

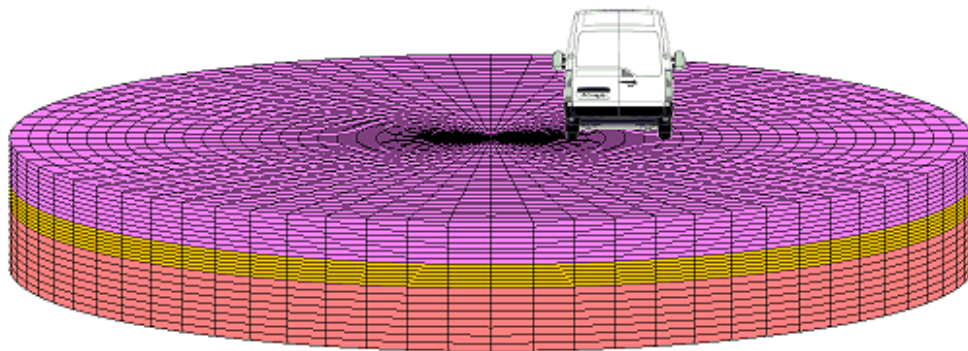
Bachelorarbeit

**Ermittlung der Rissgefährdung von Fahrbahnen infolge
von Lehm - Einschlüssen**

Gurbet Birhimeoglu

Matr.-Nr.: 108010220279

Bachelorstudiengang Maschinenbau



Betreut von

Dr.-Ing. Michael Hofmann

Prof. Dr. Techn. Günther Meschke

April 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Straßenbau	3
2.1	Entwicklung	3
2.2	Flächen und Schichten	4
2.2.1	Untergrund und Unterbau	5
2.2.2	Oberbau und die Decke	6
2.3	Bildung von Einschlüssen	11
3	Problemstellung	11
3.1	Die Software MSC Marc/Mentat	11
3.2	Vernetzung der Geometrie in MSC Mentat	12
4	Parameterstudien	14
4.1	Einfluss der Geometrie des Einschlusses	14
4.2	Einfluss der Überlagerungshöhe	20
4.3	Aussermittige Radlast	24
4.4	Einfluss des Netzweite	29
5	Schlussfolgerungen	33

1 Einleitung

Fahrbahnen sind die wichtigsten Verkehrswege zur Beförderung von Personen und Gütern, die im Laufe der Zeit instand gesetzt wurde und stellenweise Erweiterungen durchläuft. Sie ist ein Bestandteil des Verkehrswegebau und gehört somit zum Bereich des Bauingenieurwesens.

In den Untersuchungen haben sich in Fahrbahndecken aus Beton Schäden erwiesen, die nach Vermutungen auf Lehm-Einschlüsse schließen. In der vorliegenden Arbeit sollen Simulationen mithilfe der Finiten Elemente Methoden (FEM) durchgeführt werden, um eine Analyse des Materialverhaltens von Betonfahrbahnen unter Beanspruchung durch Verkehrslasten durchzuführen. Die FEM ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen und wird bei komplexen Problemen verwendet. Sie ist ein modernes Berechnungsverfahren im Ingenieurwesen und wird bei elastomechanischen Problemen angewandt. Somit können Festigkeitsberechnungen durchgeführt werden. Mithilfe des Verfahrens wird eine Näherungsfunktion an die exakte Lösung der Differentialgleichung geliefert. Dabei basiert die Genauigkeit der Näherungsfunktion auf die Erhöhung der Freiheitsgrade. Mittels der FEM können Aussagen über das Bauteilverhalten getroffen werden.

Betonfahrbahndecken werden im Verkehrsbau in der Regel an Straßen bei hohen Verkehrsbelastungen verwendet. Die vorliegenden Lehm-Einschlüsse werden aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Stoffe im Beton, die Luft einschließen, verursacht. Mittels

der Verdichtung in Betonfahrbahndecken werden Luftspalte ausgelassen, die sich ebenfalls zu Einschlüssen entwickeln. An dieser Stelle stellt sich die Frage inwiefern diese Einschlüsse Risiken für die Betonfahrbahndecke verursachen. Hierfür werden Parameterstudien durchgeführt, indem die Rissgefährdung von Fahrbahnen infolge von Einschlüssen, die sich in unterschiedlichen Tiefen unter dem Fahrzeugreifen befinden, ermittelt.

Die genannten numerischen Analysen für die Untersuchung der Schädigung in Betonfahrbahnen, die durch Einschlüsse entstehen, werden mit der Software MSC.MARC/MENTAT herangezogen. Die bereits bestehenden Einschlüsse werden durch Verkehrslasten beansprucht, die weitere Schäden in der Fahrbahn verursachen. Dafür wird die Geometrie einer Fahrbahn mit den entsprechenden Randbedingungen in der Software ausgehend von einem Randwertproblem nach erfolgreicher Berechnung in einem Post-Prozessor visualisiert und analysiert. Um zu einer genauen Analyse des Materialverhaltens zu gelangen, werden mehrere Simulationen erforderlich sein. Hierbei wird in dieser Parameterstudie zunächst die Geometrie des Einschlusses variiert und berechnet. Beginnend mit einem kugelförmigen Einschluss bis zu mehreren ellipsoiden-förmigen Einschlüssen mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen von a und b . Anschließend erfolgen weitere Studien der achsensymmetrischen Geometrie durch Variieren der Tiefenlage des Einschlusses. Im Anschluss wird das realitätsnahe Ergebnis der achsensymmetrischen Geometrie in ein 3D Modell umgestellt und weitere Studien durchgeführt. Hierbei wird die Position der LKW-Radlast verändert. Mithilfe der Parameterstudien können die wichtige Fragen über die Lehm-Einschlüsse in der Betonfahrbahndecke aufgedeckt werden.

Der Hauptteil der Arbeit gliedert sich in drei Kapitel. Nach der Einleitung wird zunächst in Kapitel zwei erläutert, wie eine Straße aufgebaut ist und welche Materialien zum Bestandteil einer Straßenbahn gehören. Im dritten Kapitel erfolgt eine Darstellung der Geometrie in Bezug auf die Software, damit einhergehend wird auf die Vernetzung der Geometrie eingegangen und diese veranschaulicht. Anschließend werden im letzten Kapitel die Ergebnisse der Parameterstudie visualisiert und analysiert.

2 Straßenbau

2.1 Entwicklung

Wie bereits in der Einleitung erwähnt ist der Straßenbau ein Bestandteil des Verkehrswegebbaus und gehört zum Bereich des Bauingenieurwesens. Sie sind die wichtigsten Verkehrswege zur Beförderung von Personen und Gütern, die im Laufe der Jahrzehnte eine Entwicklung durchgemacht haben. Ausgehend davon wird bis einschließlich heute das Straßennetz instand gesetzt und stellenweise auch erweitert, die im Hinblick der Qualität, der Wirtschaftlichkeit und der Verkehrssicherheit perfektioniert wird. Des Weiteren wird für den Schutz des Menschen und der Umwelt gesorgt, da dieser für den Straßenbau von Bedeutung ist.

Der natürlich gewachsene Boden ist als Verkehrsfläche nicht geeignet und den Anforderungen des modernen Verkehrs- und Transportwesens nicht gewachsen. Aus diesem Grund hat der Bau von Straßen- und Wegen eine besondere Bedeutung gewonnen. Dauerhafte und sichere Verkehrsflächen gehören zu den Zielen des modernen Straßenbauwesens.

Erst ab den 1950er Jahren kam der Straßenbau wieder in den Sprung, während mit zunehmendem Verkehr die Anforderungen an die Straßen höher gestellt wurden. Im Vergleich zu den vorherigen Jahren gab es zahlreiche Verbesserungen. Das hat sowohl im Bereich Konstruktion und Betontechnologie als auch in Misch- und Einbautechnik stattgefunden. Dieses Phänomen wirkte sich positiv auf das Gebrauchsverhalten und die Wirtschaftlichkeit der Betondecken.

Weiterhin gibt es viele konstruktive Veränderungen in der Bauweise der Straßenbau, dabei hat man neben der raumfugenlosen Bauweise den frostsicheren Aufbau der Befestigung erstellt. Neben dem hat man im Bereich der erosionsbeständigen Unterlage der Decke Verbesserungen gemacht.

Der Durchlauf für den Straßentwurf mit verschiedenen Stufen ist eine Grundlage für den Straßen- und Wegebau, wobei jede Stufe konkretisiert wird. Ein weiteres Ziel besteht darin, die Verkehrsüberlastungen einer Strecke sowie einen Unfallschwerpunkt zu beseitigen. Es gibt konstruktive Vorgaben, die in Regelwerke und Richtlinien enthalten sind, an die bei der praktischen Planung des Straßentwurfs orientiert wird. Der Bau der Straßen bringt sowohl Vorteile als auch Nachteile mit sich. Einerseits wird den Menschen das Leben vereinfacht, da sie eine bessere Verbindung zum Straßennetz haben, andererseits wird ihr Leben durch den Lärm und Abgase beeinträchtigt.

Der Straßenbau ist ein enger Bestandteil des Bauwesens, das auf den Erdbau basiert, mit dessen Hilfe das Gelände für den Straßenbau vorbereitet wird. Die Landschaftspflege und Straßenentwässerung gehört ebenfalls zu den Straßenbautechniken der verschiedenen Baustoffe und Bauverfahren. Im Bereich des Straßenbaus werden die Fahrbahnen aus unterschiedlichen sichtbaren Materialien wie Asphalt, Beton und Pflaster hergestellt. In der Regel werden bei größeren Bauarbeiten die Asphaltstraßen mit einem Straßenfertiger und die Betonstraßen mit einem Gleitschalungsfertiger hergestellt, während kleinere Baumaßnahmen und Reparaturarbeiten manuell ausgeführt werden. Asphalt besitzt bis zu einer bestimmten Temperatur eine Flexibilität, die im Laufe der Zeit an stark belasteten Bereichen Spurrinnen aufweist. Bei Überschreitung der Außentemperatur treten aus diesem Grund Verformungen und Schädigungen in Asphalt auf. In den folgenden Kapiteln werden die Deckschichten aus Asphalt, Beton und Pflaster näher erläutert, während auf den Aufbau und weitere Einzelheiten der Betonschicht näher herangegangen wird, da in der Parameterstudie die Simulationen mit der Betonfahrbahndecken durchgeführt werden.

2.2 Flächen und Schichten

Wie bereits im ersten Kapitel beschrieben, wird eine Fahrbahn sorgfältig geplant und anschließend schichtweise aufgebaut. Damit der Vorgang erfolgt, benötigt dieser insbesondere Gestein und einen Bindungsstoff, der die Gesteinskörner zusammenhält. Für den Bau der Fahrbahn verwenden Baufirmen polierfestes, hartes Gestein, welches kantig und rau gebrochen ist. Als Bindungsstoff bzw. Bindemittel benutzt man "Bitumen", welches separat mit dem Gestein auf ca. 200 Grad erhitzt wird. Nachdem man diese erhitzt hat, werden die beiden Komponenten gut gemischt und als heißes Mischgut (z. Bsp. Asphalt) in mehreren Schichten in die Straße aufgetragen. Somit ist eine Lebensdauer der Straßen von ca. 15 bis 20 Jahren möglich. Im Prinzip befinden sich in einer vielbefahrenen Straße etliche Schichten. Die Schichten einer Straße werden in Oberbau, Unterbau und

Untergrund unterteilt. Der Unterbau ist ein künstlich hergestellter Erdkörper zwischen Untergrund und Oberbau.

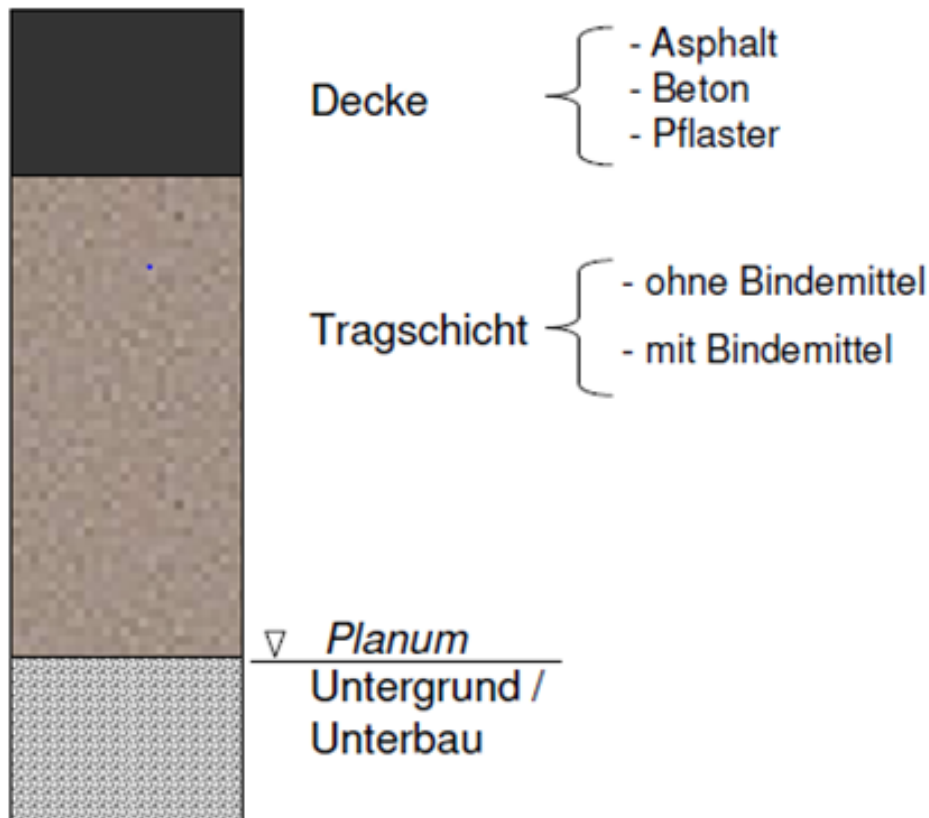


Abbildung 2.1: Aufbau einer Fahrbahn; Bild entnommen aus [1]

2.2.1 Untergrund und Unterbau

In der Natur findet man nicht immer die ideale Grundlage für den Bau der Straßen, deshalb wird der künstlich erstellte Erdkörper (Unterbau) zur Erreichung der Höhenlage der Straße benötigt. Der Unterbau, dessen Oberfläche *Planum* heißt, trennt den Erdbau von dem Straßenbau. Da der Untergrund die Stabilität komprimiert, gelten für den Unterbau die gleichen Anforderungen an die Tragfähigkeit wie für den Untergrund. Hierbei ist die Verdichtung, die Luft und Wasser aus dem Boden herauspresst, von großer Bedeutung. Für den Fall, dass im Boden Lehm, Ton oder Schluff enthalten ist, haften die Teilchen des Bodens aneinander. Für den Fall, dass Kies oder Sand im Boden vorliegt, sind die Teilchen lose nebeneinander. An dieser Stelle kommt die Verdichtung ins Spiel. Um die Verdichtung zu verwirklichen, benötigt man schwere Vibrations- oder Oszillationswalzen. Nachdem die Verdichtung erfolgt ist, sollte der Boden keinen hohen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. In diesem Fall muss der Boden mittels Einmischen des Bindemittels z.B. Kalk oder Zement, stabilisiert werden.

