

Verbesserung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen über ein Finite-Elemente-Modell

FA 4.259

Forschungsstellen: RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen (isac) (Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oeser)

Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)

Bearbeiter: Wellner, F. / Oeser, M. / Wang, D. / Liu, P. / Reinhardt, U.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: März 2015

1 Problemstellung und Zielsetzung

Bei den RDO Asphalt 09 werden zur Berechnung der Beanspruchungen in Straßenbefestigungen die Ansätze der Mehrschichtentheorie eingesetzt. Die Mehrschichtentheorie setzt voraus, dass alle Schichten linear-elastisch, isotrop, homogen, masselos und horizontal unendlich ausgedehnt sind. Außerdem liegen in Abhängigkeit der eingesetzten Lösungsstrategie weitere Einschränkungen bezüglich der Geometrie der Struktur und Belastung (Axialsymmetrie) vor. Da das Verhalten der eingesetzten Baustoffe und tatsächlich vorhandenen Beanspruchungen nicht wirklichkeitsnah abgebildet werden, können die genannten Voraussetzungen/Bedingungen in der Mehrschichtentheorie zu erheblichen Abweichungen zwischen dem berechneten und dem realen Verhalten der Verkehrswegebefestigungen führen.

Das Oberziel des Forschungsprojekts besteht in der Erstellung eines numerischen Rechenmodells auf Basis der Methode der finiten Elemente (FE) für die Analyse und optimierte Dimensionierung von Asphaltbefestigungen, um perspektivisch die derzeit in den RDO Asphalt 09 vorgeschriebene Mehrschichtentheorie zu ersetzen. Damit wird der Disziplin des konstruktiven Asphaltstraßenbaus ein in Wissenschaft und Technik anerkanntes und wirkungsvolles Werkzeug zugänglich gemacht. Das entwickelte FE-Modell soll eine Berechnungsgrundlage zur Prognose der Nutzungsdauer von neuen und vorhandenen flexiblen Befestigungen bilden. Das Modell soll auch zur Ursachenfindung von dimensionierungs- oder herstellungsbedingten Schäden dienen, um mithilfe realitätsnäherer Modellierungen die Genauigkeit der prognostizierten Beanspruchungszustände zu verbessern und die Bau- und Erhaltungskosten zu reduzieren.

2 Untersuchungsmethodik

Das entwickelte Rechenmodell muss zunächst den im Rahmen der Programmrecherche definierten Kriterien genügen. Im Vordergrund stehen hierbei die Gewährleistung eines hohen Maßes an Genauigkeit der Rechenergebnisse, einer numerisch effizienten Arbeitsweise des FE-Rechenkerns sowie einer ingenieurgerechten/anwenderfreundlichen Bedienung. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sind zwei FE-Methoden vorgesehen: Die semi-analytische Finite-Elemente-Methode SAFEM

und die achsensymmetrische Finite-Elemente-Methode (AXSFEM).

- Mit SAFEM gelingt eine "Zerlegung" des 3-D-Berechnungsnetzes in zweidimensionale Netze. Vorteile des SAFEM-Verfahrens sind eine signifikante Reduktion der Berechnungszeiten von 3-D-Analysen ohne Genauigkeitsverlust, eine direkte Einbindung von Stoffmodellen auf Basis des komplexen Moduls in den Analyseprozess und eine adäquate Berücksichtigung des Bewegungsablaufs der Belastung.
- Bei Anwendung der AXSFEM müssen die Geometrien des Berechnungsbereichs sowie die der Lasten axial-symmetrisch sein. Jedes Element repräsentiert dabei einen ringförmigen Bereich der Befestigung, in dessen Querschnitt ein isoparametrisches 6-Knoten-Dreieckelement angeordnet ist. Der Vorteil dieser Methode ist, dass eine dreidimensionale Struktur, wie beispielsweise eine Straßenbefestigung, mit relativ wenigen Elementen diskretisiert werden kann, was zu einer signifikanten Reduktion des Berechnungsaufwands führt. Hauptnachteil der Methode ist, dass lediglich axial-symmetrische Geometrie- und Belastungsverhältnisse untersucht werden können und die Analyse von realen Belastungsverhältnissen (ganze Achsen oder Achsgruppen) nur mithilfe des linearen Superpositionsansatzes gelingt.

