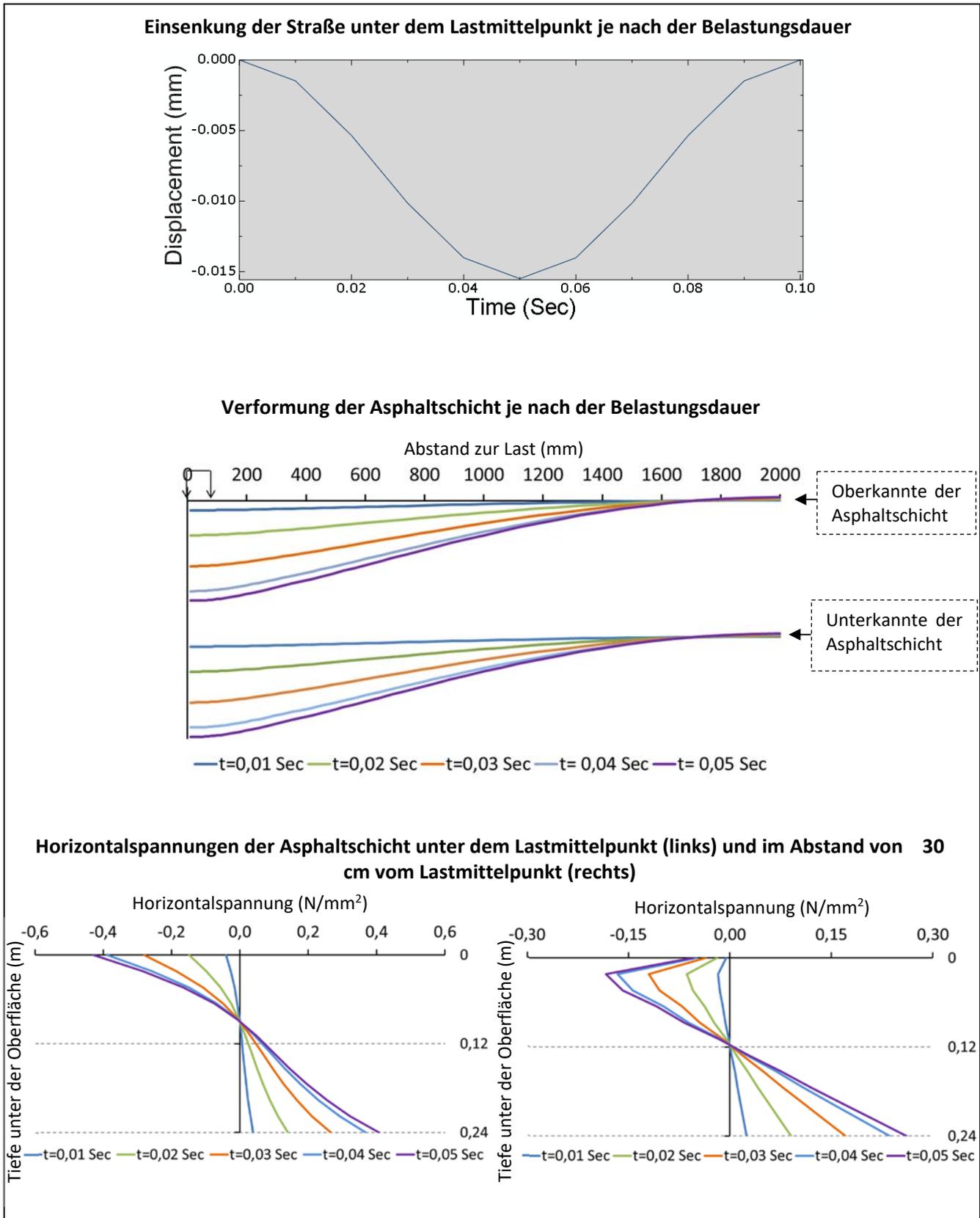


Bild 5-9 Tragverhalten der viskoelastischen Asphaltsschicht unter einer quasi statisch berechneten Impuls- kraft

Bild 5-8 und Bild 5-9 zeigen, dass die Überlagerung der Platten- und Halbraumtragwirkung bei statischer Belastung mit zunehmender Lastdauer stärker wird, während sie bei dynamischer Belastung nicht deutlich zu erkennen ist. Dies lässt sich dadurch erklären, dass unter statischer Belastung das Kriechverhalten der viskoelastischen Eigenschaft vom Asphalt, wie es die Kelvin-Voigt-Gruppe zeigt (vgl. Bild 10-6, Abschnitt 10.4.3), mit der Belastungsdauer zunimmt und somit die Halbraumtragwirkung bei Überlagerung deutlicher wird. Im Gegensatz dazu ist die Asphaltenschicht unter einer kurzzeitigen Belastung nicht so stark zusammengedrückt wie bei einer statischen Belastung (vgl. fehlende „Einbuchtung“ in der Verformung der Asphaltenschicht unter der Belastung in Bild 5-9). Dieses Verhalten der Asphaltenschicht unter statischer und dynamischer Belastung erklärt, warum die Spurrinnen in Parkbereichen oder in Bereichen mit stehendem Verkehr, wie Kreuzungen oder Bushaltestellen, häufiger anzutreffen sind als in Bereichen mit fließendem Verkehr.

5.4 Schlussfolgerung

Zusammenfassend lassen sich aus diesem Kapitel die folgenden Punkte feststellen:

Erstens entspricht die Spannungsverteilung der Asphaltenschicht im Lastangriffsbereich nicht der Plattentragwirkung. Vielmehr überlagern sich dort die Spannungsverteilung der Platten- und Halbraumtragwirkung. Wie die Überlagerung ausfällt, hängt von verschiedenen Faktoren wie der Asphaltstärke h_{Asphalt} , dem Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$, dem viskosen Verhalten des Asphalts, der Belastungsart sowie der Tragfähigkeit des darunter liegenden Halbraums ab. Je dünner die Asphaltenschicht ist, desto mehr überwiegt hier die Plattentragwirkung, je dicker sie ist, umso mehr die Halbraumtragwirkung.

Abseits des Lastangriffsbereichs ist jedoch immer eine Spannungsverteilung entsprechend der Plattentragwirkung der Asphaltenschicht zu beobachten. Daher wird diese Überlagerung vom Verfasser als „lokaler Effekt der gebetteten Platte“ bezeichnet. In Bild 5-10 und Bild 5-11 sind die charakteristischen Spannungszustände des lokalen Effekts dargestellt. Dementsprechend wurde das im vorherigen Kapitel festgestellte Tragverhalten von Asphaltstraßen (vgl. Bild 4-4) auch in Bild 5-12 überarbeitet.

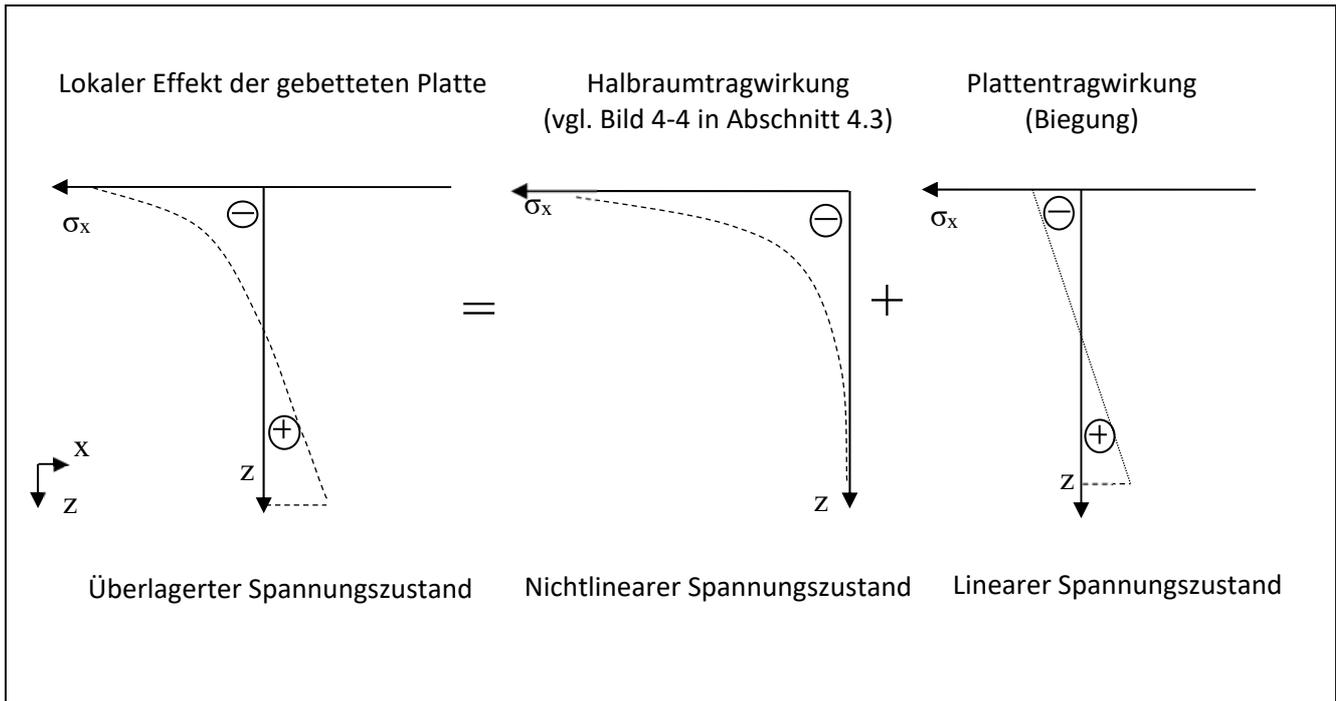


Bild 5-10 Charakteristischer Spannungszustand der Asphaltsschicht unter der Lastangriffsfläche

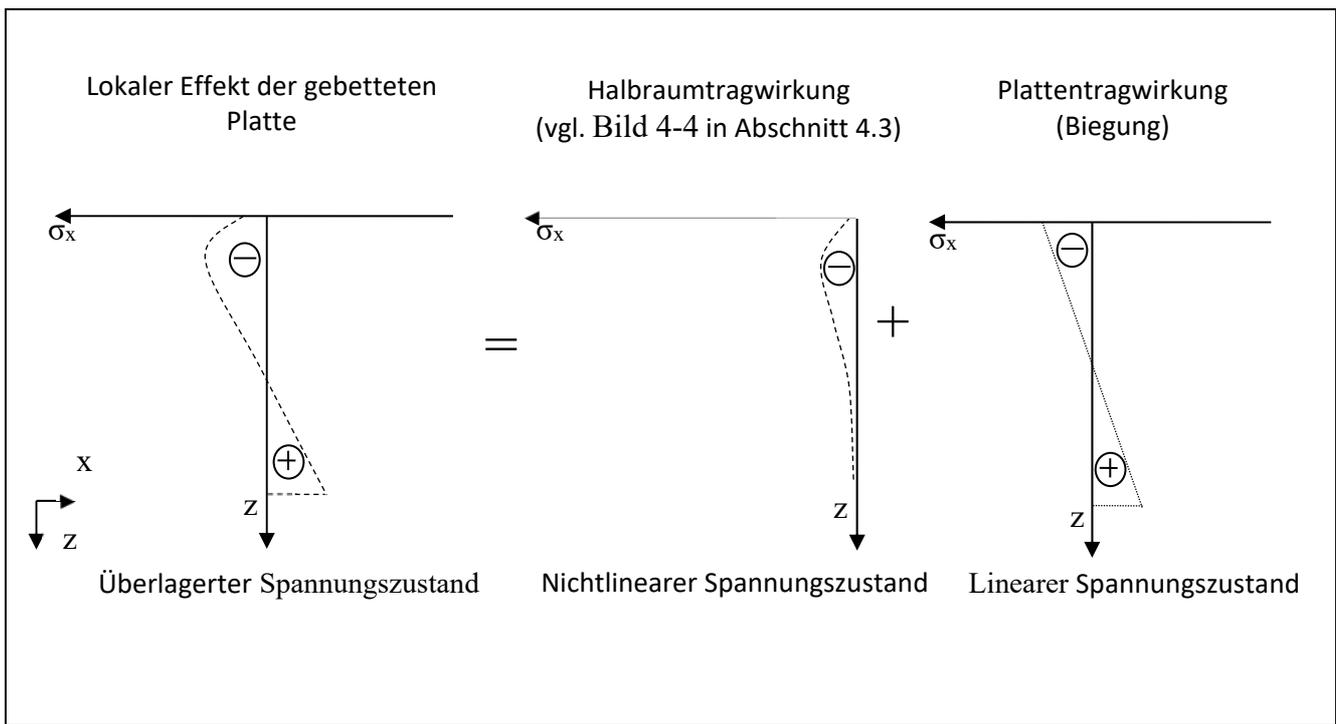


Bild 5-11 Charakteristischer Spannungszustand der Asphaltsschicht neben der Lastangriffsfläche

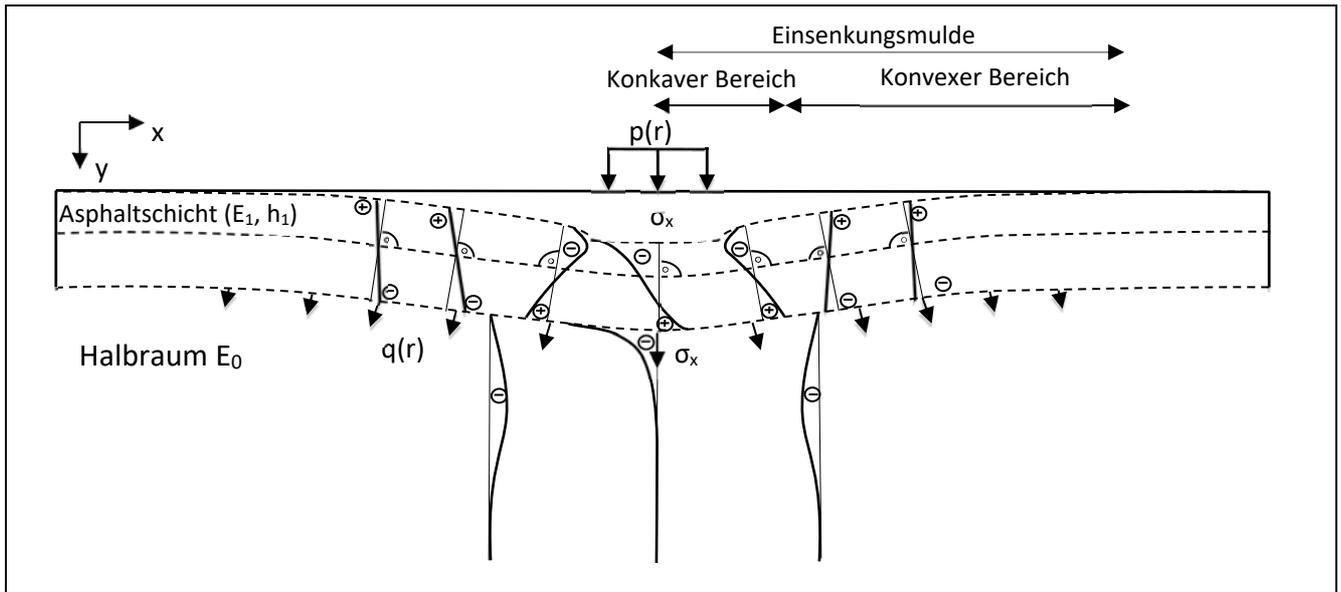


Bild 5-12 Überarbeitete Darstellung des im vorangegangenen Kapitel dargestellten Tragverhaltens von Asphaltstraßen aufgrund des lokalen Effekts der Asphaltdecke

Zweitens liegen die nichtlinearen waagerechten Normalspannungen der 30 cm dicken Asphaltdecke in der Untersuchung von GERLACH [1968] im vom lokalen Effekt beeinflussten Bereich. Sie resultieren aus dem zusammengedrückten Querschnitt der Asphaltdecke, der jedoch nicht aus dem Bild 2-14 (Abschnitt 2.3.2.3.2) festgestellt werden kann. GERLACH konnte die Überlagerung der Spannungen der Halbraum- und Plattentragwirkung darstellen, da das mehrschichtige Halbraummodell nicht von einem ebenen Querschnitt der Asphaltdecken unter der Last ausgeht, wie dies beim gebetteten Plattenmodell der Fall ist. (vgl. Abschnitt 2.3.2.3.2).

Weiterhin können mit diesem Kapitel die weiteren Rückfragen zur GRÄTZ-Rückrechnung in Kapitel 3 beantwortet werden:

Zunächst ist die Frage, ob die Verwendung des gebetteten Plattenmodells für die Rückrechnung der FWD-Messungen präzise ist. Wie in Bild 5-12 dargestellt, entspricht das Tragverhalten der Asphaltdecke, bis auf den Lastangriffsbereich, der Plattentragwirkung. Daher ist die Verwendung des gebetteten Plattenmodells für den Bereich außerhalb des Lastangriffsbereichs zur Interpretation der FWD-Untersuchungen durchaus möglich.

Als nächste galt es zu klären, ob die von GRÄTZ entwickelte Exponentialgleichung plausibel ist? Dazu wurde eine Vergleichsrechnung für die Einsenkungen der zweischichtigen Asphaltstraße in Bild 4-1

(Abschnitt 4.2.2) durchgeführt. Zum Vergleich wurden jeweils der Ansatz von GRÄTZ, das Plattenmodell und das mehrschichtige Halbraummodell herangezogen. Beim Plattenmodell wurde die Integralgleichung (2-31) von LI. u.a. [1997] mit dem mathematischen Programm Maple durch eine Taylor-Reihe approximiert und damit die Einsenkungen anhand der unten beschriebenen Gleichung (5-1) berechnet. Für das mehrschichtige Halbraummodell wurden die Einsenkungen der Straße mit Hilfe von BISAR berechnet [SHELL, 1998]. Die mit diesen drei Ansätzen berechneten Einsenkungen sind in Bild 5-13 zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der Ansatz von GRÄTZ [2009] mit den anderen rechnerischen Ansätzen vergleichbar ist.

$$w(r) = \left(\frac{2(1 - \mu_{Halbraum}^2) \cdot Q}{\pi \cdot a \cdot E_{Halbraum}} \right) \cdot \left(\frac{258}{2178} \right) \cdot \left(\frac{\text{MeijerG} \left[\left[\left[\frac{5}{6} \right], [] \right], \left[\left[\frac{5}{6,2} \right], \left[\frac{3,1}{3,1} \right], \left[\frac{3,1}{3,0} \right] \right], \left[0, -\frac{1}{3} \right], \frac{244140625}{2287914286629609} \right]}{\pi} \right) \quad (5-1)$$

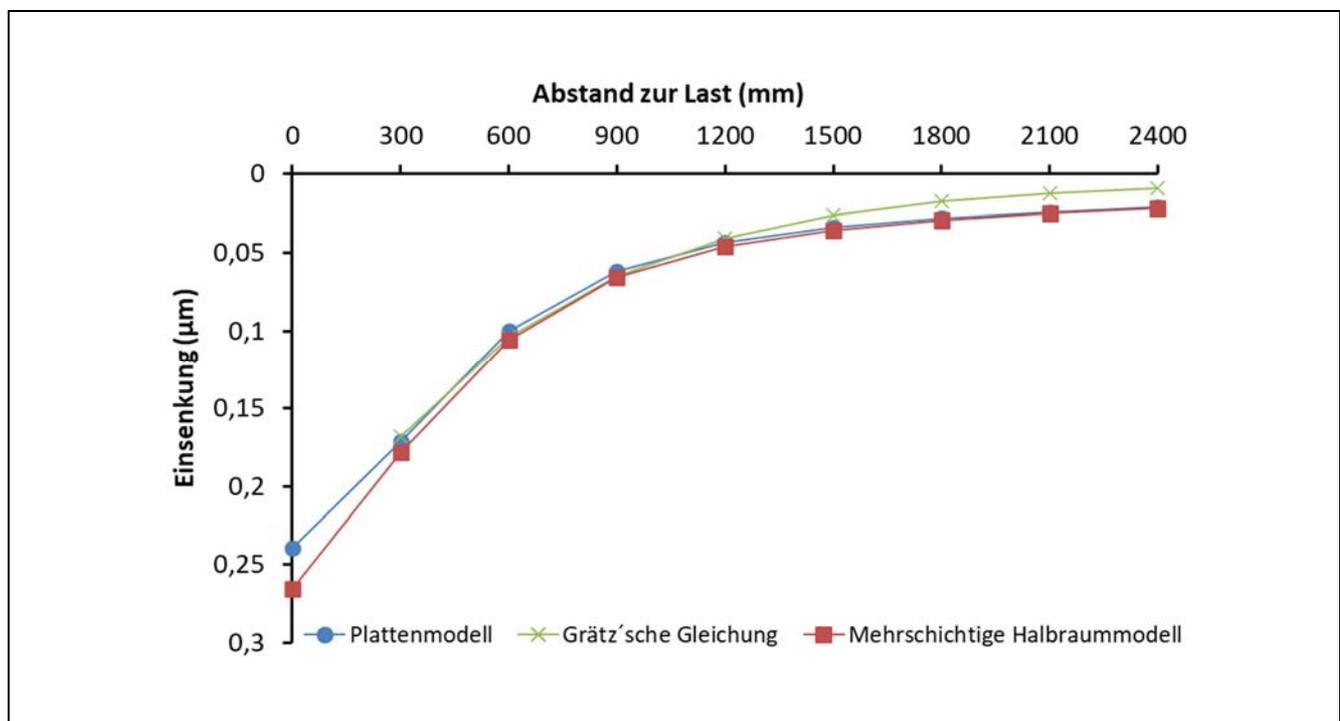


Bild 5-13 Vergleichende Berechnung der durch verschiedene Ansätze berechneten Einsenkungen der Asphaltstraße vom Bild 4-1 (Kapitel 4)

Schlussendlich war noch zu klären, *ob die von GRÄTZ aufgestellte Rückrechnungsmethode plausibel ist?* Wie schon im vergangenen Kapitel geschrieben, enthält der konkave Bereich der Einsenkungsmulde Informationen über die Plattentragwirkung der Asphaltsschicht und die Halbraumtragwirkung des Bodens und somit ist die Rückrechnung des l -Werts sinnvoll. Üblicherweise werden entweder die Einsenkungen des Lastangriffsbereiches für die Rückrechnung verwendet, z.B. das Verfahren von JENDIA [1995], oder die gesamte Einsenkungsmulde, z.B. das Verfahren von LI u.a. [1997]. Eine solche Rückrechnung führt jedoch zum ungenauen Ergebnis, weil die Asphaltsschicht unter der Lastangriffsfläche nicht nur gebogen, sondern auch zusammengedrückt wird, was das gebettete Plattenmodell nicht berücksichtigen kann. Die regressive Rückrechnung ohne Einsenkungen im Lastbereich von GRÄTZ [2009] erscheint auf den ersten Blick als problematisch, ist aber tatsächlich für die Rückrechnung günstiger, da sie diese überlagerte Verformung von Asphaltsschichten bei der Rückrechnung ausschließt (zur Genauigkeit der Rückrechnung des l -Werts nach GRÄTZ-Rückrechnung wird auf das Bild 2-26 in Abschnitt 2.5.3.2 verwiesen)

Die Klärung dieser drei Rückfragen lässt den Schluss zu, dass trotz der Interpretationslücke über den lokalen Effekt im gebetteten Plattenmodell die Ursache für die ungenauen rückgerechneten Steifigkeitsmodule des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ der 8-jährigen Autobahnstrecke in Abschnitt 1.2 nicht in der von GRÄTZ etablierten Rückrechnung für die l - und M_0 -Werte liegt.

6 Vertiefte Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen mit und ohne Schichtenverbund zwischen Asphaltsschichten

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird das Tragverhalten der Straße in Abhängigkeit vom Schichtenverbund der Asphaltsschichten untersucht und bewertet. Damit wird die letzte Frage an das GRÄTZ-Verfahren geklärt, nämlich, ob die Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ anhand der Gesamtdicke ($\sum h_{\text{Asphalt}}$) des Asphaltpakets sinnvoll ist.

6.2 FEM-Untersuchung

6.2.1 Modellierung

Hierzu wurde die Asphaltstraße aus drei verschiedenen Schichten, zwei Asphaltsschichten und dem Boden, modelliert. Der Kontakt zwischen den Asphaltsschichten in tangentialer Richtung ist für den Fall ohne Schichtenverbund als reibungsfrei und für den Fall mit vollem Schichtenverbund als fest definiert; zwischen der unteren Asphaltsschicht und dem Boden ist reibungsfrei definiert. Die Grundlagen der Modellierung für den Kontakt zwischen den verformbaren Körpern von Abaqus sind in [KING und RICHARDS, 2013] ausführlich beschrieben. Bild 6-1 zeigt das FEM-Modell der Straße mit mehrschichtiger Asphaltbefestigung. In Tabelle 6-1 sind die untersuchten Fälle zusammengefasst.

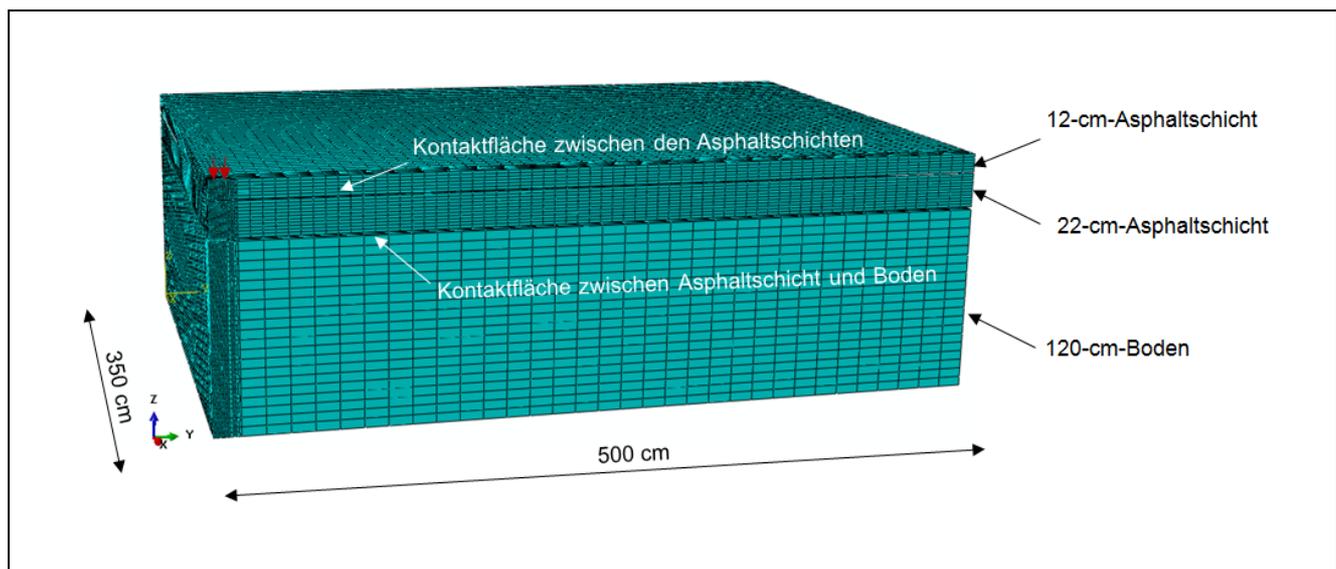


Bild 6-1 FEM-Modell in abaqus zur Untersuchung des Schichtenverbunds der Asphaltsschichten

Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> Asphaltschicht 12 cm voller Verbund </div> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> Asphaltschicht 22 cm </div>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> Asphaltschicht 12 cm kein Verbund </div> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> Asphaltschicht 22 cm </div>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> Asphaltschicht 22 cm kein Verbund </div> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> Asphaltschicht 12 cm </div>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: 100%;"> Asphaltschicht 24 cm </div>
Boden	Boden	Boden	Boden

Tabelle 6-1 Die untersuchten Fälle des Schichtenverbunds der Asphaltschichten

6.2.2 Ergebnis der Untersuchung

In Bild 6-2 und Bild 6-3 sind die Verformungen der in Tabelle 6-1 aufgeführten modellierten Straßen dargestellt. Daran ist zu sehen, dass sich ein ähnliches Verformungsverhalten der Straße einstellt wie bei CEYLAN und KIM [2012] (vgl. Bild 3-2 in Kapitel 3), d.h. der Fall 1 weist wegen seiner vergleichsweise großen Steifigkeit der Asphaltbefestigung ($D = 74,65 \text{ MNm}$) die höchste Tragfähigkeit (Lastverteilung) bzw. die kleinste Einsenkungsmulde auf. Die Fälle 2, 3 und 4 zeigen identische Mulden, obwohl sie sich in ihrer strukturellen Substanz völlig voneinander unterscheiden.

Das ähnliche Verformungsverhalten dieser drei Fälle ist darauf zurückzuführen, dass die mehrschichtige Asphaltbefestigung der Fälle 2 und 3 trotz unterschiedlicher Tiefen des fehlenden Schichtenverbunds im Paket eine gleiche äquivalente Biegesteifigkeit ($D = 26,25 \text{ MNm}$) aufweisen, die der Biegesteifigkeit der einzelnen Asphaltschicht von Fall 4 gleicht. Daher sind ihre Einsenkungen identisch zueinander (vgl. Gleichung (2-28) in Abschnitt 2.3.2.3.1).

Daraus ist zu erkennen, dass im Fall ohne Schichtenverbund die Verkehrsbelastung fast ausschließlich von der Asphaltschicht verteilt wird, die die größte Steifigkeit im Asphaltpaket trägt. Die andere, dünnere Asphaltschicht trägt zur Lastverteilung kaum bei. Diese Lastverteilung der Asphaltschichten ohne Schichtenverbund ist unabhängig davon, wo sich die lastverteilende Asphaltschicht im Asphaltpaket befindet.