Im Gegensatz zu weichen oder nicht tragfähigen Untergründen gibt es auch harte Untergründe. Hierfür wird das Gelände trassiert, indem mit speziellen Maschinen eine Schneise in das harte Gestein geschnitten wird. Der Untergrund liegt unterhalb des Oberbaus oder ist der des Unterbaus anstehende Boden. Die Tragschicht ist dem Oberbau unterliegende Schicht, die in ungebundene und gebundene Tragschichten unterteilt wird. Diese kann man

somit in zwei Kategorien einteilen. Zum einen gibt es die Tragschicht ohne Bindemittel (ungebundene Tragschicht), darunter fallen die

- Frostschutzschichten
- Kiestragschichten
- Schottertragschichten

und zum anderen die Tragschicht mit Bindemittel (gebundene Tragschicht) mit folgenden hydraulischen Bindemitteln

- hydraulisch gebundene Tragschicht
- Verfestigung -
- Betontragschicht

oder

- Asphalttragschicht

2.2.2 Oberbau und die Decke

Der Oberbau umfasst alle Schichten, die zur Sicherstellung der Tragfähigkeit der Verkehrsfläche baulich erforderlich sind. Unter normalen Umständen ist vom Oberbau nur die Deckschicht (Asphalt, Beton, Pflaster) zu erkennen. Jedoch besteht der gesamte Oberbau aus diversen Schichten verschiedener Materialien. Im Allgemeinen hat der Oberbau einer Fahrbahn eine Gesamtdicke von 40cm - 90cm. Für Geh- und Radwege beträgt die Gesamtdicke meistens 20cm - 40cm. Die Abfolge und Dicke der einzelnen Schichten des Oberbaus ist in Deutschland durch die "Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen" (RStO 12) [2](Seite 19) geregelt. Die Qualitätsanforderungen an die Deckschicht sind von großer Bedeutung, wobei ihre Dicke und Zusammensetzung von der Verkehrsbelastung abhängig ist. Im Regelfall gibt es drei Arten der Deckschicht

- Asphaltdecke
- Betondecke
- Pflasterdecke

Asphaltdecken

Im Allgemeinen bestehen Asphaltdecken aus abgestuftem Mineralgemisch und Bitumen. Bitumen ist ein Bindemittel die die Stabilität des Mittels reguliert. Die Asphaltdeckschicht

sind die am häufigsten verwendeten Deckschichten. Hierzu gehören die Decken aus Gussasphalt, Splittmastixasphalt und Asphaltbeton, während Asphaltmastix und offenporige Asphalte seltener angewandt werden. Somit bildet die Deckschicht mit der Binderschicht die Fahrbahndecke, die eine Stärke von 3cm bis 4cm besitzt und je nach Verkehrslage 12 bis 18 Jahren Haltbarkeit aufweist. Die Materialeigenschaften von Asphalt orientieren sich nach der Temperatur. Demnach hat Asphalt bei geringen Temperaturen z.B im Winter einen Elastizitätsmodul von $1000N/mm^2$ und bei hohen Temperaturen z.B im Sommer einen Elastizitätsmodul von $9000N/mm^2$. Der Hauptgrund für dieses Phänomen ist das unterschiedliche Materialverhalten in den jeweiligen Jahreszeiten. Im Winter weist Asphalt ein elastisch Materialverhalten auf und im Sommer ein viskoelastisches Materialverhalten. Aus diesem Grund ist die Querkontoaktionszahl keine Konstante, sondern eine zeit-bzw. frequenzabhängige rheologische Funktion. Der Wert für den Querkontoaktionszahl für Asphalt kann in der Praxis zwischen $\nu = 0,3$ und $\nu = 0,3$ als Konstante Querkontoaktionszahl angenommen werden, dass mittels Versuchen in der Theorie bestimmt wurde.



Abbildung 2.2: Arten der Asphaltdecken; Bild entnommen aus [1]

Wie bereits erwähnt, besitzt Asphalt bis zu einer bestimmten Temperatur eine Flexibilität, die im Laufe der Zeit an stark belasteten Bereichen Spurrinnen aufweist. Bei Überschreitung der Außentemperatur treten aus diesem Grund Verformungen und Schädigungen in Asphalt auf. Somit wird das thermoplastische Verhalten von Asphalt deutlich.

Betondecken

Betondecken bestehen ebenfalls aus abgestuftem Mineralgemisch doch im Gegensatz zu Asphaltdecken wird Zement als Bindemittel verwendet. Bei Straßen mit hoher Beanspruchung werden Betondecken bevorzugt. Die Autobahnen bestehen beispielsweise aus Betondecken und können ca. 30 bis 40 Jahre halten. Die Betondeckschichten werden mit Stärken von ca. 18 bis 30 cm gebaut und bestehen aus Platten mit 5 bis 6m Länge ohne die Verstärkung eines anderen Objekts (ohne Bewehrung). Für den Beton ist es wichtig, dass dieser mit Fugen versehen wird, da somit Risse verhindert werden und Längenänderungen durch Temperaturschwankungen ausgleichen. Anschließend werden diese verfüllt, um das Eindringen der Feststoffe oder Flüssigkeiten zu verhindern und somit die freie Beweglichkeit der Platten zueinander behindert wird. Die genannten Betonplatten werden mit Dübeln (Querfugen) und Ankern (Längsfugen) zusammengehalten. Mit den Dübeln wird für die Übertragung der Lasten gesorgt und die Höhenlage der Betonplatten in Längsrichtung gesichert während durch die Anker das Auseinanderwandern der Platten verhindert wird. Die Betondecken werden auch an stark befahrenen Busbahnhöfen und Haltestellen eingebaut, denn bei der Verwendung von Asphalt an diesen Orten würde dieser Spurrillen verursachen.

Herstellung von Betonfahrbahnen

Der moderne Straßenbau heute hat neben technischen auch wirtschaftliche Forderungen. Die Herstellung von Betonfahrdecken dient zu dauerhaften und griffigen Fahrbahnen, die für hohe Belastungen durch Schwerlastverkehr am besten geeignet sind. In der Bundesrepublik Deutschland wurde 1888 die erste Betonstraße im Handeinbau entwickelt. Der Straßenbau wurde zunächst aufgrund von verwendeten grobkörnigen Zuschlags "Zementmakadamstraßen" [3] (Seite 10) genannt. Man hat auf die ebene Tragschicht 15cm bis 25cm dicke Betonschicht (Unterbeton) im Mischungsverhältnis Zement zu Zuschlag 1 zu 7 mit Kies oder Steinbelag aufgebracht. [3][Seite 11) Nach der Erhärtung wurde die Decklage (Oberbeton) mit einem Teil Zement und drei Teilen Steinschlag angelegt. Anschließend wurde die Korngröße bis 5 cm und die Dicke von 5cm bis 6cm aufgestampft. 1924 wurde basierend auf amerikanischer Erfahrung die erste Betonstraße maschinell gebaut. Neben den wirtschaftlichen Gründen, sind die Steifigkeit und die verbundene gute lastübertragende Wirkung des Betons von großer Bedeutung. Im Vergleich zu früher bereitet heute die leistungsfähige, automatisch gesteuerte Kompaktanlage den Beton. Anschließend wird dieser mit LKW zum Einbauort transportiert. Am Einbauort werden Gleitschalungsfertiger mit Dübel und Ankersetzgeräten verdrängt, die darauffolgend an Spanndrähten geführt werden. Somit wird die Betonoberfläche eben und griffig gebaut und kann lärmindernd ausgebildet werden. Bis einschließlich 2006 hat man eine frische Betonoberfläche mit nachgeschlepptem Jutetuch in Längsrichtung texturiert. Darauffolgend wurde bei einer frisch eingebauten Betondecke der Oberflächenmörtel entfernt, damit wurden eine dauerhafte Lärmarme Textur und eine griffige Oberfläche.

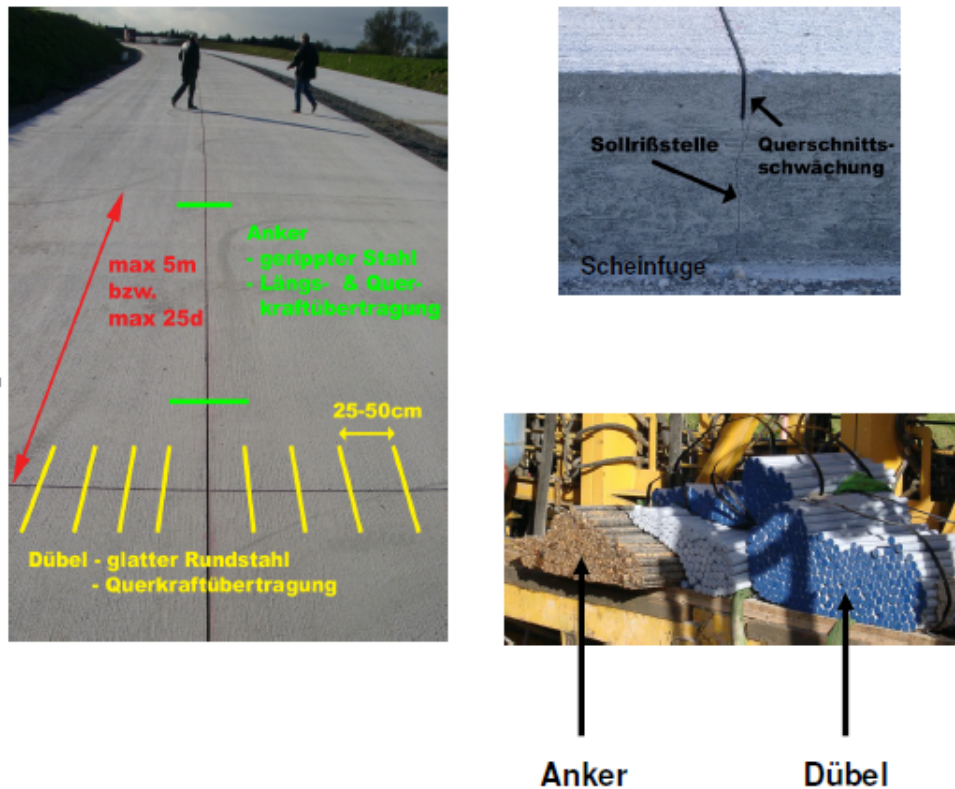


Abbildung 2.3: Betondecke; Bild entnommen aus [1]

Pflasterdecken

Die dritte Bauweise einer Decke sind Pflasterdecken, die zu eine der ältesten Bauweisen gehört, um die Straßen, Wege und Plätze zu befestigen. Diese werden zum größten Teil aus Natursteinpflaster, Betonsteinpflaster und Klinkerpflaster hergestellt. Innerhalb ihrer Bauweise gibt es ebenfalls zwei Anwendungen. Zum einen gibt es die ungebundene und zum anderen die gebundene Pflasterbauweise, die sich in ihrer wasserdurchlässigen Fuge, Bettung und Tragschicht unterscheiden. Bei der ungebundenen Bauweise der Pflastersteine handelt es um wasserdurchlässige und bei gebundener Bauweise der Pflastersteine um wasserundurchlässige. Für die Pflasterdecken wird eine Dicke von ca. 8 bis 10cm vorgenommen. Der Elastizitätsmodul für die Pflastersteinen liegt zwischen ca. 18.000 bis 21.000 N/mm^2 und die Querkontraktionszahl liegt bei $\nu = 0,3$.



Abbildung 2.4: Pflasterdecken, abfotografiert auf der Lindenerstraße am 18.03.2014 um 14:00 Uhr

Es bestehen sowohl Vorteile als auch Nachteile für die jeweiligen Deckschichten. Im Gegenteil zu Betondecken dürfen Pflasterdecken in Bereichen mit hoher Verkehrsbelastung nicht eingesetzt werden, jedoch bieten sie zu den anderen Decken umfangreiche und gestalterische Möglichkeiten. Asphalt bereitet aufgrund ihrer viskoelastischen Materialverhalten bei hohen Temperatur nach einer bestimmten Zeit Spurrillen in der Fahrbahn, ist jedoch zweimal günstiger wie Beton. Die Betonfahrbahndecke besitzt neben dem teuren Preis die doppelte Haltbarkeit im Straßenbau. Neben ihrer Wirtschaftlichkeit besitzt die Asphaltbauweise einen geringeren Aufwand als Betonfahrbahnen. Außerdem kann eine Fahrbahn bei Asphalt nach 24 Stunden freigegeben werden und bei Beton frühestens nach sieben Tagen und vollkommen belastbar ist diese erst ab 28 Tagen. Im Straßenbau werden somit diese Kriterien vorgezogen, um eine Entscheidung über die Fahrbahndecke zu treffen. Je nach Verkehrslage und Straßenordnung wird darüber entschieden, welche dieser Schichten sinngemäß angewendet werden soll.

Für die weitere Studie werden die Betonfahrbahndecken näher in Betracht gezogen und die Simulationen werden ebenfalls mit den Materialeigenschaften von Beton durchgeführt. Denn hier wird bei der Beanspruchungen von einer LKW-Radlast ausgegangen. In diesem Zusammenhang werden die anderen Deckschichten nicht mehr betrachtet.

2.3 Bildung von Einschlüssen

Beim Betonieren der Fahrbahndecken wird diese verdichtet, um eine druckfeste und wasserundurchlässige Betonfahrbahndecke anzurichten. In der Regel besteht das Beton aus Zement, Wasser und weiteren Stoffen, die eine unterschiedliche Festigkeit und Korngröße besitzen. Während diese Stoffe mithilfe eines Mischers verrührt und eingeflossen werden, schließen diese aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Stoffe Luft ein, die Einschlüsse verursachen. Dabei hängt beim Einfüllen des Betons die Fließfähigkeit von ihrer Konsistenz ab, die eine dichtere Lagerung der Bestandteile hervorruft, nachdem sie gerüttelt wird. Die Zähigkeit des Betons verursacht aufgrund des Fließens um Bewehrung und unter Aussparungen, unerwünschte Einschlüsse. Aus diesem Grund ist die Verdichtung bei Betonfahrbahndecken von großer Bedeutung. Hierfür werden für die Betonverdichtung mit einem Rüttler Vibrationen erzeugt, dessen Energie auf den Beton übertragen wird. Die übertragene Energie wird in Schwingung umgesetzt und damit wird die innere Reibung verringert. Das Ziel der Verdichtung in Betonfahrbahndecken ist die Verminderung bzw. Vermeidung der Luftspalte im Beton, indem diese zusammengedrückt werden. Die Folge der Verdichtung sind die ausgelassenen Luftspalte in geringen Mengen, die zu Einschlüssen werden.

Die Verdichtung wird beim Betonieren der Fahrbahndecke besonders bearbeitet, um die enthaltenen Lufteinschlüssen, die bei erhärtetem Beton große Poren bilden und somit eine Verringerung der Festigkeit und der Beständigkeit verursachen, zu vermeiden. Deshalb ist die Verdichtung eine Voraussetzung für das Betonieren. Es dient nicht nur für eine bessere Optik, somit wird die Frostbeständigkeit und Dauerhaftigkeit deutlich erhöht.

3 Problemstellung

3.1 Die Software MSC Marc/Mentat

Die Software MSC Marc/Mentat dient mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) eine Lösung der elastomechanischen Problemen. Die FEM ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Sie wird in verschiedenen Bereichen des Ingenieurwesens angewandt. Ebenso wie die FEM für die Spannungsberechnung bei Festkörpern und Struktursystemen in den Einsatz gebracht werden, kommen sie auch bei der Lösung von Strukturproblemen von Wärmeübertragung- und Feldproblemen sowie Fluidströmungen zum Einsatz. [6]

Die Vorgehensweise für diese Software entspricht der erlernten Theorie. MSC Marc/Mentat ist in drei Felder eingeteilt. Die Abbildung 3.1 verschafft einen Überblick über die Software und die damit eingebundenen Befehle. Während im Grafikfenster das erstellte Modell angezeigt wird, werden auf der linken Seite die Befehle zur Optimierung der Geometrie angezeigt. Das Dialogfeld veranschaulicht die Vorgehensweise der einzelnen Schritte, sowie die Anzeige der Fehlermeldungen. Nach der Berechnungen werden die Resultate im Postprozessor ebenfalls im Grafikfeld angezeigt und die gewünschten Spannungen bzw. Verschiebungen werden mittels der Befehle aufgerufen.