Danach wurden Parameterstudien durchgeführt, mit deren Hilfe der weiterentwickelte FE-Rechenkern kalibriert und optimiert werden kann. Zusätzlich erfolgte eine analytisch gestützte Optimierung des Rechenkerns. Hierzu soll für eine Auswahl von (RStO-basierten) Befestigungsvarianten nachgewiesen werden, dass der neue FE-Rechenkern für das derzeit in den RDO Asphalt 09 eingesetzte Analyseverfahren verwendet werden kann. Ferner soll die Leistungsfähigkeit des FE-Rechenkerns anhand von experimentellen Ergebnissen überprüft werden, indem mit dem Rechenkern Messergebnisse aus der Versuchsstrecke der BASt rechnerisch bestätigt werden.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Analytisch gestützte Verifikation des FE-Rechenkerns

Das Ziel der numerischen Validierung ist es, die Fahrbahnreaktionen, welche mit dem SAFEM- und AXSFEM-Rechenkern ermittelt werden, mit den Ergebnissen der Referenzprogramme zu vergleichen. Als Referenzprogramme wurden eines der weltweit verbreitetsten, kommerziellen FE-Programme ABAQUS und der Mehrschichten-Rechenkern BISAR ausgewählt. Die Parameter und Randbedingungen bei der Modellierung der vier Programme wurden so konsistent wie möglich eingestellt, um die Vergleichbarkeit der Modelle zu gewährleisten. Für die numerischen Simulationen werden zwei Versuchsreihen vorgesehen (s. Tabelle 1). Versuchsreihe 1 stellt das Verhalten des ausgewählten Oberbaus an einem kalten Wintertag dar, während die Versuchsreihe 2 das Verhalten des ausgewählten Oberbaus an einem heißen Sommertag beschreibt.

Anhand der Oberflächentemperatur und dem dazugehörigen Temperaturverlauf im Oberbau nach den RDO Asphalt 09 können die Parameter für die Materialeigenschaften festgelegt werden. Ein voller Schichtenverbund besteht nur zwischen den Asphaltsschichten. Zwischen ATS und HGT, HGT und ToB so-

wie zwischen ToB und Boden wird ein vollständig aufgelöster, horizontaler Schichtenverbund angenommen. Bei der numerischen Simulation wird zunächst davon ausgegangen, dass sich alle Schichten linear-elastisch verhalten, wie es in den RDO Asphalt 09 vorgeschrieben wird.

Tabelle 1: Geometrische Daten und Materialeigenschaften der Fahrbahn nach den RStO und RDO Asphalt 09 (Oberbau 1)

Schicht	Dicke [mm]	μ	Versuchsreihe 1 [MPa]	Versuchsreihe 2 [MPa]
Asphaltdeckschicht (ADS)	40	0,35	22 690	2 902
Asphaltbinderschicht (ABS)	80	0,35	27 283	6 817
Asphalttragschicht (ATS)	140	0,35	17 853	4 903
Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)	150	0,25	10 000	10 000
Frostschuttschicht (ToB)	340	0,5	101*	101*
Boden	2000	0,5	45	45

* Aus dem E_{v2} -Wert auf der Frostschuttschicht (= 100 MPa) und auf dem Planum (= 45 MPa) wird der Schichtmodul der Frostschuttschicht mit einem iterative Verfahren in den RDO Asphalt 09 bestimmt.