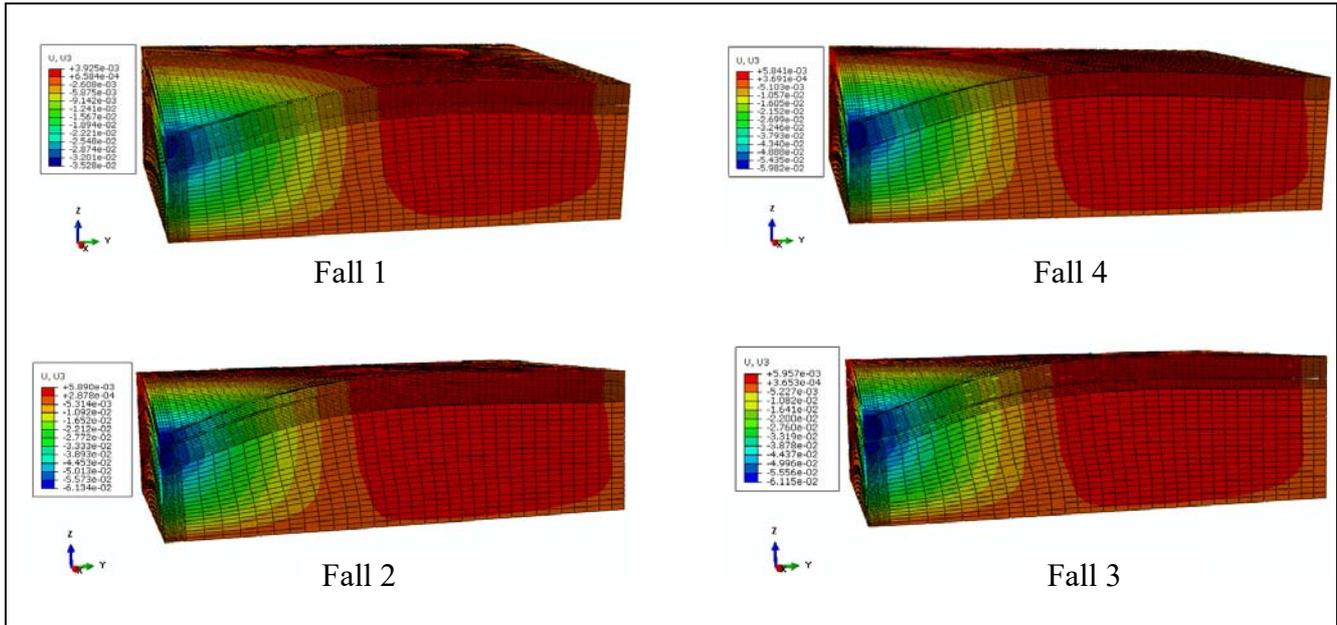


Bild 6-2 Die Verformung der in Tabelle 6-1 modellierten Straßen

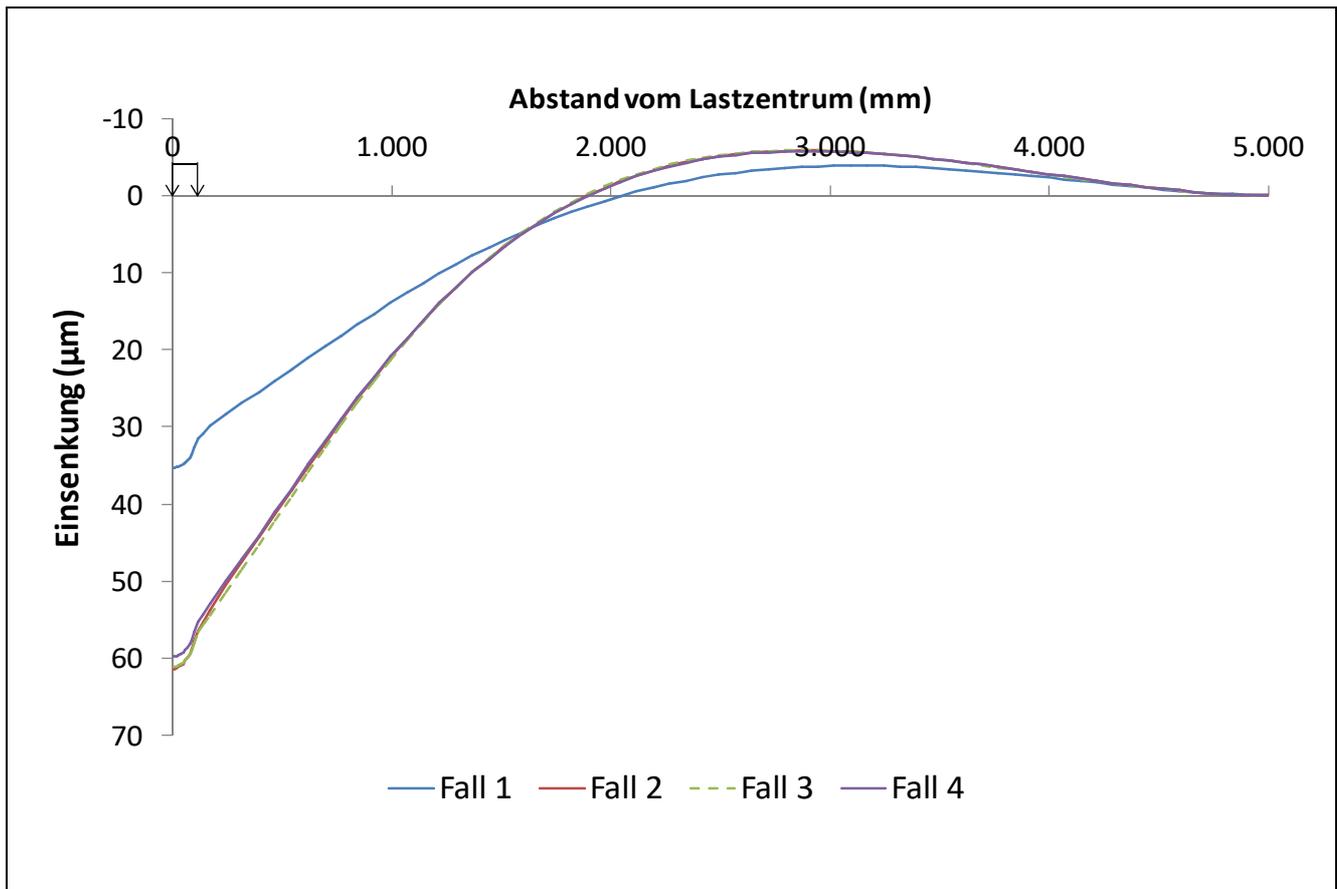


Bild 6-3 Die Einsenkungsmulde der in Tabelle 6-1 aufgeführten modellierten Straßen

Die Erklärung, dass bei Asphalt-schichten ohne Schichtenverbund die Lastverteilung ausschließlich über die Asphalt-schicht erfolgt, die die größte Steifigkeit im Asphalt-paket aufweist, wird durch die Beobach-tungen in der Praxis unterstützt. Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 geschrieben, sind die Praxiserfahrungen zwischen der Nutzungsdauer (Tragfähigkeit) einer Straße und dem Zustand des Schichtenverbunds ihrer Asphalt-schichten in Bild 2-5 zusammengefasst [FGSV, 1990]. Demnach beträgt die Tragfähigkeit von Straßen der Bauklasse I in der RStO 01 [FGSV, 2001] ca. 10 % gegenüber der Planung, falls der Schichtenverbund zwischen der Binder- und Tragschicht nicht gegeben ist. Der Aufbau einer Asphalt-befestigung der Bauklasse I nach der RStO ist wie folgt: 4 cm dicke Deckschicht + 8 cm dicke Binder-schicht + 18 cm dicke Tragschicht (vgl. Bild 6-4). Beim fehlenden Schichtenverbund zwischen der Binder- und Tragschicht übernimmt die Asphalt-tragschicht aufgrund ihrer größeren Biegesteifigkeit die Rolle der lastverteilenden Schicht der Straße, so dass die lastverteilende Dicke der Straße ca. 18 cm beträgt. Betrachtet man in Bild 6-4 bei der Bauklasse III/IV, bei denen die Tragfähigkeit der Straße ca. 10% der Bauklasse I entspricht (vgl. die B-Zahl in Bild 6-4), so sieht man, dass die Dicke der lastverteilenden Schicht der Straße in dieser Bauklasse etwa 20 cm beträgt. Das bedeutet, dass in der Bau-klasse I, ohne Schichtenverbund zwischen Binder- und Tragschicht, die Verkehrsbelastung im Wesent-lichen durch die 18 cm dicke Tragschicht verteilt wurde.

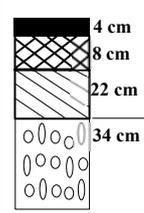
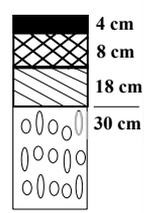
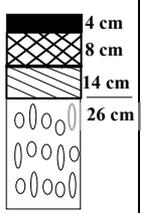
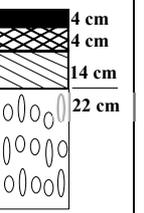
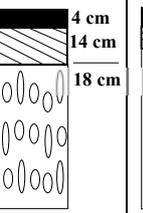
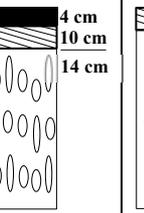
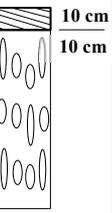
Zeile	Bauklasse		SV	I	II	III	IV	V	VI
	Äqui-valente 10-t-Achs-übergänge in Millionen	B	> 32	> 10 - 32	> 3 - 10	> 0,8 - 0,3	> 0,3 - 0,8	> 0,1 - 0,3	≤ 0,1
1	Asphaltdeckschicht Asphaltbinderschicht Asphalttragschicht Frostschutzschicht								

Bild 6-4 Ausschnitt der Tafel 1 der RStO 01 [FGSV, 2001]

6.3 Schlussfolgerung

Die aufgezeigten Punkte dieses Kapitels lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

Erstens gibt es neben den bisher bekannten strukturellen Substanzparametern von Asphaltsschichten, der Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$, die Asphaltsschichten h_{Asphalt} und die Qualität des Schichtenverbunds, noch einen weiteren strukturellen Substanzparameter, die so genannte wirksame Dicke der lastverteilenden Asphaltsschichten (h_{wirksam}). Dieser Parameter setzt sich aus den Dicken von Asphaltsschichten und ihres Schichtenverbunds zusammen: Mit Schichtenverbund entspricht die h_{wirksam} der $\sum h_{\text{Asphalt}}$. Ohne Schichtenverbund entspricht die h_{wirksam} etwa der Dicke der Asphaltsschicht, die im Asphaltpaket die größte Steifigkeit trägt, unabhängig davon, wo sie sich im Asphaltpaket befindet. Anhand dieser mechanischen Eigenschaft der h_{wirksam} lässt sich der fehlende Schichtenverbund der Asphaltsschichten schnell und einfach bewerten.

Zweitens geht es bei den Untersuchungen von CEYLAN und KIM [2012] bzw. bei dem Bild 3-2 (Kapitel 3) um den Parameter h_{wirksam} . Die beiden Fälle Delaminated_2 und Delaminated_3 in Bild 3-2 haben trotz unterschiedlicher Lage des fehlenden Schichtenverbunds die gleiche h_{wirksam} der Asphaltsschichten mit 4 in. Somit sind ihre Einsenkungen miteinander identisch. Die h_{wirksam} der Asphaltsschichten im Fall Delaminated_1 ist mit 3,75 in etwas geringer. Deshalb sind die Einsenkungen in diesem Fall größer als in den beiden anderen Fällen.

Schlussendlich entspricht der Parameter h_{Asphalt} in der GRÄTZ'schen Rückrechnung nicht der Gesamtdicke ($\sum h_{\text{Asphalt}}$), sondern der wirksamen Dicke h_{wirksam} von Asphaltsschichten. Dieser Unterschied führt dazu, dass die Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ mit dieser Methode nicht zutrifft, wenn der Schichtenverbund zwischen den Asphaltsschichten nicht gegeben ist. Denn im Fall ohne Schichtenverbund ist die h_{wirksam} wesentlich kleiner als die $\sum h_{\text{Asphalt}}$.

Ein Beispiel hierfür ist die 8-jährige Autobahnstrecke in Bild 1-1 (Abschnitt 1.2). Die Asphaltbefestigung dieser Strecke weist am Bohrkern folgenden Aufbau auf: 4 cm dicke Deckschicht + 8 cm dicke Binderschicht + 22 cm dicke Tragschicht. Beim fehlenden Schichtenverbund zwischen der Binder- und Tragschicht beträgt die h_{wirksam} der Asphaltsschichten ca. 22 cm. Wird in diesem Fall der $|E|_{\text{Asphalt}}$ mit 34 cm ($\sum h_{\text{Asphalt}}$) statt mit 22 cm (h_{wirksam}) zurückgerechnet, so beträgt der rückgerechnete $|E|_{\text{Asphalt}}$ nur ca. 20 % des tatsächlichen Werts (vgl. Gleichung (2-44) in Abschnitt 2.5.3.2). Dies erklärt, wieso die

rückgerechneten $|E|_{\text{Asphalt}}$ dieser Strecke überwiegend bei ca. 3.000 N/mm^2 liegen, obwohl im Labor $|E|_{\text{Asphalt}}$ mit 14.000 N/mm^2 ermittelt wurde.

Rechnet man nun die h_{wirksam} der Asphaltsschichten der 8-jährigen Strecke mit dem im Labor ermittelten Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ von 14.000 N/mm^2 zurück, so zeigt sich, dass das Problem dieser Strecke nicht in der Ermüdung von Asphaltsschichten, sondern in der Qualität ihres Schichtenverbunds liegt (vgl. Bild 6-5). Daraus lässt sich schließen, dass der Schichtenverbund von Asphaltsschichten der „blinde Fleck“ der GRÄTZ-Rückrechnung ist. Dies erklärt, warum der aus der FWD-Untersuchung zerstörungsfrei ermittelte $|E|_{\text{Asphalt}}$ der 3-jährigen Strecke der Laboruntersuchung entsprach, während dies bei der 8-jährigen Strecke nicht funktionierte.

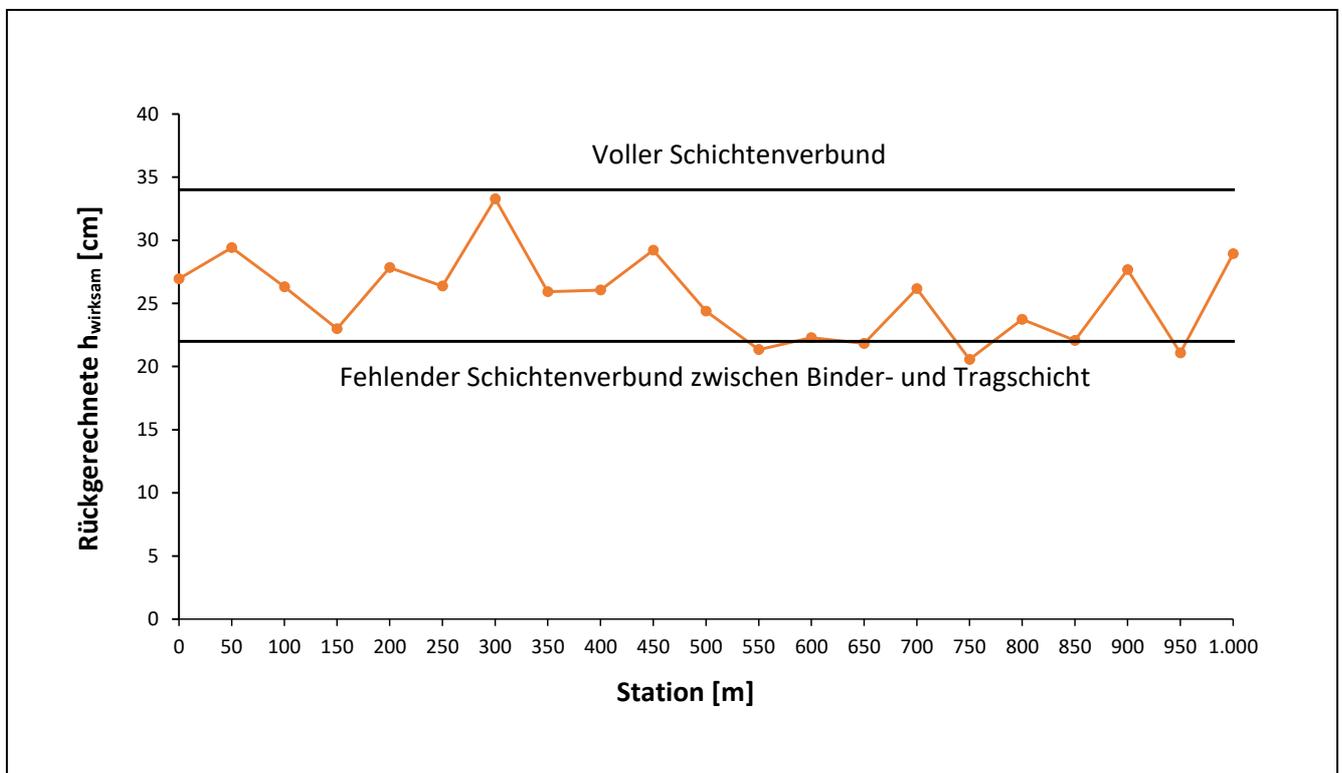


Bild 6-5 Die rückgerechneten h_{wirksam} der 8-jährigen Autobahnstrecke in Abschnitt 1.2

7 Vertiefte Untersuchung des Tragverhaltens von Straßen mit unvollständigem Schichtenverbund zwischen Asphaltsschichten

7.1 Einleitung

Im vorangegangenen Kapitel wurde erläutert, dass die im Vergleich zu den Laboruntersuchungen unplausiblen Ergebnisse der GRÄTZ-Rückrechnung bei der 8-jährigen Autobahnstrecke (Abschnitt 1.2) mit dem Schichtenverbund zusammenhängen können. Allerdings sind die Ungenauigkeiten der FWD-Untersuchung bei dieser Strecke noch nicht vollständig geklärt. Tatsächlich wurde bei der Bohrkernentnahme kein Problem mit dem Schichtenverbund festgestellt. Erfüllt ist außerdem der Mindestwert von nach ZTV Asphalt Stb 07 [FGSV, 2013] beim Abscherversuch. Trotzdem beträgt die Rückrechnung nur ca. 50 % des Laborwerts. Es stellt sich dadurch die Frage, was mit den Stationen in Bild 6-5 in Abschnitt 6.3 geschah, deren h_{wirksam} zwischen dem vollen und fehlenden Schichtenverbund liegt? Als Lösungsansatz wird folgende Hypothese verfolgt: Es handelt sich um einen teilweise vorhandenen Schichtenverbund der Asphaltsschichten. In diesem Kapitel wird daher der „unvollständige Verbund zwischen den Asphaltsschichten“ modelliert und das entsprechende Tragverhalten der Straße untersucht, um die Abweichung zwischen FWD- und Laboruntersuchung bei dieser Autobahnstrecke vollständig aufzuklären.

7.2 FEM-Untersuchung

7.2.1 Herangehensweise

Es soll zwischen den beiden im vorangegangenen Kapitel untersuchten Extremfällen mit vollem und fehlendem Schichtenverbund noch einen Zwischenzustand geben, der in der Literatur, z.B. in [WELLNER und ASCHER, 2007] oder in [TRB, 2012], als „teilweise vorhandener Schichtenverbund“ bezeichnet wird. Anders als den (voll) fehlenden Schichtenverbund, der sofort an den losen Asphaltbeläge im Bohrkern erkennbar ist, kann der teilweise vorhandene Schichtenverbund so nicht erkannt werden. Dieser Zustand des Schichtenverbunds wird derzeit aufgrund des Verbundmodells von BISAR mit unterschiedlicher Reibung der Asphaltsschichten erklärt (vgl. Abschnitt 2.3.2.4). Entsprechend haben STÖCKERT [2001], ROMANOSCHI und METCALF [2002], JOHANNSEN [2012], CHUN u.a. [2015], WU u.a. [2017] und LE u.a. [2020] den Schichtenverbund in Bezug auf die Reibung der Asphaltsschichten untersucht.

Diese Erklärung von BISAR bzw. SHELL [1998] erscheint jedoch dem Verfasser nicht plausibel. Bild 7-1 zeigt eine durch den Abscherversuch zerstörte Schichtgrenze der Asphalttschichten. Daraus ist erkennbar, dass der Schichtenverbund aus zwei physikalischen Faktoren beruht – der Verzahnung der Körner der oberen und unteren Asphalttschichten und der Haftung des beim Asphalteinbau aufgespritzten Bitumenfilms. Tritt Gleiten zwischen den Asphalttschichten auf, unabhängig davon, ob der Parameter α 1 % oder 100 % beträgt, bedeutet dies, dass weder die Verzahnung der Körner noch die Haftung des Bitumens ausreichend vorhanden ist. Es muss also an einer Stelle des Schichtenverbunds entweder der volle oder fehlende Verbund auftreten.

Der weitere nicht überzeugende Punkt der Erklärung von BISAR über den Schichtenverbund der Asphalttschichten ist die Annahme, dass der Schichtenverbund über die Fläche homogen verteilt ist. In der Praxis zeigt sich dagegen oft, dass er flächig inhomogen ist. Durch die Entnahme mehrerer Bohrkerne an eng beieinander liegenden Stellen wurde festgestellt, dass der Schichtenverbund nicht immer vollflächig dargestellt ist. Vielmehr treten einzelne Fehlstellen auf. Die Bohrkerne, obwohl nur ca. 30 cm voneinander entfernt, zeigen aber völlig unterschiedlichen Verbundqualität, wie z.B. in Bild 7-2 zu sehen ist. Diese Beobachtung wirft die Frage auf, ob es sich bei dieser räumlichen Inhomogenität des Schichtenverbunds nicht doch um den unvollständigen Schichtenverbund handelt.

Aus verschiedenen Gründen hat sich der Verfasser daher entschlossen, die Auswirkung des unvollständigen Schichtenverbunds von Asphalttschichten auf das Tragverhalten der Straße mit der räumlichen Verteilung des Schichtenverbunds in der Straße zu untersuchen.

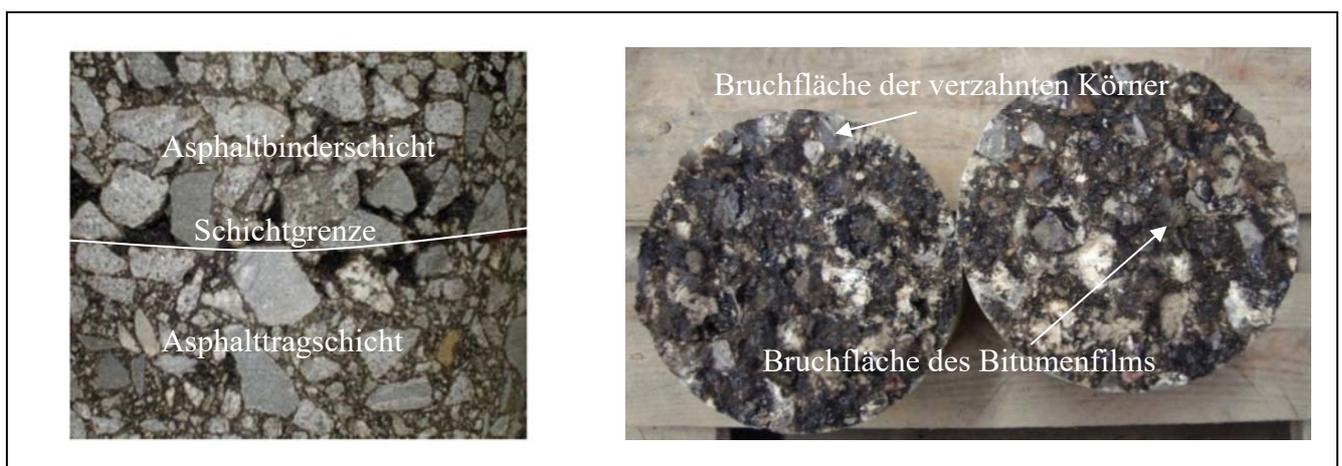


Bild 7-1 Die Schichtgrenze am Bohrkern der Asphalttragschicht und -binderschicht (links) und die durch den Abscherversuch zerstörte Schichtgrenze der Asphalttschichten (rechts) [Eigene Bilder]

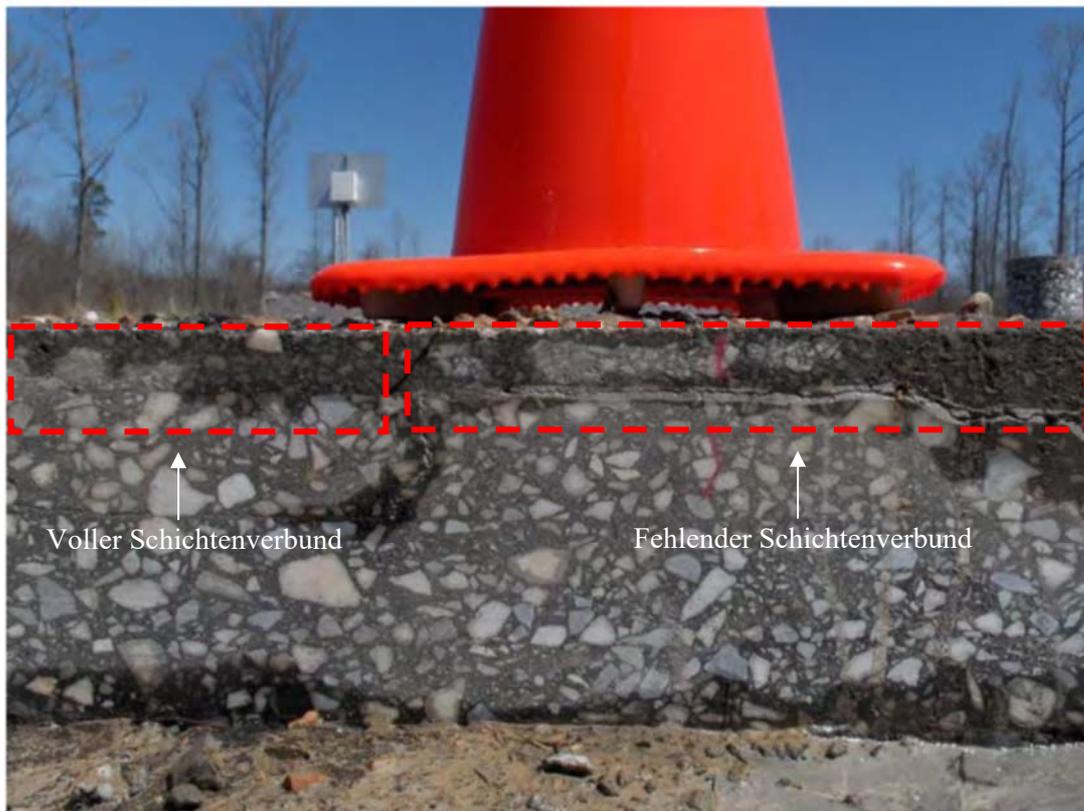


Bild 7-2 Die Inhomogenität des Schichtenverbunds der Asphalt-schichten in der Fahrbahn [WILLIS und TIMM, 2006]

7.2.2 Modellierung

Dazu wurde das FEM-Modell des vorangegangenen Kapitels weiterverwendet, jedoch wurde der Verbund der Asphalt-schichten in sechs Szenarien (Fällen) unterschiedlich räumlich verteilt modelliert. Die ersten und letzten Fälle sind die Extremfälle mit einem vollflächig vorhandenen und einem vollflächig fehlenden Schichtenverbund. Vom zweiten bis zum fünften Fall wurde im Lastangriffsbereich ein fehlender Schichtenverbund modelliert, während der restliche Bereich mit vollem Verbund modelliert wurde. Dabei wurde die Fläche mit dem fehlenden Schichtenverbund sukzessiv vergrößert. Tabelle 7-1 fasst die Untersuchungsfälle zusammen.

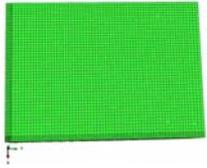
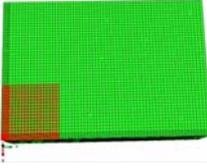
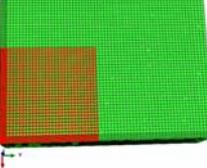
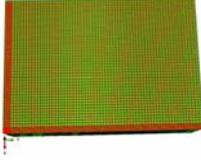
Fall	Verbund zwischen den Asphaltsschichten	FEM-Modelle in abaqus
1	Voller Verbund: vollflächig Schichtenverbund	
2	Teilweise vorhandener Verbund 1: Fehlender Verbund im Lastangriffsbereich (rote Fläche)	
3	Teilweise vorhandener Verbund 2: Fehlender Verbund im Bereich der Innenkurve von Fall 1 (rote Fläche)	
4	Teilweise vorhandener Verbund 3: Vergrößerung des fehlenden Verbunds im Bereich der Innenkurve von Fall 1 (rote Fläche)	
5	Teilweise vorhandener Verbund 4: Weitere Vergrößerung des fehlenden Verbunds im Bereich der Innenkurve von Fall 1 (rote Fläche)	
6	Kein Verbund: vollflächig fehlender Schichtenverbund	

Tabelle 7-1 Modellierungen der räumlichen Verteilung des vollen und fehlenden Schichtenverbunds zur Untersuchung des teilweise vorhandenen Schichtenverbunds von Asphaltsschichten

7.2.3 Ergebnis der Untersuchung

In Bild 7-3 und Bild 7-4 sind die radialen Dehnungen der Asphalt-schichten in der Lastachse und die Einsenkungen der Straße dargestellt. Zunächst ist aus den beiden Bildern ersichtlich, dass sich ein ähnliches Gesamttragverhalten der Asphalt-schichten wie in BISAR einstellt, jedoch mit unterschiedlichen Reibungsparameter α (vgl. Bild 2-16 und Bild 2-17 in Abschnitt 2.3.2.4). Dies unterstützt die Erklärung, dass der teilweise Schichtenverbund auf einer solchen räumlichen Verteilung des vollflächig vollen und fehlenden Schichtenverbunds im Belag beruhen kann.