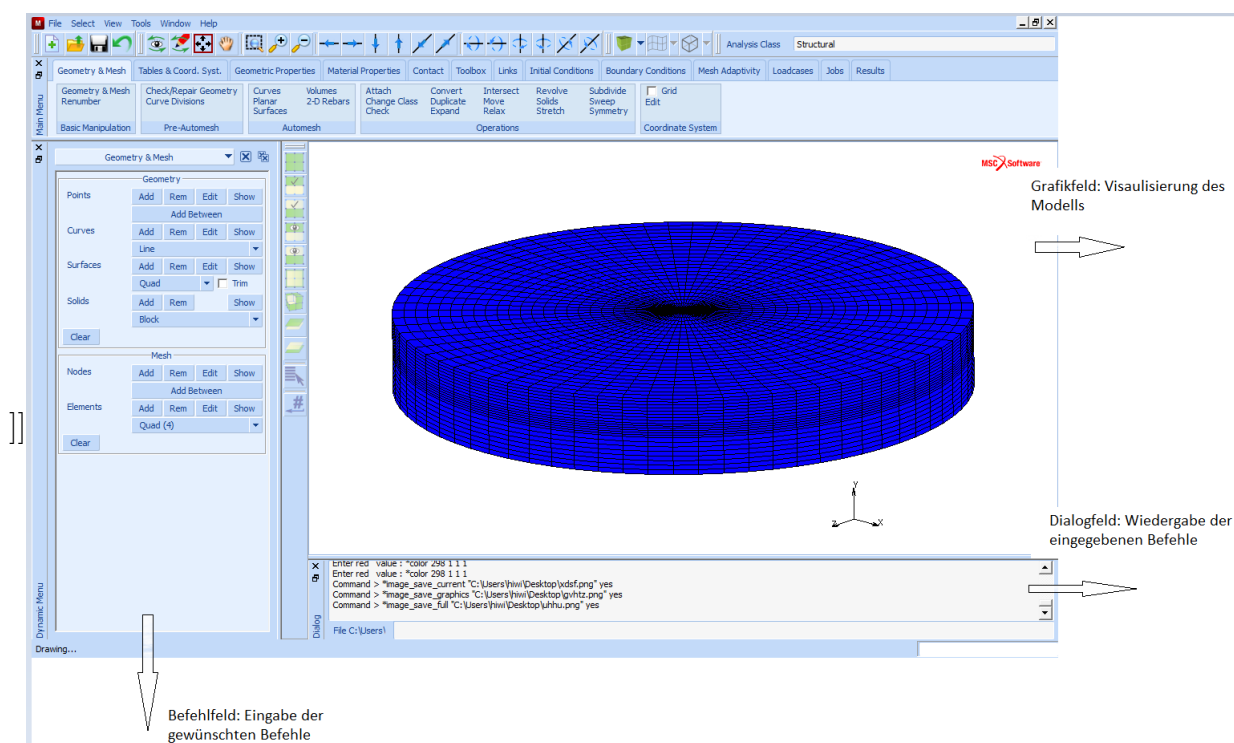


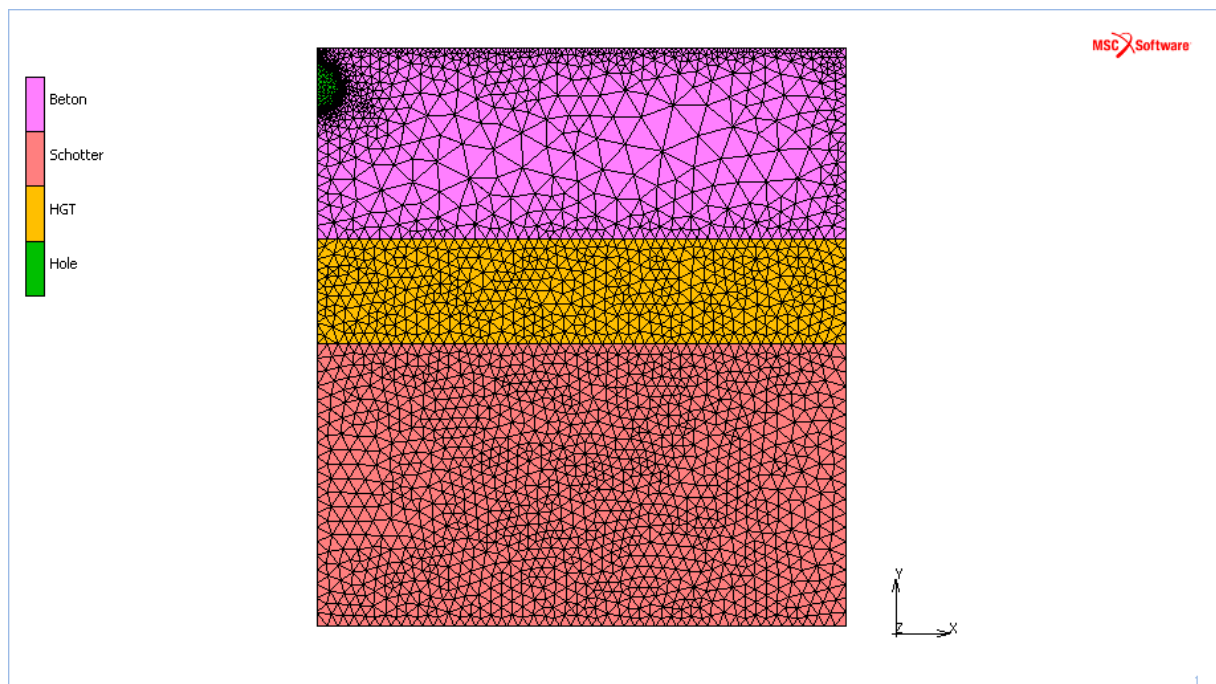
Abbildung 3.1: Überblick der Software MSC Marc/Mentat

3.2 Vernetzung der Geometrie in MSC Mentat

Die zu modellierende Geometrie ist eine Betonfahrbahndecke mit unterschiedlichen Schichten und den lastabhängigen Beanspruchungen. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erläutert, werden Betonfahrbahndecken an Straßen mit hohen Verkehrsbelastungen angewandt. Somit werden die Fahrbahndecken dem Verkehr und den daraus resultierenden Lasten angesetzt. Die einwirkenden Lasten verursachen im Querschnitt überwiegend Biegemomente und Druckspannungen, da sie an der Fahrbahnoberfläche eingreifen. Durch die zunehmende Güterverkehrsleistung ist die Betonfahrbahn nicht nur dem statischen, sondern dynamischen Beanspruchungen und zyklischen Einwirkungen ausgesetzt. Die zyklischen Einwirkungen basieren auf den Wechsel der Be- und Entlastung durch den Verkehr auf der Fahrbahn, die im Laufe von mehreren Millionen Lastwechseln auch innere Gefüge Störungen mit sich bringt. Ebenso können bei den Verdichtungen des Betons LuSTEINSchlüsse entstehen, die die Festigkeit und Beständigkeit des erhärteten Betons herabsetzen. Die vorliegenden Einschlüsse sind in der Parameterstudie von großer Bedeutung, da die Rissgefährdung infolge dieser Einschlüsse untersucht wird.

Die Software MSC Mentat dient zur Simulationen mittels der Finiten-Elemente-Methode (FEM) um eine Analyse über ein vorliegendes Problem durchzuführen. Im ersten Schritt wird mittels der Angabe von Punkten die achsensymmetrische Geometrie erstellt und anschließenden nach gewünschter Netzweite vernetzt. Der Einschluss wird einschließlich ihrer Umgebung feiner vernetzt während der restliche Bereich der Geometrie grober vernetzt wird. Im Grunde hat die Netzweite einen minimalen Einfluss auf die Spannungen. In der Parameterstudie wird der Einfluss der Netzweite ebenfalls näher herangezogen, um

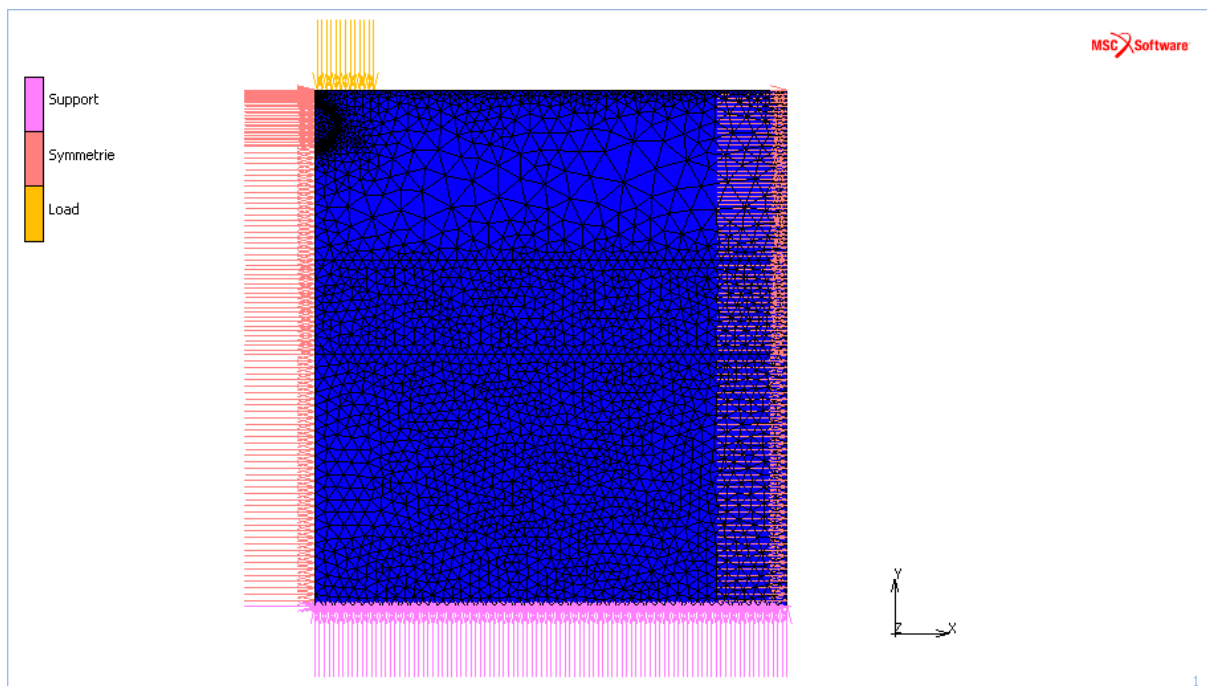
den minimalen Unterschied darzustellen. Nachdem die Vernetzung der Geometrie erfolgt ist, kommen die Eigenschaften und die Materialparameter der einzelnen Schichten ins Spiel. Die Deckschicht wird mit den Elementen separat in eine sogenannte Box eingefügt. Die gleiche Vorgehensweise erfolgt für die hydraulisch gebundene Tragschicht(HGT), dem Schotter und für den Einschluss. Durch die Einteilung der Elemente in diese Gruppen kann man die Materialeigenschaften einfacher angeben. Als nächstes werden die Randbedingungen angegeben, damit die Rechnung erfolgt. Für die Belastung wird die LKW-Radlast in Betracht gezogen und der Geometrie angepasst. Nachdem man die Festlager und Loslager bestimmt und angegeben hat, kann man das achsensymmetrische Problem für die Berechnung beginnen. Für den LKW-Radlast der achsensymmetrischen Geometrie werden mehrere Simulationen durchgeführt. Das Volumen eines kugelförmigen Einschlusses wird ermittelt und dem einer ellipsoid förmigen Volumen gleichgesetzt. Damit bleibt das Volumen unverändert und Vergleiche mithilfe der Ergebnisse gemacht. Hierbei wird in bei dem ellipsoid förmigen Einschluss das Verhältnis der Seiten a und b variiert, um diese Rechnungen durchzuführen. Das Ergebnis, welches der Realität näher liegt, wird für die nächsten Studien angewandt. Für die nächsten Studien werden unterschiedliche Höhenlagen des Einschlusses in Betracht genommen und berechnet. Anschließend wird mit diesem Resultat das 3D-Modell erstellt. Auch an dieser Stelle wird das Ergebnis mit den realitätsnahen Spannungen in Betracht gezogen. Das erstellte 3D-Modell wird nun mit unterschiedlichen Positionen der Belastung simuliert, um Aussagen über die Spannungen im Einschluss zu treffen. Die Rissgefährdung wird nun durch die Position der LKW-Radlast berechnet. In Abbildung 3.2 ist die erste Parameterstudie mit der beschriebenen Vorgehensweise sowohl mit den Materialeigenschaften als auch mit den Randbedingungen abgebildet. Nachdem die Vernetzung der Geometrie sowie die Angabe ihrer Randbedin-



Einteilung der Materialeigenschaften

gungen erfolgt ist, kann man diese mittels des Identitätsbefehls visualisieren und auf ihre Richtigkeit überprüfen. Für jede angegebene Materialeigenschaften wird eine andere Far-

be ausgeblendet, die durch eine Legende verdeutlicht wird. Die identische Darstellung wird für die angegebenen Randbedingungen ebenfalls angewandt.



Darstellung der Randbedingungen

Abbildung 3.2: Grafikfenster von MSC Mentat; Materialeigenschaften; Randbedingungen

4 Parameterstudien

4.1 Einfluss der Geometrie des Einschlusses

Die die Vernetzung der axialsymmetrischen Geometrie in 2D erfolgt wie bereits im oberen Kapitel erwähnt in MSC Mentat. In der unteren Abbildung sind die Höhen und die Geometrie mit einem kugelförmigen Einschluss dargestellt. Die verschiedenen Materialparameter sind separat in der folgenden Tabelle (2.1) aufgelistet. Für die Geometrie sind die jeweiligen Randbedingungen mit dem Finiten Elemente Netz ebenfalls dargestellt. Die Verschiebungsansätze wurden (quadratisch) gewählt und für diesen Fall die Simulationen durchgeführt.

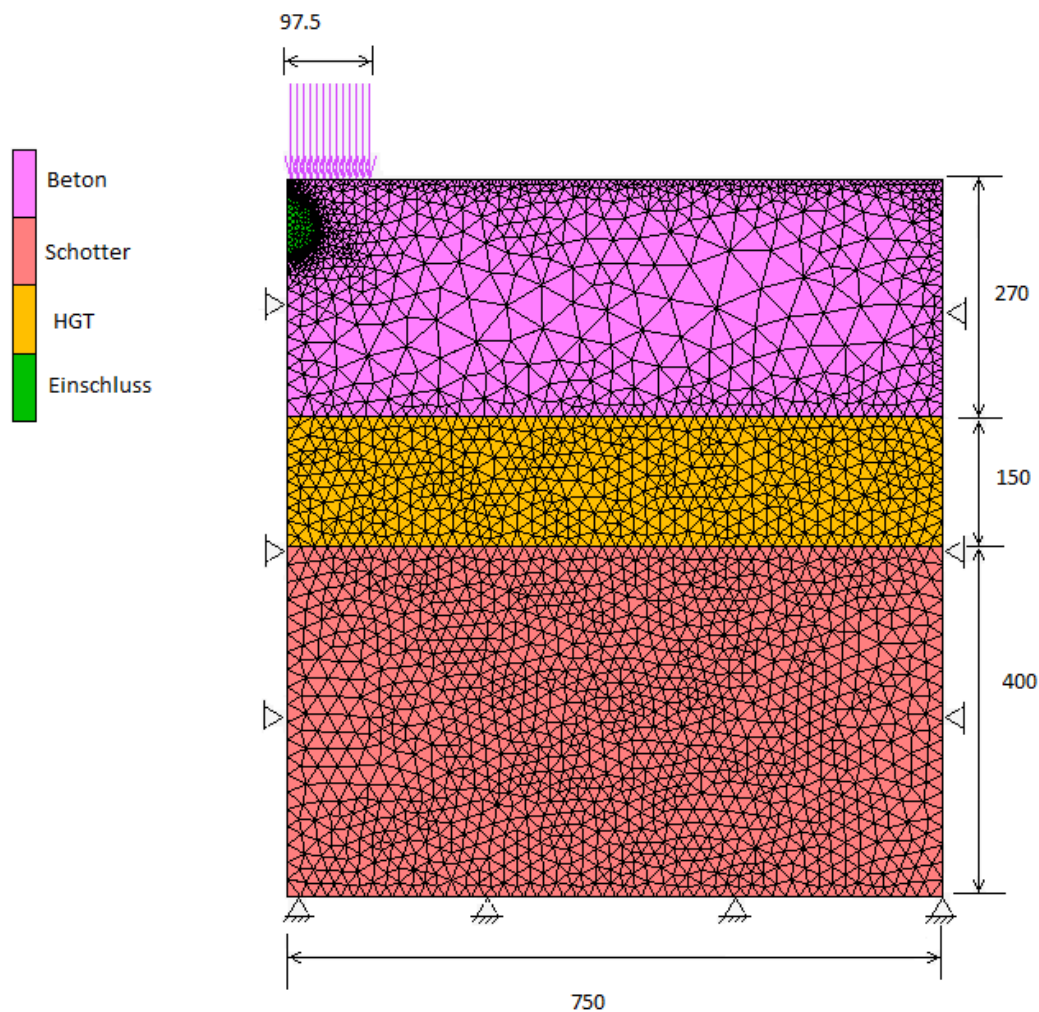


Abbildung 4.1: kugelförmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: Berechnungsausschnitt, Abmessungen und axialsymmetrische FE-Diskretisierung (Maße in [mm])

Die verwendeten Materialparameter für die Fahrbahn sind in der folgenden Tabelle 4.1 aufgelistet.

