

Weiterentwicklung der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit

FA 4.303

Forschungsstellen: GWT-TUD GmbH, Dresden

Ingenieurgesellschaft für Straßenwesen
Aachen mbH (ISAC GmbH)

Bearbeiter: Wellner, F. / Kayser, S. / Oeser,
M. / Blasl, A. / Reinhardt, U. /
Canon Falla, G. / Neumann, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und
digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Dezember 2020

1 Aufgabenstellung

Im Projekt "FE 04.0303/2016/ORB" wurden Methoden für die Dimensionierung und Analyse von flexiblen Straßenbefestigungen entwickelt und implementiert.

Primär wurde das Programm flexCALC erstellt, das die rechnerische Dimensionierung (gemäß RDO Asphalt) und die Substanzbewertung (gemäß RSO Asphalt) auf Basis eines Finite-Elemente-Rechenkerns in einer einheitlichen Softwareplattform zusammenführt. Des Weiteren steht in dem modular strukturierten Programm ein Rechenkern auf Basis der Mehrschichtentheorie zur Verfügung. Dieser zeichnet sich durch seine enorme Geschwindigkeit aus, unterliegt jedoch verschiedenen geometrischen und materiellen Einschränkungen. Der durch die Fourier-Reihen unterstützte Rechenkern auf Basis der Finite-Elemente-Methode ermöglicht gegenüber der Mehrschichtentheorie die Berücksichtigung anderer Geometrien und Randbedingungen. Beide Methoden gelten für linear-elastische Statik.

Nichtlineare Materialmodelle und dynamische Effekte werden aufgrund ihrer Komplexität in der Dimensionierungspraxis bislang nicht berücksichtigt. Detaillierte Analysen erfordern allerdings deren Berücksichtigung, da die Ergebnisse unter idealisierten Annahmen stark von der Realität abweichen können. Daher wurde ein Finite-Elemente-Rechenkern mit rein polynomialen Ansatzfunktionen implementiert. Zur Auswahl stehen verschiedene Modelle für ungebundene, granulare Materialien und ein etabliertes Modell für viskoelastische Materialien. Zur Modellierung des Schichtenverbunds wurden verschiedene Konstitutivgesetze und die dazugehörige Elementformulierung implementiert. Außerdem ist ein expliziter Löser implementiert. Damit steht ein Werkzeugkasten bereit, der die Weiterentwicklung der Dimensionierung unterstützen wird.

Besonderes Augenmerk wurde auf eine ausführliche Dokumentation sowie die Möglichkeit zur einfachen Weiterentwicklung

und Wartbarkeit gelegt. Durch aufwändige Verifikationen wurde die Korrektheit der implementierten Algorithmen sichergestellt.