Die mit ABAQUS und SAFEM in den Fahrbahnbefestigungen ermittelte Spannungsverteilung und Deformation (vergrößert um den Faktor 1 000) sind in Bild 1 exemplarisch dargestellt. In Tabelle 2 und 3 werden die Spannungen an drei kritischen Stellen näher betrachtet, nämlich dort, wo die maximalen Zug- oder Druckspannungen auftreten. Anhand der Ergebnisse wurde nachgewiesen, dass die Ergebnisse der Programme SAFEM und AXSFEM mit denen des FE-Programms ABAQUS überein-

stimmen. Die Berechnungszeiten von SAFEM und AXSFEM sind jedoch wesentlich geringer als die von ABAQUS, wobei die Berechnung mit AXSFEM noch deutlich schneller als mit SAFEM erfolgt. Allerdings empfiehlt es sich, für eine dreidimensionale Analyse von realen Belastungsverhältnissen (ganze Achsgruppen) SAFEM vorzuziehen, da bei Anwendung des AXSFEM-Rechenkerns lediglich axialsymmetrische Geometrie- und Belastungsverhältnisse untersucht werden können.

Tabelle 2: Vergleich zwischen ABAQUS, BISAR und SAFEM hinsichtlich der ermittelten Spannungen [MPa] an kritischen Stellen

Position	Versuchsreihe 1					Versuchsreihe 2				
	SAFEM	ABAQUS	Differenz	BISAR	Differenz	SAFEM	ABAQUS	Differenz	BISAR	Differenz
Oberseite der ADS	-0,704	-0,690	2,03 %	-0,700	0,57 %	-0,698	-0,702	-0,57 %	-0,700	-0,29 %
Unterseite der ATS	0,938	0,959	2,19 %	1,01	7,13 %	0,663	0,675	1,78 %	0,708	6,36 %
Unterseite der HGT	0,262	0,269	2,60 %	0,283	7,42 %	0,715	0,725	1,38 %	0,763	6,29 %

Tabelle 3: Vergleich zwischen ABAQUS, BISAR und AXSFEM hinsichtlich der ermittelten Spannungen [MPa] an kritischen Stellen

Position	Versuchsreihe 1					Versuchsreihe 2				
	AXSFEM	ABAQUS	Differenz	BISAR	Differenz	AXSFEM	ABAQUS	Differenz	BISAR	Differenz
Oberseite der ADS	-0,703	-0,690	1,89 %	-0,700	0,42 %	-0,701	-0,702	-0,14 %	-0,700	0,14 %
Unterseite der ATS	0,945	0,959	1,46 %	1,01	6,43 %	0,668	0,675	1,04 %	0,708	5,65 %
Unterseite der HGT	0,268	0,269	0,37 %	0,282	4,96 %	0,727	0,725	-0,31 %	0,763	4,72 %

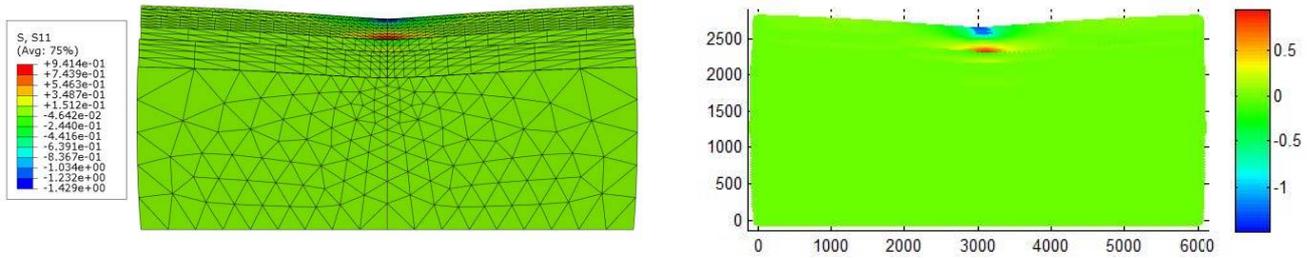


Bild 1: Ermittelte Spannung in horizontaler Richtung mit ABAQUS (links) und SAFEM (rechts) für Versuchsreihe 1