Schicht	Elastizitätsmodul E_c	Querdehnzahl ν_c	Zugfestigkeit f_{tu}
Beton	$30\,000\text{ N/mm}^2$	0.2	4.0 N/mm^2
HGT	$30\,000\text{ N/mm}^2$	0.2	4.0 N/mm^2
Lehmartige Einschlüsse	3 N/mm^2	-	-
Schottertragschicht	150 N/mm^2	0.35	-

Tabelle 4.1: Materialeigenschaften der einzelnen Schichten

Wie man in Abbildung 4.1 erkennen kann, ist die Geometrie des Einschlusses kugelförmig und hat einen Radius von 35mm in einer Tiefenlage von 20mm unter der Oberfläche. Für die Radlasten wurde eine Gleichlast von 1.925N/mm auf einer Fläche der Länge $97,5\text{mm}$ angenommen. Die angenommene Gleichlast ist einer Radlast eines LKW-Reifens von $57,5\text{kN}$ auf einer Fläche von 30000mm^2 gleichzusetzen. Der Kraftangriffspunkt liegt für diese Studien zunächst über dem Einschluss. Für die erste Parameterstudie sind die Ergebnisse in Abbildung 4.2 illustriert. Hierbei wurde die Geometrie des Einschlusses variiert. Die vorliegenden maximalen Zugspannungen, die in vier Bereiche differenziert sind, werden deutlich. Die Darstellung in den vier Bereichen vereinfacht die Entscheidung über Rissgefährdungen in der Fahrbahn. Im Einschluss werden die Ober- und Unterseite in die Bereiche A und B geteilt. Die Oberfläche der Fahrbahn wird in Bereich D und der Materialwechsel zwischen der Schottertragschicht und dem HGT wird in Bereich C eingeteilt.

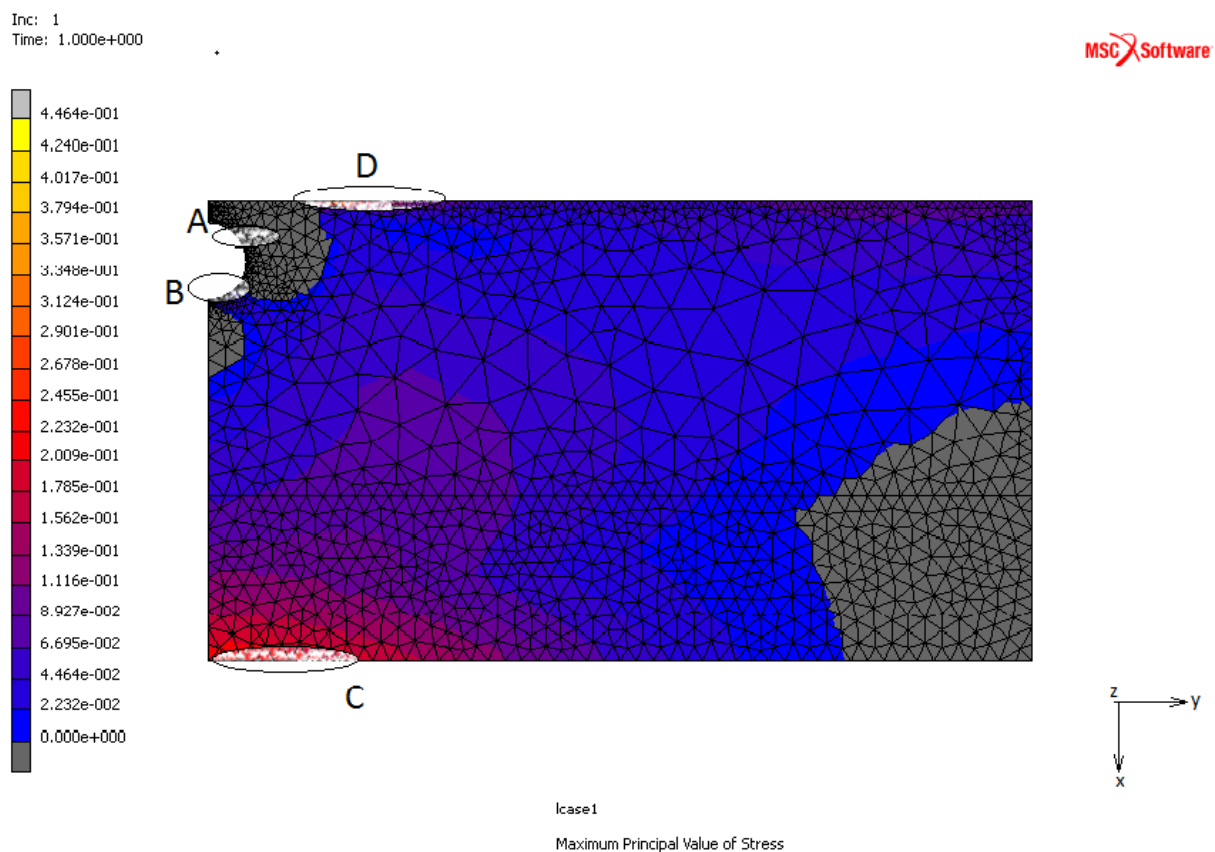
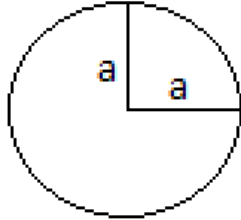
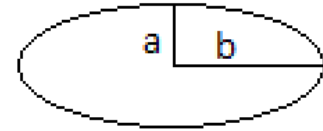


Abbildung 4.2: kugelförmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 20\text{mm}$

Nun wurden mehrere Simulationen durchgeführt, um ein praxisnahes Ergebnis zu ermitteln. Bevor die Simulationen mit dem unterschiedlichen Längenverhältnis von a und b durchgeführt werden, wurde eine kurze Rechnung dafür eingeleitet. Für den kugelförmigen Einschluss wurde das Volumen anhand der Formel $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ bestimmt. Für das Volumen des ellipsoid förmigen Einschlusses gilt: $V = \frac{4}{3}\pi a^2 b$



Kugel



Ellipsoid

Durch Gleichsetzen der beiden Gleichungen für das Volumen folgt $r^3 = a^2 b$. Der Radius $r = 35\text{mm}$ wird von der ersten Studie übernommen, während a und b mit dem gewählten Verhältnis $\frac{a}{b} = x$ ermittelt werden. Somit wurden sechs Studien mit unterschiedlichen Geometrien des Einschlusses, die Mithilfe der Gleichungen ermittelt wurden, durchgeführt.

Die folgende Tabelle verschafft einen Überblick über die Studien

Studien	a/b	a [mm]	b [mm]
1	1	35	35
2	0.5	27.78	55.56
3	0.2	20.47	102.34
4	0.1	16.25	162.5
5	0.02	9.5	475
6	0.05	12.89	257.88

Tabelle 4.2: Längen der Radien der Einschlüsse

Im Anschluss der Simulationen wurden die maximalen Zugspannungen in den vier Bereichen aufgenommen und in der folgenden Abbildung 4.3 dargestellt. In der Abbildung wird die maximale Zugspannungen σ jeweils für die vier Bereiche A, B, C und D als Funktion des Verhältnisses a/b illustriert. Es wird deutlich, dass in den fünf Studien die Zugfestigkeit von $4N/mm^2$ ab dem Verhältnis $a/b = 1/5$ in Bereich A und D überschritten wird.

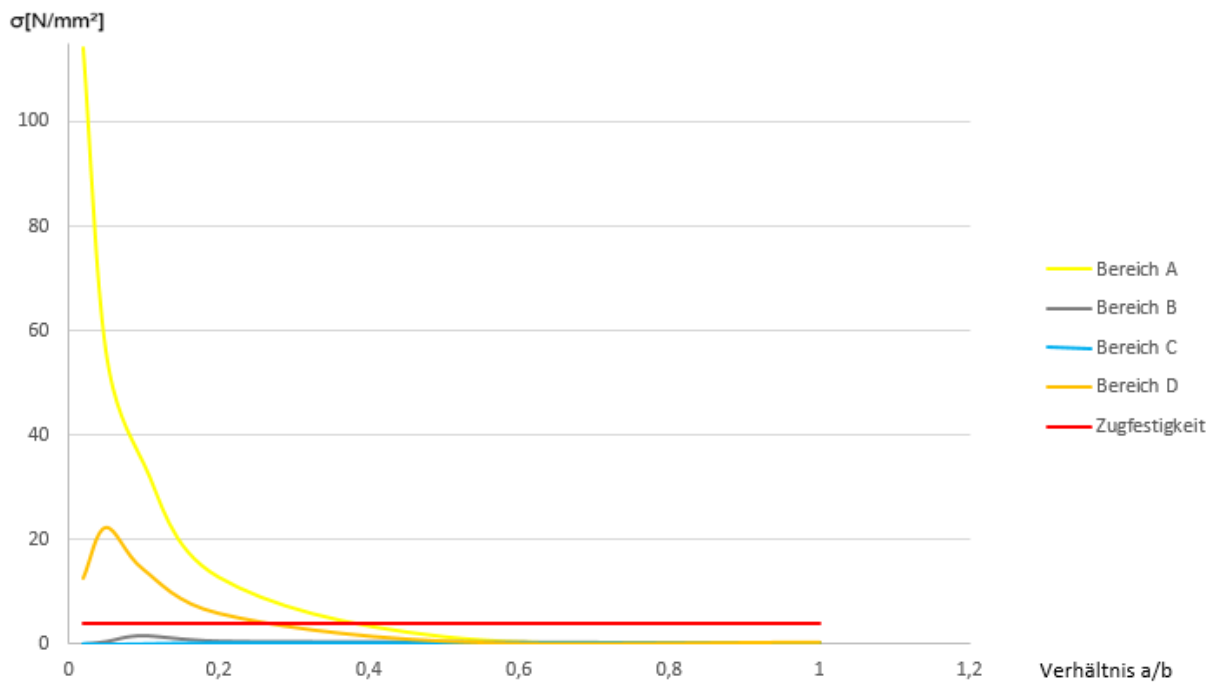


Abbildung 4.3: variierte Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast: Maximale Hauptzugspannungen in den vier Bereichen A, B, C und D als Funktion des Verhältnisses a/b

In der ersten und zweiten Studie (Verhältnis $a/b=1$ und $a/b=1/2$) treten geringe Zugbeanspruchungen in der Betonfahrbahn auf, die auf die Größe der Belastungsfläche zurückzuführen ist. Die Belastungsfläche von $97,5\text{mm}$ ist viel größer als der Durchmesser des Einschlusses mit 70mm . Die vertikal wirkende Lasten werden in diesem Zusammenhang seitlich abgetragen und somit werden die horizontale Zugspannungen über dem Einschluss überdruckt. Somit ist für diese Studien eine Rissbildung an der Oberfläche (Bereich D) nicht vorzusehen. Im Gegensatz dazu findet in den vier weiteren Studien eine Erhöhung der Zugbeanspruchung in den Bereichen A und D statt. Die größeren Zugbeanspruchungen sind ebenfalls auf die Geometrie des Einschlusses zurückzusetzen. Durch den ellipsoid förmigen Einschluss wird der Einschluss deutlich schmaler. Aus diesem Grund werden die Vertikallasten über dem Einschluss aufgenommen und bewirken somit höhere Zugspannungen. Je schmaler der ellipsoid förmige Einschluss wird, desto höher sind auch die Zugspannungen an der Oberfläche (Bereich D). Doch durch die letzte Studie (Verhältnis $a/b = 1/50$) wird diese These widerlegt. Denn hier treten im Vergleich zu den drei anderen Studien nun geringere Zugspannungen in den Bereichen B, C und D auf. Die Geometrie nimmt die Vertikallasten an der vorderen Seite des Einschlusses auf. Im weiteren Verlauf des Einschlusses sind keine größeren Zugspannungen erkennbar. Die Vertikallasten werden in dem Bereich nicht mehr aufgenommen und somit kommt es nicht zu weiteren Zugspannungen im Einschluss. Besonders in den Bereichen B und C wird der Unterschied deutlich. Die Bereiche A und D weisen weiterhin größere Zugspannungen, die jedoch im Bereich A auf die Belastung und im Bereich D auf den direkten Kontakt der Belastung zurückzuführen ist. Im Anschluss wurde die maximale Verschiebung als Funktion des Verhältnisses ebenfalls in der Abbildung 2.5 dargestellt. Die maximale Verschiebung wird mit verringertem Verhältnis größer. Der Grund für die steigende maximale Verschiebung bei verringertem Verhältnis ist der schmaler werdende Radius a . Je kleiner der Radius a wird, desto kleiner

wird der Spalt und desto größer werden die maximalen Verschiebungen. Die Belastung greift auf einen kleineren und somit instabile Fläche(Spalt).

Für die dargestellten Kurven in der Abbildung 4.3, kann man für die jeweiligen Bereiche eine approximierte Gleichung angeben. Die Programmierung der Gleichung erfolgt in Mathematica. Hierbei wird zunächst diskutiert für welche Bereiche eine Gleichung erstellt wird. Da in den Bereichen B und C geringe Spannungen auftreten, sind diese nicht von großer Bedeutung. Aus diesem Grund zieht man die Spannungswerte in den Bereichen A und D näher in Betracht. Als Ergebnis für diese Bereiche hat man die Gleichung einer Hyperbel angenähert. Daraus folgt

- für Bereich A $\sigma(x) = \frac{1}{(a_0+a_1x)^2}$ mit $a_0 = -0,0716575$ und $a_1 = -1,12398$
- für Bereich D $\sigma(x) = \frac{1}{(a_0+a_1x^2)}$ mit $a_0 = 0,0554042$ und $a_1 = 1,91948$

Die Vorgehensweise wird für die weiteren Studien fortgeführt. Mittels dieser Methode müssen für diese Studien keine weiteren Simulationen durchgeführt werden. Mithilfe der Gleichungen hat man einerseits nicht genaue Ergebnisse, andererseits eine ersparte Arbeit mit approximierten Werten für weitere Studien.

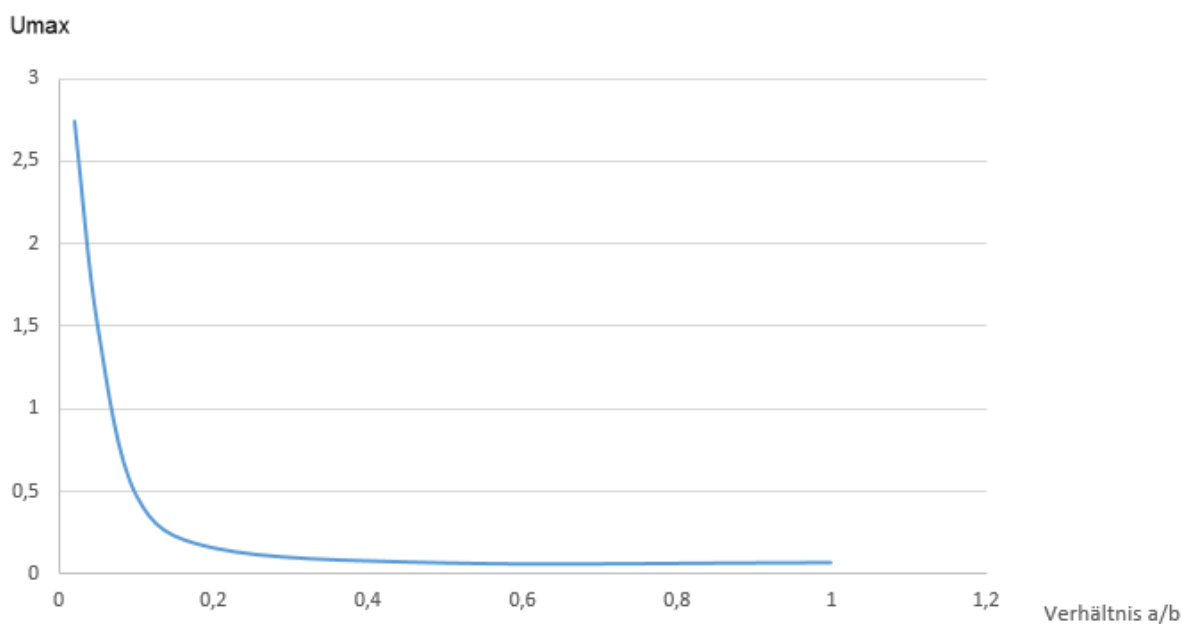


Abbildung 4.4: variierte Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast: Maximale Verschiebung in Lastrichtung (x) als Funktion des Verhältnisses a/b

Die Verschiebungen begeben sich auf ein realitätsnahes Ergebnis und deuten auf sinnvolle Simulationen. Für die Kurve der Verschiebung in Abbildung 4.4 wird ebenfalls eine Gleichung ermittelt, die eine Approximation der Kurve angibt. Die Gleichung ist ebenfalls eine Funktion, die eine Hyperbel beschreibt:

- $U_{max}(x) = \frac{1}{(a_0+a_1x)^2}$ mit $a_0 = 0,302538$ und $a_1 = 153,476$

Je geringer das Verhältnis zwischen a und b desto größer ist die maximale Verschiebung, weil der Radius a kleiner wird und somit die Belastung auf einen geringeren Spalt aufgetragen wird.