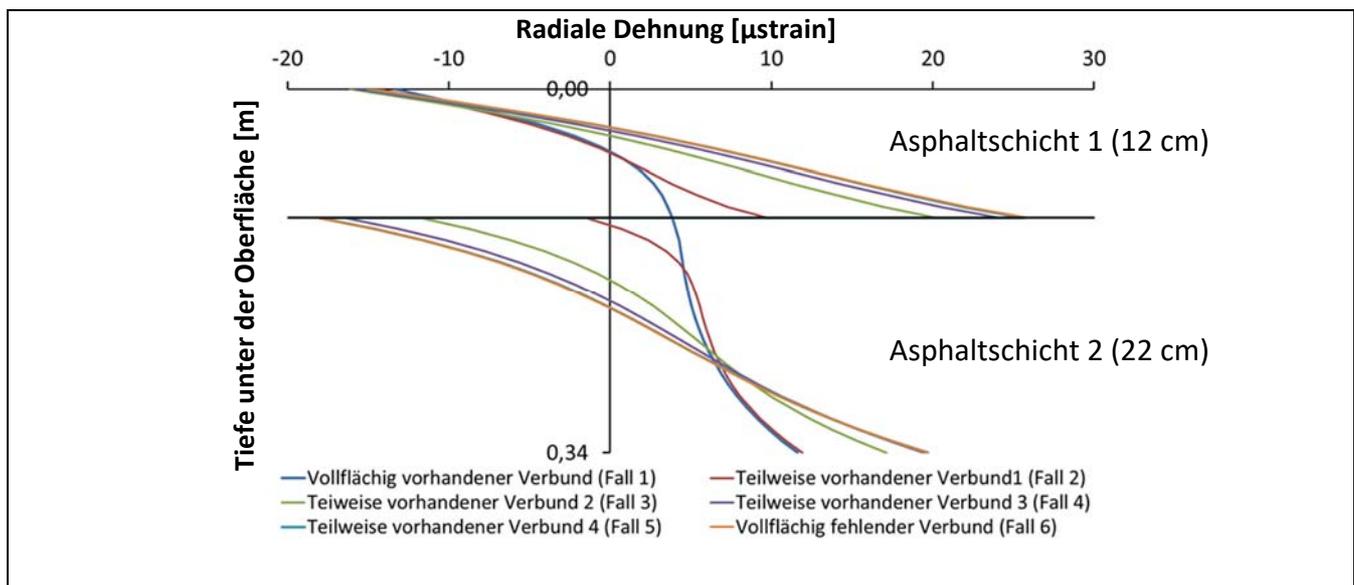


Bild 7-3 Der Dehnungszustand der Asphalt-schichten der Fälle in Tabelle 7-1

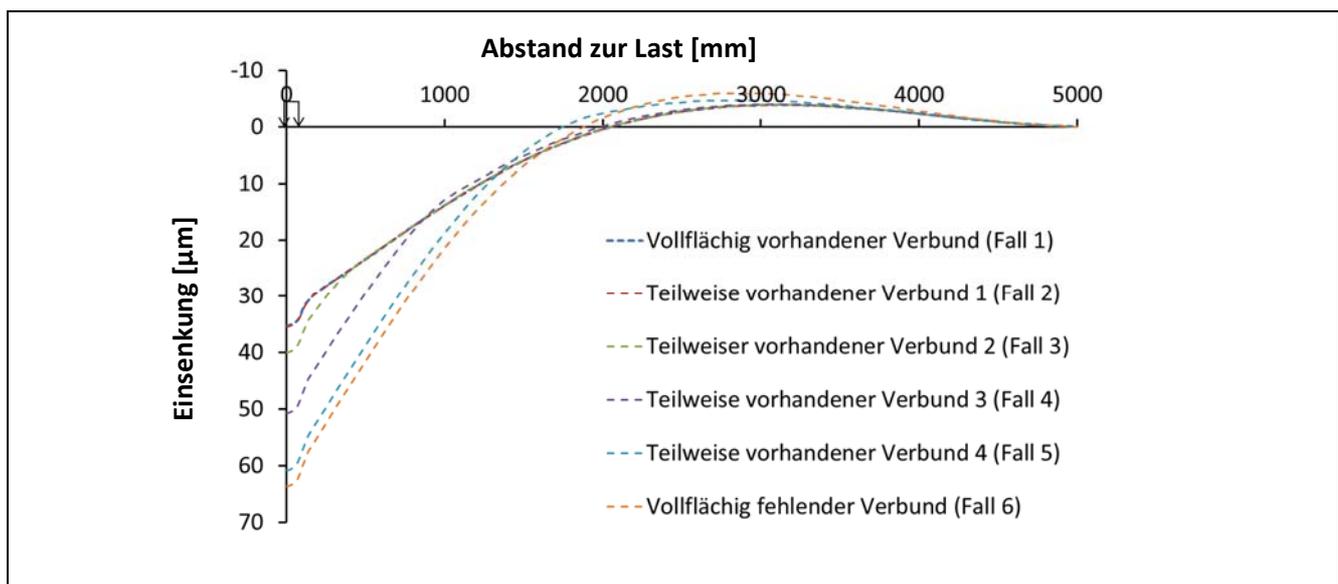


Bild 7-4 Die ausgewerteten Einsenkungsmulden der Fälle in Tabelle 7-1

Weiter ist aus Bild 7-4 ersichtlich, dass die hier gezeigten Einsenkungsmulden den h_{wirksam} entsprechen, die sich mit einer h_{wirksam} zwischen der $\sum h_{\text{Asphalt}}$ (des vollen Schichtenverbund) und der $h_{\text{Asphaltschicht 2}}$ (des fehlenden Schichtenverbunds) berechnen lassen. Diese Werte wurden bei der Rückrechnung in Kapitel 6.3 ermittelt (vgl. Bild 6-5). Aus dieser Beobachtung führte zu der Frage, wie sich die Tragfähigkeit der Asphaltsschichten verhält, wenn der Schichtenverbund im Belag räumlich an einzelnen Stellen verteilt ist.

Um diese Frage zu klären, wurde der Fall 7 weiter untersucht, in dem der Schichtenverbund an einzelnen Stellen des vollflächig fehlenden Verbunds räumlich verteilt modelliert wurden. Die Modellierung und die errechneten Einsenkungen sind in Bild 7-5 zusammengestellt. Aus dem Bild ist ersichtlich, dass die Tragfähigkeit des Falls 7 mit der Tragfähigkeit des Falls 1 (vollflächiger Schichtenverbund) vergleichbar ist, obwohl der ausfallende Schichtenverbund fast die gesamte Asphaltfläche einnimmt. Dies liegt daran, dass durch die räumliche Verteilung der einzelnen Stellen des Schichtenverbunds beim Biegen der Asphaltsschichten ein sogenannter Dübel-Effekt entsteht, sodass ihre h_{wirksam} fast gleich der $\sum h_{\text{Asphalt}}$ ist.

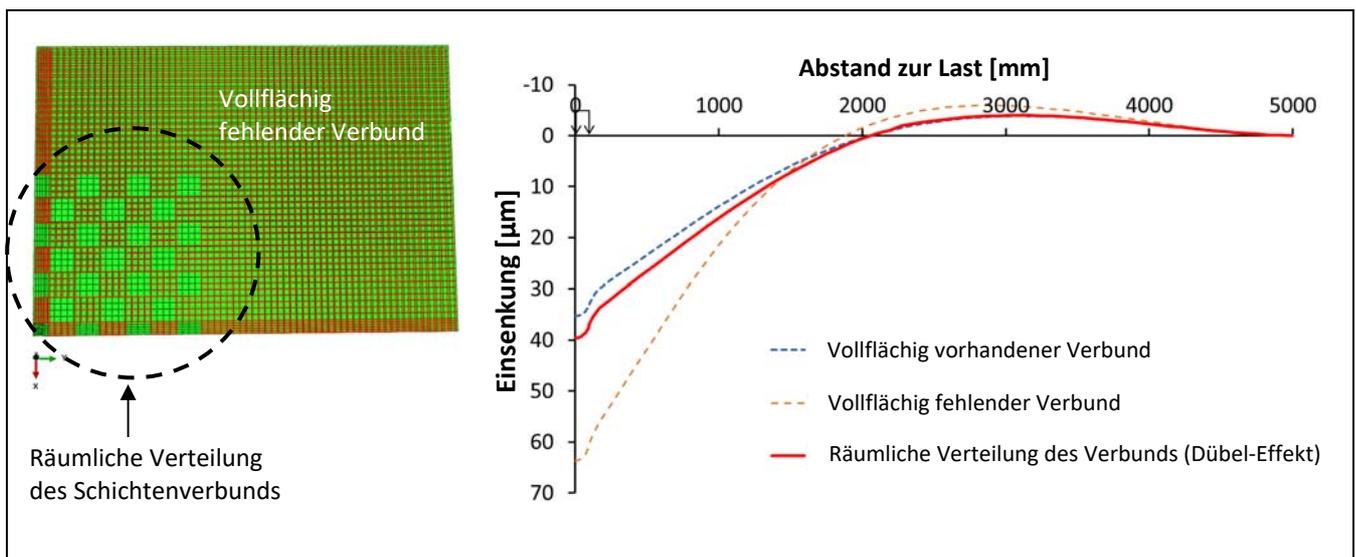


Bild 7-5 Modellierung der räumlichen Verteilung des Schichtenverbunds an einzelnen Stellen in abaqus (links) und ihre gerechneten Einsenkungsmulde (rechts)

7.3 Schlussfolgerung

Zusammenfassend lassen sich aus diesem Kapitel die folgenden Punkte feststellen:

Der Schichtenverbund zwischen den Asphaltsschichten ist nicht wie bisher anhand des BISAR-Verbundmodells vollflächig teilweise und über die Reibung der Asphaltsschichten zu betrachten, sondern teilflächig vollständig in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Verteilung über die Fläche wie folgt darzustellen:

- Vollständiger Schichtenverbund bedeutet, dass ein vollflächiger Verbund der Asphaltsschichten vorliegt.
- Fehlender Schichtenverbund bedeutet, dass ein großflächiger Ausfall des Schichtenverbunds vorliegt.
- Teilweiser Schichtenverbund bedeutet, dass fehlender und vollständiger Schichtenverbund räumlich verteilt vorliegen.

Darüber hinaus liegt die h_{wirksam} der teilweise gebundenen Asphaltsschichten normalerweise zwischen der $\sum h_{\text{Asphalt}}$ und der Dicke der lastverteilenden Asphaltsschicht vom fehlenden Schichtenverbund. Es ist jedoch durchaus möglich, dass die h_{wirksam} des teilweise vorhandenen Schichtenverbunds mit der $\sum h_{\text{Asphalt}}$ vergleichbar ist, wenn nur an einzelnen räumlich verteilten Stellen voller Verbund (Dübelwirkung) besteht.

Schließlich lässt sich hier der Unterschied zwischen der FWD- und Laboruntersuchung an den Bohrkernstellen der 8-jährigen Autobahnstrecke (Abschnitt 1.2) erklären, nämlich dadurch, dass der Schichtenverbund in der Fahrbahn räumlich verteilt vorliegt. Dort, wo die Bohrkernentnommen wurden, war der Schichtenverbund vorhanden – an den benachbarten Stellen jedoch nicht. Daher konnte an den Bohrkernen kein Problem mit dem Schichtenverbund der Asphaltsschichten festgestellt werden, obwohl die rückgerechnete h_{wirksam} der Asphaltsschichten an diesen Stellen wesentlich kleiner als die $\sum h_{\text{Asphalt}}$ ist.

8 Entwicklung der „Darmstädter Methode“ zur Interpretation der FWD-Messungen

Bild 8-1 zeigt die Zusammenhänge zwischen Einsenkungen von Asphaltstraßen und deren strukturellen Substanzparametern, die aus den FEM-Untersuchungen dieser Arbeit erarbeitet wurden. Damit wird die von GRÄTZ etablierte FWD-Untersuchung weiterentwickelt, um die strukturelle Substanz von Asphalt-schichten sowie die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Straße zerstörungsfrei genau zu bewerten.

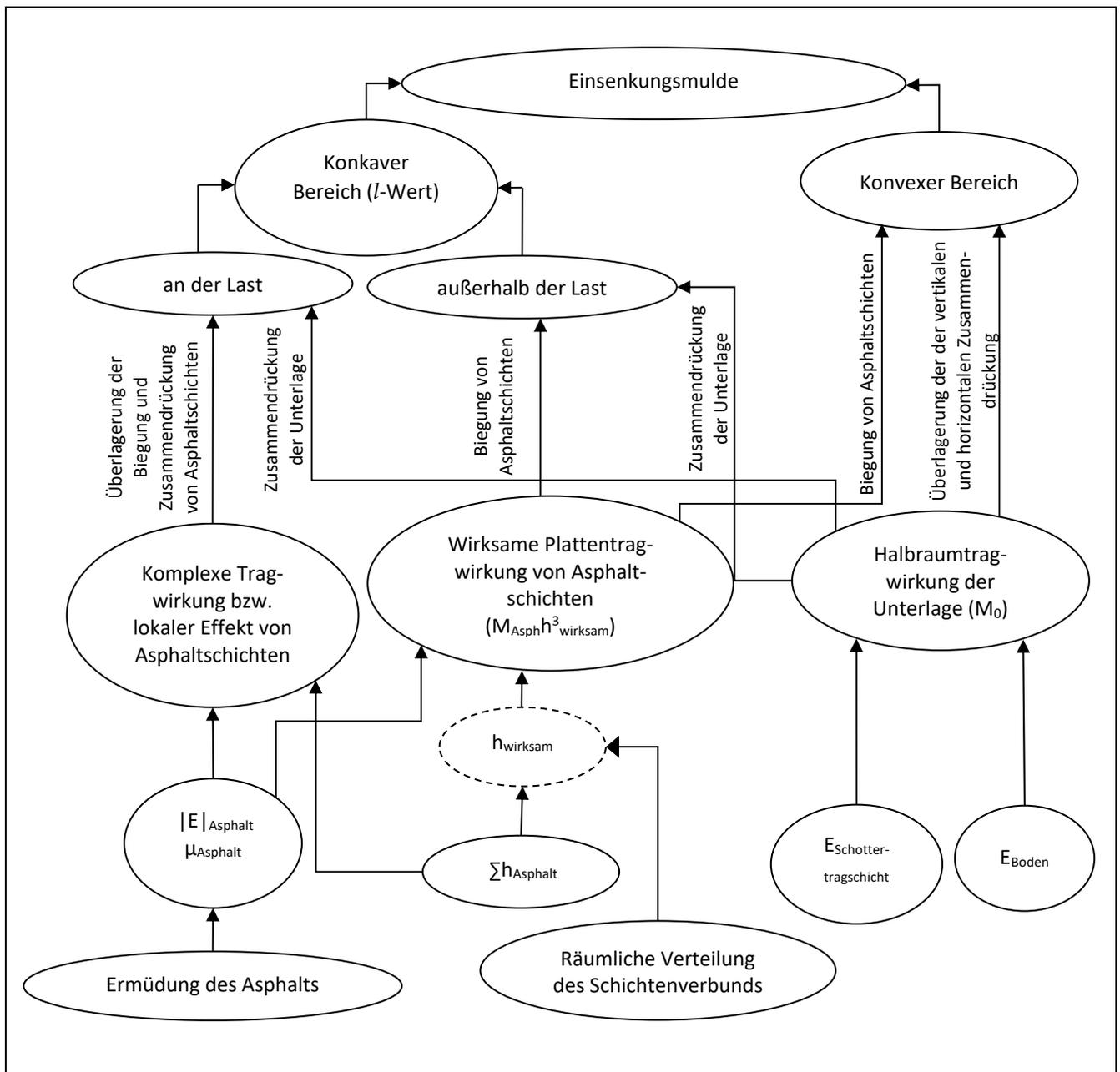


Bild 8-1 Die Zusammenhänge zwischen den Fahrbahneinsenkungen und den strukturellen Substanzparametern von Asphaltstraßen

Zur Weiterentwicklung der FWD-Untersuchung sind noch folgende Fragen zu klären:

1. Müssen die FWD-Messungen mit einem mehrschichtigen Straßenaufbau interpretiert werden, wie er in der Realität vorliegt? Oder können sie mit einem vereinfachten zweischichtigen Straßenaufbau ausgewertet werden, bei dem der mehrschichtige Asphaltbelag als eine Platte und die ungebundene Schicht mit dem Boden als einen Halbraum betrachtet wird?

Dem internationalen Stand der Technik entsprechend wird angestrebt, die FWD-Messungen mit einem praktischen mehrschichtigen Straßenaufbau, wie er in der Realität vorliegt, auszuwerten. Mit Hilfe solcher Ansätze wie dem mehrschichtigen Halbraummodell oder der Finite-Element-Methode ist es theoretisch möglich, den E-Modul der einzelnen Schichten in der Straße sowie die Steifigkeit des einzelnen Schichtenverbunds der Asphaltsschichten aus den FWD-Messungen zurückzurechnen (vgl. Bild 2-23 in Abschnitt 2.5.3.1). Tatsächlich ist eine solche mehrschichtige Rückrechnung jedoch wenig ideal. Erstens sind die für eine solche mehrschichtige Rückrechnung erforderlichen Informationen über den vorhandenen Straßenaufbau meist nicht verfügbar oder ungenau. Zweitens ist aus Bild 8-1 ersichtlich, dass die Einsenkungen der Straße zwar mit ihren strukturellen Substanzparametern zusammenhängen, aber auch in dieser Hinsicht mehrdeutig sind, d.h. die Änderung eines strukturellen Parameters kann zu denselben Einsenkungen führen wie die Änderung eines anderen strukturellen Parameters (ein Beispiel hierfür ist Bild 6-3 in Abschnitt 6.2.2 vom Kapitel 6). Diese Mehrdeutigkeit der Einsenkungen lässt viel Spielraum für ungenaue Ergebnisse bei einer iterativen mehrschichtigen Rückrechnung und damit für eine ungenaue Bewertung struktureller Substanz der Straße sowie ihrer Tragfähigkeit. Je mehr Schichten also in die Rückrechnung einbezogen werden, desto ungenauer wird die Untersuchung.

Das zweischichtige Straßenmodell, bei dem die mehrschichtige Asphaltbefestigung als eine Platte und die ungebundene Schicht mit dem Boden als ein Halbraum betrachtet wird, erscheint zu sehr vereinfacht, ist aber tatsächlich sehr gut für die Auswertung von FWD-Messungen geeignet. Mit Hilfe des gebetteten Plattenmodells lassen sich die wirksame Plattentragwirkung von Asphaltsschichten und die Halbraumtragwirkung der Unterlage direkt aus den FWD-Messungen feststellen, ohne dass Informationen über den vorhandenen Straßenaufbau erforderlich sind. Damit kann die Tragfähigkeit der Straße bereits bewertet werden, ohne sie bemessen zu müssen. Darüber hinaus beinhaltet die ausgewertete wirksame Plattentragwirkung von Asphaltsschichten den Faktor ihres Schichtenverbunds. Dies ermöglicht eine schnelle und genaue Bewertung der Qualität des Schichtenverbunds von Asphaltsschichten, was für Bauverträge sehr interessant ist.

Aus verschiedenen Gründen erscheint es sinnvoll, die Auswertung der FWD-Messungen mit einem vereinfachten zweischichtigen Straßenmodell und dem gebetteten Plattenmodell bestehen zu lassen.

2. Muss eine neue Methode für die Rückrechnung entwickelt werden oder kann man mit der GRÄTZ-Rückrechnung weiterarbeiten?

Wie in Kapitel 2 geschrieben, leitete GRÄTZ im Rahmen seiner Habilitation eine Exponentialfunktion zur Approximation der Integralgleichung der gebetteten Plattentheorie her und etablierte damit die regressive Rückrechnung für FWD-Messungen. Im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit wurden die Exponentialfunktion sowie die Rückrechnungsmethode von GRÄTZ überprüft und für valide befunden (vgl. Bild 5-13 in Abschnitt 5.4 und Bild 2-26 in Abschnitt 2.5.3.2). Die regressive Rückrechnung von GRÄTZ hat außerdem den Vorteil, dass die FWD-Messungen mit geringem Aufwand durch ein kostenfreies mathematisches Programm wie SCILAB ausgewertet werden kann. Dies ermöglicht eine einfache und verbreitete Anwendung der FWD-Untersuchung in der Industrie sowie eine Weiterentwicklung der Untersuchung durch andere Institute. Deswegen kann man weiterhin mit der regressiven Rückrechnung von GRÄTZ arbeiten. Allerdings muss auch diese Rückrechnung weiterentwickelt werden, um die strukturelle Substanz von Asphaltsschichten bewerten zu können. Aus den rückgerechneten l - und M_0 -Werten soll zusätzlich auch die wirksame Schichtsteifigkeit von Asphaltsschichten $M_{\text{Asph}}h^3_{\text{wirksam}}$ ermittelt werden (Gleichung 8-1).

$$M_{\text{Asph}}h^3_{\text{wirksam}} = 6 \cdot M_0 \cdot l^3 \text{ [MN} \cdot \text{m]} \quad (8-1)$$

Alternativ können der $M_{\text{Asph}}h^3_{\text{wirksam}}$ und M_0 auch aus der Integralgleichung 2-32 (Abschnitt 2.3.2.3.1) mit einem kostenpflichtigen mathematischen Programm wie Maple iterativ zurückgerechnet werden (siehe mehr in [LI u.a., 1997]). Diese iterative Rückrechnung dürfte geringfügig genauer als die regressive Rückrechnung von GRÄTZ sein, ist jedoch mit Aufwand und Kosten verbunden.

3. Ist es möglich, die Ermüdung des Asphalts und die Qualität des Schichtenverbunds durch FWD-Messungen zugleich zu bewerten?

Nach dem derzeitigen Forschungsstand wird angestrebt, diese beiden wichtigen strukturellen Zuständen von Asphaltsschichten zugleich durch FWD-Messungen zu bewerten. Aus dem Bild 8-1 ist jedoch ersichtlich, dass durch FWD-Messungen entweder die Ermüdung oder die Qualität des Schichtenverbunds

der Asphalt-schichten bewertet werden kann. Mit dem zurückgerechneten $M_{\text{Asph}} h^3_{\text{wirksam}}$ -Wert kann entweder das Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ über die wirksame Dicke der Asphalt-schichten h_{wirksam} berechnet werden. Damit ist die Ermüdung des Asphalts zu bewerten. Alternativ kann über $|E|_{\text{Asphalt}}$ die wirksame Dicke der Asphalt-schichten h_{wirksam} ermittelt werden und dann damit die Qualität des Schichtenverbunds von Asphalt-schichten beurteilt werden.

Die Rückrechnung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ sowie die Bewertung der Ermüdung der Asphalt-schichten sind das gesetzte Ziel dieser Arbeit. Dieses Ziel setzt jedoch die genaue Kenntnis der räumlichen Verteilung des Schichtenverbunds im Asphaltbelag voraus. Wenn das nicht möglich ist, so müssen mehrere Bohrkerne entnommen werden. Auch die von ROWE [1993] postulierte Abnahme des $|E|_{\text{Asphalt}}$ mit zunehmender Nutzungsdauer, die als Grundlage für die Bewertung der Ermüdung der Asphalt-schichten dient, scheint in der Praxis nicht nachvollziehbar zu sein. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte wurden aus mehreren Autobahnen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern Bohrkerne entnommen und deren $|E|_{\text{Asphalt}}$ im Labor untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen deuten nicht auf eine Abnahme des $|E|_{\text{Asphalt}}$ mit zunehmender Verkehrsbelastung hin, wie sie nach dem ROWE-Postulat erwartet wird (vgl. Bild 8-2). Das Langzeitverhalten des Asphaltmaterials in der Praxis ist vermutlich anders als das im Labor und bedarf weitere Forschungen. Daher sind die Rückrechnung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ und die daraus folgende Bewertung der Ermüdung von Asphalt-schichten mit den gegebenen Methoden nicht sinnvoll.

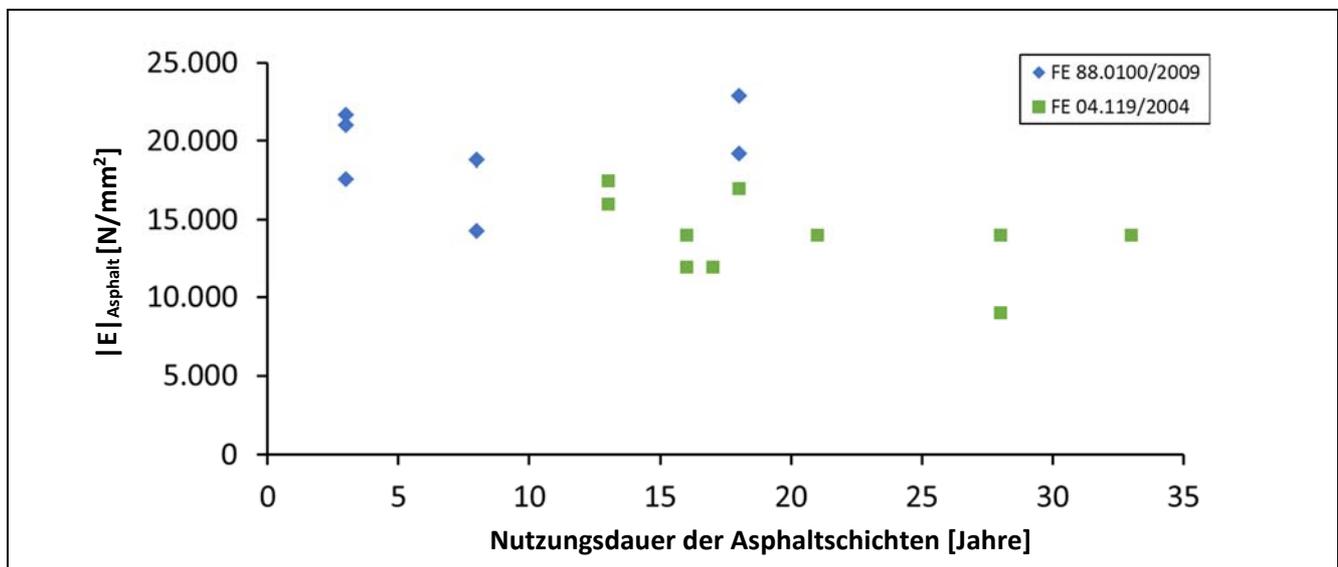


Bild 8-2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen des $|E|_{\text{Asphalt}}$ mit unterschiedlicher Nutzungsdauer im Rahmen des Forschungsprojekts FE 04.119/2004 [RESSEL und WELLNER u.a., 2008] und FE 88.0100/2009 [BALD u.a., 2011]

Unterdessen sind Probleme mit dem Schichtenverbund bei Asphaltsschichten in der Praxis sehr häufig anzutreffen. Durch den Vergleich der wirksamen Dicke h_{wirksam} mit der Gesamtdicke von Asphaltsschichten $\sum h_{\text{Asphalt}}$ lässt sich der mangelhafte Verbund zwischen den Asphaltsschichten relativ schnell und genau bewerten, was sowohl für die Industrie als auch für die Straßenbauverwaltung von großem Interesse sein wird.

Die wirksame Dicke h_{wirksam} ist in die dritte Potenz des Terms $M_{\text{Asph}}^3 h_{\text{wirksam}}$ gesetzt und bestimmt damit dessen Größenordnung. Auch wenn keine genaue Information über den Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ vorliegt und dafür eine Annahme zu treffen ist, hat dies nur einen geringen Einfluss auf die rückgerechnete h_{wirksam} . Daher ist es sinnvoll, aus dem rückgerechneten $M_{\text{Asph}}^3 h_{\text{wirksam}}$ -Wert die h_{wirksam} von Asphaltsschichten zu bestimmen und damit deren Schichtenverbund zu bewerten.

4. Wie soll die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Asphaltsschichten durch FWD-Messungen bewertet werden?

Diese Fragestellung kann auch auf zwei unterschiedliche Varianten gelöst werden. Die erste Variante ist die sogenannte rechnerische Bewertung. Dazu können die rückgerechneten l - und M_0 -Werte z.B. in die Integralgleichung (8-2) von LI u.a. [1997] eingesetzt werden, um die ganze Einsenkungsmulde der Straße nachzurechnen und dann damit die Dehnung der Asphaltsschichten unter dem Lastmittelpunkt zu bemessen. Mit Hilfe einer Ermüdungsfunktion des Asphalts, die z.B. in [COST 333, 1999] beschrieben ist, können die noch ertragbaren 10-t-Achslastübergänge (die Restnutzungsdauer der Straße) im Hinblick auf die Rissbildung von Asphaltsschichten rechnerisch bestimmt werden, ohne Kenntnis der bisherigen Verkehrsbelastungen.

Die zweite Variante ist die sogenannte empirische Bewertung. Hierbei werden die insgesamt ertragbaren Verkehrsbelastung (10-t-Achslastübergängen) der Straße anhand der empirischen Erfahrungen der RStO 12 [FGSV, 2012] sowie der rückgerechneten h_{wirksam} von Asphaltsschichten bewertet. Die noch ertragbaren Verkehrsbelastungen sind aus den bisherigen ertragenen Verkehrsbelastungen zu ermitteln.

Das gesetzte Ziel dieser Arbeit wird mit der ersten Variante versucht zu erreichen. Allerdings treten erhebliche Schwierigkeiten bei der Umsetzung auf, welche im Folgenden erläutert werden: Wie in Bild 8-1 dargestellt, überlagern sich im Lastangriffsbereich die Biegung und die Zusammendrückung von Asphaltsschichten. Je nach dem Ausmaß dieser Verformungen bei Überlagerung sind als Schädigung der

Asphaltschichten entweder Risse oder Spurrinnen zu erwarten. Mit den Untersuchungen in dieser Arbeit können diesbezüglich noch keine finalen Aussagen getroffen werden. Dennoch kann festgehalten werden, dass die Ermittlung der Restnutzungsdauer von Asphaltschichten im Hinblick auf die Rissbildung nicht ausreicht (vgl. Abschnitt 2.4). Vielmehr muss die Nutzungsdauer der Asphaltschichten sowohl im Hinblick auf die Rissbildung an der Unterseite als auch auf die Spurrinnenbildung an der Oberseite in Betracht gezogen werden. Insbesondere bei dicken Asphaltpaketen von Autobahnen oder Bundesstraßen sollen Spurrinnen auf der Fahrbahn für die Ermittlung maßgeblicher sein als Rissen an der Unterseite der Asphaltschichten. (Eine rechnerische Ermittlung der Nutzungsdauer von Asphaltschichten wie die für Rissbildung, jedoch für die Spurrinnenbildung ist nach derzeitigem Forschungsstand noch nicht möglich).

Die empirischen Erfahrungen der RStO [FGSV, 2012] beinhalten die Berücksichtigung von Spurrinnen- und Rissbildung in den Asphaltschichten. Daher hat die auf dieser Basis ermittelte Restnutzungsdauer der Straße große Toleranzen, stellt aber derzeit die bessere Variante dar. Zumal die Wirkung der Überlagerung der Halbraum- und Plattentragwirkung auf den Schädigungsmechanismus von Asphaltschichten noch unklar ist. Daher ist es sinnvoll, die Tragfähigkeit und die Restnutzungsdauer der Straße auf Grundlage der RStO zu bewerten.