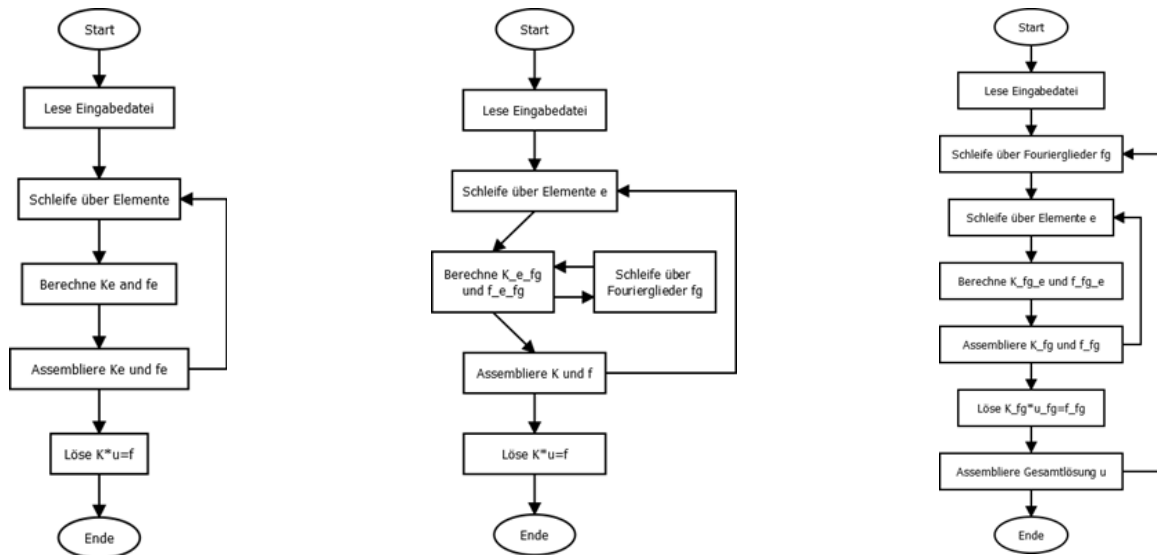
2 Finite-Elemente-basierte Modellierung

Die Größe des Problems und vor allem die im Rahmen der Probabilistik notwendige Berechnung von zahlreichen ähnlichen Varianten des Problems erfordern eine hohe Geschwindigkeit des Codes. Einerseits ermöglichen aktuelle Rechnerarchitekturen eine Reduktion der Rechenzeit durch Parallelisierung, andererseits muss das Rechenverfahren selbst bereits möglichst effizient sein. Der implementierte Code erfüllt beide Anforderungen: Hohe Single Thread Performance sowie gute Skalierung. Die gute Skalierung wird vor allem durch eine Vorberechnung von Teilen der Elementsteifigkeitsmatrizen erreicht.

Ein klassisches Finite-Elemente-Programm ist typischerweise wie in Bild 1a strukturiert. Insbesondere wird die Funktion, welche die Elementsteifigkeitsmatrix berechnet, für jedes Element genau einmal aufgerufen¹.

Durch die Fourier-Reihen-unterstützte Finite-Elemente-Methode (FSFEM) ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, die sich drastisch in der Laufzeit und ihrem Potenzial zur Parallelisierung unterscheiden. Die Untersuchung unterschiedlicher Implementierungen ergab, dass es nicht vorteilhaft ist, pro Element direkt alle Fourier-Terme zu berechnen, wie in Bild 1b dargestellt. Vielmehr ist es sinnvoll die Elementsteifigkeitsmatrizen größtenteils vorzuberechnen und dann die Iteration über Elemente in der Schleife über die Fourier-Terme anzuordnen. Somit können auch die Fourier-Koeffizienten der Verschiebungen auch direkt pro Fourier-Term gelöst werden, da das globale Gleichungssystem in kleinere Teilprobleme zerfällt. Anhand von Vergleichen mit analytischen Lösungen und mittels ABAQUS berechneten numerischen Lösungen von dreidimensionalen Problemen wurde das Verfahren verifiziert (siehe Bild 2). Dabei stellte sich heraus, dass der gewählte FSFEM-Ansatz Einschränkungen hinsichtlich der Abbildbarkeit von Randbedingungen mit sich bringt. Die dadurch induzierten Abweichungen sind aber als gering anzusehen.

¹ Im Rahmen linearer Elastizität



(a) Klassisches FE-Programm.

(b) Fourier-FE-Programm mit Fourier-Schleife in Elementroutine.