Für die nächsten Studien wird die Geometrie des Einschlusses aus der bereits vorliegenden Parameterstudie entnommen, die das nächst realistische Ergebnis aufweist. Die Wahl trifft auf den ellipsoid-förmigen Einschluss mit $a/b = 1/5$ und durch Variieren der Tiefenlage dieser Geometrie werden weitere Simulationen durchgeführt.

4.2 Einfluss der Überlagerungshöhe

Im Anschluss der Wahl einer geeigneten Geometrie aus der vorherigen Studie, wird nun die Rissbildung in Bezug der Tiefenlage des Einschlusses überprüft. Für diese Simulationen wurde der ellipsoid-förmige Einschluss mit den Radien $a = 20,47$ und $b = 102,314$ mit einem Verhältnis von $a/b = 1/5$. Die vorherigen Studien zeigten sowohl zu geringe als auch zu hohe Spannungswerte in den jeweiligen Bereiche. Aus diesem Grund wurde diese Geometrie gewählt, da in der Praxis die Spannungswerte für diese Geometrie wahrscheinlicher auftreten. An dieser Stelle werden die Materialeigenschaften sowie die Randbedingungen für die Fahrbahn wie zuvor angenommen. Mit weiteren Studien soll nun festgestellt werden, in welcher Tiefenlage diese Einschlüsse eine Rissgefährdung für die Fahrbahn bilden. Die Abbildung 4.5 stellt die Geometrie mit dem gewählten Einschluss für die nächsten Studien durch Angabe ihrer Materialeigenschaften dar.

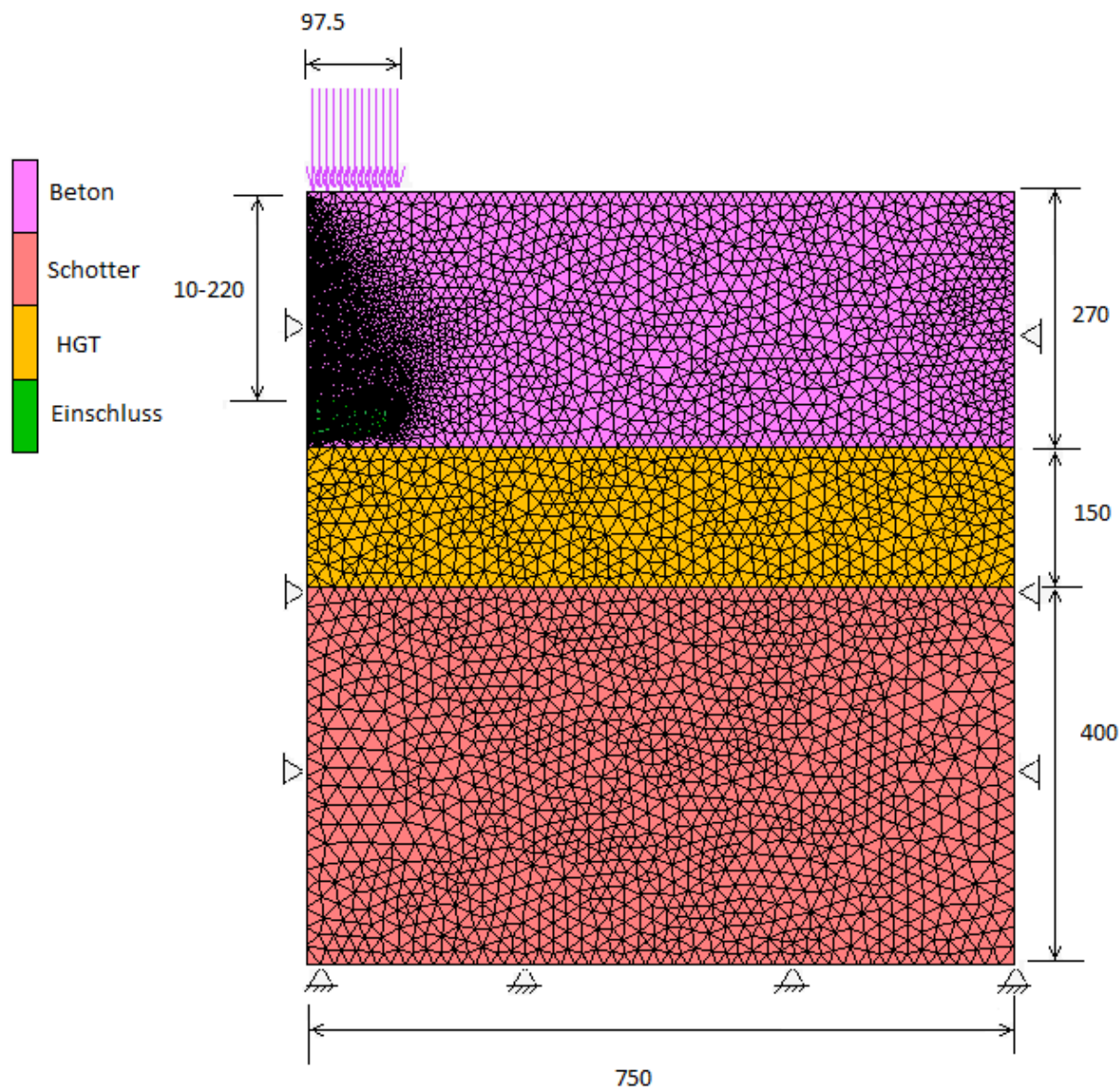


Abbildung 4.5: ellipsoid-förmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: Berechnungsausschnitt, axialsymmetrische FE-Diskretisierung für unterschiedliche Tiefenlagen (alle Maße in [mm])

Hierfür wurden die Überlagerungshöhen zunächst beliebig gewählt, die keine weiteren mathematischen Hintergründe hat. Die Abbildung 4.6 weist auf den Einschluss mit der tiefsten Höhe, bei dem die letzte Simulation durchgeführt wurde. Die Einteilung der Bereiche an denen die maximale Hauptzugspannung gemessen wurde, ist wie abgebildet identisch anzunehmen wie in der vorherigen Studie.

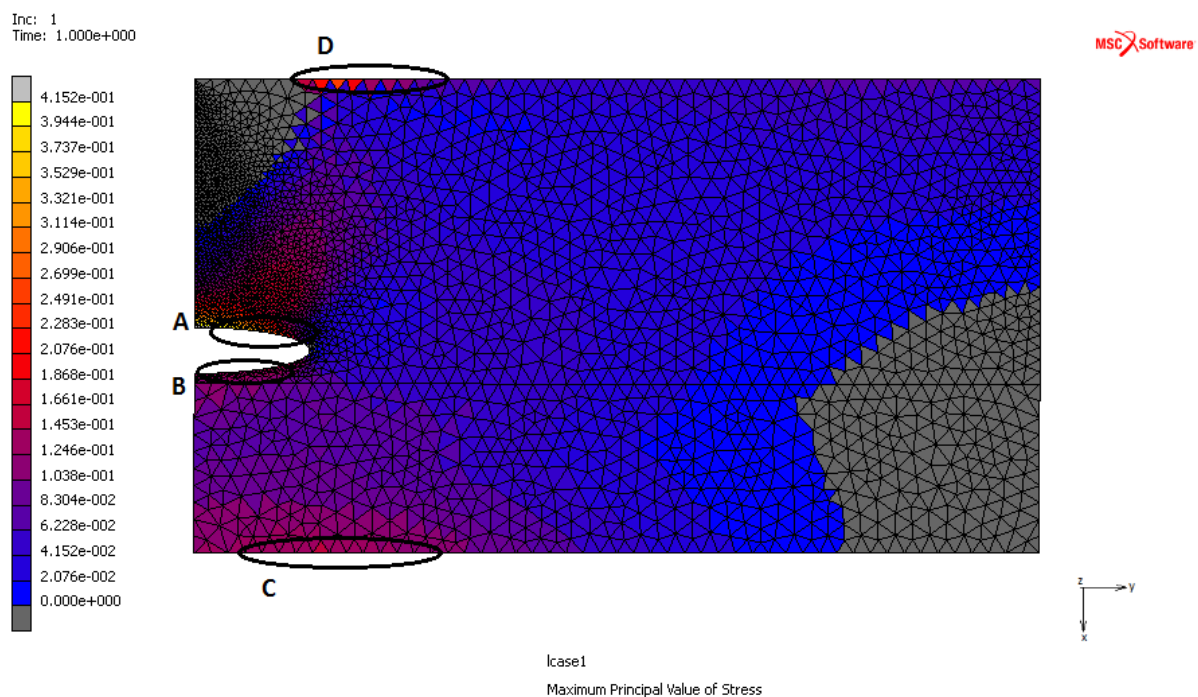


Abbildung 4.6: ellipsoid-förmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 220\text{mm}$

Wie bereits zu erwarten, sinken die hohen Zugbeanspruchungen in den jeweiligen Bereichen A, B, C und D mit zunehmender Höhe. Je tiefer der Einschluss liegt desto geringer die Zugspannungen, da die Belastung auf eine dickere Fläche ohne Zwischenräume (Riss) übertragen wird. Eine Rissgefährdung in der Fahrbahn besteht für Einschlüsse, die sich unmittelbar in 10 bis 20mm unter der Betonfahrbahndecke befinden. Aus den Berechnungen folgt, dass für Einschlüsse ab einer Überlagerungshöhe von 60mm unter der Belastung keine Rissgefährdungen für die Oberfläche der Betonfahrbahndecke vorliegen. Nach dieser Schlussfolgerung kann man die Rissbildung der Einschlüsse in allen Höhen zwischen den Werten 20 bis 60mm überprüfen.

Die Verläufe und Spannungsunterschiede werden durch die Abbildung 4.7 verdeutlicht. Die maximale Zugspannung in den jeweiligen Bereichen wird als Funktion der Überlagerungshöhe h dargestellt. Eine Rissgefährdung für die Betonfahrbahndecken ist für die

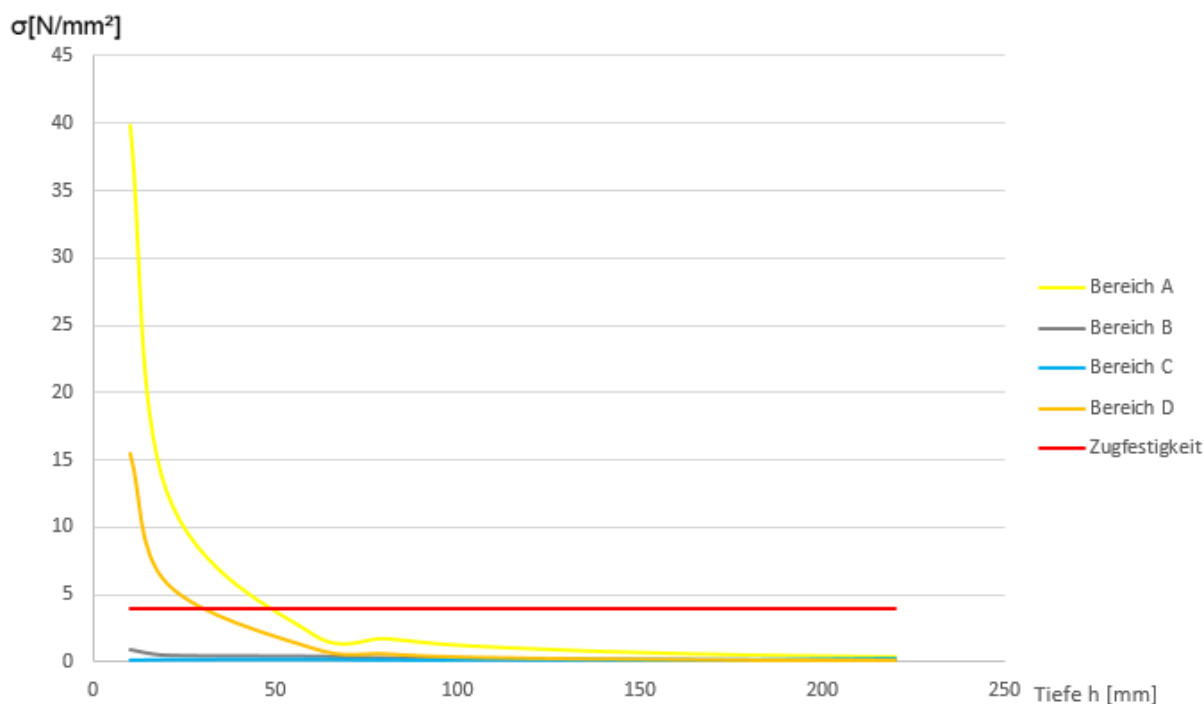


Abbildung 4.7: ellipsoid-förmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: Maximale Hauptzugspannungen in den vier Bereichen A, B, C und D als Funktion der Überlagerungshöhe h

Eine approximierende Gleichung zur Beschreibung der Hauptzugspannungen in den Bereichen A und B wird programmiert. Die zugehörige Gleichung entspricht einer Hyperbel mit unterschiedlichen Koeffizienten. Die Gleichung lautet:

- für Bereich A $\sigma(x) = \frac{1}{(a_0 + a_1 x)^2}$ mit $a_0 = 0,161829$ und $a_1 = 0,0131185$
- für Bereich B $\sigma(x) = \frac{1}{(a_0 + a_1 x)^2}$ mit $a_0 = 0,0995943$ und $a_1 = 0,0154229$

Die maximale Verschiebung wird ebenfalls gemessen und als Funktion der Tiefenlage h definiert. Die Verschiebung entspricht der Erwartung und nimmt mit zunehmender Tiefenlage ab. Indem die Tiefenlage des Einschlusses zunimmt, wird die Belastung auf eine dickere Fläche übertragen. Da die Belastung von der Fläche aufgenommen wird, besteht keine Möglichkeit für größere Verschiebungen. Die Funktion für die maximale Verschiebung zur Tiefenlage h ist in der folgenden Abbildung 4.8 visualisiert.

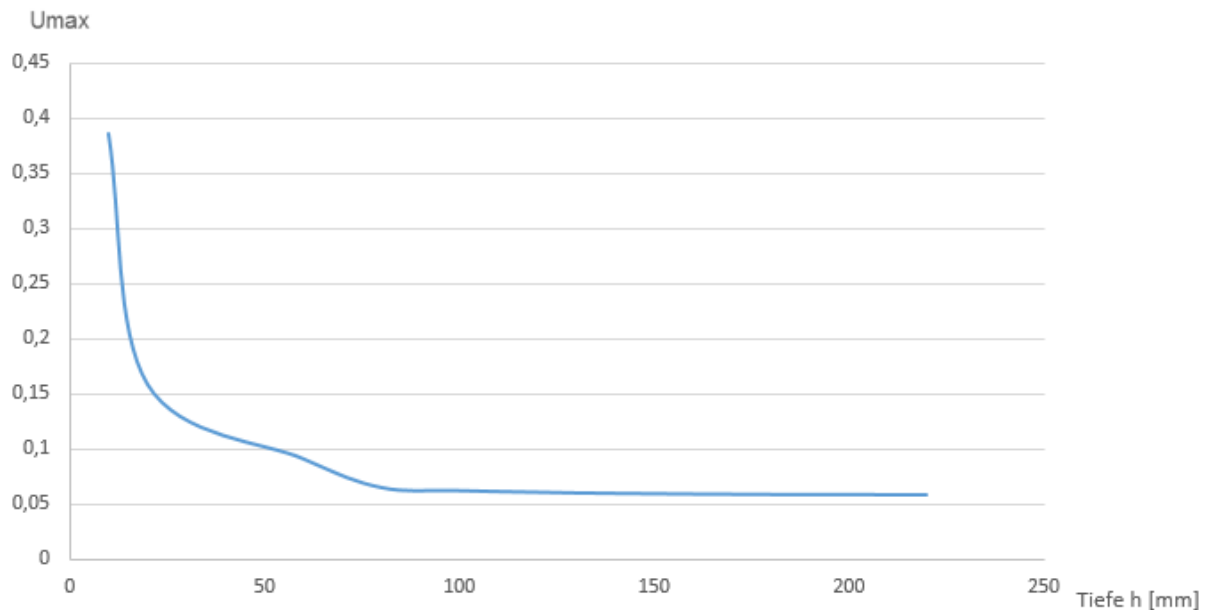


Abbildung 4.8: ellipsoid-förmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: Maximale Verschiebung in Längsrichtung (x) in Abhängigkeit der Tiefenlage h

Anschließend wird für die Verschiebung mittels der vorhandenen Werte ebenso eine Gleichung approximiert, um die Verschiebung in weiteren Tiefenlagen in der Form ohne weitere Simulationen zu ermitteln. Die approximierte Gleichung für die maximale Verschiebung lautet:

- $U_{max}(x) = \frac{1}{(a_0 + a_1 x)^2}$ mit $a_0 = 1,87445$ und $a_1 = 0,00786107$

4.3 Aussermittige Radlast

Zum Abschluss der achsensymmetrischen Lastfällen sind für die Untersuchungen der Aufstellung der Radlast 3D Analysen von Bedeutung. Die Berechnungen beruhen in diesem Fall auf einer Überlagerung der Aussermittigen Radlast des LKW auf der Oberfläche in Abständen von $0 - 1500\text{mm}$, $500 - 200\text{mm}$, $750 - 2250\text{mm}$, $1000 - 2500\text{mm}$ und $1500 - 3000\text{mm}$. Die Abstände beziehen sich auf beide Reifen des LKWs. Der Abstand der Reifen beträgt 1500 . Die Abbildung 4.8 stellt das Berechnungsmodell dar, das zur Vereinfachung den Ausschnitt-plan abbildet. Die Materialeigenschaften und dessen Belastung wurde gemäß der vorherigen Parameterstudien angenommen. Die Fahrbahn wird bei den 3D Analysen auf eine Länge von 6000mm erweitert.