Durch die oben genannten vier Fragenstellungen wurde die „Darmstädter Methode“ zur Interpretation der FWD-Messungen neu entwickelt. Um die Methode zu verifizieren, wurden die FWD-Messungen verschiedener Autobahnstrecken ausgewertet, die im Rahmen des Forschungsprojekts FE-Nr. 88.0100/2009 [BALD u.a., 2011] durchgeführt wurden. Im Ergebnis wurden an zwei Stellen von zwei verschiedenen Autobahnstrecken der ausfallende Schichtenverbund der Asphaltschichten bewertet. Die Bohrkernentnahme bestätigte diese Bewertung.

In Bild 8-3 und Bild 8-4 sind die „Darmstädter Methode“ und die Verifizierung der Methode in der Praxis dargestellt.

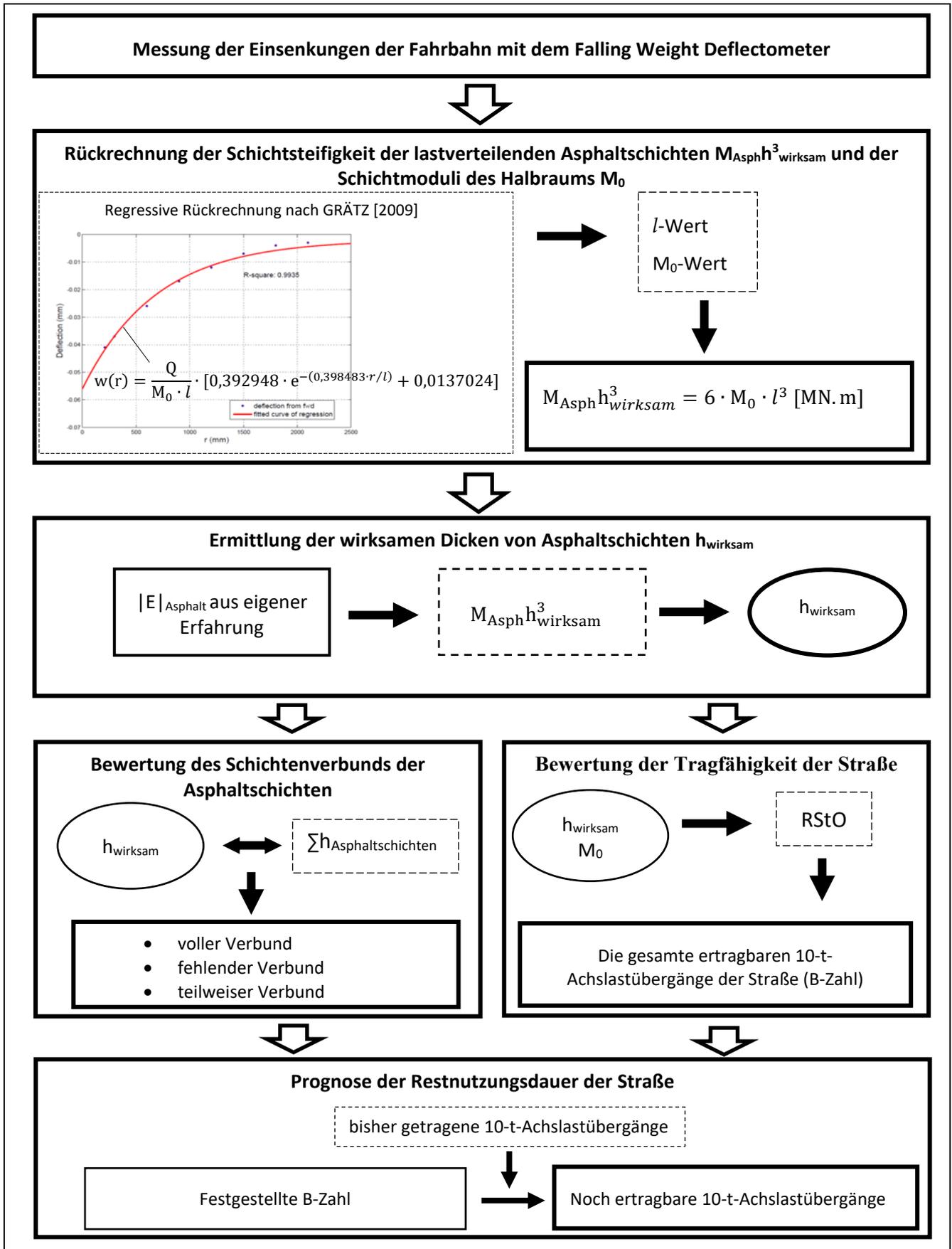


Bild 8-3 Darmstädter Methode zur Interpretation der FWD-Messungen



Stelle 1				Stelle 2			
Grätz'sche Rückrechnung		Annahme	Berechnen	Grätz'sche Rückrechnung		Annahme	Berechnen
M_0 [N/mm ²]	l [mm]	$ E _{\text{Asphalt}}$ [N/mm ²]	h_{wirksam} [cm]	M_0 [N/mm ²]	l [mm]	$ E _{\text{Asphalt}}$ [N/mm ²]	h_{wirksam} [cm]
1.447	274	14.000	<u>22,5</u>	1.210	291	14.000	<u>22,9</u>
Bewertung: fehlender Schichtenverbund				Bewertung: fehlender Schichtenverbund			
12 cm + <u>22 cm</u> = 34 cm				<u>22 cm</u> + 12 cm = 34 cm			

Bild 8-4 Verifizierung der Darmstädter Methode in der Praxis

9 Zusammenfassung und Ausblick

Straßenerhaltung ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Erfolg einer dynamischen Wirtschaft. Um die Erhaltungsstrategie wirtschaftlich und effizient zu planen, ist die strukturelle Substanz der Asphalt-schichten genau zu bewerten. Aufgrund des hohen Aufwands solcher zerstörenden Untersuchungen wie Bohrkernentnahme ist es erforderlich, eine zerstörungsfreie Methode zu entwickeln.

Seit Anfang der 2000er Jahre erforscht das Institut für Verkehrswegebau der Technischen Universität Darmstadt die zerstörungsfreie Bewertung struktureller Substanz der Asphalt-schichten und ihrer Tragfähigkeit mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD). Als Ergebnis von 10 Jahren Forschung wurde in 2009 im Rahmen der Habilitation von GRÄTZ ein Verfahren entwickelt, das auf dem gebetteten Plattenmodell basiert. Im Vergleich zu den in anderen Ländern entwickelten mehrschichtigen Verfahren hat das zweischichtige Verfahren von GRÄTZ den Vorteil, dass es die FWD-Messungen ohne Informationen über den bestehenden Straßenaufbau interpretieren kann. Im Jahr 2010 wollte das Institut das GRÄTZ-Verfahren weiterentwickeln, um die Restnutzungsdauer der Straße mit dem FWD zerstörungsfrei zu ermitteln. Dabei wurde jedoch die Schwächen des GRÄTZ-Verfahrens erkennbar.

Zunächst zeigt die Parameteranalyse, dass die Bewertung der Tragfähigkeit der Straße mit dem I -Wert ohne Berücksichtigung der strukturellen Substanz des unterliegenden Halbraums, wie von GRÄTZ vorgeschlagen, zu ungenauen Ergebnissen der Untersuchung führen kann. Um dieses Problem zu lösen, stellte das Institut das GRÄTZ-Verfahren auf die Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ um. Ziel dieser Umstellung war es, mit dem rückgerechneten $|E|_{\text{Asphalt}}$ die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Straße im Hinblick auf Rissbildung von Asphalt-schichten zu ermitteln. Untersuchungen in der Praxis zeigten jedoch, dass der durch dieses Verfahren rückgerechnete $|E|_{\text{Asphalt}}$ auch für verschiedenen Strecken unterschiedlich ausfiel. Daraufhin stellte das Institut fest, dass das GRÄTZ-Verfahren weiterentwickelt werden muss, um die strukturelle Substanz der Asphalt-schichten genau zu bewerten. Erst dann kann eine zerstörungsfreie Ermittlung mit dem FWD in Betracht gezogen werden.

Ziel dieser Arbeit war es, das GRÄTZ-Verfahren weiterzuentwickeln, um den Steifigkeitsmodul des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ durch FWD-Messungen zutreffend zu bewerten und damit die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Straße im Hinblick auf die Rissbildung der Asphalt-schichten zerstörungsfrei und rechnerisch zu bewerten.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde zunächst die Entwicklung des Verfahrens von GRÄTZ analysiert. Dabei wurden verschiedene Punkte in dem Verfahren in Frage gestellt, aus denen sich seine unterschiedliche Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ ergeben können. Um diese Punkte zu klären, wurde anschließend das Tragverhalten der Straße mittels der Finite-Element-Methode (abaqus) untersucht.

Den Schwerpunkt der Ergebnisse der FEM-Untersuchungen stellte die Aufklärung des Tragverhaltens von Asphaltsschichten in Abhängigkeit von ihrem Schichtenverbund dar, was zur Einführung einer neuen Kennzahl für die strukturelle Substanz der Straße führte – die so genannte wirksame Dicke der lastverteilenden Asphaltsschichten (h_{wirksam}). Damit ließ sich feststellen, dass die Schwachstelle des GRÄTZ-Verfahrens in der Vernachlässigung des Schichtenverbunds von Asphaltsschichten liegt und daher die Rückrechnung des Steifigkeitsmoduls des Asphalts $|E|_{\text{Asphalt}}$ aus der FWD-Messung nicht ziel führend ist.

Die weiteren Ergebnisse der FEM-Untersuchungen, mit denen die Überlagerung der Platten- und Halb-raumtragwirkung im Lastangriffsbereich von Asphaltsschichten (der lokale Effekt der gebetteten Platten) festgestellt wurde, zeigten auch, dass die in vielen Literaturstellen beschriebene rechnerische Ermittlung der Nutzungsdauer der Straße in Bezug auf die Rissbildung von Asphaltsschichten nicht ausreichend ist.

Aufgrund dieser neuen Erkenntnisse wurde festgelegt, dass die Zielsetzung dieser Arbeit geändert werden muss. Die FWD-Messungen sollen nämlich dazu herangezogen werden, die wirksamen Dicke von Asphaltsschichten h_{wirksam} auszuwerten und damit deren Schichtenverbund zu bewerten. Anhand der rückgerechneten h_{wirksam} werden die Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer der Straße auf der Grundlage der empirischen Erfahrungen der RStO ermittelt. Damit wurde die „Darmstädter Methode“ zur Interpretation der FWD-Messungen neu entwickelt. Die Verifizierungen in der Praxis bestätigen die Methode.

Als Ausblick kann die Darmstädter Methode als Grundlage für die Funktionsbauverträge verwendet werden. Dazu werden die folgenden Punkte zur Weiterentwicklung der Methode empfohlen:

Erstens soll der teilweise Schichtenverbund der Asphaltsschichten in der Praxis systematisch untersucht werden, in dem die wirksame Dicke von Asphaltsschichten h_{wirksam} in verschiedene Richtungen der Fahrbahn ausgewertet wird. Damit wird die Bewertung des Schichtenverbunds Methode optimiert.

Zweitens soll die wirksame Dicke von Asphaltsschichten h_{wirksam} in Verbindung mit dem Abscherversuch systematisch untersucht werden. Dadurch können die in ZTV-Asphalt vorgeschriebenen Mindestanforderungen an den Schichtenverbund der Asphaltsschichten für den Abscherversuch, die üblicherweise in Bauverträgen geregelt sind, optimiert werden.

Drittens soll die Tragfähigkeit von Straßen mit gemischten Bauweisen, z.B. wie Pflaster auf Asphalt oder Asphalt auf Beton, untersucht werden. Dadurch kann der Parameter h_{wirksam} als die Dicke der lastverteilenden Schicht von Straßen weiterentwickelt werden. Damit werden die Bewertung sowie die Bemessung der Tragfähigkeit der Straße optimiert. In diesem Zusammenhang soll auch die durch die GRÄTZ'schen Rückrechnungsmethode rückgerechnete Schichtmoduli des Halbraumes M_0 in Verbindung mit einem statischen Lastplattendruckversuch verglichen werden.

Schließlich soll der lokale Effekt, die Überlagerung der Halbraum- und Plattentragwirkung, der Asphaltsschichten unter Last eingehend erforscht werden. Mit den daraus gewonnenen neuen Erkenntnissen kann die Restnutzungsdauer der Straße genauer ermittelt werden. So lassen sich die Strategien zur Erhaltung der Straßen besser erstellen.

10 Anhang 1: Baustoff Asphalt

10.1 Zusammensetzung und Herstellung des Asphalts

Asphalt ist ein Baustoff, der aus abgestuften Körnungen aus Gesteinen und Bitumen als Bindemittel besteht. Je nach den lokal verfügbaren Materialien, den vorhandenen Gesteinsarten, werden für die Körnungsgemische des Asphaltmischgutes nur bestimmte Gesteine verwendet, die die geforderten Qualitäten für den Einsatz im Straßenbau erfüllen können. Die verschiedenen Korngrößen, die bei der Herstellung getrennt anfallen, werden in der Mischanlage unter Zugabe von Bitumen zu Asphalt gemischt. Die Zusammensetzung des Körnungsgemischs ist entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des Asphalts. Das im Mischgut verwendete Bindemittel ist Bitumen, das durch die Destillation von Erdöl hergestellt wird. Die viskose Eigenschaft von Bitumen ermöglicht die fugenlose Herstellung der Asphaltsschichten.

10.2 Lastabtrag des verdichteten Asphaltmischguts

Im verdichteten Zustand stellt das Asphaltmischgut eine Matrix aus Körnern, Bitumen und Luft (Hohlräume) dar. Darin bauen die Körner ein Korngerüst auf, die es ermöglicht, die durch den Verkehr erzeugten Spannungen in zahlreiche kleine Normal- und Schubspannungen zwischen den einzelnen Körnern aufzulösen. In Bild 10-1 ist der Lastabtrag des verdichteten Asphaltmischguts dargestellt.

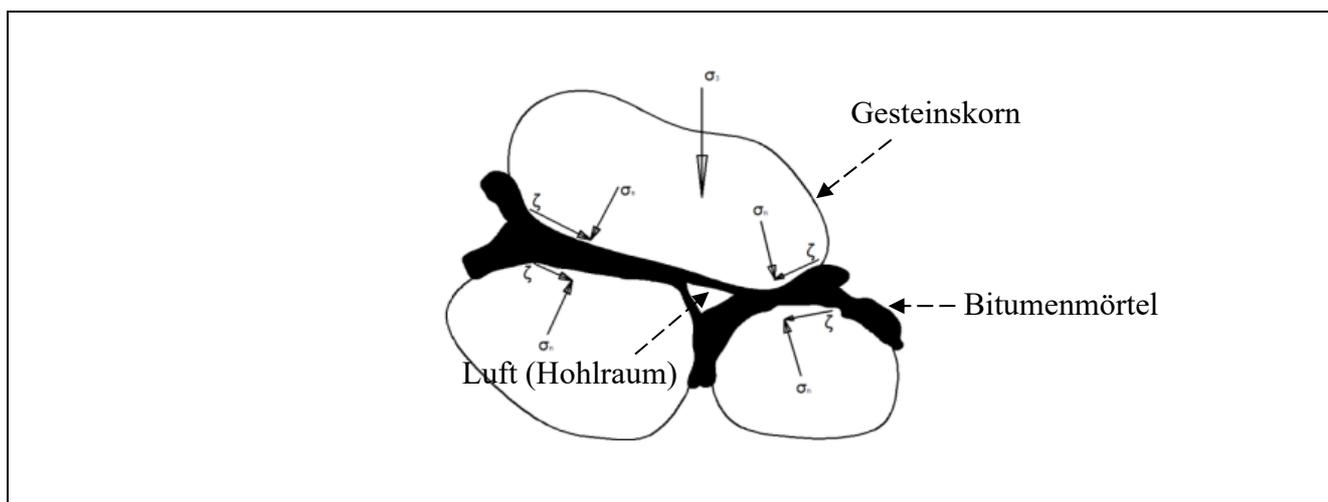


Bild 10-1 Spannungszustand im verdichteten Asphaltmischgut [NGUYEN, 2008]

Durch Mischen bildet Bitumen mit dem Feinsand bzw. Füller ein homogenes Medium, das als Mörtel bezeichnet wird. Der Mörtel umhüllt nach dem Mischen jedes Gesteinskorn und ermöglicht es den

Körnern, sich miteinander zu verbinden und nach der Verdichtung ihre Position im Korngerüst zu fixieren.

Dank der Hohlräume im Asphalt kann sich das Bitumen bei hohen Temperaturen ausdehnen. Nach den ZTV Asphalt-StB 07 [FGSV,2013] sollen die Hohlräume zwischen den Körnern jedoch nur mit einer bestimmten Menge von Bitumen gefüllt werden. Bei zu viel Bitumen wird der Korn-zu-Korn-Kontakt bzw. die Verzahnung der Körner beeinträchtigt. Dadurch verringert sich der Verformungswiderstand des Asphaltmaterials.

Unter der Radlast kann das Tragverhalten des Asphalts im Grenzzustand der Tragfähigkeit wie folgt beschrieben werden: Die Normalspannungen sollen über die Korn-zu-Korn-Kontakt des Korngerüsts abgetragen werden. Die Schubspannungen versuchen, ein Korn im Korngerüst von seinen benachbarten Körnern wegzuschieben und ein Abgleiten der Körner voneinander zu bewirken. Dies wird durch die Verzahnung der Körner, die Kohäsion sowie die Adhäsion verhindert. Somit haben die folgenden Komponenten den entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Asphalts.

- Die elastische Tragfähigkeit des Korngerüsts (Körnungen)
- Die Verzahnung der Körner im Korngerüst (Kornform)
- Die Adhäsion zwischen Bindemittel und Körnern (Affinität zwischen Bitumen und Gestein)
- Die Kohäsion des bituminösen Mörtels, der aus dem Bitumen und dem darin eingeschlossenen Füller sowie Feinsanden besteht (Komplexer E-Modul)

10.3 Mechanische Eigenschaft des Asphalts

Die mechanischen Eigenschaften von Asphalt hängen von seiner Zusammensetzung ab. Durch die Bildung des Korngerüsts erhält Asphalt eine nahezu isotrope mechanische Eigenschaft. Die Körner liefern in der Regel die elastische Komponente, die temperaturunabhängig ist, während die viskoelastische Eigenschaft von Asphalt durch das temperaturabhängige Bitumen gesteuert wird [LITZKA u.a., 1999]. Infolge der mangelnden Affinität zwischen Körnern und Bitumen bzw. der fehlenden oder unzureichenden Kohäsion des Mörtels können sich die Körner im Korngerüst unter der Verkehrsbelastung gegeneinander verschieben, was zu den plastischen Verformungen des Asphalts führt. Die mechanischen Eigenschaften von Asphalt sind stark abhängig von der Umgebungstemperatur sowie der Belastungsart.

Die viskoelastische Eigenschaft des Asphalts wird in der Literatur durch den komplexen Modul E^* beschrieben, z.B. in DIN EN 12697. Der komplexe Modul E^* eines linearen viskosen elastischen Körpers stellt den Zusammenhang zwischen einer sinusförmigen Belastung $\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$ und der dadurch hervorgerufenen Dehnung $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \Phi)$ dar. Bild 10-2 zeigt das charakteristische Verformungsverhalten der viskoelastischen Eigenschaft.

Der komplexe Modul E^* , wie im Bild 10-3 schematisch dargestellt, setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, dem reellen Anteil E_1 , Speichermodul genannt, und dem imaginären Anteil E_2 , Verlustmodul genannt. Der Begriff „Speichermodul“ beschreibt die Tatsache, dass die Energie der elastischen Verformung während der Belastung zwischengespeichert und bei der Entlastung vollständig wieder zurückverwandelt wird. Der „Verlustmodul“ hingegen gibt an, dass die Energie der viskosen Verformung nicht gespeichert, sondern in Wärmeenergie umgewandelt wird und nicht zurückgewonnen werden kann [SCHRAMM, 1995].

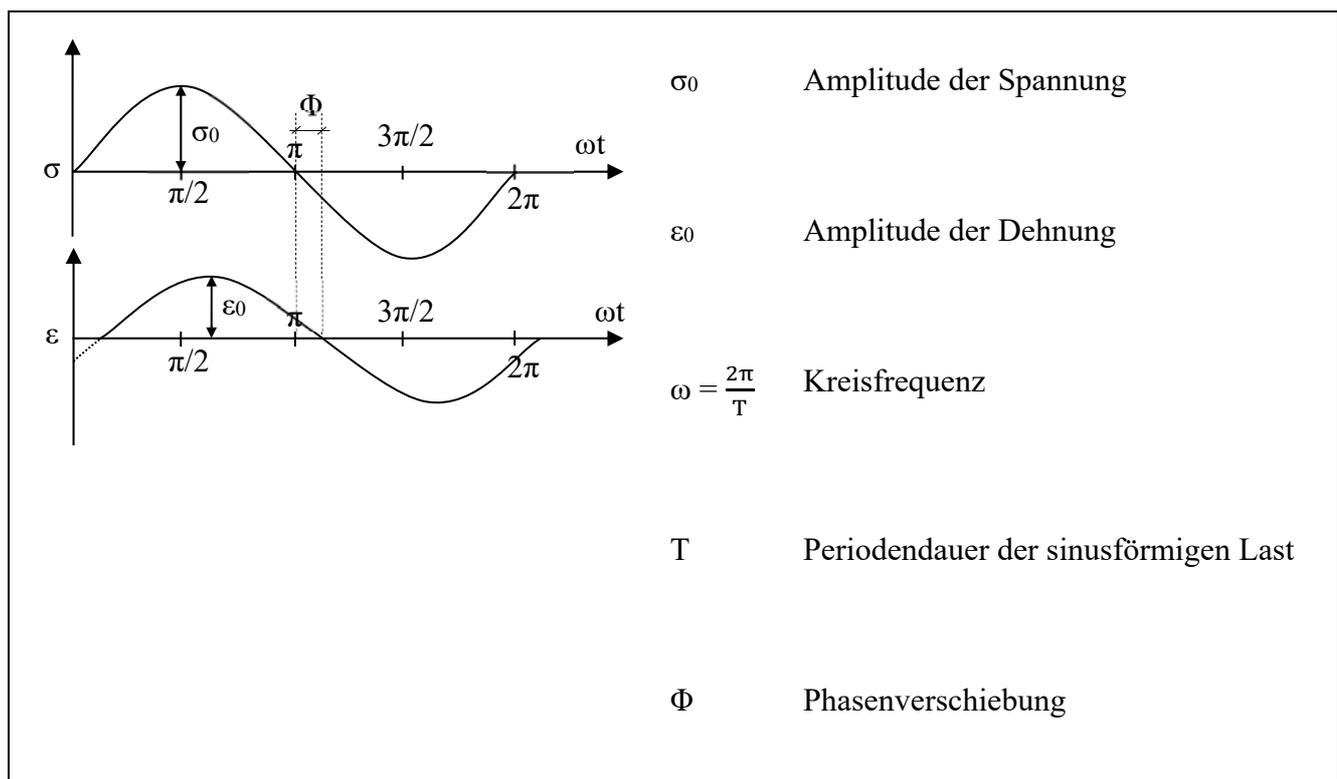
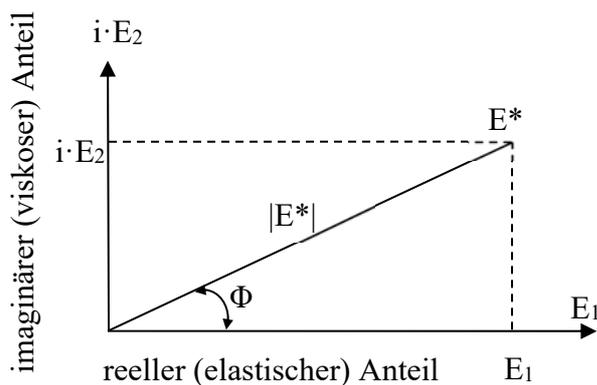


Bild 10-2 Spannungs- und Verformungsverhalten der viskosen elastischen Eigenschaft [LITZKA u.a., 1999]



$$E^* = |E^*| \cdot (\cos(\Phi) + i \cdot \sin(\Phi)) \quad (10-1)$$

$$E_1 = |E^*| \cdot \cos(\Phi) \quad (10-2)$$

$$E_2 = |E^*| \cdot \sin(\Phi) \quad (10-3)$$

E^* Komplexer Modul des Asphalts

$|E^*|$ Betrag des komplexen Moduls bzw. Steifigkeitsmodul des Asphalts [MPa]

i Imaginäre Einheit mit $i^2 = -1$

Φ Phasenverschiebung; $\Phi = \arctan (E_2/E_1)$

Bild 10-3 Zusammensetzung des komplexen Moduls E^* des Asphalts [FGSV, 2006]

Anhand der oben geschriebenen Grundlagen des komplexen Moduls E^* des Asphalts (vgl. Bild 10-2 und Bild 10-3) wurde die Untersuchung mit dem Dynamic Shear Rheometer (DSR-Versuch) entwickelt, um die viskoelastischen Eigenschaften vom Bitumen zu bewerten. Darüber hinaus besteht nach [FGSV AL-SP-Asphalt 09, 2009] eine Temperatur-Frequenz-Äquivalenz des Steifigkeitsmoduls von Asphalt $|E^*|_{\text{Asphalt}}$. Der $|E^*|_{\text{Asphalt}}$, welcher in einem dynamischen Versuch für die Temperatur T_1 und der Frequenz f_1 ermittelt wird, kann auch bei einer anderen Temperatur T_2 und der Frequenz f_2 , ermittelt werden. Die Temperatur-Frequenz-Äquivalenz des $|E^*|_{\text{Asphalt}}$ kann in der Regel durch eine Hauptkurve (engl. Master Curve) dargestellt werden. Die Hauptkurve eines Asphaltmischguts wird ermittelt, indem aus der Prüftemperatur und der Belastungsfrequenz die Steifigkeitsmodule $|E^*|_{\text{Asphalt}}$ bei unterschied-

lichen Beanspruchungszuständen, die sogenannte „Isotherme“, bestimmt und mit dem Ansatz von ARREHNIUS auf eine Referenztemperatur bezogen werden [HÜRTGEN, 2000].

10.4 Rheologisches Verhalten des Asphalts

Die numerische Beschreibung der mechanischen Eigenschaft des Asphalts ermöglicht die Analyse des Tragverhaltens von Asphaltstraßen im Gebrauchszustand. Dazu wurden verschiedene rheologische Modelle entwickelt, die in vielen Literaturstellen beschrieben sind, wie z.B. [COST 333], [FGSV, 2006] oder [bast, 2006].

10.4.1 Elastisches Verhalten

Das Federelement wird verwendet, um die Elastizität des Asphalts zu beschreiben. Dazu ist die Dehnung des Asphalts proportional zur Belastung und unabhängig von der Belastungszeit oder Belastungsart. Bei Entlastung geht er spontan und vollständig zum Ausgangszustand zurück. Bild 10-4 zeigt das elastische Verformungsverhalten.

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon_E \quad (10-4)$$

mit:

E : Steifigkeit des rheologischen Elements Feder

σ_0 : Belastung, ggf. zeitabhängig

ε_E : elastische Dehnung der Feder, ebenfalls ggf. zeitabhängig, aber proportional zu σ_0

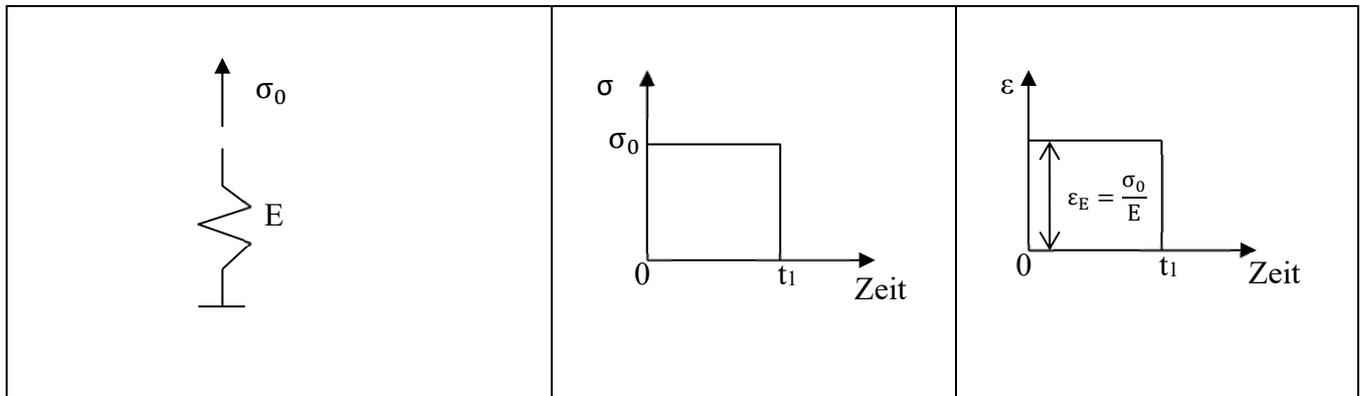


Bild 10-4 Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Federelementes bei einer konstanten Spannung

Die Dehnungsreaktion der Feder unter der sinusförmigen Spannung $\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$ wird durch die folgende Gleichung ohne Phasenverschiebung beschrieben.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0 \cdot \sin(\omega t)}{E} \quad (10-5)$$

10.4.2 Viskoses Verhalten

Das viskose Verhalten des Asphalts wird durch das Dämpferelement dargestellt, das aus einem Kolben besteht, der mit einer newtonschen Flüssigkeit gefüllt ist. Dazu zeigt das Dämpferelement ein lineares, unelastisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter einer konstanten Spannung. Die viskose Dehnung des Dämpfers ist proportional zur Belastung und zur Belastungszeit. Nach Wegnahme der Belastung bleibt die viskose Verformung unverändert. Bild 10-5 zeigt das viskoelastische Verhalten.