Tabelle 4 zeigt die Berechnungszeit der vier verwendeten Programme bei Einsatz eines Intel Core Duo-Prozessors mit 3,4 GHz und 32 GB RAM. Hinsichtlich der Berechnungsergebnisse und der benötigten Rechenzeit ist SAFEM mit der kommerziell verfügbaren Software auf Basis der Mehrschichtentheorie BISAR (für ausgewählte Berechnungssituationen, die den einschränkenden Annahmen der Mehrschichtentheorie entsprechen) sehr gut vergleichbar. Gegenüber der Mehrschichtentheorie ist ein wesentlicher Vorteil von SAFEM, dass die geometrischen Begrenzungen der Schichten (Ränder, Bordkonstruktionen etc.) adäquat berücksichtigt werden können.

Tabelle 4: Vergleich zwischen ABAQUS, BISAR und SAFEM hinsichtlich der Berechnungszeit für Versuchsreihe 1

	SAFEM	ABAQUS	AXSFEM	BISAR
Elemente	2 272	29 912	2 093	-
Knote	4 681	57 198	4 344	-
Berechnungszeit [s]	12	220	2	2

3.2 Experimentell gestützte Verifikation des FE-Rechenkerns

Ferner wurde das FE-Programm SAFEM auf die Genauigkeit anhand von experimentellen Ergebnissen aus der Versuchsstrecke der BAST geprüft. Hierfür wurden die Dehnungen längs zur Fahrtrichtung an der Unterseite der Asphalttragschicht (ATS) und die vertikalen Druckspannungen auf der Oberseite der Schottertragschicht (ToB) bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten (jeweils 2,7, 7,4, 15,5 und 29,8 km/h) aus dem

Versuchsfeld gemessen und mit den Berechnungsergebnissen der numerischen Simulation verglichen. Da beim AXSFEM-Rechenkern lediglich axialsymmetrische Geometrie- und Belastungsverhältnisse untersucht werden können, ist eine Analyse mittels AXSFEM von realen Achsgruppen – trotz einer möglichen Anwendung des linearen Superpositionsgesetzes – nur bedingt anwendbar und wurde daher in diesem Kapitel nicht durchgeführt. Somit kommt für die Verifikation nur SAFEM in Frage (s. Bild 2).

Zur Ermittlung der Beanspruchung im Oberbau wird der dynamische E-Modul in Abhängigkeit von der Belastungsfrequenz ermittelt, die mit drei verschiedenen Varianten (Rechenvarianten 1 bis 3) berechnet wird. In Bild 3 und Bild 4 werden die auf der Modellstraße gemessenen und mit den FE-Programmen berechneten Längsdehnungen an der Unterseite der ATS sowie Druckspannungen auf der Oberseite der ToB gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die berechneten Längsdehnungen an der Unterseite der ATS deutlich über den Messwerten der Versuchsstrecke liegen. Für die ToB liegen jedoch umgekehrte Erkenntnisse vor: Die berechneten Druckspannungen liegen stets unter den gemessenen Werten der Modellstraße. Die Abweichungen der berechneten Spannungen/Dehnungen von den gemessenen Werten verringern sich bei zunehmender Geschwindigkeit. Daraus kann geschlossen werden, dass je höher die Belastungsgeschwindigkeit ist, desto genauer kann der Beanspruchungszustand im Oberbau mit der angenommenen linearen Elastizität beschrieben werden.