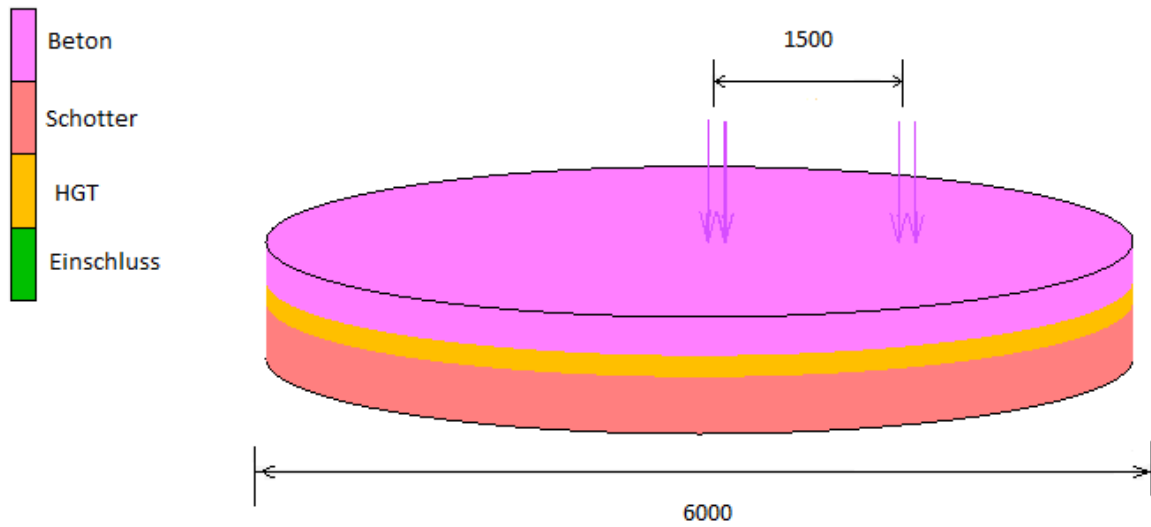


Abbildung 4.9: Geometrie der 3D Analysen

Sowohl die Geometrie als auch die Position des Einschlusses bleibt in dieser Studie unverändert, während die Radlast in fünf unterschiedlichen Positionen umgestellt wird. In der Abbildung 4.10 sind die maximalen Hauptzugspannungen in der Betonfahrbahn und in einem Querschnitt durch den ellipsoid-förmigen Einschluss der Tiefenlage $h = 20mm$ dargestellt. Durch die Abbildung wird deutlich, dass die Zugspannungen an der Oberfläche der Fahrbahnplatte stärker auftreten als in den übrigen Bereichen.

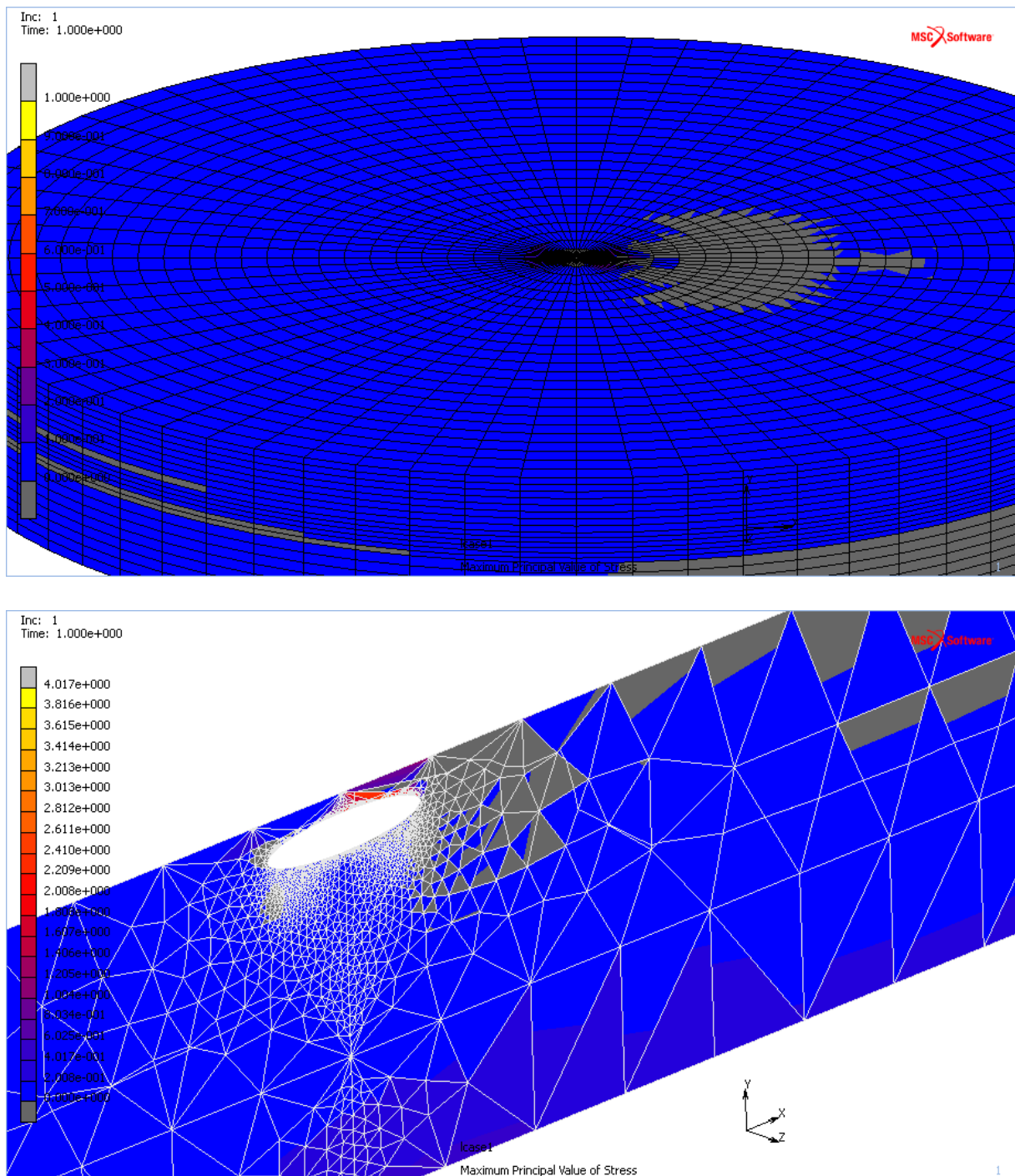


Abbildung 4.10: ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW -Radlast: Darstellung der Zugspannungen in der Betonfahrbahn und im einen Querschnitt

Die jeweiligen Bereiche wurden hier in drei Bereiche unterteilt, da die Zugbeanspruchungen teilweise nicht dem achsensymmetrischen Berechnungsmodell entspricht. Für das 3D Berechnungsmodell sind die drei Bereiche folgendermaßen aufgespalten. In diesem Fall treten an den Rändern des Einschlusses keine hohen Spannungen auf, deshalb wird hier nur die obere Seite (Bereich A) des Einschlusses in Betracht gezogen. Die Oberfläche der Fahrbahndecke wird in Bereich B und der Übergang vom HGT zum Schottertragschicht in Bereich C eingeteilt.

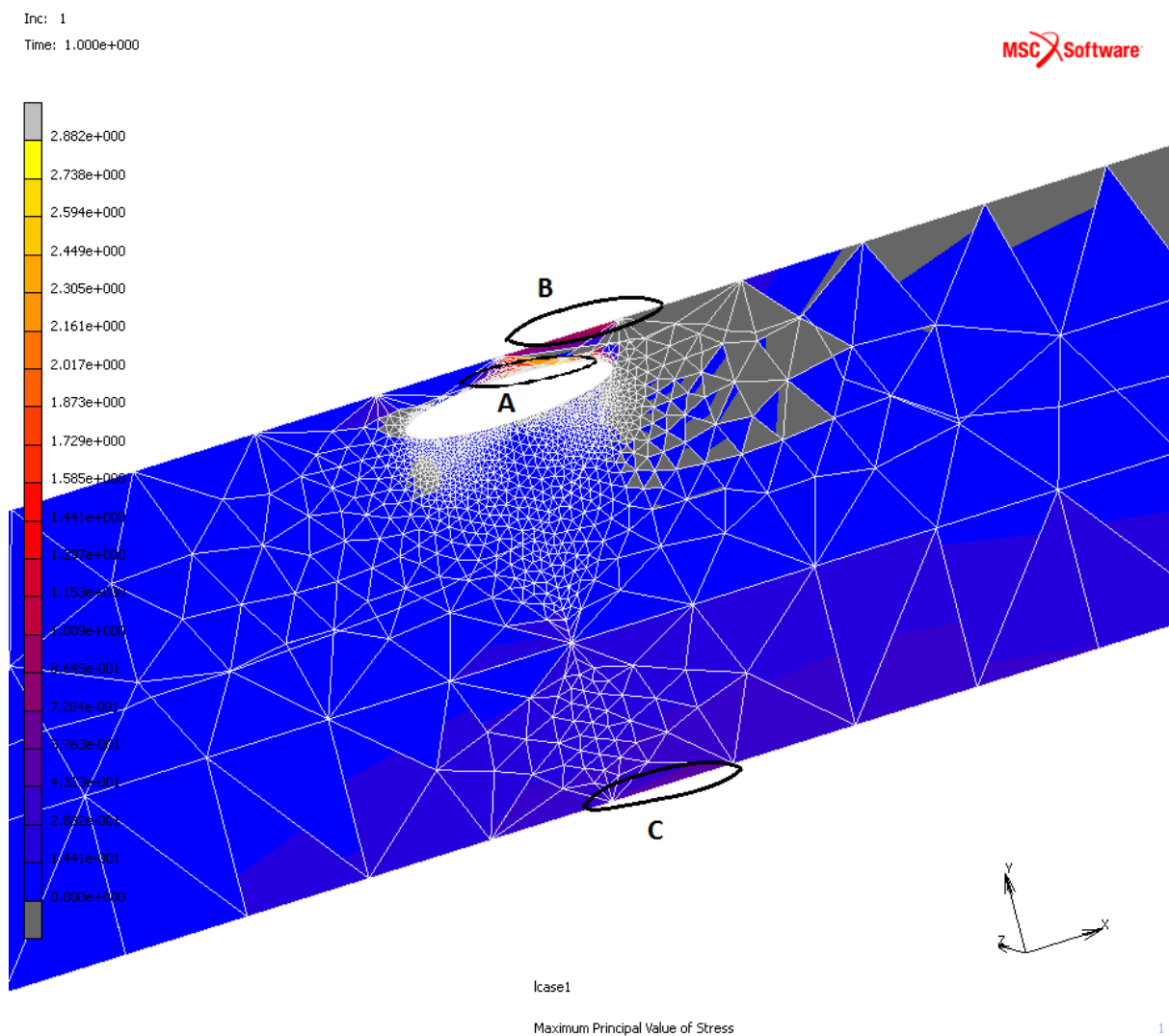


Abbildung 4.11: Einteilung der Geometrie in den Bereichen A, B und C

Die Belastung ist für diese Studien als doppeltes Maß anzunehmen, da auf beiden Seiten von zwei Radlasten ausgegangen wird. Im Allgemeinen treten hier keinen hohen Spannungen auf, die auf eine Rissgefährdung schließen. Ausschließlich der ersten Studie, die einer Entfernung 0 – 1500mm der Fahrbahnmitte liegt, kann eine Rissgefährdung der Oberfläche der Betonfahrbahndecke ausgeschlossen werden.

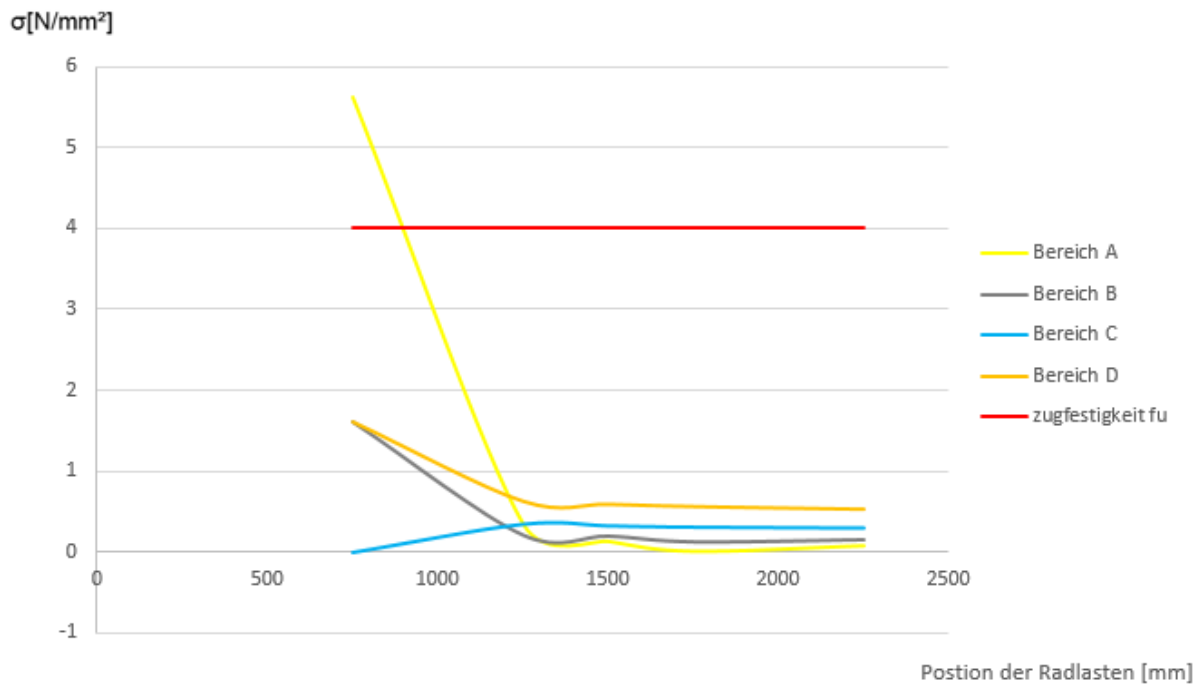


Abbildung 4.12: ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast, 3D Analysen: Maximale Hauptzugspannungen in den den Bereichen A, B und C als Funktion der Lastposition

Für die Fahrbahn ist die Verschiebung im Zentrum zu messen, um über den Einfluss der Lastposition auf die Verschiebung über dem Einschluss zu diskutieren. Für die Fahrbahn ist die Verschiebung im Zentrum von großer Bedeutung, um den Einfluss der Lastposition auf die Verschiebung über dem Einschluss zu diskutieren.