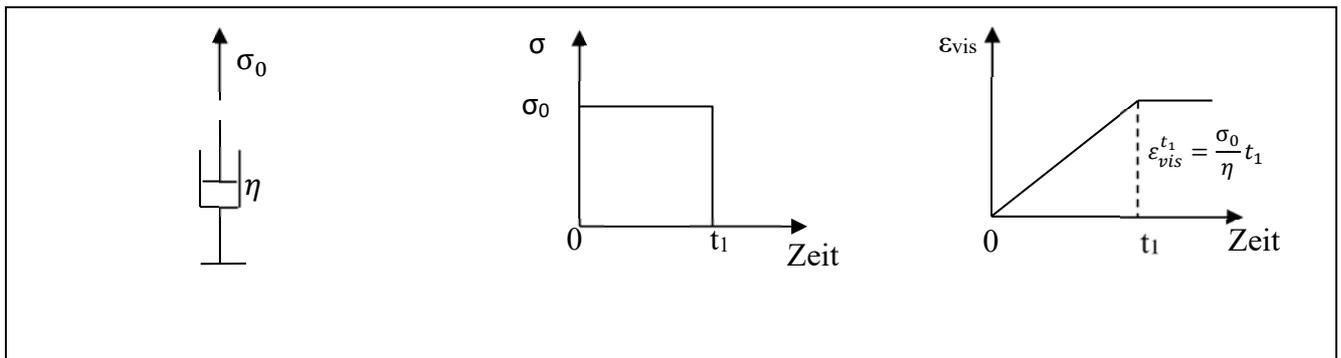


Bild 10-5 Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Dämpferelementes bei einer konstanten Spannung

$$\varepsilon_{vis}^{t_1} = \frac{\sigma_0}{\eta} t_1 \quad (10-6)$$

mit:

σ_0 : zeitabhängige Belastung

$\varepsilon_{vis}^{t_1}$: viskose Dehnung zum Zeitpunkt t_1

η : Scher- oder Zugviskosität; dynamische Viskosität

Die Dehnungsreaktion eines Dämpferelementes unter der Spannungsfunktion $\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$ wird durch die folgende Gleichung mit einem Phasenwinkel von $\frac{\pi}{2}$ beschrieben:

$$\varepsilon_{vis}^t = \frac{\sigma_0}{\eta} \sin\left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right) \quad (10-7)$$

10.4.3 Viskoelastisches Verhalten

Die viskoelastische Eigenschaft des Asphalts wird durch Reihen- und Parallelschaltungen von Feder- und Dämpferelementen numerisch beschrieben. In Bild 10-6 und Bild 10-7 sind die Kriech- und Relaxationsfunktionen des viskoelastischen Verhaltens mittels der Kelvin-Voigt-Gruppe und der Maxwell-Gruppe dargestellt.

Kelvin-Voigt-Gruppe:

Unter einer konstant vorgegebenen Spannung σ_0 (vgl. Gleichung 10-8) wird das Kriechverhalten wie folgt beschrieben:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot J(t) \quad (10-8)$$

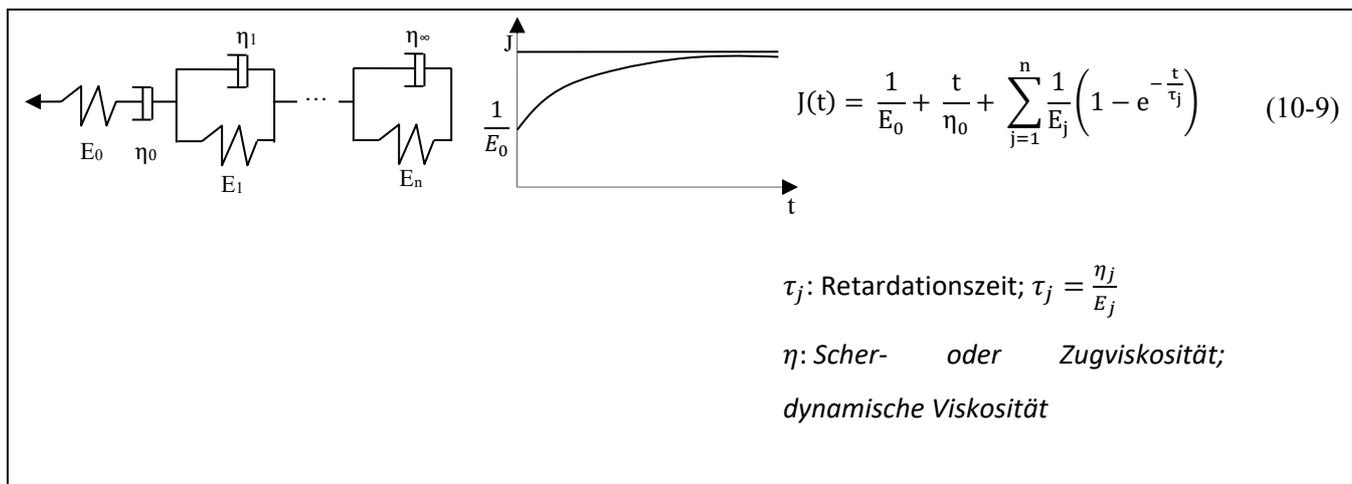


Bild 10-6 Kelvin-Voigt-Gruppe und ihre Kriechfunktion [VORMWALD, 2009]

Maxwell-Gruppe:

Unter einer konstant vorgegebenen Dehnung ε_0 (vgl. Gleichung 10-10) wird die Relaxation wie folgt beschrieben:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot E(t) \quad (10-10)$$

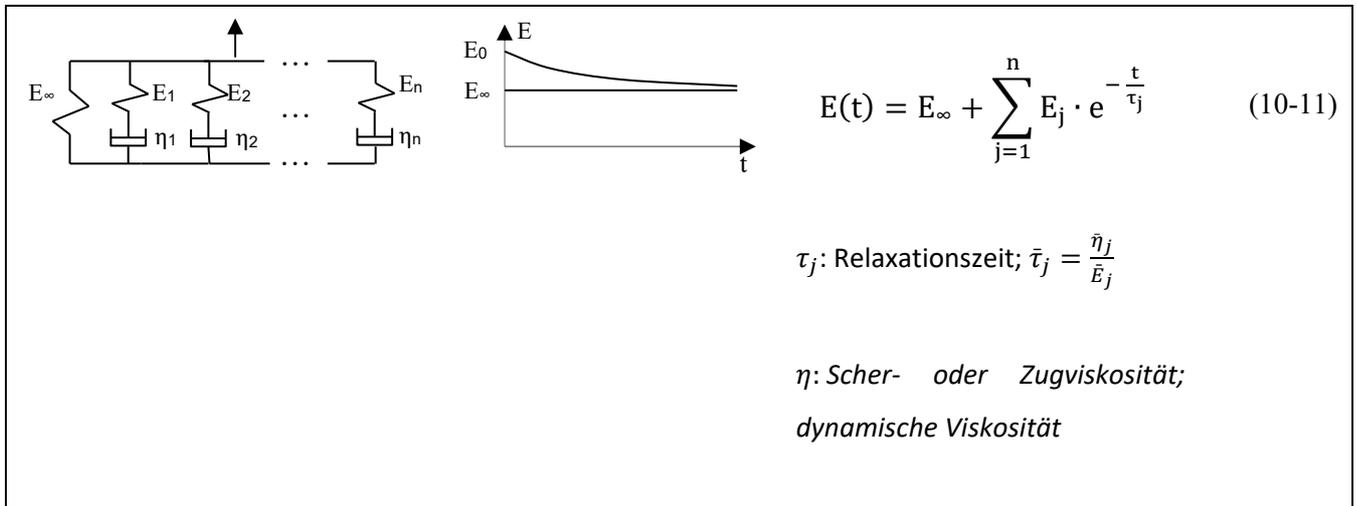


Bild 10-7 Maxwell-Gruppe und ihre Relaxationsfunktion [VORMWALD, 2009]

11 Anhang 2: Rechnerische Modelle zur Beschreibung des Tragverhaltens von Straßen

11.1 Halbraummodell von BOUSSINEQ

Durch die Anwendung von Potentialfunktionen mit der Vernachlässigung des Massengewichts lautet der Lösungsansatz von BOUSSINEQ für die Differentialgleichungen von (2-14) bis (2-16) der Kontinuumsmechanik in Abschnitt 2.3.2.1 wie folgt [GERLACH, 1968]:

$$\begin{aligned}u &= \zeta_1 + z \cdot \frac{\delta\psi}{\delta x} \\v &= \zeta_2 + z \cdot \frac{\delta\psi}{\delta y} \\w &= \zeta_3 + z \cdot \frac{\delta\psi}{\delta z}\end{aligned}\tag{11-1}$$

Darin sind ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 und ψ Potentialfunktionen. Die Verträglichkeit dieser Funktionen lautet.

$$\frac{\delta\psi}{\delta z} + \frac{1}{3 - 4\mu} \left(\frac{\delta\zeta_1}{\delta x} + \frac{\delta\zeta_2}{\delta y} + \frac{\delta\zeta_3}{\delta z} \right) = 0\tag{11-2}$$

Mit dem Elastizitätsgesetz für den dreidimensionalen Spannungs-Verformungs-Zustand in kartesischen Koordinaten (vgl. Gleichung (2-10)) lauten die Verformungen an der Oberfläche eines elastischen homogenen Halbraums durch eine symmetrisch kreisförmige oder rechteckförmige Flächenlast $p(\zeta, \eta)$.

$$\begin{aligned}
 u(x, y, 0) &= -\frac{1 + \mu}{2\pi E} (1 - 2\mu) \iint_0^F \frac{p(\zeta, \eta)(x - \zeta)}{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2} d\zeta \cdot d\eta \\
 v(x, y, 0) &= -\frac{1 + \mu}{2\pi E} (1 - 2\mu) \iint_0^F \frac{p(\zeta, \eta)(y - \eta)}{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2} d\zeta \cdot d\eta \\
 w(x, y, 0) &= -\frac{1 + \mu}{2\pi E} (1 - 2\mu) \iint_0^F \frac{p(\zeta, \eta)(y - \eta)}{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2} d\zeta \cdot d\eta
 \end{aligned}
 \tag{11-3}$$

An der Lastachse ergibt sich die Einsenkung w unter einer kreisförmigen Pressung p_0 (a) wie folgt.

$$w(0,0,0) = \frac{2(1 - \mu^2)}{E} a \cdot p_0
 \tag{11-4}$$

und ergeben sich die Beanspruchungen in der Lastachse wie im Folgend:

$$\sigma_z = p \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right]
 \tag{11-5}$$

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left[(1 + 2\mu) - \frac{2(1 + \mu) \cdot z}{(a^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

$$\tau = 0$$

11.2 Das mehrschichtige Halbraummodell

Nach LÜCKE [1966] werden die Einsenkung w und Radialverschiebung u eines zylindrischen Raumelements in Bild 2-7 einer Halbraumschicht mit bestimmter Dicke h wie folgt beschrieben:

$$w(r, z) = \frac{1 + \mu}{E} \left[2(1 + \mu) \nabla^2 \Phi(r, z) - \frac{\delta^2 \Phi(r, z)}{\delta z^2} \right] \quad (11-6)$$

$$u(r, z) = -\frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{\delta^2 \Phi(r, z)}{\delta r \delta z} \quad (11-7)$$

die Verträglichkeit der Bipotentialsgleichung lautet

$$\nabla^4 \Phi(r, z) \cong \Delta^2 \Phi(r, z) \cong \left(\frac{\delta^2}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \right)^2 \cdot \Phi(r, z) = 0 \quad (11-8)$$

Mithilfe von Hankel-Transformation nullter Ordnung transformierte LÜCKE die Gleichungen (11-6) und (11-7).

$$\bar{w}(m, z) = \frac{1 + \mu}{E} \left[(1 - 2\mu) \frac{\delta^2}{\delta z^2} \bar{\Phi}(m, z) - (2 - \mu) m^2 \bar{\Phi}(m, z) \right] \quad (11-9)$$

$$\bar{u}(m, z) = \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{\delta}{\delta z} \bar{\Phi}(m, z) \quad (11-10)$$

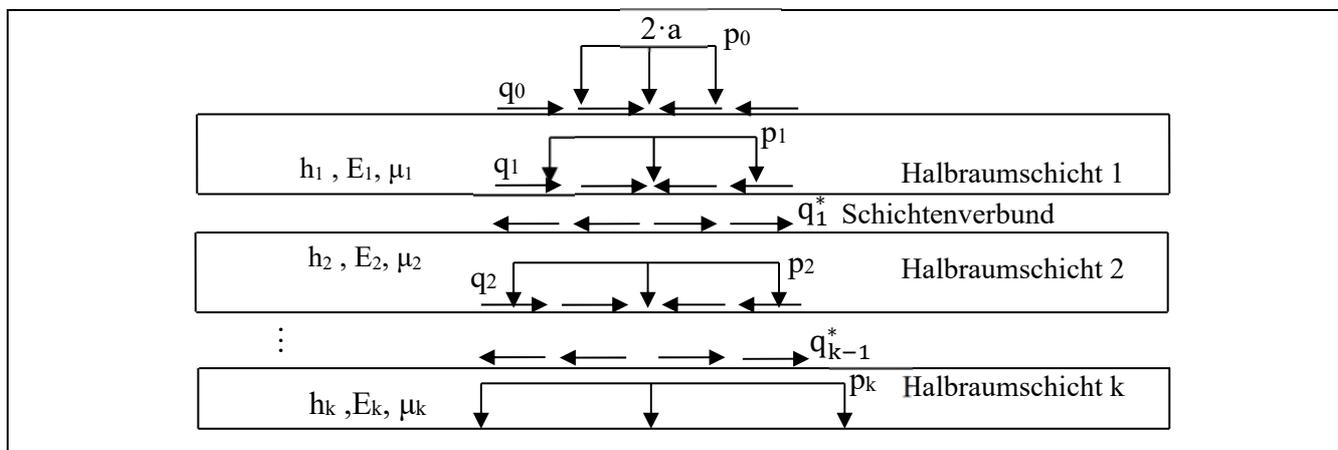


Bild 11-1 Das N-schichtige Halbraummodell [LÜCKE, 1966]

Für ein heterogene Halbraum aus N übereinanderliegenden Halbraumschichten mit unterschiedlichen Schichtdicken h_k und Materialeigenschaft E_k und μ_k (Bild 11-1) sind die Spannung- und Verschiebungskomponenten einzelner Halbraumschicht unter einer axialsymmetrischen Belastung wie folgt:

An der Unterseite der Halbraumschicht k:

$$\bar{w}(m, 0) = \frac{2(1 - \mu_k^2)}{mE_k \varepsilon_k} (\alpha_k \bar{p}_k - \beta_k \bar{p}_{k+1} - \gamma_k \bar{q}_k - \delta_k \bar{q}_{k-1}) \quad (11-11)$$

$$\bar{u}(m, 0) = \frac{2(1 - \mu_k^2)}{mE_k \varepsilon_k} (-\gamma_k \bar{p}_k + \delta_k \bar{p}_{k-1} + \lambda_k \bar{q}_k - \varrho_k \bar{q}_{k-1}) \quad (11-12)$$

An der Oberseite der Halbraumschicht k

$$\bar{w}(m, h_{k+1}) = \frac{2(1 - \mu_{k+1}^2)}{mE_{k+1} \varepsilon_{k+1}} (-\beta_{k+1} \bar{p}_{k+1} - \alpha_{k+1} \bar{p}_k - \delta_{k+1} \bar{q}_{k+1} - \gamma_{k+1} \bar{q}_k) \quad (11-13)$$

$$\bar{u}(m, h_{k+1}) = \frac{2(1 - \mu_k^2)}{mE_{k+1} \varepsilon_{k+1}} (\delta_{k+1} \bar{p}_{k+1} - \gamma_{k+1} \bar{p}_k + \varrho_{k+1} \bar{q}_{k+1} - \lambda_k \bar{q}_{k-1}) \quad (11-14)$$

mit \bar{p}_k ist die Axialspannung an der Schichtgrenze

$$\bar{p}_k = \frac{\beta_k (\lambda_k + n_k \varepsilon_k) - \delta_k (\gamma_k - n_k s_k \varepsilon_k)}{(\lambda_k + n_k \varepsilon_k)(\alpha_k + n_k \varepsilon_k) - (\gamma_k - n_k s_k \varepsilon_k)^2} \cdot \bar{p}_0 = f \cdot \bar{p}_0 \quad (11-15)$$

und \bar{q}_k ist die horizontale Schubspannung an der Schichtgrenze

$$\bar{q}_k = \frac{\beta_k(\lambda_k - n_k s_k \varepsilon_k) - \delta_k(\alpha_k - n_k \varepsilon_k)}{(\lambda_k + n_k \varepsilon_k)(\alpha_k + n_k \varepsilon_k) - (\gamma_k - n_k s_k \varepsilon_k)^2} \bar{q}_0 = g \cdot \bar{p}_0 \quad (11-16)$$

m ist Parameter der Hankel-Transformation

$\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k, \varepsilon_k, \lambda_k, s_k$ sind die Exponentialfunktionen von m und enthalten die Schichtdicke der Halbraumschicht k .

n_k ist das Verhältnis der Steifigkeit der Schicht k und $k+1$

$$n_k = \frac{(1 - \mu_{k+1}^2)E_k}{(1 - \mu_k^2)E_{k+1}} \quad (11-17)$$

Für eine Kreisfläche mit einem Radius a und angreifenden Druck p erhält man durch die Transformation

$$\bar{p}_0(m) = p \int_0^a r \cdot I_0(mr) dr = p \frac{a}{m} I_1(ma) \quad (11-18)$$

I_0 und I_1 : Bessel-Funktion nullter und erster Ordnung

An der Schichtgrenze der Halbraumschichten gelten für volle Haftbedingung:

$$\bar{w}(m, 0) = \bar{w}(m, h_{k+1}) \quad (11-19)$$

$$\bar{u}(m, h_{k+1}) = \bar{u}(m, h_{k+1}) \quad (11-20)$$

und für reibungsfreie Auflagerung:

$$\bar{w}(m, 0) = \bar{w}(m, h_{k+1}) \quad (11-21)$$

$$\bar{q}(m, h_k) = \bar{q}(m, h_{k+1}) = 0 \quad (11-22)$$

Unter Verwendung des Integrals für die Gleichungen (11-13) und (11-14)

$$w(r, z) = \int_0^\infty m \cdot \bar{w}(m, z) I_0(rm) dm \quad (11-23)$$

$$u(r, z) = \int_0^\infty m \cdot \bar{u}(m, z) I_1(rm) dm \quad (11-24)$$

Die Integralgleichungen der Beanspruchungen einer beliebigen Halbraumschicht k unter einer kreisförmigen vertikalen Flächenlast p(a) werden wie folgt beschrieben:

Die Axialdruckspannung an der Berührungsfläche

$$\sigma_z(r, 0) = p_k = -p \cdot a \cdot \int_0^\infty f_k \cdot I_1(am) \cdot I_0(rm) dm \quad (11-25)$$

Die Schubspannung in der Berührungsfläche

$$\tau_z(r, 0) = q_k = -p \cdot a \cdot \int_0^\infty g_k \cdot I_1(am) \cdot I_0(rm) dm \quad (11-26)$$

Die Einsenkung an der Unterseite der Halbraumschicht k

$$w_k(r, 0) = \frac{2(1 - \mu_k^2)}{E_k} \cdot p \cdot a \int_0^\infty \frac{(\alpha_k f_k - \beta_k)}{m \varepsilon_k} I_1(am) \cdot I_0(rm) dm \quad (11-27)$$

Die Einsenkung an der Oberseite der Schicht k

$$w_k(r, h_k) = \frac{2(1 - \mu_k^2)}{E_k} \cdot p \cdot a \int_0^\infty \frac{(\beta_k f_k - \alpha_k)}{m \varepsilon_k} I_1(am) \cdot I_0(rm) dm \quad (11-28)$$

Die Radialverschiebung an der Unterseite der Schicht k

$$u_k(r, h_k) = \frac{2(1 - \mu_k^2)}{E_k} \cdot p \cdot a \int_0^\infty \frac{(-\gamma_k f_k - \delta_k)}{m \varepsilon_k} I_1(am) \cdot I_1(rm) dm \quad (11-29)$$

Die Radialverschiebung an der Oberseite der Schicht k

$$u_k(r, 0) = \frac{2(1 - \mu_k^2)}{E_k} \cdot p \cdot a \int_0^\infty \frac{(\delta_k f_k - \gamma_k)}{m \varepsilon_k} I_1(am) \cdot I_1(rm) dm \quad (11-30)$$

f_k ist das Verhältnis der elastischen Kennwerte zwischen Schicht k und der unterliegenden Schicht k+1.

Durch die Integration der Bessel-Funktion hat GERLACH die Gleichungen (11-25) bis (11-30) gelöst und das Tragverhalten einer drei schichtigen Asphaltstraße in Bild 2-14 (Abschnitt 2.3.2.3.2) dargestellt.

12 Anhang 3: Auswertung der viskoelastischen Eigenschaft des Asphalts für die Untersuchung im Kapitel 5.3

Die mechanischen Parameter der viskoelastischen Eigenschaft des Asphaltmaterials, die für die FEM-Modellierungen im Kapitel 5 mit abaqus eingesetzt wurden, wurden anhand des Relaxationsversuchs von MINHOTO u.a. [2007] für Hot Mastic Asphalt bei 15°C ausgewertet.

In abaqus wird das zeitabhängige viskoelastische Materialverhalten anhand der Maxwell-Gruppe (siehe Abschnitt 10.4.3) wie folgt beschrieben [abaqus Manual User, Version 6-10].

$$G(t) = \frac{E(t)}{2 \cdot (1 + \mu)} = G_0 \left(1 - \sum_{j=1}^N g_j \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right) \right) \quad (12-1)$$

mit:

$$g_j = \frac{G_j}{G_0}$$

$$\bar{\tau}_j = \frac{\eta_j}{\bar{G}_j} : \text{Relaxationszeit}$$

Die Auswertung des Relaxationsversuchs von MOINHOTO u.a. [2007] und die daraus resultierten Materialkonstanten der Maxwell-Gruppe zur Modellierung der viskoelastischen Eigenschaft der Asphaltsschicht in Abschnitt 5.3 sind dem Bild 12-1 zu entnehmen.

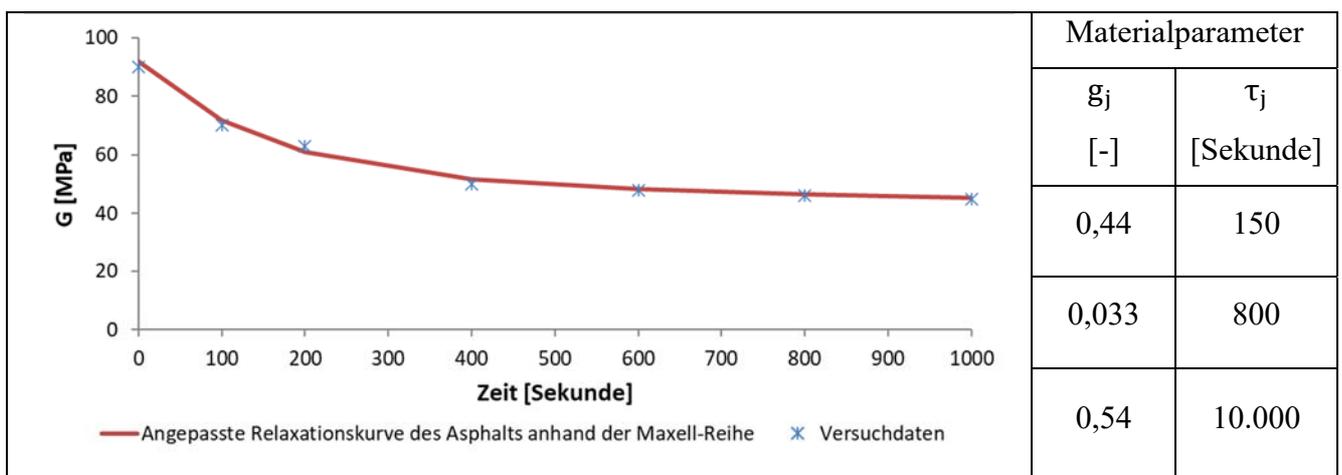


Bild 12-1 Relaxationsversuch von Hot-Maxtis-Asphalt bei 15°C von [MINHOTO u. a., 2007] und die Auswertung der Relaxation des Asphalts anhand der Maxwell-Reihe (siehe Abschnitt 10.4.3)

13 Anhang 4: Ermüdungsfunktionen des Asphalts und Ergebnisse der Laboruntersuchungen zur Bestimmung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ aus der Literatur

13.1 Ermüdungsfunktionen des Asphalts aus verschiedenen Forschungsinstituten

Nach COST 333 [1999] wurde aus der Praxis festgestellt, dass die Ermüdungsfunktion von Asphalt generell im Bereich von 10^4 bis 10^7 Überrollungen verwendet werden soll. Demnach wird die Ermüdungsfunktion von Asphaltsschichten nach der Formel (2-43) in Abschnitt 2.4 wie folgt angegeben.

$$N_f = SF \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_6} \cdot \varepsilon \right)^{-\frac{1}{b}} \quad (13-1)$$

mit:

ε_6 : Dehnung entsprechend der Ermüdung des Asphalts im Bereich von 10^4 bis 10^7 Lastwechseln [μstrain]

b : Materialkonstante [-]

ε : Initiale elastische Zugdehnung an der Unterseite von Asphaltsschichten [μstrain]

SF: Anpassungsfaktor der Ermüdungsfunktion für Verwendungen in der Praxis [engl. Shiftfactor]

Die Parameter in der Ermüdungsfunktion werden durch statistische Regressionen hergeleitet. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen zwischen Labor und Realität ist für die angegebene Ermüdungsfunktion jeweils ein sogenannter Verschiebungsfaktor SF (engl. Shiftfactor) einzuführen, um die Anzahl der in der Realität zu erwartenden Überrollungen vom Verkehr näherungsweise prognostizieren zu können. Der Faktor SF soll den Heilungseffekt des Asphalts, Risswachstum und die Zunahme des Verkehrs berücksichtigen.

In Tabelle 13-1 sind die Parameter der Ermüdungsfunktion von Asphalt, die im Labor bestimmt wurden, sowie deren Verschiebungsfaktor SF aus verschiedenen Forschungsinstituten zusammengestellt.

Forschungsinstitut	Verwendeter Versuch	Parameter der Ermüdungsfunktion des Asphalts in Formel (13-1)		
		SF [-]	ε_6 [μ strain]	b [-]
Asphalt Institute	[-]	13	263	0.304
Nottingham Pell	Rotatingbending	100	212	0.2
Shell SPDM	[-]	10	239	0.2
BRRC Verstraeten	2 Point Bending	7.1	133	0.21

Tabelle 13-1 Die mittels des Laborversuchs vorgeschlagenen Parameter für die Ermüdungsfunktion in Formel (13-1) in [COST 333, 1999]

13.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen an den Bohrkernen zur Bestimmung des $|E|_{\text{Asphalt}}$ anhand der Spaltzugschwellversuche

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte wie zum Beispiel FE 04.199/2004/ARB und FE 88.0100/2009 wurden von mehreren Autobahnen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern Bohrkern entnommen und der $|E|_{\text{Asphalt}}$ im Labor untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 13-3 bzw. in Tabelle 13-4 zusammengefasst. Daraus kann die Abnahme des E-Moduls vom Asphalt $|E|_{\text{Asphalt}}$ während der Nutzung, wie ROWE in Bild 2-19 (Abschnitt 2.4.2) gezeigt, jedoch nicht abgeleitet werden.