(c) Fourier-FE-Programm mit Element-Schleife in Fourierglied-Schleife

Bild 1: Flussdiagramme von klassischen und fourierunterstützten FE-Codes

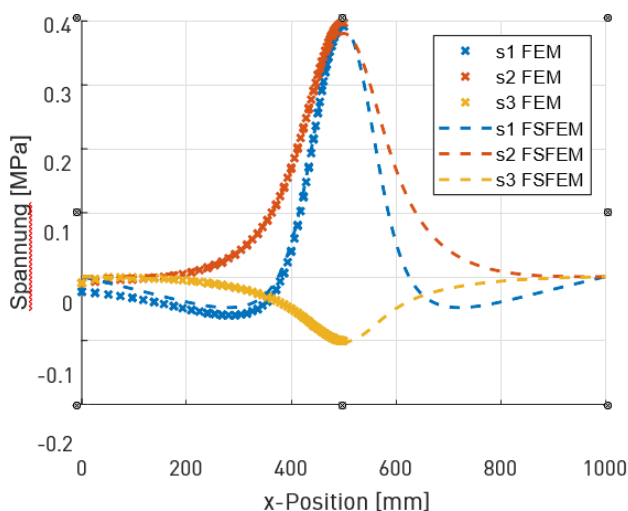


Bild 2: Spannungsverläufe entlang der x-Richtung auf der Unterseite der Deckschicht eines abstrahierten zweischichtigen Straßenaufbaus. x blau, y rot, z gelb. Kreuze: FEM, gestrichelte Linien: FSFEM

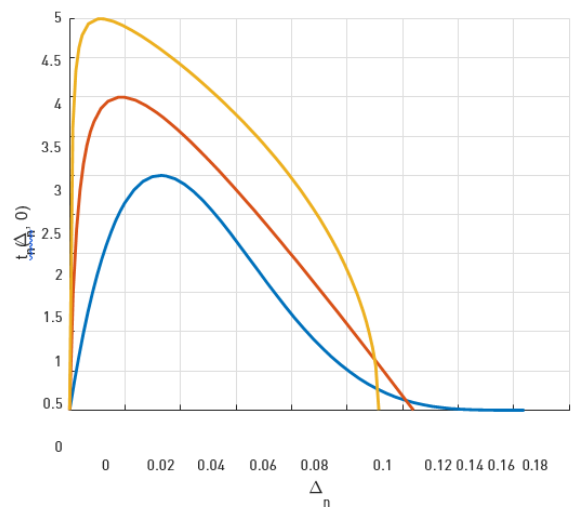


Bild 3: Rissöffnungs-Kohäsivspannungsverläufe in Normalenrichtung des Modells für den Schichtenverbund. Das Modell kann für duktiles Verhalten (blau) bis hin zu sprödem Verhalten (gelb) parametrisiert werden.

3 Nichtlineare Materialmodellierung und Löser

Im Asphaltstraßenbau haben linear-elastische Materialmodelle nur begrenzte Gültigkeit. In der Realität verhalten sich bituminöse Baustoffe dissipativ: Bewegungsenergie wird in Wärme umgewandelt und nicht elastisch gespeichert. Zur Modellierung dieses Verhaltens wurde das generalisierte Maxwell-Modell implementiert. Für die Berücksichtigung ungebundener, granularer Materialien, wie sie in Tragschichten anzutreffen sind, stehen das "Dresdner"-Modell und das "Universal"-Modell nach

Uzan zur Verfügung. Neben dem impliziten Solver für (quasi)-statische Berechnungen steht mit dem Newmark- β -Verfahren ein verbreitetes explizites Verfahren bereit.

4 Modellierung des Schichtenverbunds

Der Verbund zwischen den einzelnen Schichten einer Asphaltstraße hängt stark von Verkehrs- und Temperaturlasten ab. Insbesondere ermüdet der Verbund in der Regel. Die Modellierung dieser Eigenschaften durch Kohäsivzonenelemente ist zielführend, da über die rein elastische Antwort hinaus Schädigungseffekte, sowie die schließliche Delamination abgebildet werden können. Aufgrund der Anpassbarkeit an unterschiedliche Verläufe des Schädigungsverhaltens wurde das "Park-Paulino-Roesler"-Modell implementiert (siehe Bild 3).