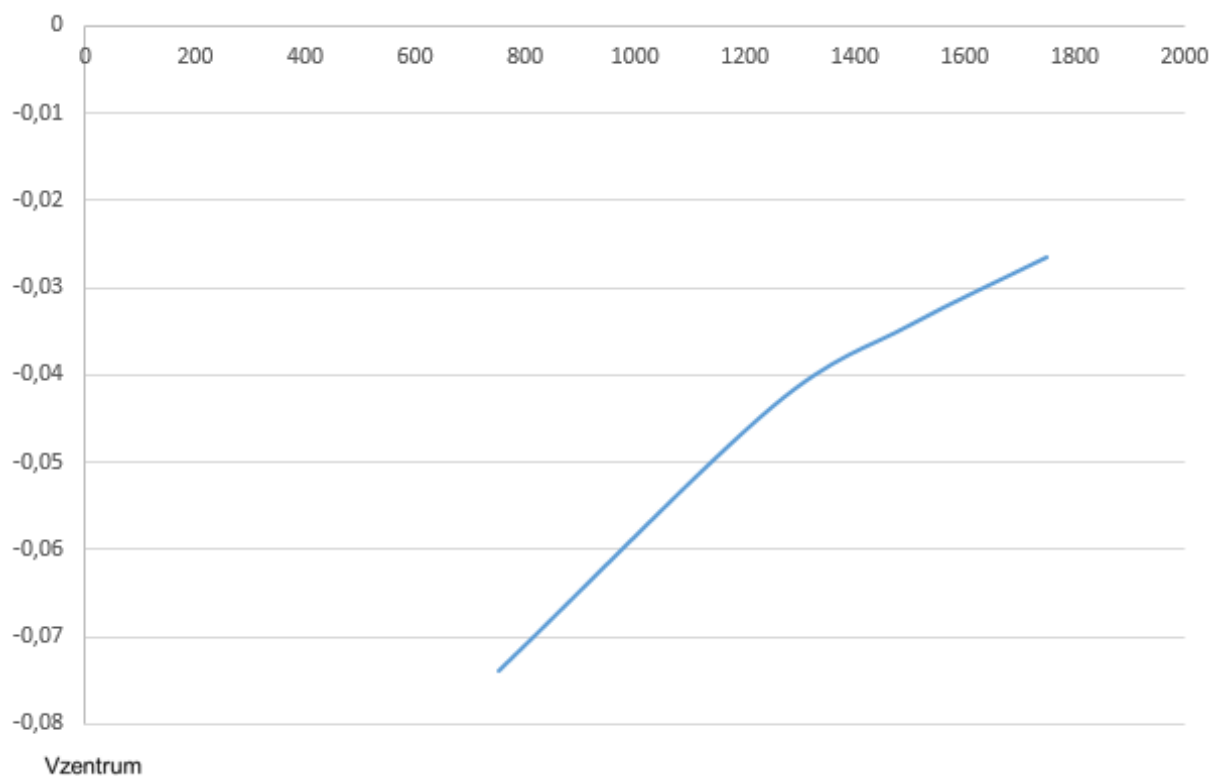


Abbildung 4.13: Verschiebung im Mittelpunkt der Fahrbahn in Lastrichtung (y) für die Lastposition

Aufgrund der geringen Spannungen wird bei dieser Parameterstudie nur eine Gleichung für die Verschiebung im Zentrum der Fahrbahn aufgestellt. Die ermittelte Gleichung für die Verschiebung im Bezug auf die Änderung der Lastposition lautet:

- $V_{zentrum}(x) = -\frac{1}{(a_0 + a_1 x)^2}$ mit $a_0 = -1,84632$ und $a_1 = -0,00242197$

4.4 Einfluss des Netzweite

Die letzte Studie befasst sich mit dem Einflusses der Netzweite auf die Resultate. Für diese Studie wird eine Geometrie aus den vorherigen Studien entnommen und jeweils mit einem groben Netz und einem feinen Netz mit ca. 10-fach mehr Elementen bzw. - 10-fach wenigen Elementen gerechnet. Die vorherige Geometrie ist aus dem achsensymmetrischen Modell der Fahrbahn für ein Einschluss mit den Radien $a = 20,47mm$ und $b = 102,34mm$ mit einem Verhältnis von $a/b = 1/5$. Ziel dieser Studie ist zu überprüfen, ob und inwiefern die Verfeinerung des Netzes im Allgemeinen einen Einfluss auf die Ergebnisse einer Simulation hat.

Zum besseren Vergleich sind die jeweiligen Netze in der Abbildung 4.12 - 4.14 dargestellt. Die Vergleichsgeometrie enthält 7530 Elemente während die grobe Netzweite 753 und die feine Netzweite 65320 Elemente besitzt.

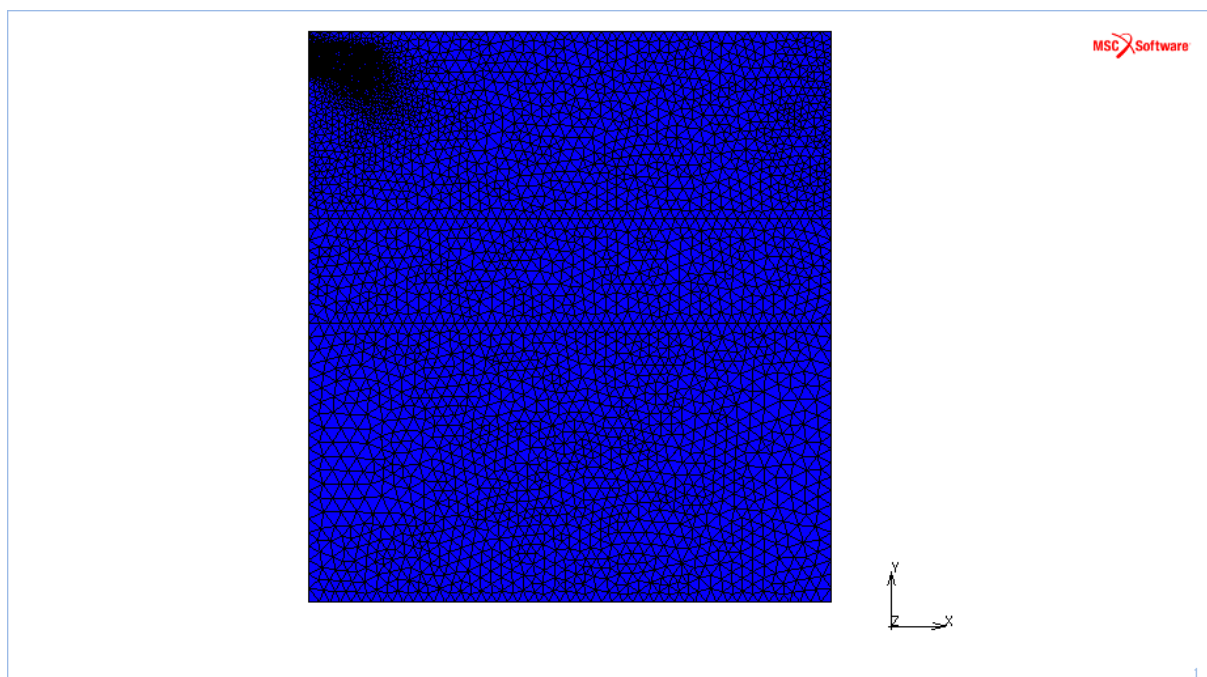


Abbildung 4.14: ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast :Vergleichsgeometrie in einer Tiefenlage $h = 20mm$ mit 7530 Elementen

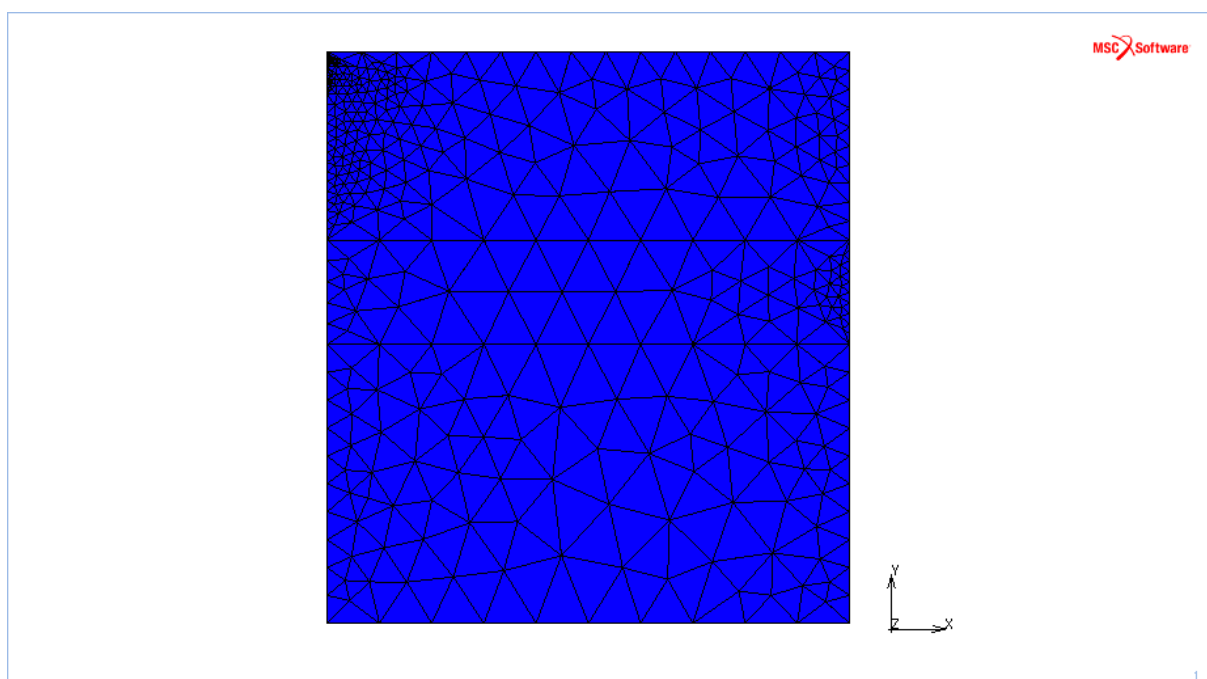


Abbildung 4.15: ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast :grobe Vernetzung in einer Tiefenlage $h = 20mm$ mit 753 Elementen

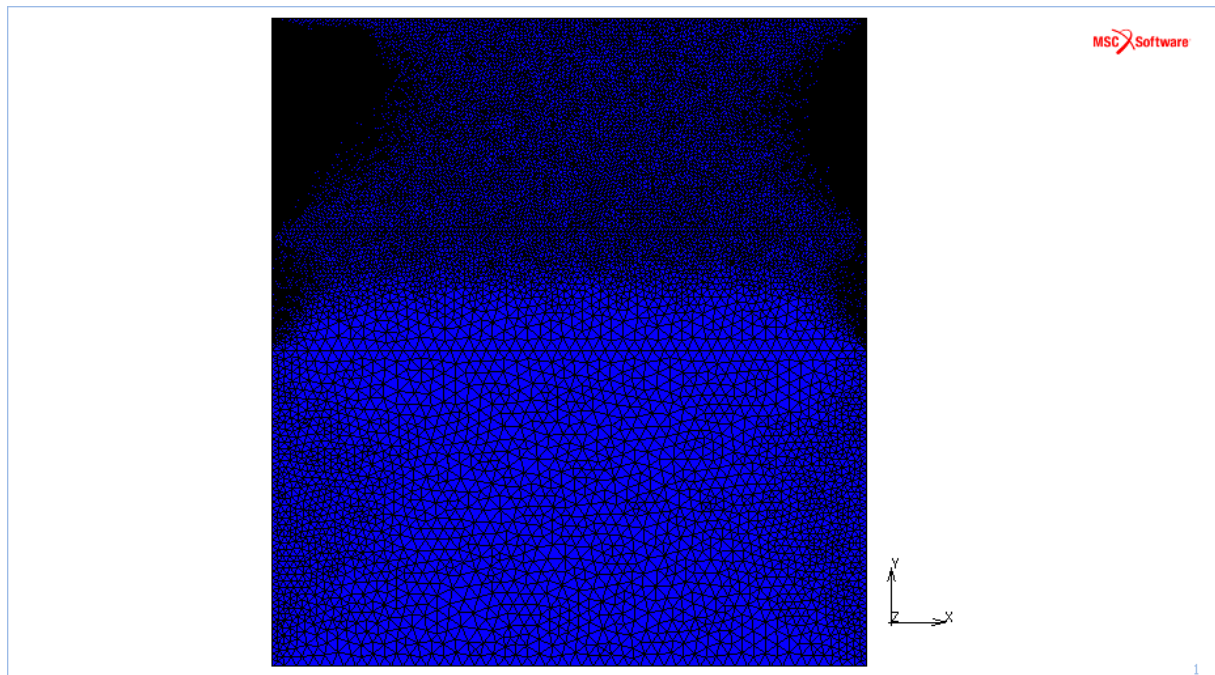


Abbildung 4.16: ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast :feine Vernetzung in einer Tiefenlage $h = 20mm$ mit 65320 Elementen

Die Ergebnisse weichen nicht stark voneinander ab. Die Bereiche der Hauptzugspannungen weisen sowohl im feinen als auch im groben Netz eine gleichwertige Spannungsverteilung mit abweichenden Werten auf, während die Verschiebung eine Abweichung von ca. $\pm 0,02$ anzeigt. Zum besseren Vergleich sind die Hauptzugspannungen der drei Netzweiten in Abbildungen 4.17 - 4.19 dargestellt.

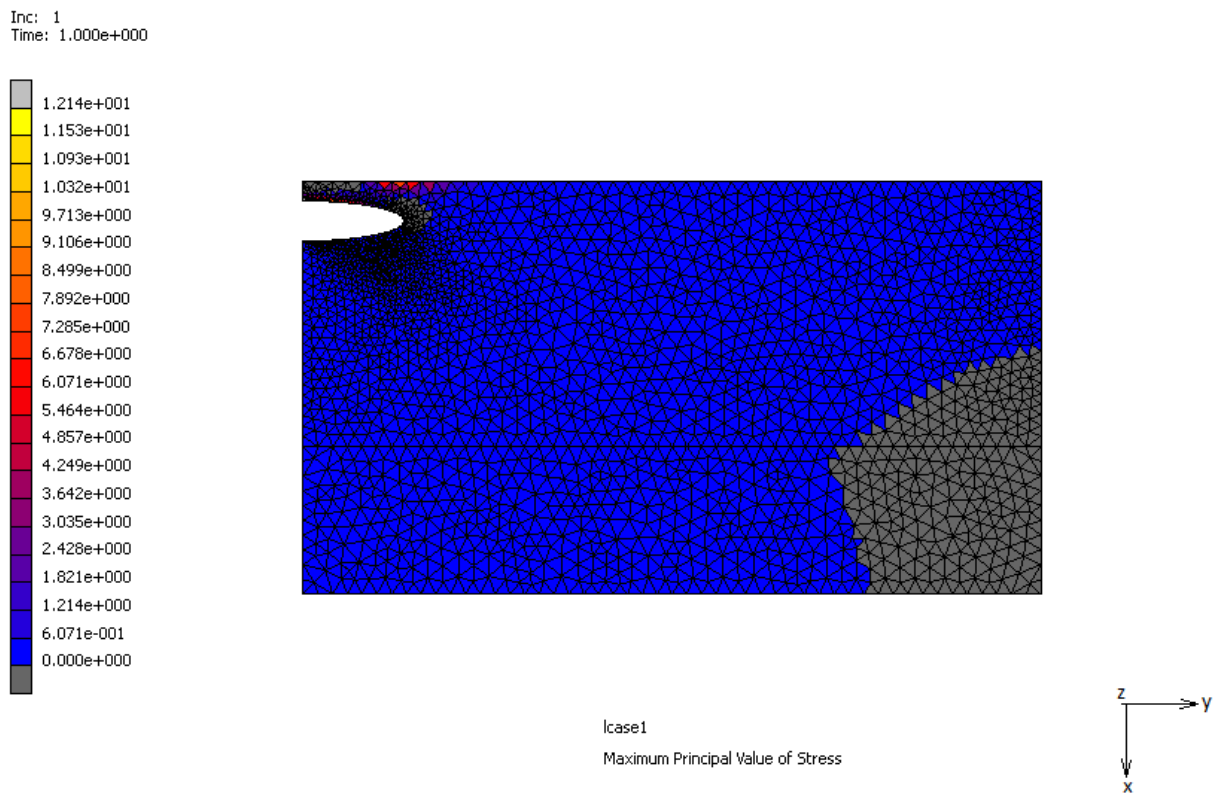


Abbildung 4.17: ellipsoidförmiger Einschluss mit LKW-Radlast auf der Betonfahrbahn: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 20\text{mm}$, Vergleichsgeometrie