13.2.1 FE 04.199/2004/ARB

Versuchstrecke	Bauklasse nach der RStO 12	Nutzungsdauer [Jahre]
1	SV	16
2	I	33
3	I	13
4	SV	21
5	SV	17
6	II	16
7	I	28
8	II	18
9	SV	28
10	SV	13

Tabelle 13-2 Informationen der untersuchten Strecken des Forschungsprojekts FE 04.199/2004/ARB

	H [°C]	E-Modul [N/mm ²]							
		ADS		ABI		oATS		uATS	
		N	R	N	R	N	R	N	R
VS 1	-10	14.819	12.186	15.732	12.801	17.145	18.982	19.263	18.807
	5	12.763	10.484	10.742	8.524	12.201	12.593	13.175	12.083
	20	5.837	6.853	6.018	6.634	7.217	7.110	8.398	6.818
VS 2	-10	13.625	15.717	21.942	21.012			14.853	15.000
	5	13.411	12.629	15.517	14.841			13.440	14.814
	20	7.824	7.450	8.879	7.565			8.942	9.696
VS 3	-10	19.582	19.983	28.145	19.845	26.311	22.988	21.909	18.572
	5	14.696	16.250	22.646	17.900	20.813	17.455	14.023	12.530
	20	7.948	7.258	11.387	12.322	12.873	12.200	7.902	7.841
VS 4	-10	18.226	20.425	13.631	14.256	14.642	14.740	18.811	18.247
	5	13.442	14.011	13.548	14.439	10.037	10.780	12.468	14.120
	20	8.735	8.701	6.956	8.470	6.075	7.175	5.912	7.123
VS 5	-10	10.053	12.194	14.512	15.406			13.852	11.968
	5	10.231	12.004	12.871	12.524			14.105	11.811
	20	5.805	6.876	6.251	8.645			9.687	9.671
VS 6	-10	12.314	14.477	16.394	15.101			21.065	21.455
	5	10.198	11.004	13.024	12.576			14.515	14.465
	20	5.179	5.941	5.894	6.288			7.100	7.236
VS 7	-10	13.930	16.775	16.039	13.256			14.429	15.147
	5	10.711	11.849	12.107	12.280			13.320	8.768
	20	6.516	6.917	7.837	11.094			8.022	4.000
VS 8	-10	18.558	18.357	23.417	19.204			20.541	15.790
	5	8.136	10.024	16.741	17.465			19.474	16.526
	20	5.164	5.709	10.553	12.160			12.250	11.007
VS 9	-10	13.647	15.675	11.034		14.796	14.227	13.116	15.613
	5	10.115	13.485	11.622		13.907	13.247	11.730	13.392
	20	6.037	6.782	6.859		9.370	8.617	9.352	9.452
VS 10	-10	14.004	14.798	20.800	20.714	18.437	19.052	25.646	22.272
	5	10.370	12.867	16.123	15.706	16.616	15.835	17.446	16.156
	20	4.206	5.025	7.345	10.210	9.986	10.059	9.282	9.707

Legende:

VS : Versuchstrecke

H [°C] : Prüftemperatur des Asphalts

ADS : Asphaltdeckschicht

ABI : Asphaltbinderschicht

o.ATS : obere Asphalttragschicht

u.ATS : untere Asphalttragschicht

N : Nebenrollspur

R : Rollspur

Tabelle 13-3 Die im Labor mittels des Spaltzug-Schwell-Versuchs bestimmten $|E|_{\text{Asphalt}}$ von Asphaltsschichten im Rahmen des Forschungsprojekts FE 04.199/2004/ARB [RESSEL, WELLNER u.a., 2008]

13.2.2 FE 88.0100/2009

Autobahnstrecke [-]	Nutzungsdauer [Jahre]	Laboruntersuchung mittels des Spaltzug-Schwellversuchs			
		E_{ADS} [N/mm ²]	E_{Abi} [N/mm ²]	$E_{o.ATS}$ [N/mm ²]	$E_{u.ATS}$ [N/mm ²]
1	3	11.800	16.650	17.400	21.700
2	3	11.700	15.000	17.600	14.300
3	3	12.500	14.500	22.200	21.100
4	8	16.000	15.100	11.600	14.300
5	8	13.200	20.100	19.800	18.800
6	18	14.000	20.500	23.100	22.900
7	18	14.000	21.900	19.200	19.200

Tabelle 13-4 Die Nutzungsdauer der untersuchten Strecken und der im Labor bestimmte $|E|_{Asphalt}$ bei $t_{Asphalt} = 5^\circ C$ aus der Bohrkernuntersuchung des FE 88.0100/2009 [BALD u.a., 2011]