5 Erweiterte Berechnungen gemäß RDO und RSO Asphalt

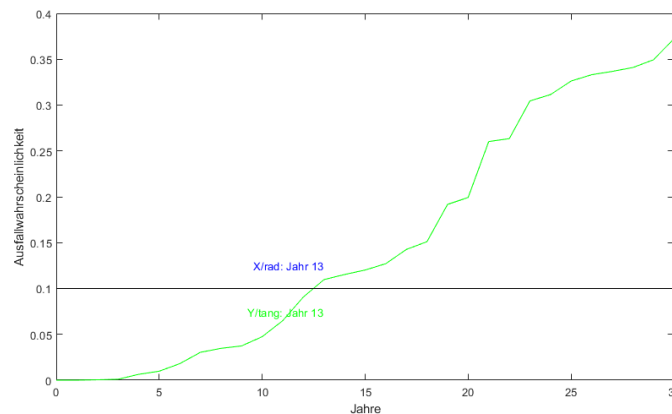
Nach Fertigstellung und Verifikation der beiden Rechenkerne wurde das Programm "flexible Calculations of Asphalt Layer Constructions" (flexCALC) um die Funktionalität und Verfahrensweise der RDO Asphalt erweitert. Damit ist es nun möglich, Dimensionierungsberechnungen gemäß den RDO Asphalt und der erweiterten Funktionalität des FE-Rechenkerns einer beschränkten Geometrie durchzuführen. Um die gleiche Funktionalität auch bei der probabilistischen Verfahrensweise der RSO Asphalt verwenden zu können, war es notwendig den Berechnungsaufwand von im Minimum 547 560 Beanspruchungszuständen zu reduzieren. Ohne diese Reduktion ist eine allgemeine Anwendung, trotz einer möglichen parallelen Abarbeitung extrem zeitaufwändig und somit unpraktikabel.

Die Reduktion der zu berechnenden Beanspruchungszustände wurde wie folgt umgesetzt:

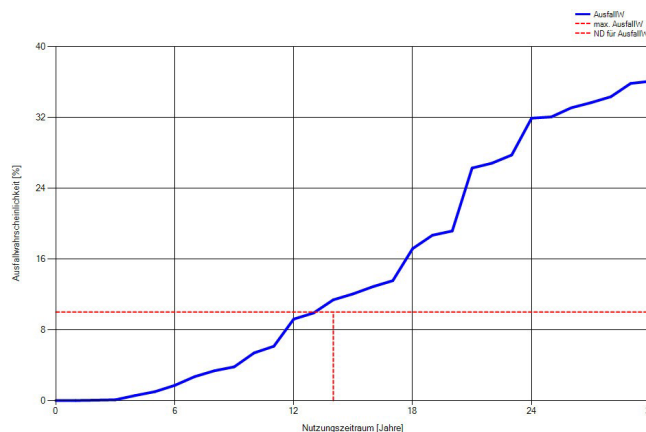
- Berücksichtigung einer Achslastklasse (statt 26), aufgrund des linear-elastischen Materialverhaltens.
- Berücksichtigung von vier Temperaturklassen (statt 13) und jeweils zwölf Temperaturverläufen als Stützstellen für eine analytische Berechnungsweise.
- Berücksichtigung von fünf Steifigkeitsklassen (bei mehr als 5) der Asphalttragschicht als Stützstellen für eine analytische Berechnungsweise.
- Berücksichtigung von fünf Schichtdickenklassen (bei mehr als 5) der Asphaltkonstruktion als Stützstellen für eine analytische Berechnungsweise.

Damit beträgt die minimale Anzahl der zu berechnenden Beanspruchungszustände nunmehr 6 480, wobei die Mindestanzahl von drei Steifigkeitsklassen für jede der Asphaltschichten berücksichtigt wurde. Anschließend werden die Ergebnisse der Berechnungen als Stützstellen für die Interpolationen mittels Polynom- oder Potenzfunktion verwendet, um die Ergebnisse der zuvor nicht berücksichtigten Beanspruchungszustände analytisch zu bestimmen. Diese Vorgehensweise reduziert den

zeitlichen Aufwand immens, beeinflusst aber die Qualität der Berechnungsergebnisse. Die erforderliche Anzahl und Lage der Stützstellen wurden innerhalb des Forschungsprojekts variiert und untersucht, um den qualitativen Einfluss auf das Gesamtergebnis so gering wie möglich zu halten. Um die Richtigkeit der Ergebnisse und der programmierten Funktionsweise zu zeigen, erfolgten abschließend vergleichende Verifikationsberechnungen der multifunktionalen Gesamtlösung mit ADtoPave (siehe Bild 4).