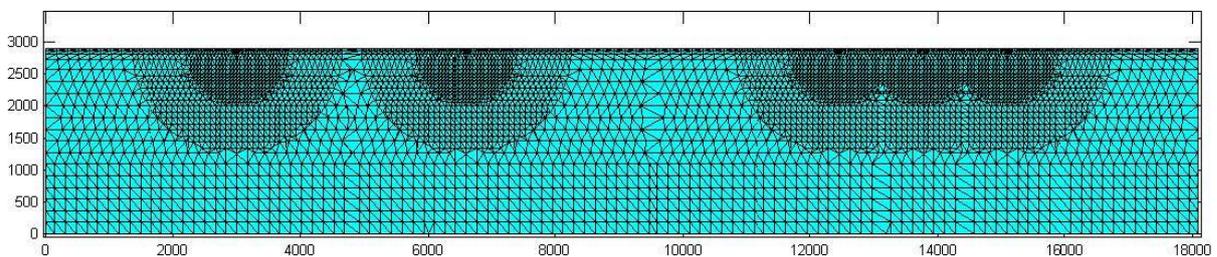


Bild 2: Automatische Netzgenerierung für die Fahrbahn mit SAFEM

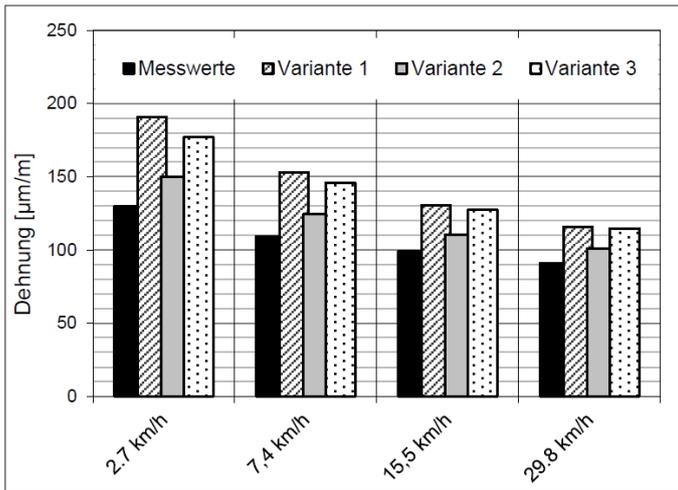


Bild 3: Gemessene und berechnete Längsdehnungen an der Unterseite der ATS (Achse 2)

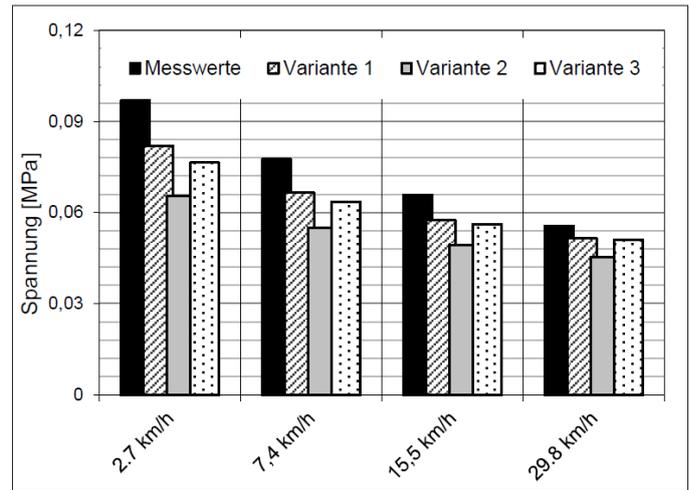


Bild 4: Gemessene und berechnete Druckspannungen auf der Oberseite der ToB (Achse 1)

4 Kalibrierung des SAFEM-Rechenkerns an den RStO

Nachdem durch Vergleichsrechnungen mit anderen Berechnungsprogrammen gezeigt wurde, dass der SAFEM-Rechenkern korrekt funktioniert, wurde er mittels des Berechnungsalgorithmus gemäß RDO Asphalt 09 an den RStO kalibriert. Im Zuge dessen wurden auch weitere Entwicklungen in dimensionierungsrelevanten Bereichen bei der Kalibrierung verwendet (zum Beispiel normierte charakteristische Temperaturverläufe). Somit ist es nun möglich, mithilfe von SAFEM RStO- und RDO-konforme Dimensionierungsrechnungen zu machen.