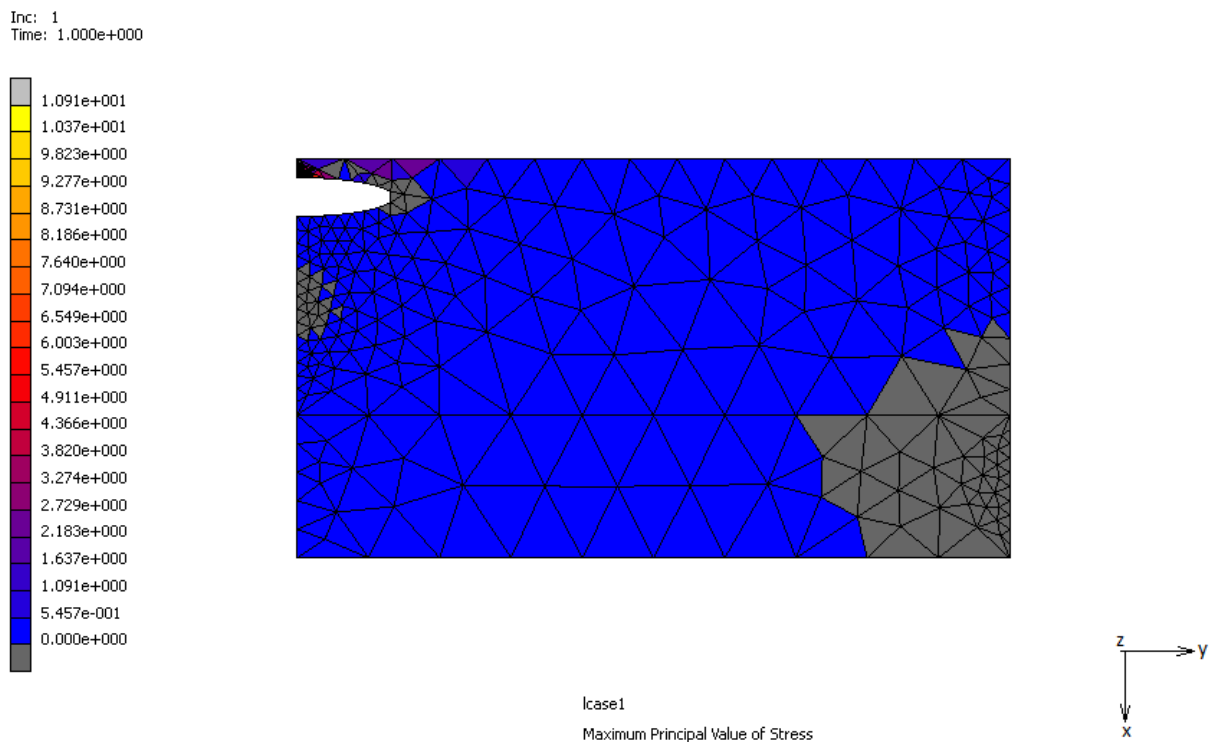


Abbildung 4.18: ellipsoidförmiger Einschluss mit LKW-Radlast auf der Betonfahrbahn: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 20\text{mm}$, grobe Vernetzung

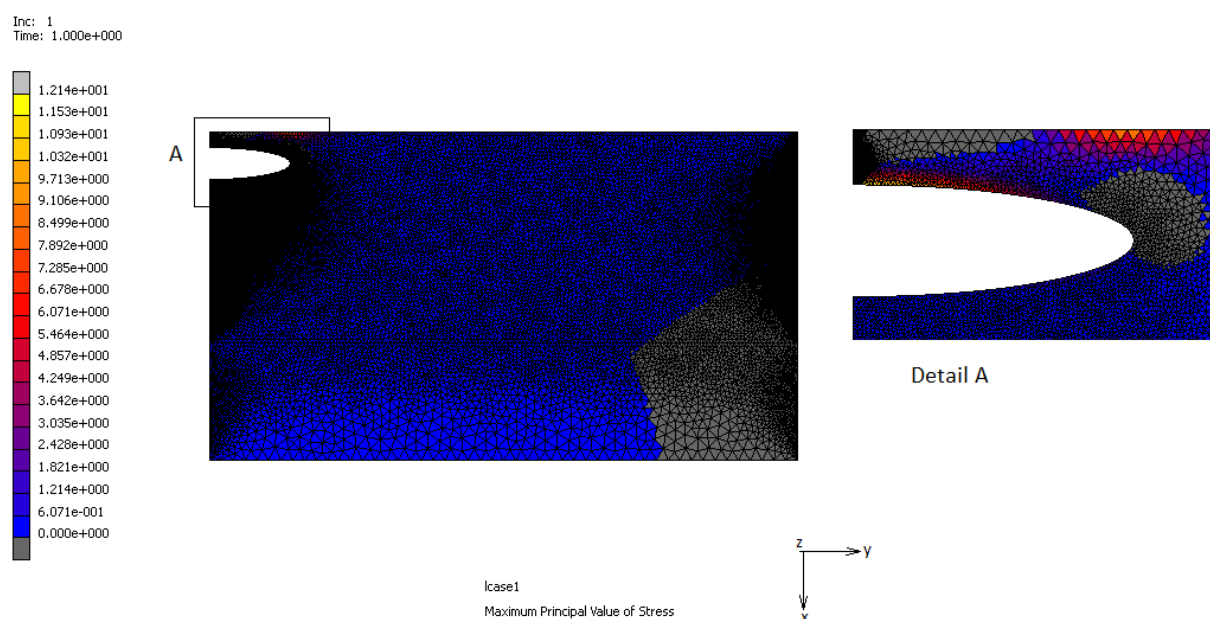


Abbildung 4.19: ellipsoid-förmiger Einschluss mit LKW-Radlast auf der Betonfahrbahn: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 20\text{mm}$, feine Vernetzung

Die vorliegenden Hauptzugspannungen und die maximale Verschiebung mit den geringen Abweichungen werden anhand der Abbildungen veranschaulicht. Das Resultat zeigt, dass die Netzweite keinen Einfluss auf die beanspruchten Bereiche hat, während eine geringe Abweichung der Werte hervortritt. Hierbei hat man bei einem groben Netz geringere Werte und bei einem feineren Netz höhere Werte, welches auf ein genaueres Ergebnis deutet. Die Netzverfeinerung beruht dennoch auf eigener Entscheidung, da es keine großen Unterschiede zwischen den Netzweiten auftreten.

Wichtig ist dass man bei der Vernetzung keine hängende Knoten und keine Überlappungen von Elementen verursacht. Diese können das Ergebnis der Spannungsverteilung verfälschen.

5 Schlussfolgerungen

Innerhalb dieser vorliegenden Arbeit wurde die Rissbildung in Betonfahrbahndecken infolge von Lehm-Einschlüssen, welches mit einer LKW-Radlast beansprucht wird, mithilfe der Finiten-Elemente-Methode simuliert und anschließend analysiert.

Wie bereits im Hauptteil beschrieben entstehen diese Einschlüssen aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Stoffe, die im Beton enthalten sind. Die Zähigkeit des Betons verursacht aufgrund des Fließens um Bewehrung und unter Aussparungen, unerwünschte Einschlüsse. Eine speziell Anwendung für die Verhinderung der Einschlüsse ist das Verdichten mittels einem Rüttler, die Vibrationen erzeugt, denn Energie auf den Beton übertragen wird. Die übertragene Energie wird in Schwingungen umgesetzt und somit die innere Reibung verringert. Das Ziel ist damit die Verhinderung der Luftspalte im Beton, indem diese zusammengedrückt werden. Die Folge der Verdichtung sind die ausgelassenen Luftspalte in geringen Mengen, die zu Einschlüssen werden.

Das Zweck dieser Arbeit besteht darin, durch unterschiedliche Parameterstudien eine

Rissgefährdung zu ermitteln, wenn lediglich Lehm-Einschlüssen und eine LKW-Radlast vorliegt. Dabei wurden sowohl achsensymmetrische als auch 3D Analysen vorgenommen. In der ersten Parameterstudie wurde die Geometrie des Einschlusses untersucht. Dabei hat man sich auf das Volumen eines kugelförmigen Einschlusses konzentriert und die ellipsoid-förmigen Einschlüsse angepasst. Hierbei hat man festgestellt, dass die Zugfestigkeit von $4N/mm^2$ ab einem Verhältnis der Seitenlängen $a/b = 1/5$ mit $a = 20,47mm$ und $b = 102,34mm$ überschritten wird. Je kleiner das Verhältnis der Seitenlänge ist, desto höhere Spannungen treten in der Betonfahrbahn auf. Die Oberfläche der Fahrbahndecke ist jedoch davon nicht betroffen, denn ab einem Verhältnis von $a/b = 1/50$ erscheinen geringere Spannungen auf der Oberfläche der Fahrbahndecke. Der Grund dafür ist die Aufnahme der Vertikallasten unmittelbar über dem Einschluss. Die Beanspruchung wird somit stärker im Bereich A übernommen, da die Länge des Einschlusses im Vergleich zu der Länge der Last geringer ist. Die maximale Verschiebung dagegen steigt mit minimiertem Verhältnis. Während für die zweite Studie die Geometrie des Einschlusses von der ersten Studie entnommen wurde, hat man hier die Tiefenlage der Geometrie für die Rissbildung in der Betonfahrbahn ermittelt. In diesem Fall treten ab einer Tiefenlage von $h = 60mm$ keine höheren Spannungen auf, wobei die Zugfestigkeit von $4N/mm^2$ nicht überschritten wird. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass je tiefer der Einschluss liegt desto geringer die Spannungen und somit kann eine Rissbildungen durch tiefer liegende Einschlüsse ausgeschlossen werden. Je tiefer der Einschluss liegt, desto geringer die maximale Verschiebung, denn die beanspruchte Fläche wird dicker und somit anspruchsvoller zu verschieben. In der dritten Parameterstudie wird die achsensymmetrische Geometrie in ein 3D Modell umgewandelt und mit verschiedenen Lagepositionen der LKW-Radlast gerechnet. Hierfür wurde der Abstand der zweier LKW-Radlasten gemessen und auf der vergrößerten Betonfahrbahn simuliert. Je weiter die LKW-Radlast vom Zentrum der Betonfahrbahn liegt, desto geringer sind die Spannungen in der Betonfahrbahn. Diese Schlussfolgerung beruht auf die Vertikallast, die mit entfernter Radlast nicht mehr unmittelbar über dem Einschluss liegt. Somit wird die Beanspruchung von er dickeren Fläche ohne Einschlüssen übernommen. Eine LKW-Radlast mit einer Entfernung ab ca. $500mm$ vom Einschluss, verursacht keine Gefahr für die Betonfahrbahndecke und somit auch keine Rissgefährdung. Hierbei wurde die Verschiebung im Zentrum der Betonfahrbahndecke ermittelt, die mit entfernter LKW-Radlast zunimmt. Im Anschluss wurde für eine achsensymmetrische Geometrie der Einfluss der Netzweite auf das Resultat untersucht. Hierbei gab es minimale Veränderungen der Spannungswerte, während die Bereiche der Zugbeanspruchungen identisch waren. Die feine Netzweite erbringt deutlich genauere Ergebnisse, wobei in dieser Studie das grobe und das feine Netz keine aussagekräftige Unterschiede aufwies. Anhand der Studien wird deutlich, dass durch variieren der Geometrie des Einflusses, der Tiefenlage der Geometrie oder die Position der LKW-Radlast unterschiedliche Spannungsgrößen auftreten. Einerseits sind die festgestellten Ergebnisse und die daraus schließenden Schlussfolgerungen keine Überraschung. Andererseits muss die Geometrie der Einschlusses sowie ihre Tiefenlage und die Position der LKW-Radlast festgestellt werden.

Die Schwierigkeit der Simulationen lag im 3D Modell, da hierfür mehrere Varianten untersucht wurden. Zunächst hat man mit einem weiteren LKW-Radlast gegenüberliegend gerechnet, die keine aussagekräftigen Ergebnisse dargestellt hat. Die LKW-Radlast wurde mit einer doppelten Last in den Simulationen verwendet, weil vier Räder des LKWs in Betracht gezogen wurden. Demzufolge sind keine weitere Berechnung notwendig, jedoch

könnte man nun das vorliegende Modell mit der Belastung mit zusätzlicher Temperatur untersuchen und auswerten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Berechnungen gelungen sind, sie realitätsnahe Ergebnisse mit logischen Schlussfolgerungen liefern und somit wichtige Fragen aufgedeckt hat.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau einer Fahrbahn; Bild entnommen aus [1]	5
2.2	Arten der Asphaltdecken; Bild entnommen aus [1]	7
2.3	Betondecke; Bild entnommen aus [1]	9
2.4	Pflasterdecken, abfotografiert auf der Lindenerstraße am 18.03.2014 um 14:00 Uhr	10
3.1	Überblick der Software MSC Marc/Mentat	12
3.2	Grafikfenster von MSC Mentat; Materialeigenschaften; Randbedingungen	14
4.1	kugelförmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: Berechnungsausschnitt, Abmessungen und axialsymmetrische FE-Diskretisierung (Maße in[mm]	15
4.2	kugelförmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 20mm$	16
4.3	varierte Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast: Maximale Hauptzugspannungen in den vier Bereichen A, B, C und D als Funktion des Verhältnisses a/b	18
4.4	varierte Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast: Maximale Verschiebung in Lastrichtung (x) als Funktion des Verhältnisses a/b	19
4.5	ellipsoid-förmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: Berechnungsausschnitt, axialsymmetrische FE-Diskretisierung für unterschiedliche Tiefenlagen (alle Maße in [mm])	21
4.6	ellipsoid-förmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 220mm$	22
4.7	ellipsoid-förmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: Maximale Hauptzugspannungen in den vier Bereichen A, B, C und D als Funktion der Überlagerungshöhe h	23
4.8	ellipsoid-förmiger Einschluss, Lastfall LKW-Radlast: Maximale Verschiebung in Lastrichtung (x) in Abhängigkeit der Tiefenlage h	24
4.9	Geometrie der 3D Analysen	25
4.10	ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW -Radlast: Darstellung der Zugspannungen in der Betonfahrbahn und im einen Querschnitt	26
4.11	Einteilung der Geometrie in den Bereichen A, B und C	27
4.12	ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast, 3D Analysen: Maximale Hauptzugspannungen in den den Bereichen A, B und C als Funktion der Lastposition	28
4.13	Verschiebung im Mittelpunkt der Fahrbahn in Lastrichtung (y) für die Lastposition	29
4.14	ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast :Vergleichsgeometrie in einer Tiefenlage $h = 20mm$ mit 7530 Elementen	30
4.15	ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast :grobe Vernetzung in einer Tiefenlage $h = 20mm$ mit 753 Elementen	30
4.16	ellipsoid-förmige Einschlüsse, Lastfall LKW-Radlast :feine Vernetzung in einer Tiefenlage $h = 20mm$ mit 65320 Elementen	31
4.17	ellipsoidförmiger Einschluss mit LKW-Radlast auf der Betonfahrbahn: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 20mm$, Vergleichsgeometrie	32

4.18 ellipsoidförmiger Einschluss mit LKW-Radlast auf der Betonfahrbahn: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 20\text{mm}$, grobe Vernetzung	32
4.19 ellipsoid-förmiger Einschluss mit LKW-Radlast auf der Betonfahrbahn: maximale Hauptspannungsverteilung bei einer Tiefenlage $h = 20\text{mm}$, feine Vernetzung	33

Tabellenverzeichnis

4.1	Materialeigenschaften der einzelnen Schichten	15
4.2	Längen der Radien der Einschlüsse	17

Literatur

- [1] Uni. -Prof.Dr.-Ing- E.Straube: *Aufbau einer Straßenbefestigung*, Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften Fachgebiet Straßenbau, Universität Duisburg Essen, 2011.
- [2] Rolf Breitenbücher: *Rissbildungen in Fahrbahndecken aus Beton- Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR)-Phase 1*, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag. NW, Verl. für neue Wiss., 2010.
- [3] Norbert Ehrlich, Otmar Hersel: *Straßenbau heute-Betondecken*, BetonMarketing Deutschland GmbH, 2009/2010.
- [4] Johann Scheiblauber: *Straßenbau heute*, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Köln, 1976.
- [5] Henning Natzschka: *Straßenbau - Entwurf und Bautechnik*, Vieweg + Teubner, 3.Auflage, Wiesbaden, 2011.
- [6] K.J.Bathe: *Finite-Elemente-Methoden*, 2.Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2002.
- [7] Dr.-Ing. Kerstin Schindler: *Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung*, TU Carolowilhelmina zu Braunschweig, 2008.
- [8] Mineralische MARBOS Pflastermörtel: *Hochbelastbare und wartungsfreundliche Pflasterdecken*, Broschüre, Dortmund, 2009/2010.
- [9] Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel: *Werkstoffe des Bauwesens Festbeton*, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, Frühjahrstrimester 2008.