(a) Ausfallwahrscheinlichkeit flexCALC



(b) Ausfallwahrscheinlichkeit ADtoPave.

Bild 4: Vergleich der Ergebnisse der Ausfallwahrscheinlichkeiten einer Verifikationsrechnung zwischen flexCALC und ADtoPave

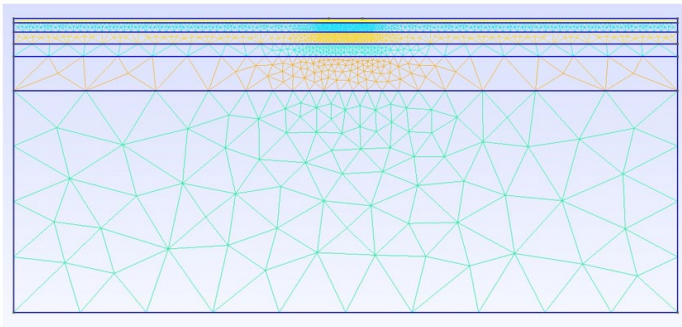
6 Arbeit mit flexCALC

Um die Verwendung und Weiterentwicklung von flexCALC so transparent und einfach wie möglich zu gestalten, wurde bei der Erstellung der Software darauf geachtet, dass die verwendeten Datenformate (JSON, ABAQUS und VTK) plattform- und softwareunabhängig gelesen und verarbeitet werden können. Damit wird zum einen dem Anwender die Möglichkeit gegeben, mit den Programmen seiner Wahl zu arbeiten und zum anderen bleibt flexCALC unabhängig von der Verwendung bestimmter anderer Softwarelösungen und deren zukünftigen Entwicklungen. Somit wird in Verbindung mit der modularen Programmstruktur mit flexCALC eine Software-Plattform bereitgestellt, mit deren Hilfe auch zukünftige Aufgabenstellungen bei der rechnerischen

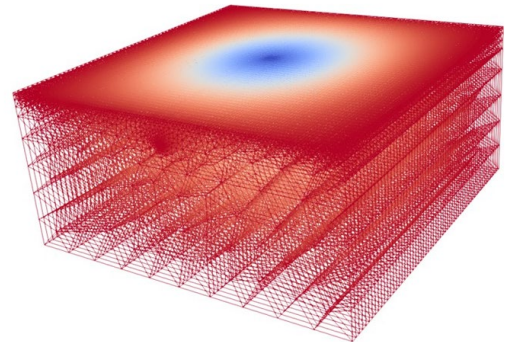
Dimensionierung und Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen bearbeitet werden können.

Neben den genannten Datenformaten wurde die leistungsfähigen, aber freien Softwarelösungen GMSH und ParaView verwendet. Mit ihrer Hilfe werden die Qualität und die Möglichkeiten der

mit flexCALC zu bearbeitenden Problemstellungen deutlich gesteigert. GMSH ermöglicht dabei eine schnelle und problemabhängige parametrisierte Vernetzung für die Arbeit mit FSFEM (siehe Bild 5a). Mithilfe von ParaView können die Berechnungsergebnisse flexibel und entsprechend der Anwenderbedürfnisse visualisiert werden (siehe Bild 5b).



(a) Beispiel eines generiertes Netzes mit Hilfe von GMSH



(b) Beispiel einer grafischen Ausgabe in ParaView.

Bild 5: Beispiele der verwendeten Programme für die Arbeit mit flexCALC