Für die Kalibrierrechnungen wurden zwei Berechnungsgeometrien zugrunde gelegt. Die erste Geometrie (unbeschränkt, Abstand Lastachse-Ränder Berechnungskörper: 3 000 mm) entspricht weitestgehend dem unendlich ausgedehnten Berechnungsraum der Mehrschichtentheorie. Bei der zweiten Geometrie (beschränkt) wurde der Abstand zwischen Belastungsfläche und einem Rand des Berechnungskörpers auf 750 mm reduziert. Nach den Berechnungen wurden die Ergebnisse zum einen mittels eines Quotienten aus Shiftfaktor SF und Kalibrierbeiwert und zum anderen mithilfe eines Anpassungsfaktors F kalibriert (s. Tabelle 5). Beide Methoden unterscheiden sich in ihrer Kalibrierung nur minimal. Welche der beiden Berechnungs- und der beiden Kalibriermethoden zukünftig Anwendung findet, wurde nicht abschließend festgelegt.

5 Schlussfolgerung

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die beiden Rechenmodelle bereits bestimmte nutzungsrechtliche Voraussetzungen (wie die Gewährleistung eines hohen Maßes an Genauigkeit der Rechenergebnisse, einer numerisch effizienten Arbeitsweise sowie einer ingenieurgerechten /anwenderfreundlichen Bedienung etc.) erfüllt haben, sodass eine dauerhafte und möglichst kostenneutrale Verwendung als FE-Rechenkern in Dimensionierungsprogrammen für Asphaltbefestigungen gegeben ist. Weiterer Forschungsbedarf besteht vor allem darin, die nachfolgenden, bisher nicht ausreichend berücksichtigten, für die Prognose der Restlebensdauer von Asphaltbefestigungen jedoch sehr wichtigen Sachverhalte durch die FE-Methode zu modellieren. Dazu zählen beispielsweise die dynamischen Radlasten, die rheologischen Eigenschaften von Asphalt, verbesserte Annahmen für den Schichtenverbund, Erkenntnisse zur Rissausbreitung und eine Verknüpfung mit dem probabilistischen Dimensionierungs- und Prognosekonzept etc. Alle genannten Einflussgrößen sollen vom FE-Modell explizit aufgegriffen werden. Auf diese Weise können die schadigungsrelevanten Beanspruchungszustände wirklichkeitsnah ermittelt werden, die als Eingangsparameter für eine zuverlässige Oberbaubemessung und eine exakte Prognose der Restnutzungsdauer verwendet werden.

Tabelle 5: Vorschläge für die bauweisenabhängigen Kalibrierwerte und Anpassungsfunktionen

Zeile	Bauweise	Beschränkte Geometrie			Unbeschränkte Geometrie		
		SF = 1 500	SF = 6 000	F	SF = 1 500	SF = 6 000	F
1	Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht	0,425	1,7	3 500	0,6	2,4	2 500
2.1	Asphalttragschicht und Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln auf Frostschutzschicht beziehungsweise Schicht aus frostunempfindlichem Material	0,125	0,5	13 500	0,15	0,6	10 000
2.2		0,225	0,9	7 000	0,3	1,2	5 000
2.3		0,3	1,2	5 000	0,45	1,8	3 500
3	Asphalttragschicht und Schottertragschicht auf Frostschutzschicht	0,175	0,7	8 750	0,225	0,9	6 250
4	Asphalttragschicht und Kiestragschicht auf Frostschutzschicht	0,175	0,7	8 750	0,225	0,9	6 250
5	Asphalttragschicht und Schotter- oder Kiestragschicht auf Schicht aus frostunempfindlichem Material	0,225	0,9	7 000	0,3	1,2	5 000