14 Anhang 5: Ergebnisse der FEM-Modellierungen des Kapitels 5

14.1 Horizontalspannungszustand der elastischen Asphalt-schichten der Asphalt-schichten in Abschnitt 5.2

14.1.1 10-cm-Asphalt-schicht

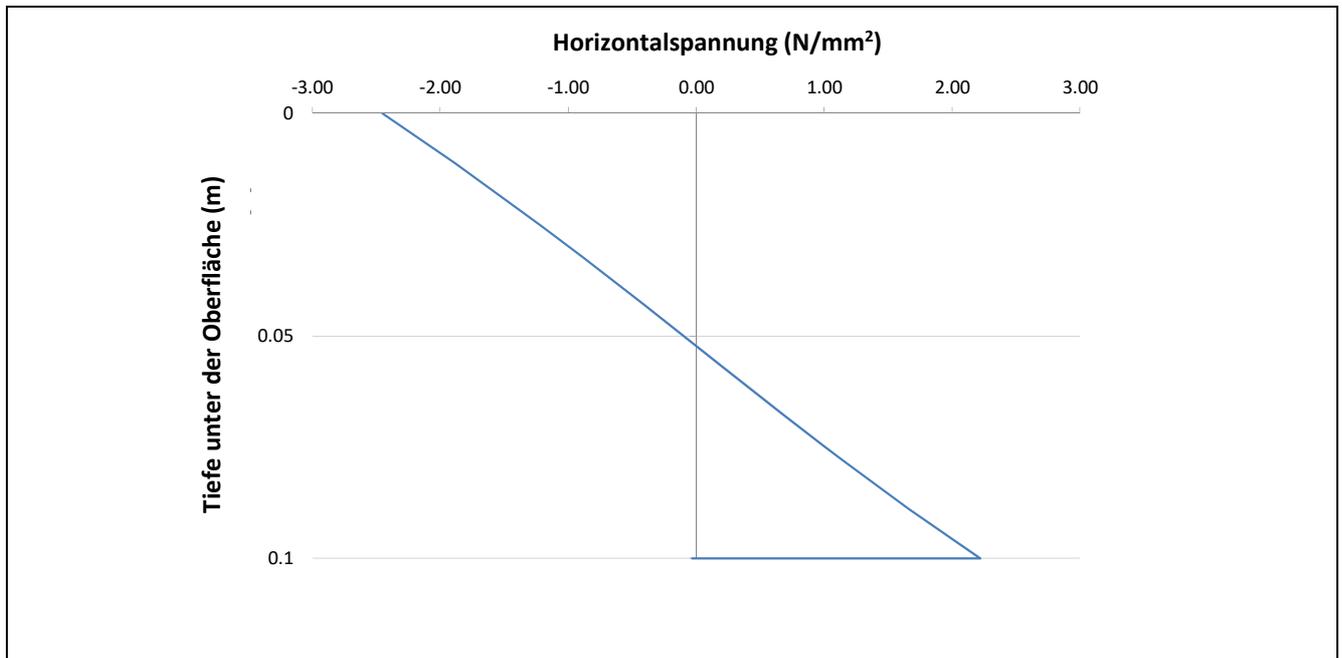


Bild 14-1 Horizontalspannung in der Lastachse

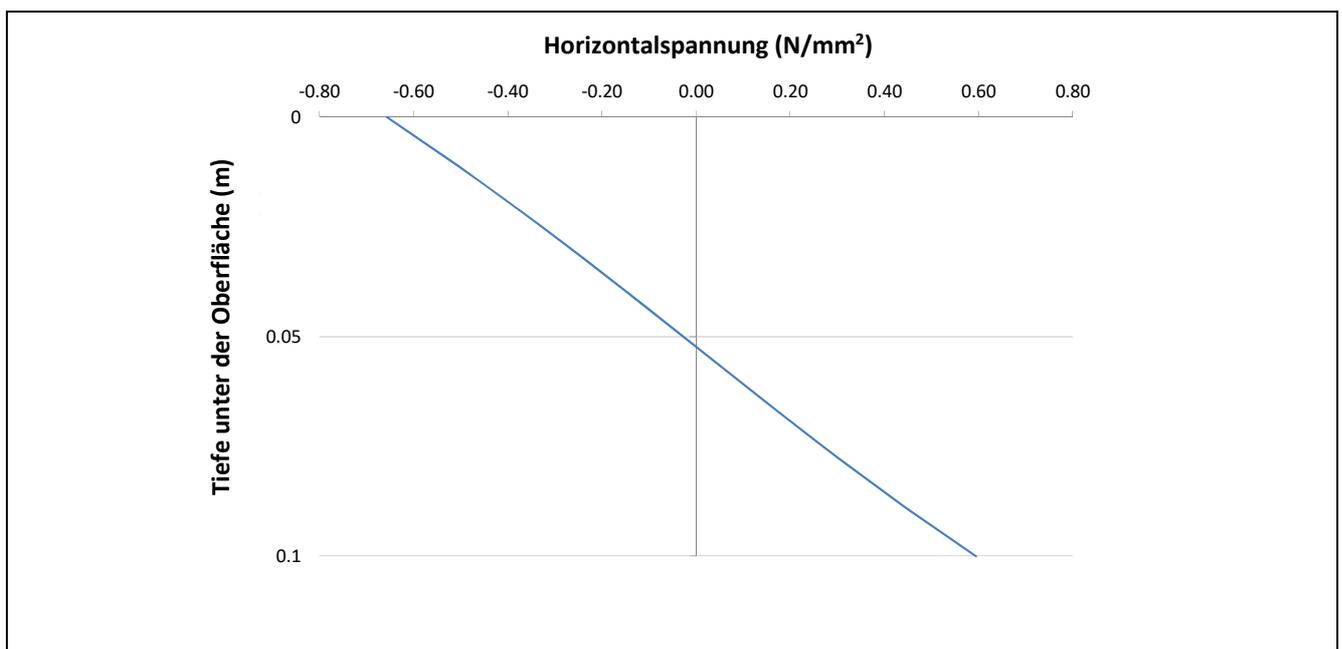


Bild 14-2 Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last

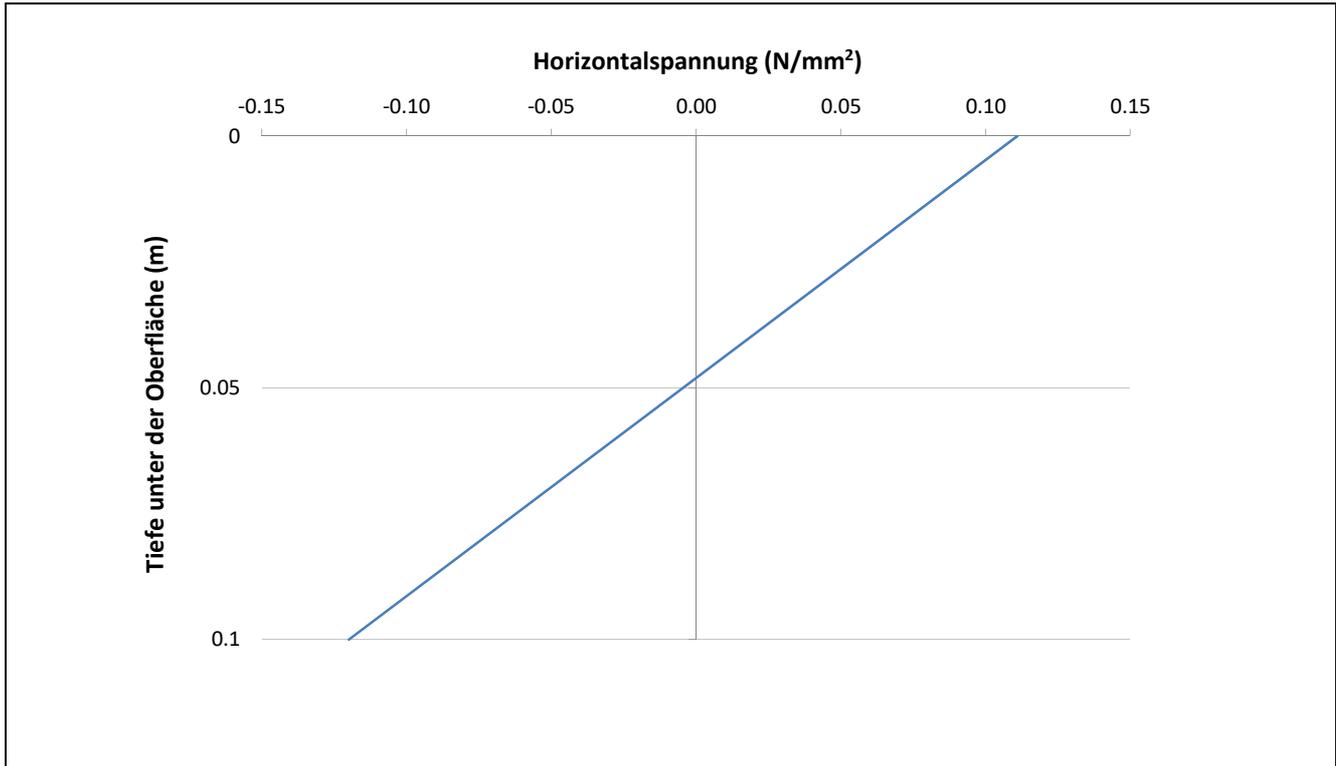


Bild 14-3 Horizontalspannung in Abstand von 80 cm zur Last

14.1.2 24-cm-Asphaltschicht

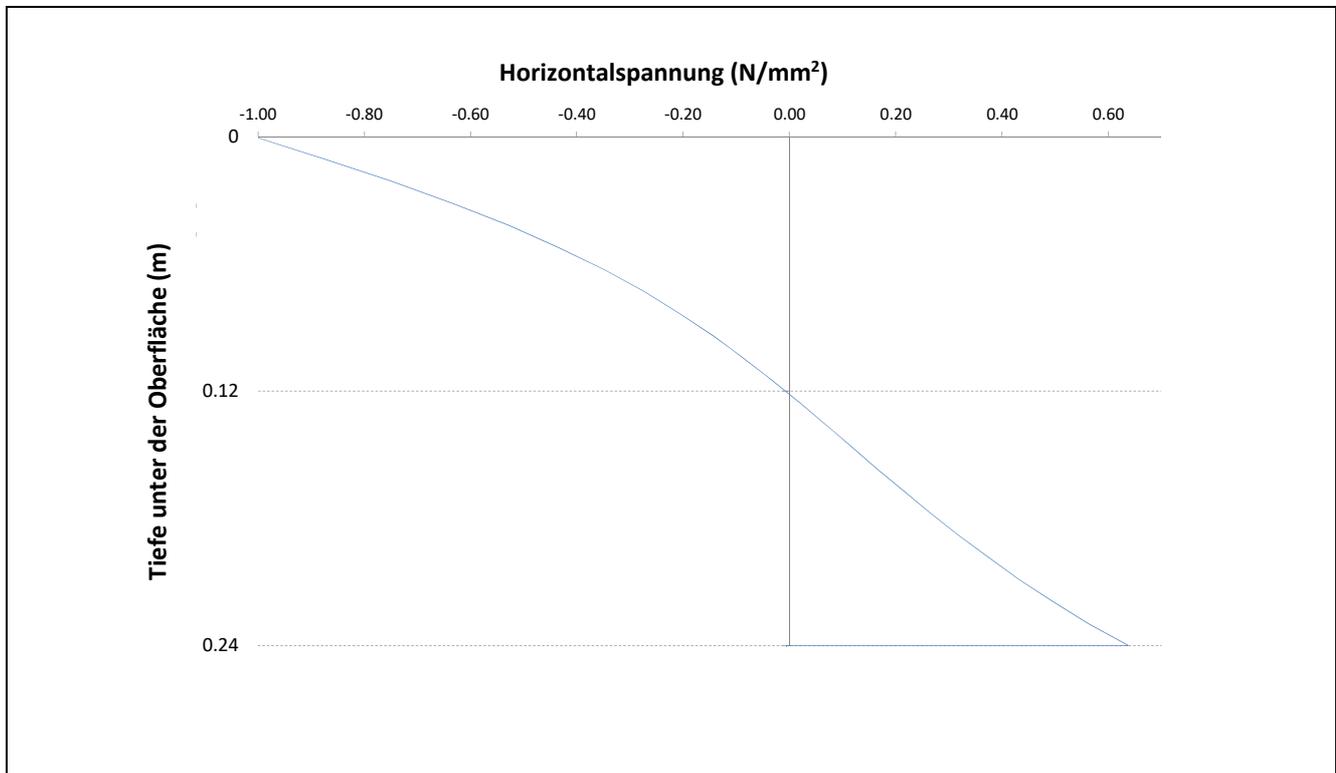


Bild 14-4 Horizontalspannung in der Lastachse

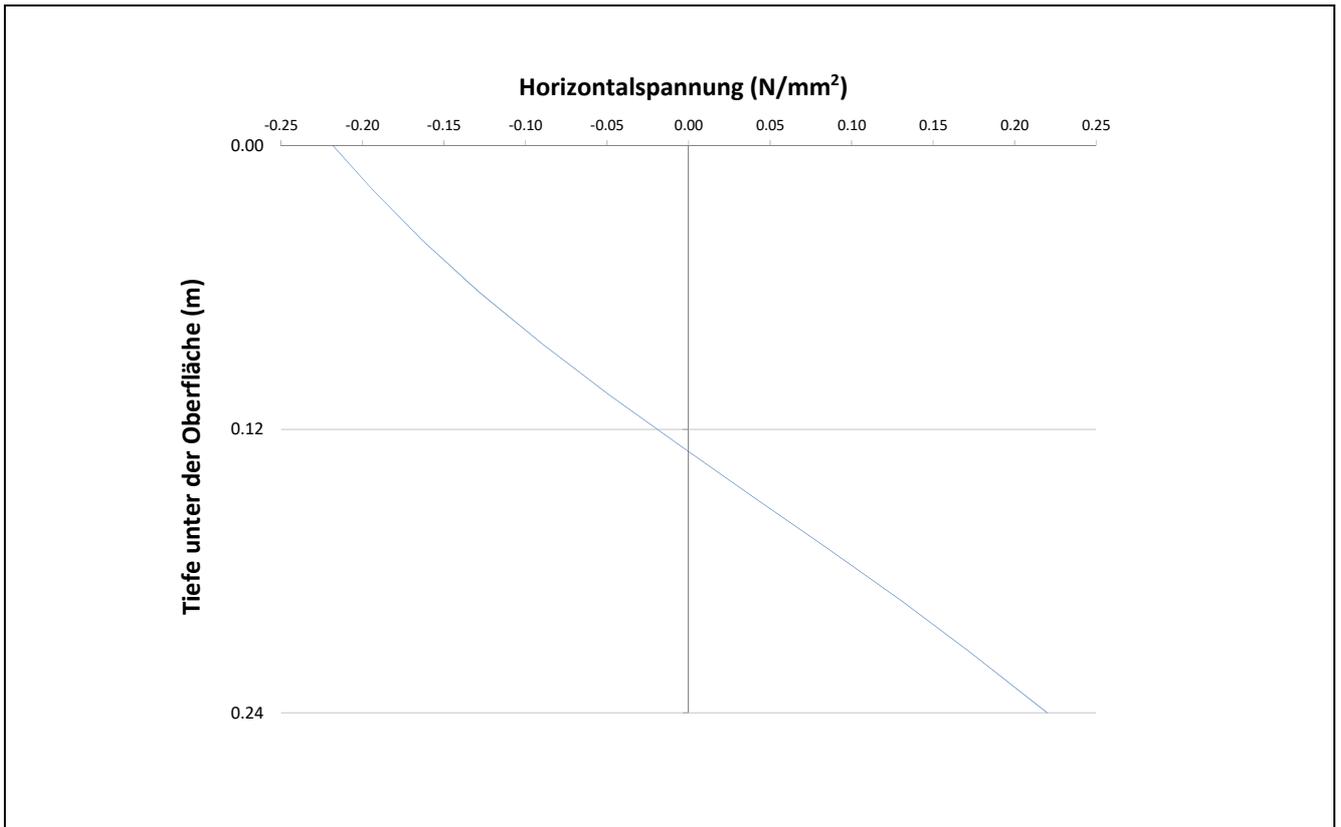


Bild 14-5 Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last

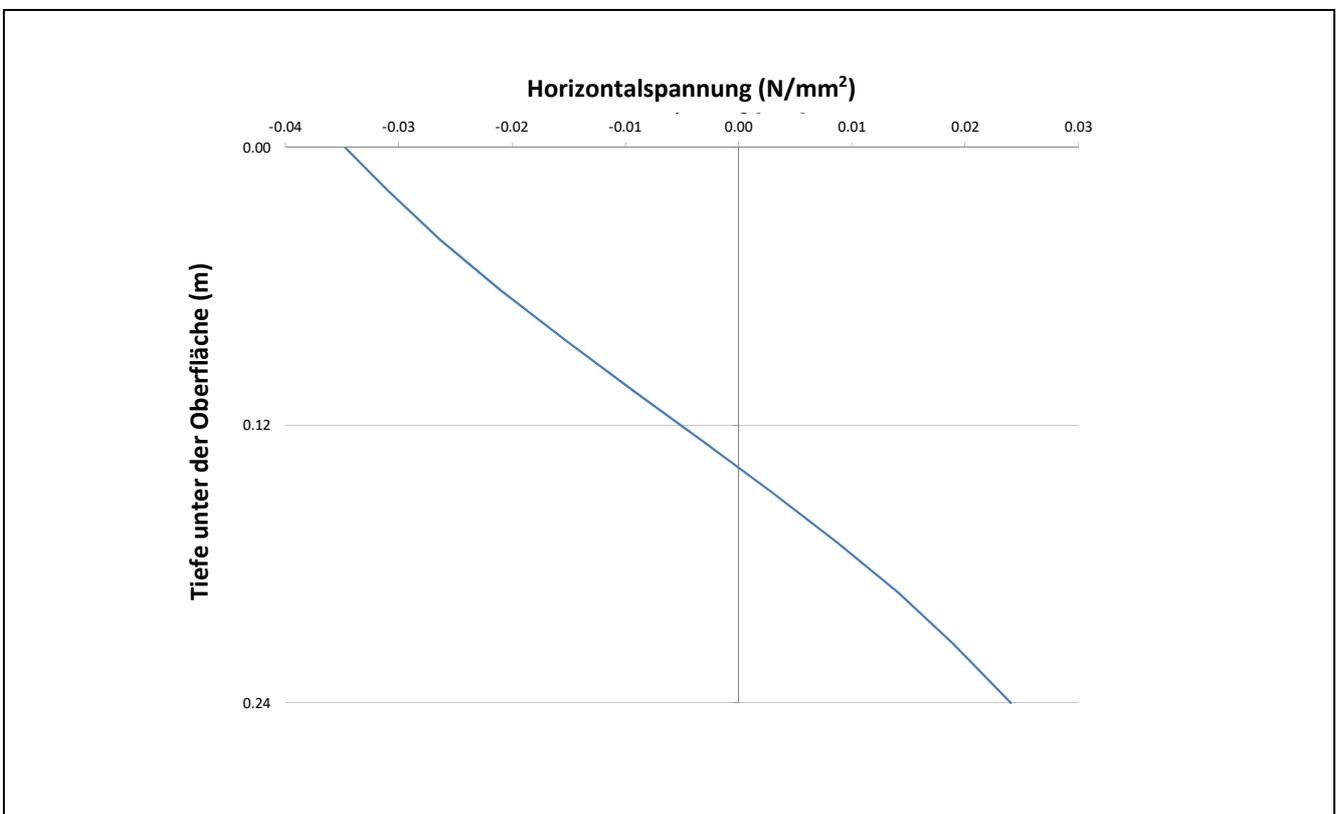


Bild 14-6 Horizontalspannung in Abstand von 50 cm zur Last

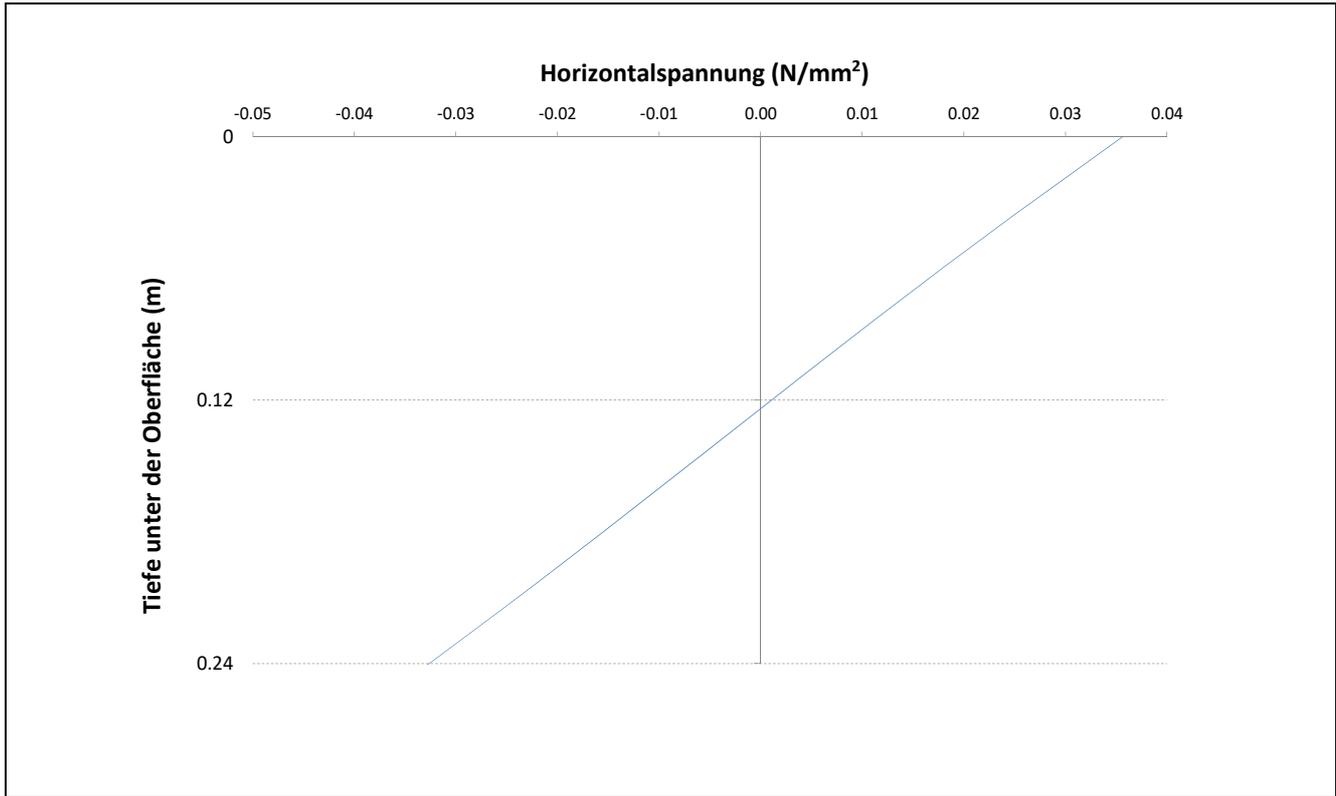


Bild 14-7 Horizontalspannung in Abstand von 120 cm zur Last

14.1.3 42-cm-Asphaltschicht

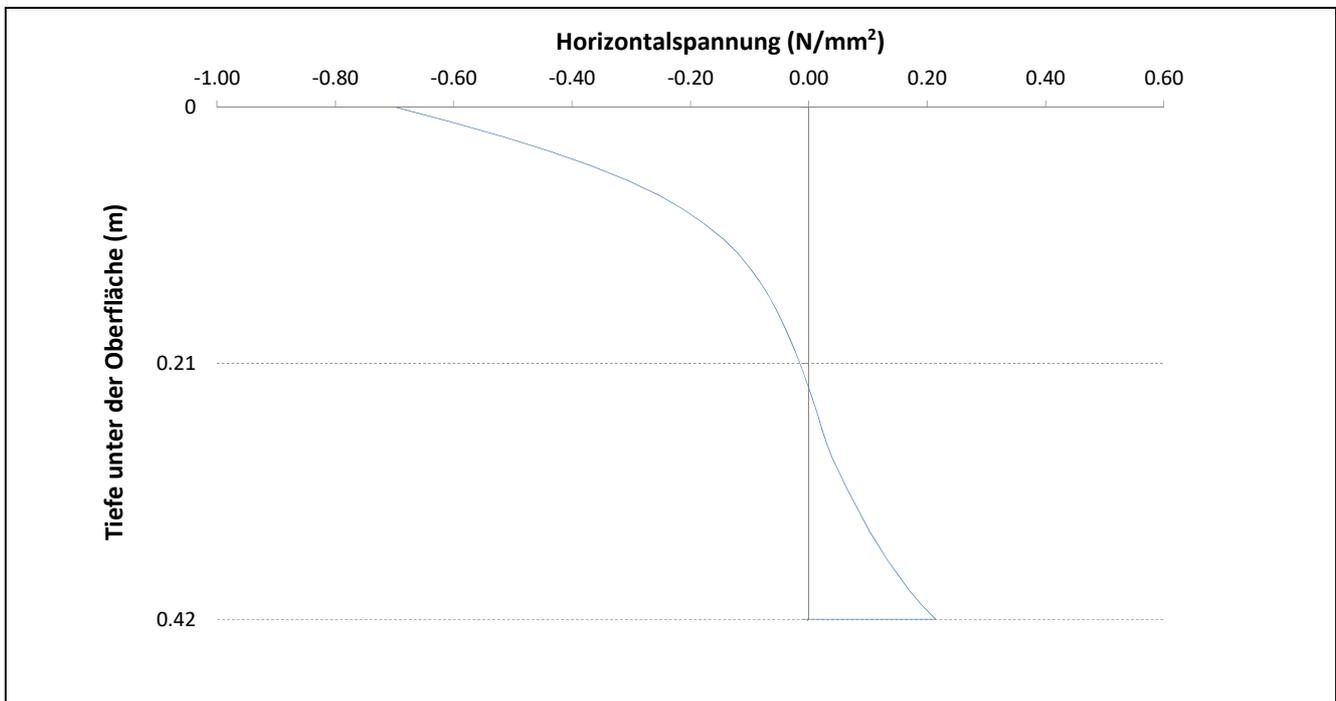


Bild 14-8 Horizontalspannung in der Lastachse

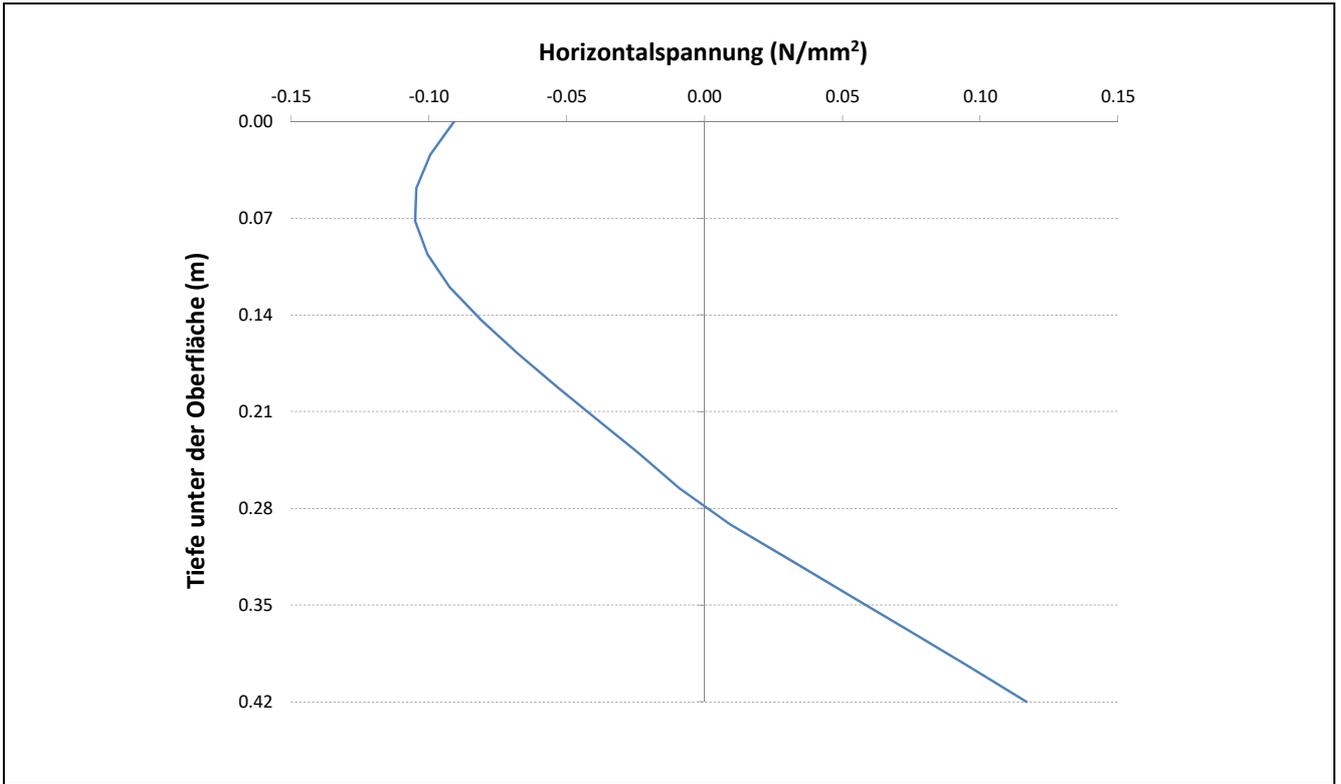


Bild 14-9 Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last

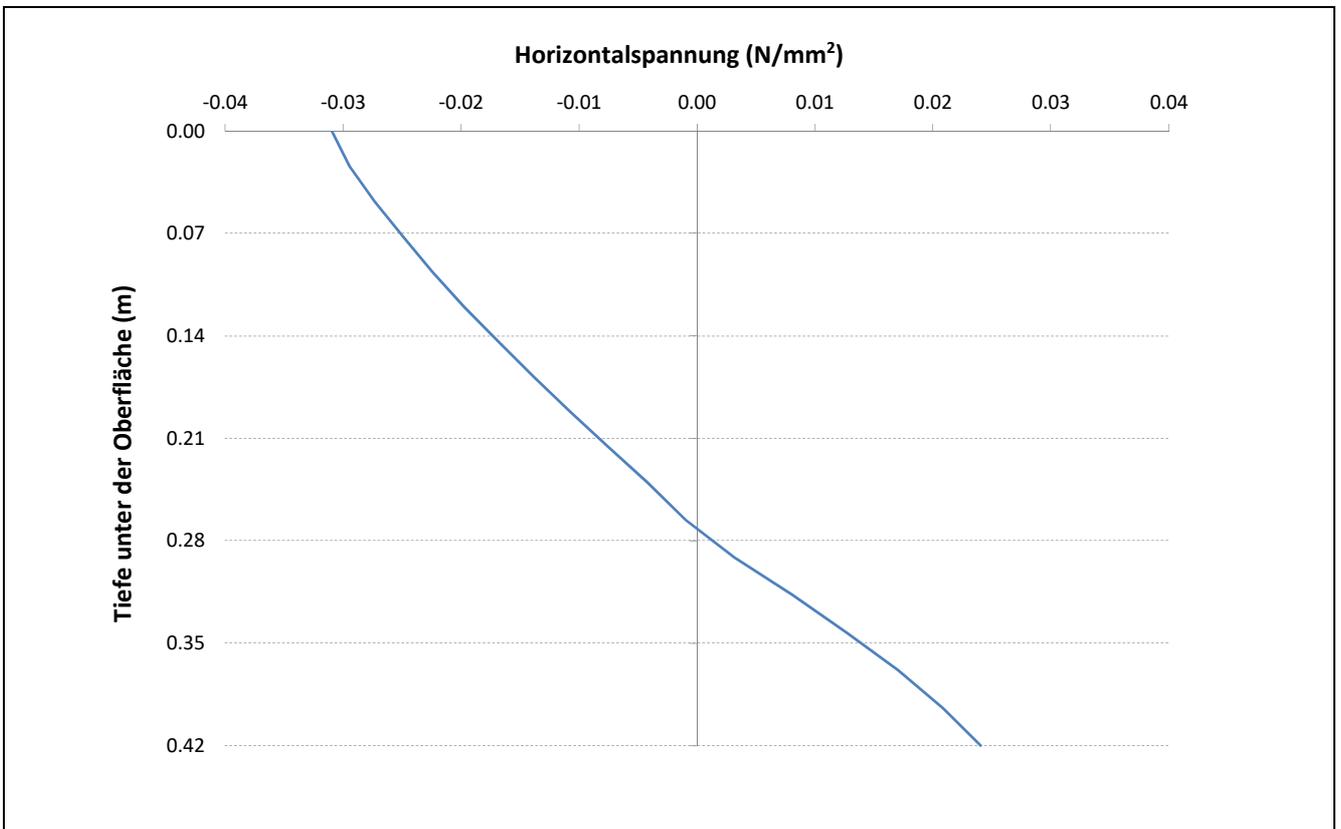


Bild 14-10 Horizontalspannung in Abstand von 50 cm zur Last

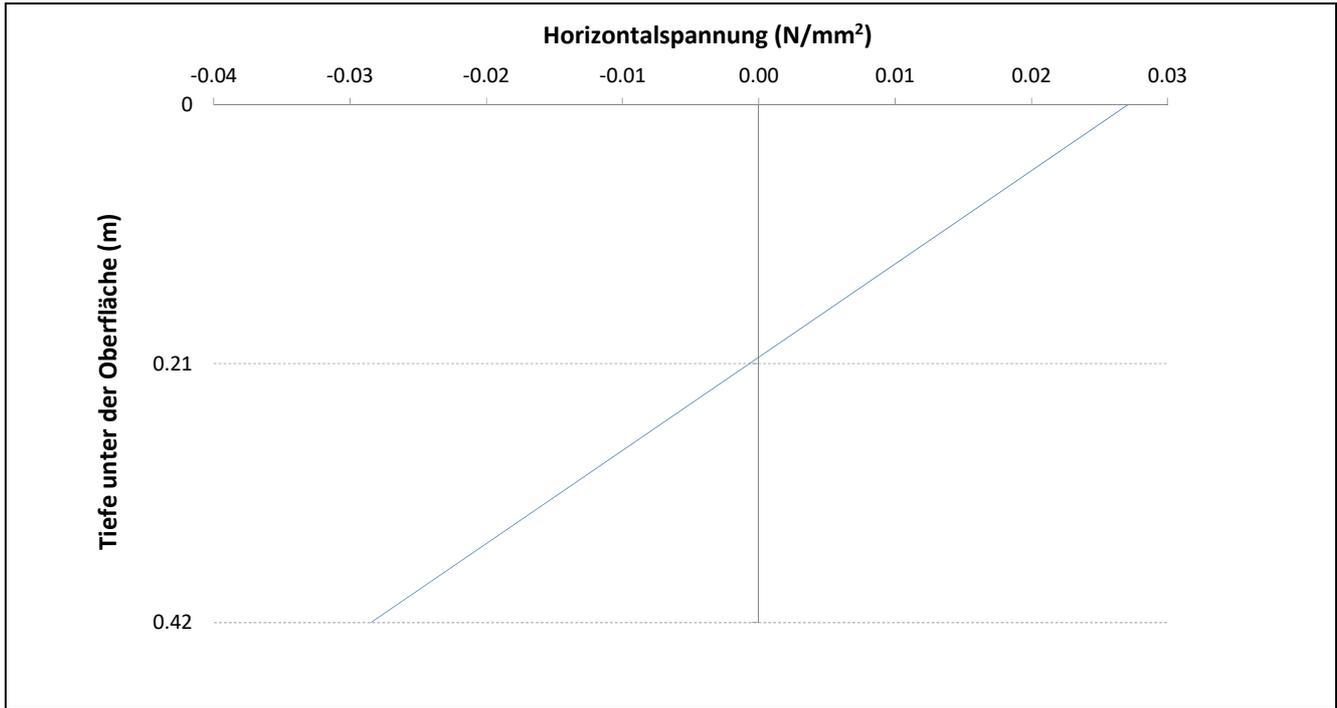


Bild 14-11 Horizontalspannung in Abstand von 120 cm zur Last

14.1.4 60-cm-Asphaltschicht

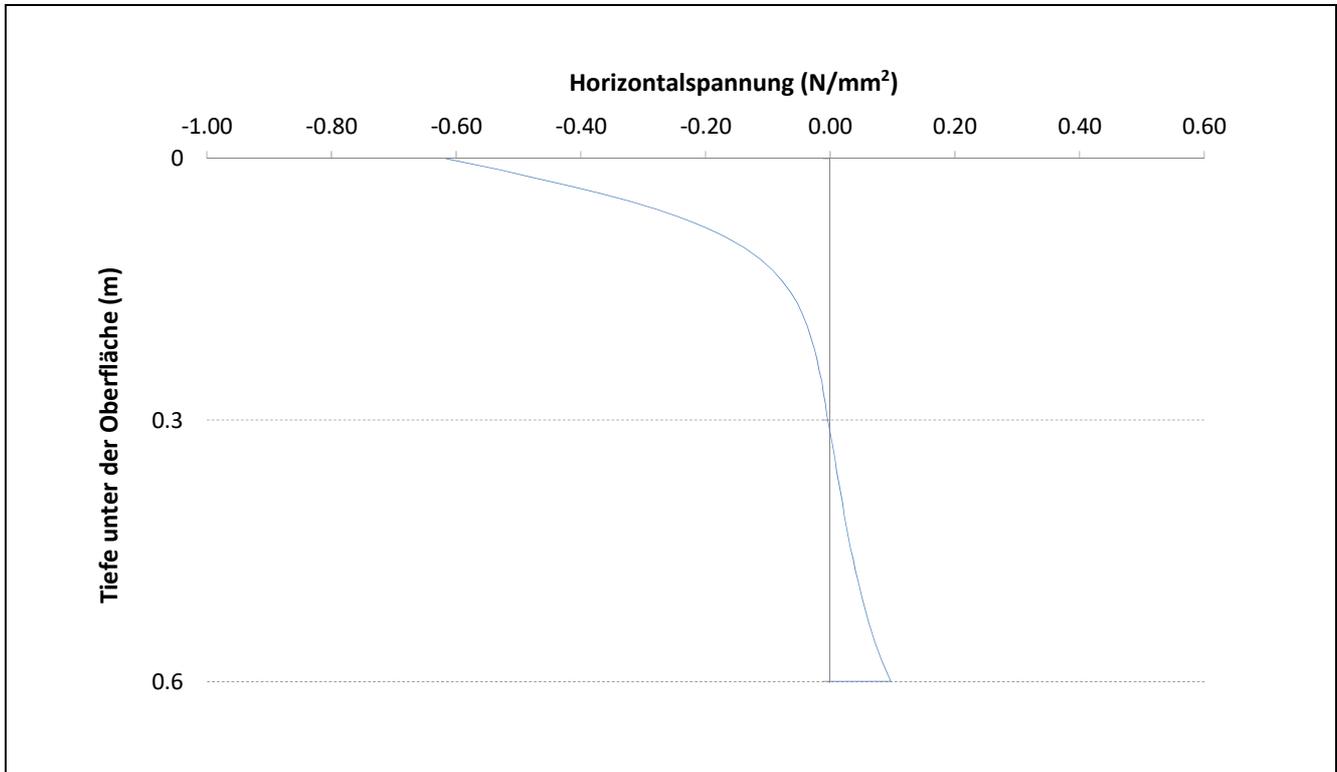


Bild 14-12 Horizontalspannung in der Lastachse

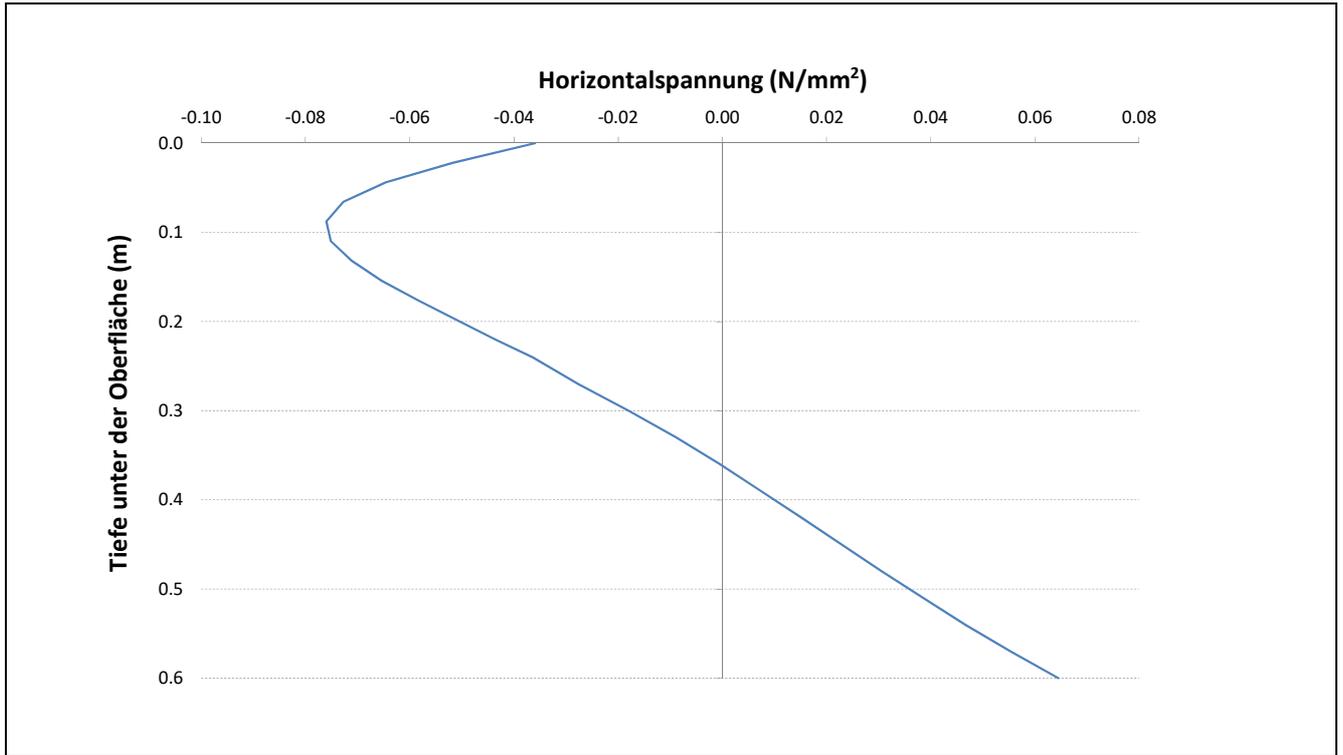


Bild 14-13 Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last

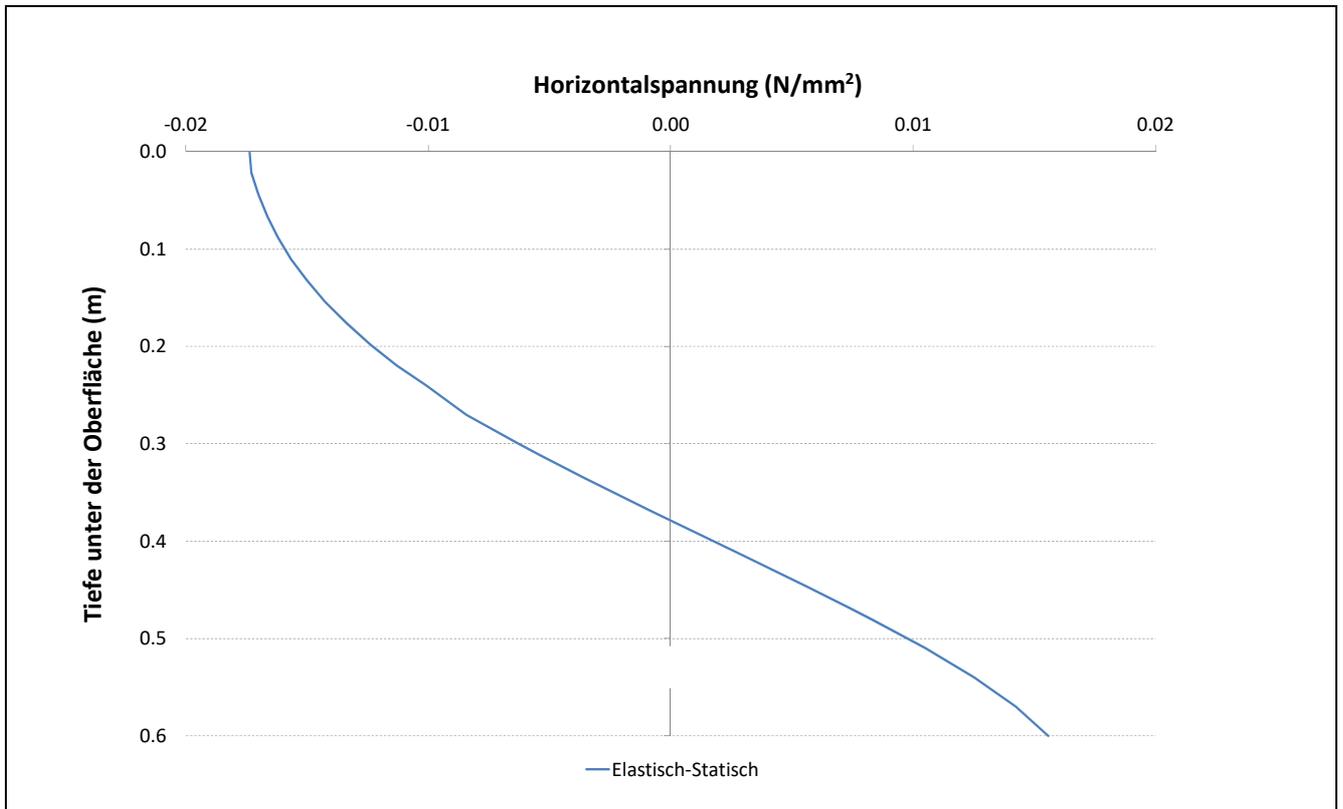


Bild 14-14 Horizontalspannung in Abstand von 50 cm zur Last

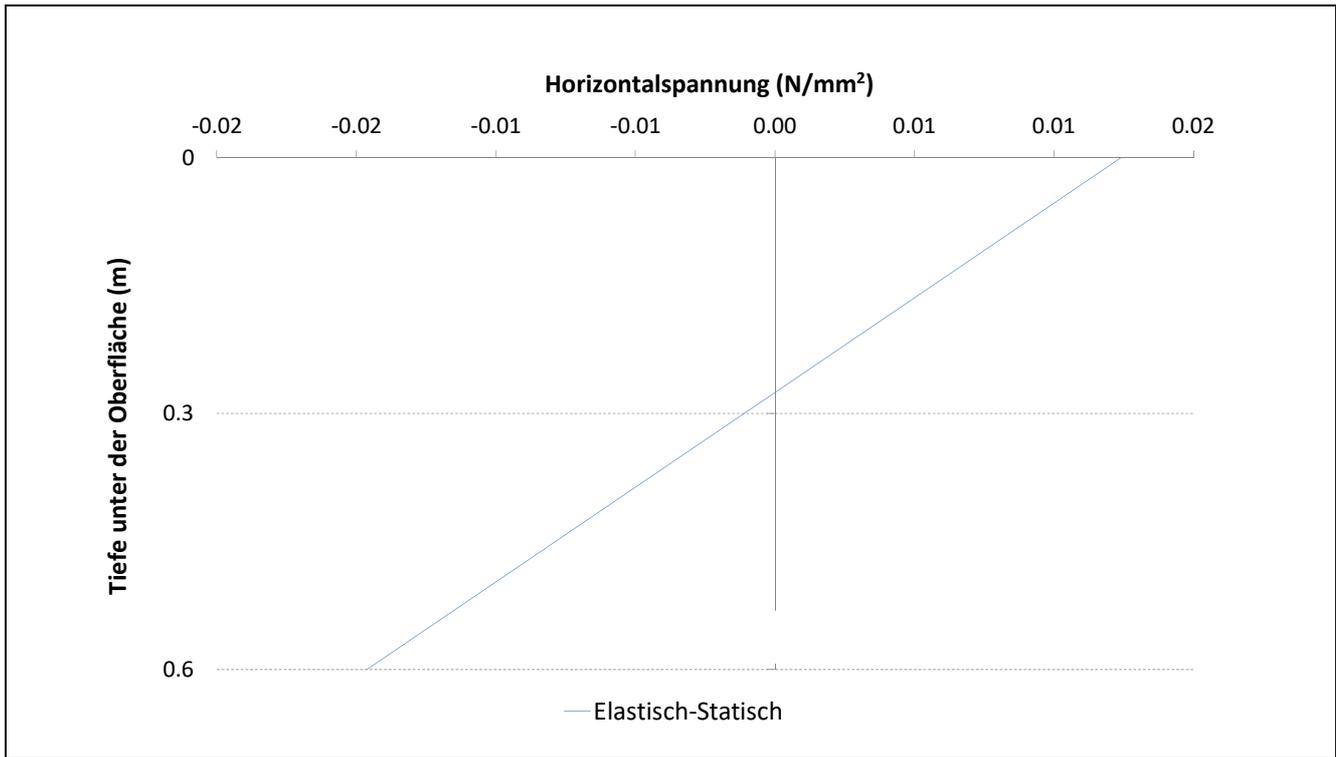


Bild 14-15 Horizontalspannung in Abstand von 120 cm zur Last

14.1.5 100-cm-Asphaltschicht

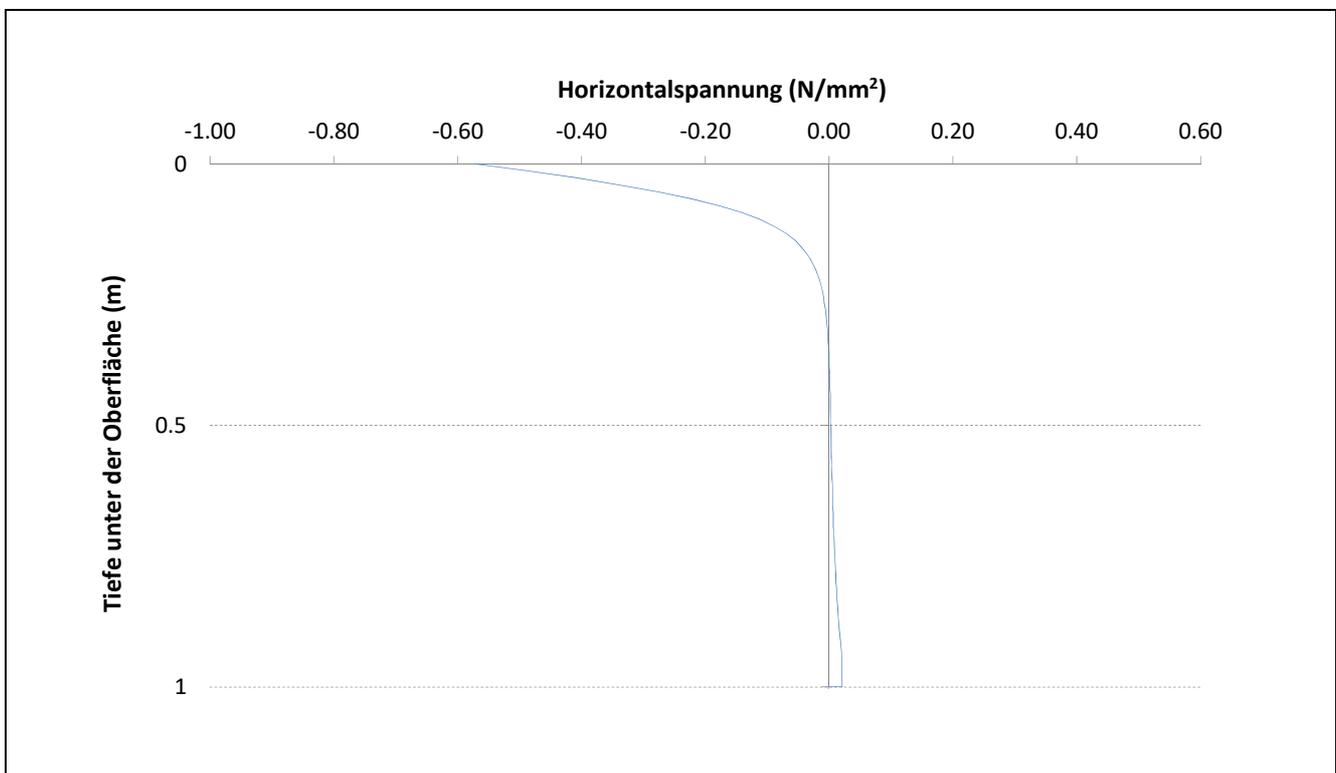


Bild 14-16 Horizontalspannung in der Lastachse

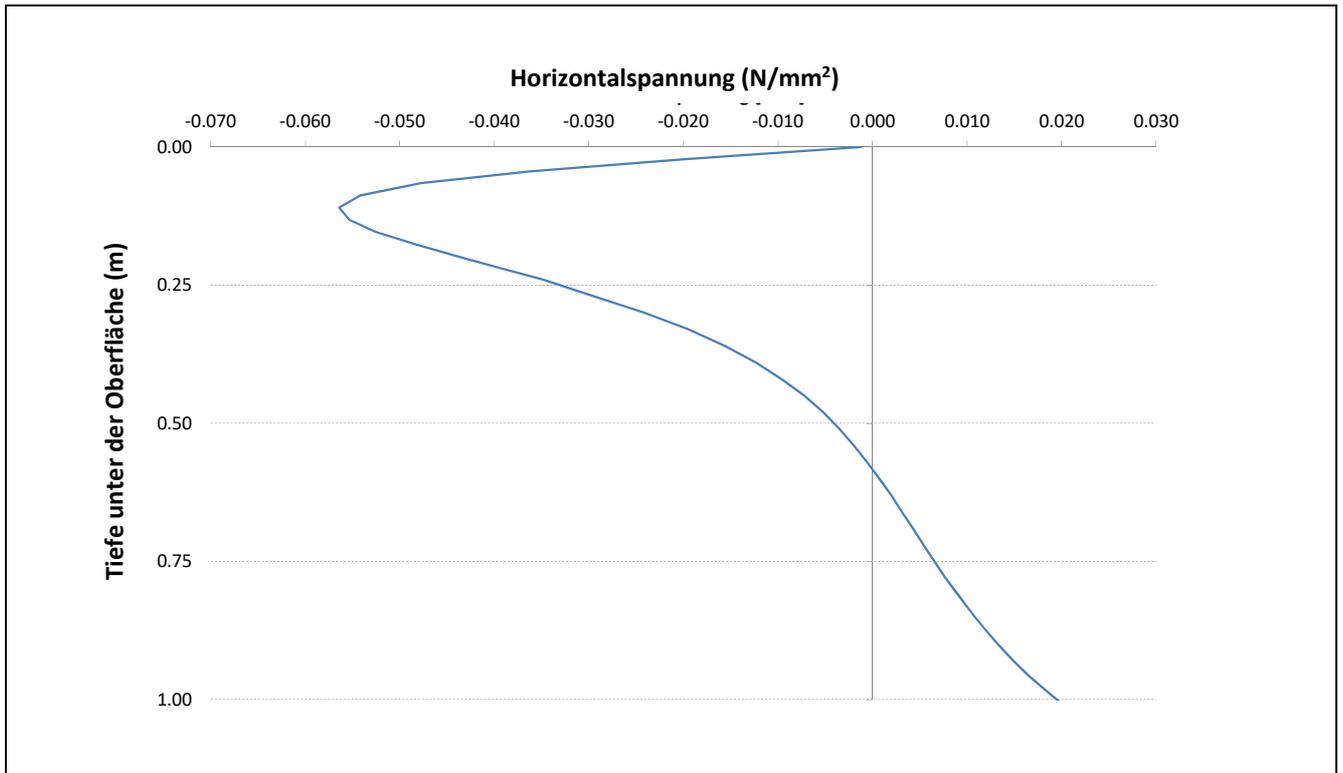


Bild 14-17 Horizontalspannung in Abstand von 30 cm zur Last

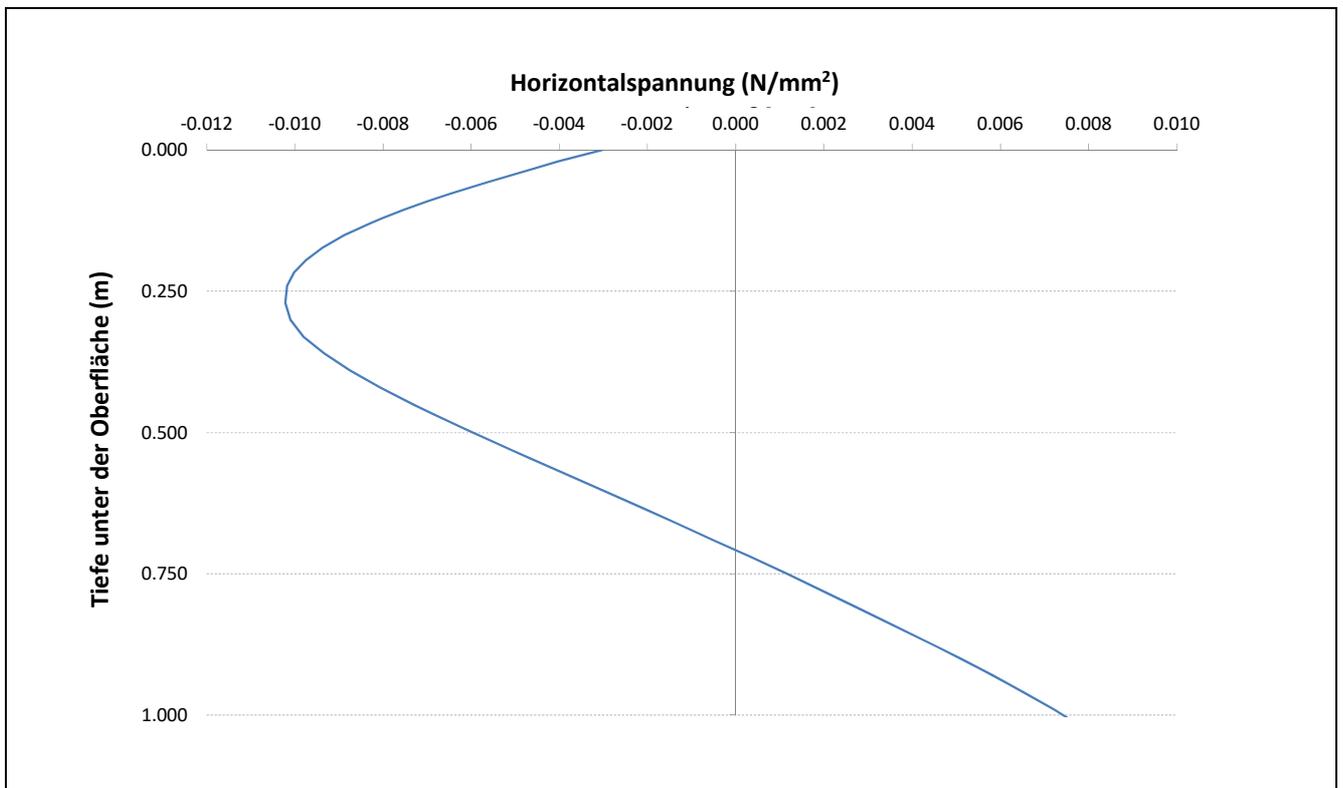


Bild 14-18 Horizontalspannung in Abstand von 50 cm zur Last

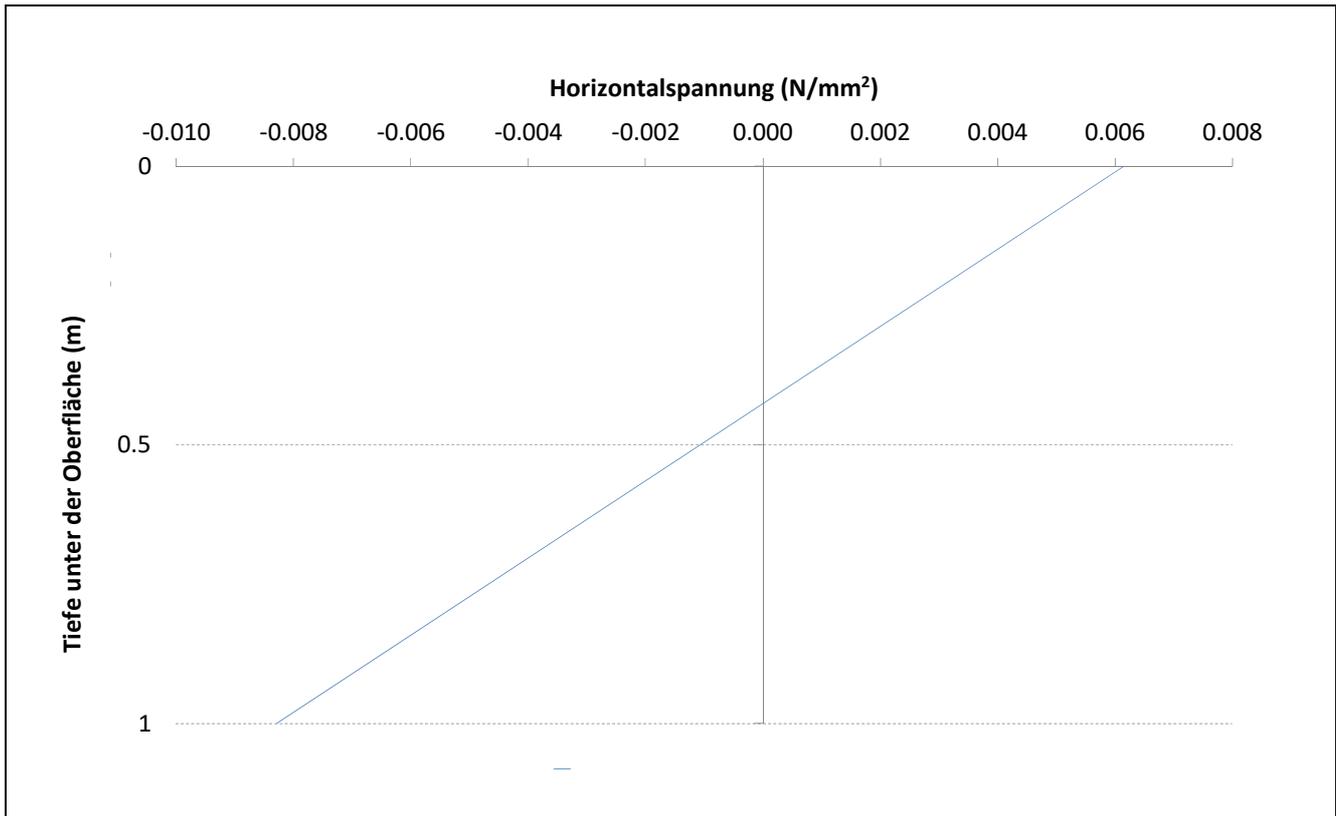


Bild 14-19 Horizontalspannung in Abstand von 180 cm zur Last

14.2 Verformungen der elastischen Asphalterschichten (Untersuchungen vom Abschnitt 5.3)

14.2.1 10-cm-Asphaltschicht

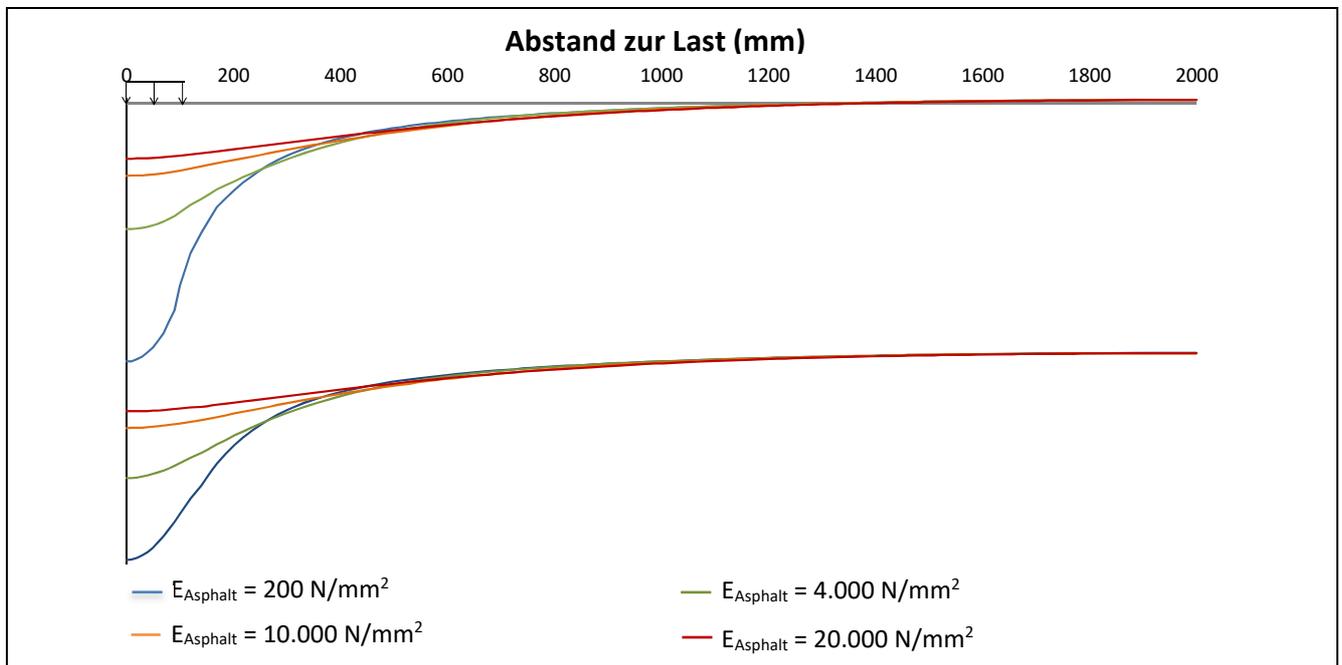


Bild 14-20 Verformung der 10-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}

14.2.2 24-cm-Asphaltschicht

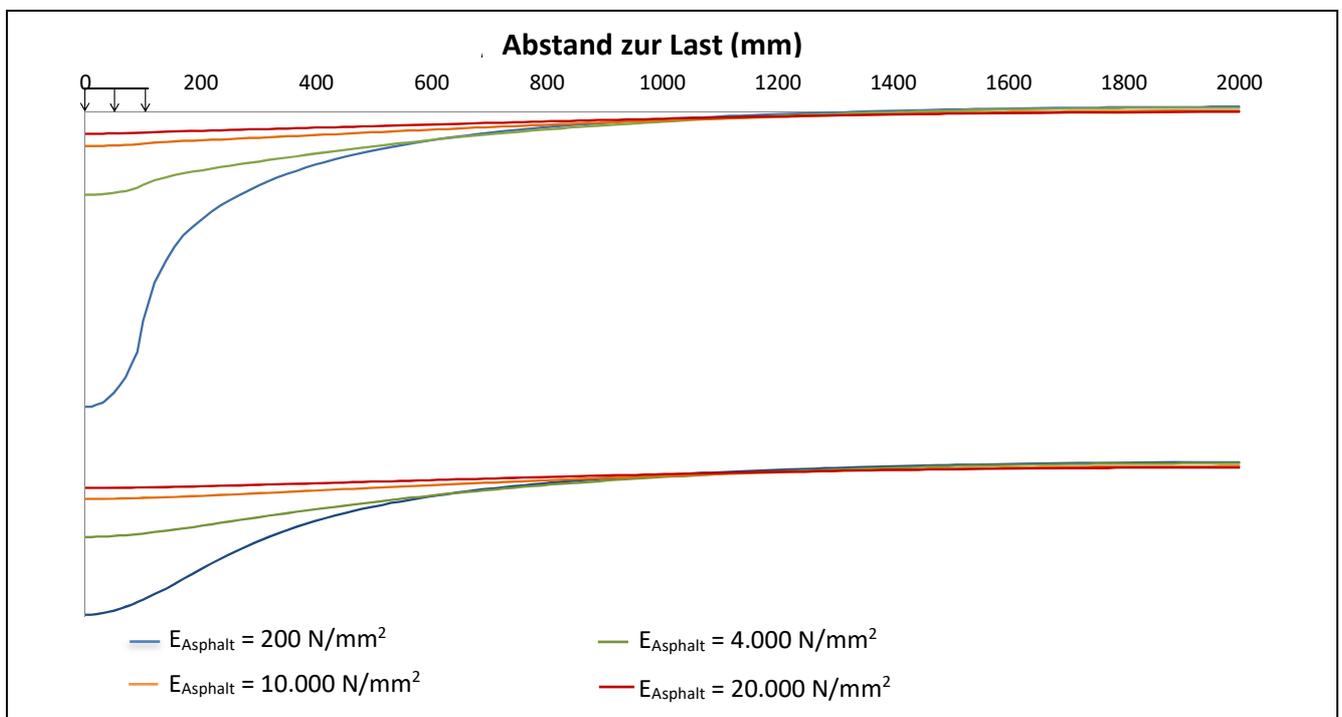


Bild 14-21 Verformung der 24-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}

14.2.3 42-cm-Asphaltschicht

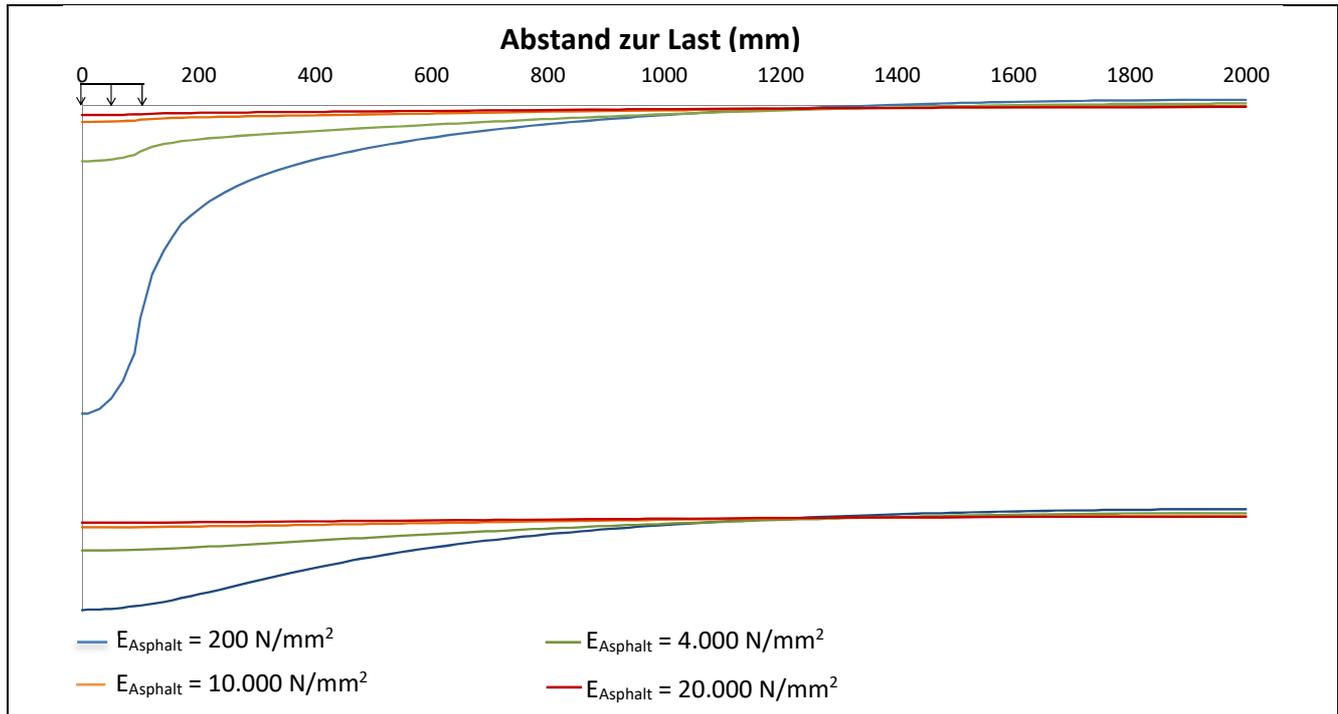


Bild 14-22 Verformung der 42-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}

14.2.4 60-cm-Asphaltschicht

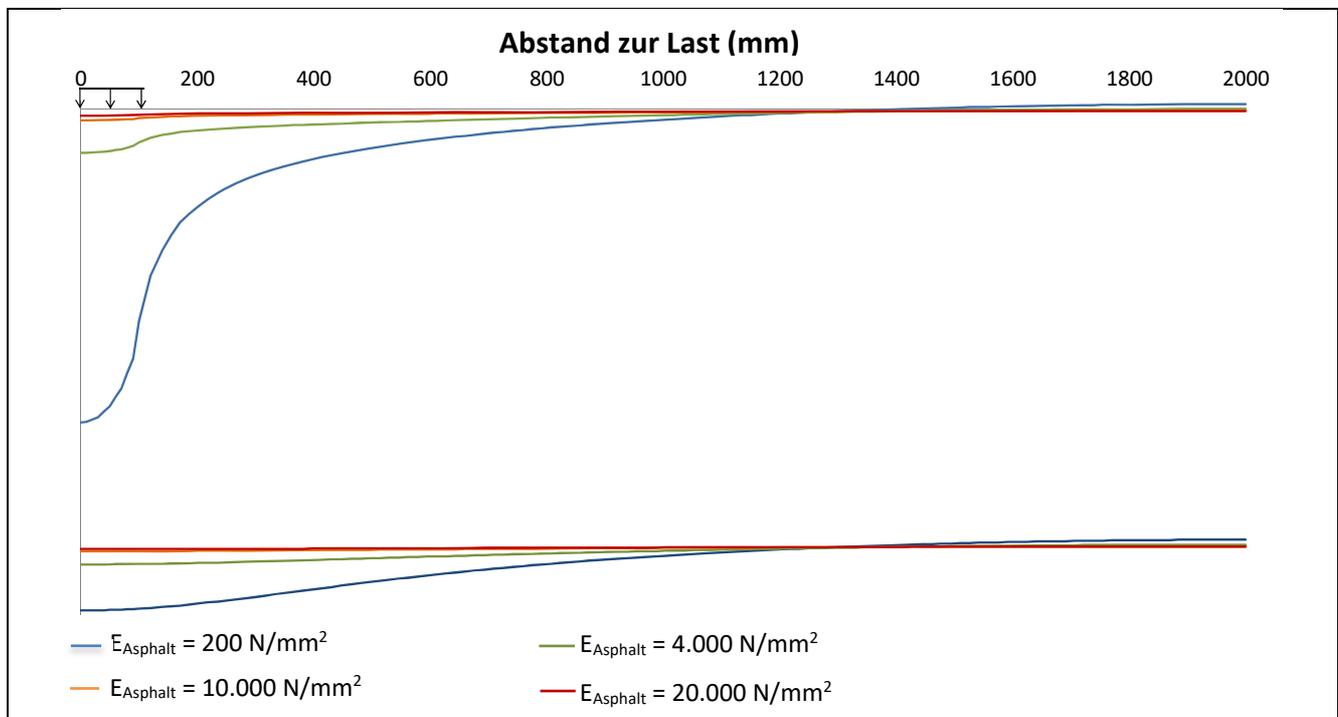


Bild 14-23 Verformung der 60-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}

14.2.5 100-cm-Asphaltschicht

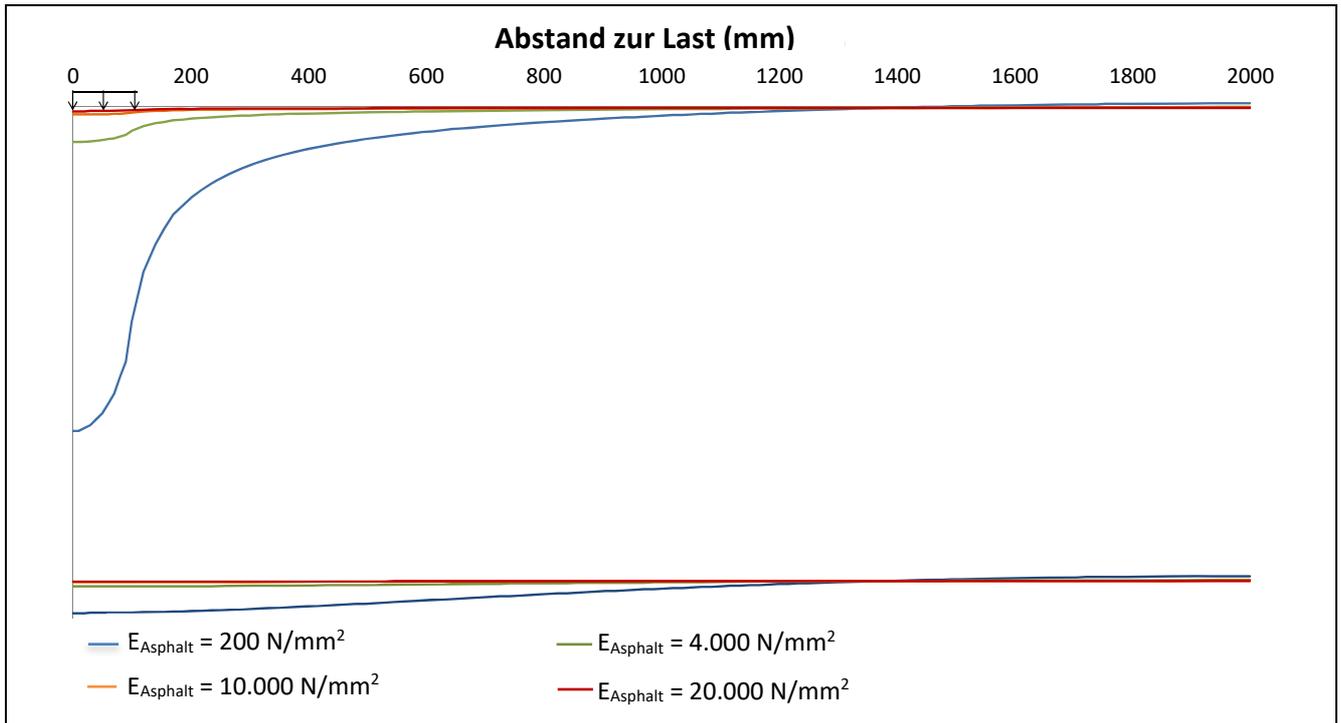


Bild 14-24 Verformung der 100-cm-Asphaltschicht bei unterschiedlichen E_{Asphalt}

15 Literaturverzeichnis

[abaqus] **Abaqus** User Manual Version 6-10

[AL HAKIM u.a., 2000] **AL HAKIM B., LAM WAH CHEUNG, ROBERT J. ARMITAGE:** Use of FWD Data for Prediction of Bonding Between Pavement Layers, Nottingham University, United Kingdom, International Journal of Pavement Engineering, **2000**

[BALD u.a., 2011] **BALD J. S., NGUYEN A-D, SCHWEBEL N., BÖHM S.:** Optimierung von Maßnahmen zur Erhaltung einer funktionstüchtigen Straßeninfrastruktur – Ermittlung des Substanzwertes –, Schlussbericht des Forschungsprojekts FE-Nr. 88.0100/2009, TU Darmstadt, **2011**

[BALD und NGUYEN, 2014] **BALD J. S., NGUYEN A-D:** Evaluation of load-carrying capacity of asphalt superstructures from Deflection Measurement, Europäischen Conference Transport Research Arena, in Paris, **2014**

[bast, 2006] **BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN (bast):** Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigung, Straßenbau Heft S 45, **2006**

[CEYLAN und KIM, 2012] **CEYLAN H. und KIM S.:** Controlled Evaluation of Falling Deflectometer, Final Report of Project R06D Non-destructive Testing to Identify Delamination between HMA, Topic B.7, **2012**

[CHUN u.a., 2015] **CHUN S., KIM K., GREENE J., CHOUBANE B.:** Evaluation of interlayer bonding condition on structural response characteristics of asphalt pavement using finite element analysis and full-scale field tests, Construction and Building MATERIALS Volume 96 pages 307-318, Elsevier UK **2015**

[COST 333, 1999] **COST 333:** Development of New Bituminous Pavement Design, Final Report of the Action, European Commission Directorate General Transport, **1999**

[COST 336, 2005] **COST 336:** Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation, Final Report of the Action, European Commission Directorate General Transport, **2005**

[DIN 12697-26] **DIN EN 12697-26:** Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 26: Steifigkeit, **2004**

[DIN 18134] **DIN EN ISO 18134:** Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch, **2012**

ELMOD **Dynatest:** Auswertungsmethode der gemessenen Einsenkungen an der Fahrbahnoberfläche (<http://www.dynatest.com/software/elmod.aspx>)

EVERCAL **Washington State Department of Transportation**: Auswertungsmethode der FWD-Messungen (<http://www.wsdot.wa.gov/Business/MaterialsLab/Pavements/>)

[FGSV, 1990] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Arbeitspapier Nr. 25/B 5.1, Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt B 5.1 Einfluss des Schichtenverbundes auf das Verhalten von Asphaltbefestigungen, **1990**

[FGSV ALP A-StB, Teil 4, 1999] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt ALP A-StB, **Teil 4 Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner, 1999**

[FGSV, 2001] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen **RStO 01, 2001**

[FGSV ZEB, 2006] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen ZEB, Arbeitsgruppe Sonderaufgaben (Hrsg.), **2006**

[FGSV, 2006] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Mechanisches Verhalten von Asphalt in Befestigung für Verkehrsflächen - Eingangsgrößen in die Bemessung (Materialkennwerte), **Arbeitspapier Nr. 65, 2006**

[FGSV AL-SP-Asphalt 09, 2009] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten von Asphalten mit dem Spaltzugschwellversuch AL-SP-Asphalt 09, **2009**

[FGSV, 2009] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten, **RDO Asphalt 09, 2009**

[FGSV, 2011] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Arbeitspapiere zur Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen, Reihe B: Berechnungsmodelle, **Teil B1: Methode der Mehrschichtentheorie und Halbraumtheorie bei der Dimensionierung, 2011**

[FGSV, 2012] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen **RStO 12, 2012**

[FGSV, 2013] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN**: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, **ZTV Asphalt-Stb 07, Ausgabe 2013**

[FGSV 2014, Teil B 2.1] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN:** Arbeitspapiere Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigung, Teil B 2.1: Falling Weight Deflectometer (FWD): **Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen, 2014**

[FGSV 2014, Teil C 2.1] **FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN UND VERKEHRSWESEN:** Arbeitspapiere Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigung, Teil C 2.1 Falling Weight Deflectometer (FWD): **Auswertung und Bewertung, 2014**

[GERLACH, 1968] **GERLACH A.:** Zur Beurteilung der Standfestigkeit von Fahrbahnaufbauten mit Hilfe statisch elastizitätstheoretischer Berechnungen, Dissertation, TH Hannover, **1968**

[GHANIZADEH u.a., 2020] **GHANIZADEH A.Z., HEIDARABADIZADEH N., JALALI F.:** Artificial neural network back-calculation of flexible pavements with sensitivity analysis using Garson's and connection weights algorithms, Springer, **June 2020**

[GOODMAN u.a., 1968] **GOODMAN, TAYLOR R. L., BREKKE T. L.:** A model for the mechanics of jointed rocks. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, No. 53, pp 637-659, **1968**

[GRÄTZ, 2009] **GRÄTZ B.:** Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmen, Habilitation TU Darmstadt, **2009**

[HÜRTGEN, 2000] **HÜRTGEN, H.:** Methoden zur Beschreibung der thermomechanischen Eigenschaften von Asphalt (Asphalt-Rheologie); Schriftenreihe des Fachgebietes Konstruktiver Straßenbau im Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover; Heft 20; Hannover **2000**

[ICAO, 1983] **INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION:** Aerodrome Design Manual, Part 3, Pavement, Second Edition, **1983**

[JENDIA, 1995] **JENDIA:** Bewertung der Tragfähigkeit von bituminöser Straßenbefestigung, Dissertation Karlsruhe, **1995**

[JOHANNSEN, 2012] **JOHANNSEN K.:** Prüfung und Bewertung des Verbundzustandes von Asphaltbefestigungen, Dissertation TU Dresden, **2012.**

[KING UND RICHARD, 2013] **KING S., RICHARDS T.:** Solving Contact Problems with Abaqus, Seminar Unterlagen, **2013.**

[KURRER, 2016] **KURRER K.-E.:** Geschichte der Baustatik, Auf der Suche nach dem Gleichgewicht, 2.Auflage, Ernst & Sohn, **2016**

[LE u.a., 2020] **LE M.-T., NGUYEN Q.-H., NGUYEN M.-L.:** Numerical and Experimental Investigations of Asphalt Pavement Behaviour, Taking into Account Interface Bonding Conditions, Reprinted from: Infrastructures, **2020.**

[LITZKA u.a., 1999] **LITZKA J., STROBL R., PASS F., AUGUSTIN H.:** Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung, Straßenforschung Heft 479, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, **1999**

[LI u.a., 1997] **LI S., FWA T. F., TAN K. H.:** Back-Calculation of Parameter for Slab on two-layer foundation system, Journal of Transport Engineering/ November/December, **1997**

[LI und WANG, 2018] **LI M., WANG H.:** Prediction of Asphalt Pavement Responses from FWD Surface Deflections Using Soft Computing Methods, Journal of Transportation Engineering, March **2018**

[LÜCKE, 1966] **LÜCKE, H.:** Zur Ermittlung der Elastizitätskonstanten in geschichteten Befestigungsaufbauten mit Hilfe von Druckmessungen, Dissertation, TH Hannover, **1966**

[MEIER u.a., 1968] **MEIER, EISENMANN, KORONEOS:** Beanspruchung der Straße unter Verkehrslast, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 76 Kirschbaum Verlag, **1968**

[MEISSNER und MAURIAL, 2000] **MEISSNER, MAURIAL:** Die Methode der finiten Elemente: Eine Einführung in die Grundlagen, Springer 2.Auflage 2000 Edition, **2009**

[MINHOTO u.a., 2007] **MINHOTO M., PEREIRA P., PAIS J.:** Evaluation of the visco-elastic properties in Asphalt rubber and conventional mixes, Semantic Scholar, **2007**

[NGUYEN, 2008] **NGUYEN A.-D.:** Untersuchung von Schadensfällen an Halbstarren Belägen mit Hilfe von Finite Elemente Methode, Master Thesis, Fachgebiet Straßenwesen, Institute für Verkehr, TU Darmstadt, **2008**

[NGUYEN, 2016] **NGUYEN A.-D.:** Non-destructive Evaluation of Bonding Condition Of Asphalt Pavement Based On The Measured Deformation Of The Road, 95th Annual Meeting TRB, Washington, D.C., **2016**

[PANC, 1975] **PANC V.:** Theories of elastic plates, Springer, **1975**

[RESSEL und WELLNER u.a., 2008] **RESSEL W., BENNER A., WELLNER F., WERKMEISTER S., LIPKE S.:** Vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Asphaltbefestigungen nach langjähriger Verkehrsnutzung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, FE 04.199/2004/ARB, Heft 1003, **2008**

[ROMANOSCHI und METCALF, 2002] **ROMANOSCHI, METCALF:** Errors in Pavement Layer Moduli Backcalculation due to Improper Modeling of the layer Interface Condition, **2002**

[ROWE, 1993] **ROWE G.:** Performance of Asphalt Mixture in the Trapezoidal Fatigue Test; Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologist, Volume 62, S.344-384, **1993**

[SCHRAMM, 1995] **SCHRAMM G.:** Einführung in Rheologie und Rheometrie, Gebrüder Haake, Karlsruhe, **1995**

[SHELL, 1998] **SHELL:** Manual User BISAR (Bitumen Structure Analysis in Road) 3.0, **1998**

[STÖCKERT, 2001] **STÖCKERT U.:** Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau, Dissertation TU Darmstadt, **2001**

[STRAUBE u.a., 2010] **STRAUBE E., JANSEN D., GRÄTZ B., HOTHAN J., KARCHER C., LORENZL H., WEINGART W.:** Bewertung der Tragfähigkeit der Unterlage einer Asphaltbefestigung mit Tragschichten ohne Bindemittel durch FWD-Messungen, Straße und Autobahn, Jg. 61, H.1, S.19-24, **2010**

[TRB, 2012] **TRANSPORT RESEARCH BOARD:** Non-destructive Testing to Identify Delamination between HMA Layers, Final Report des R06D von Strategic Highway Research Program, **2012**

[VORMWALD, 2009] **VORMWALD M.:** Skript Werkstoffmechanik im WS 2009/2010, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt, **2009**

[WIEHLER und WELLNER, 1996] **WIEHLER und WELLNER, F.:** Straßenbau: Konstruktion und Ausführung, 5.Auflage, **1996**

[WILLIS und TIMM, 2006] **WILLIS J. R., TIMM D. H.:** Forensic Investigation of Rich-Bottom Pavement, Final Report of Project NCAT 06-04, National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn University, **December 2006**

[WESTERGAARD, 1948] **WESTERGAARD:** New formulas for stresses in concrete pavements of air fields, American Society of civil engineers, transaction, **1948**

[WANG u.a., 2017] **WANG D., LUI P., OTTO F., OESER M., BALCK H.:** Zerstörungsfreie Bewertung der strukturellen Substanz der Asphaltbefestigung mit Geofonen, Bautechnik 94, Heft 10, Ernst & Sohn, **2017**

[WELLNER, 1995] **WELLNER F.:** Grundlagen zur Bemessung flexibler Straßenkonstruktionen mit Tragschichten ohne Bindemittel, Habilitation, TU Dresden, **1995**

[WELLNER und ASCHER, 2007] **WELLNER F., ASCHER D.:** Untersuchungen zur Wirksamkeit des Haftverbundes und dessen Auswirkungen auf die Lebensdauer von Asphaltbefestigungen, Technische Universität Dresden, Professur für Straßenbau, **2007**

[WU u.a., 2017] **WU S., CHEN H., ZHANG J., ZHANG Z.:** Effects of interlayer bonding conditions between semi-rigid base layer and asphalt layer on mechanical responses of asphalt pavement structure, International Journal of Pavement Research and Technology Volume 10 pages 274-281, Elsevier UK, **2017**

[ZANDER, 2007] **ZANDER U.:** Grundlagen einer rechnerischen Dimensionierung des Straßenoberbaus aus Asphalt, Straße & Autobahn, S. 488-494, **9/2007**