

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Makroskopische Strukturmodellierung zur Prognose von kritischen Beanspruchungszuständen in Asphaltstraßen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab*,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roman Lackner**,
und Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Wistuba*,
*Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung,
**Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen

eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Bauingenieurwesen,
von

Artur Galek
E610 0125495
Pappenheimgasse 10-16/1/10
1200 Wien

Jan Bubich
E610 0025526
Hauptstraße 176a
7361 Frankenu

Wien, im April 2008

.....

.....

Kurzfassung

Gegenwärtig werden zur Lösung von komplexen Aufgabenstellungen bei der konstruktiven Bemessung von Bauwerken numerische Simulationsverfahren eingesetzt. Auch im Straßenbau gibt es zahlreiche Bestrebungen zur Erstellung geeigneter Simulationsprogramme, die auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basieren.

Der erste Teil der gegenständlichen Arbeit beinhaltet eine Auseinandersetzung mit den Grundlagen des Materialverhaltens, welche als Bausteine zur Erstellung von rheologischen Werkstoffmodellen dienen. Aufgrund der Komplexität des Materialverhaltens von Asphalt sind besonders Modelle geeignet, die zeitlich nichtlinear-viskose Elemente enthalten. Eines dieser Materialmodelle ist das Power-Law-Modell. Es besteht aus zwei Elementen, einer linearen Feder und einem parabolischen Dämpfer. Die Parameter dieses Modells können aus den Ergebnissen von statischen und dynamischen Laborversuchen abgeleitet und in eine FEM-Software implementiert werden. Im Zuge von numerischen Simulationen lassen sich Spannungen und Dehnungen von Straßenkonstruktionen ermitteln, welche Verkehrsbelastungen, äußeren Witterungseinflüssen wie Temperaturschwankungen oder der Kombination dieser beiden Einwirkungen ausgesetzt sind. Im Zuge dieser Arbeit wird ein entwickeltes dreidimensionales Berechnungsprogramm zuerst auf Plausibilität durch Vergleichsrechnungen mit anderen Programmen untersucht. Anschließend folgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den zwei- und dreidimensionalen Berechnungsvarianten. Den Abschluss bilden Parameterstudien, welche zur Abschätzung der Einflüsse der einzelnen Materialparameter dienen.

Summary

For solutions of complex tasks concerning structural dimensioning of buildings numerical simulation processes are used commonly. There are scores of ambitions to compile applicable simulation processes for road construction too.

The first part of the master's thesis includes an examination of theoretical background of rheological material models behaviour. Due to the complicity of material behaviour of asphalt especially such models are adequate, which do include non-linear time creep elements. One of these Material models is the Power-Law-model. It consists of two elements, a linear spring and a parabolic dashpot. The parameters of these models can be derived from the results of static and dynamic laboratory tests, and implementing to a FEM-Software. By numerical simulation stresses and strains of road constructions, which are exposed to traffic load, thermal changes or the combination of both, can be ascertained. In the course of this study a generated three-dimensional FE-program is primarily tested for plausibility. Subsequent follows a comparison of the results of two- and three-dimensional versions of calculation. Finally parameter studies help to assess the effect of the several measurement parameters.

Vorwort

An erster Stelle möchten wir Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. Michael Wistuba unseren Dank für die äußerst hilfreiche und professionelle Betreuung im Zuge dieser Arbeit aussprechen. Er war es, der nicht nur zur Initialzündung dieses Werks beigetragen hat, sondern uns während des gesamten Bearbeitungszeitraums in zahlreichen Gesprächen mit wertvollen Ideen und Anregungen stets zur Seite stand. Ebenso besonderer Dank gebührt Frau Projektass. Dipl.-Ing. Elisabeth Aigner und Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roman Lackner für die kritischen und stets ertragreichen Diskussionen über die Funktionsweise des Rechenmodells sowie die laufende Überarbeitung der FEM-Software.

Auch Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Ronald Blab sind wir für die gute Zusammenarbeit zu Dank verpflichtet. Ganz besonderen Dank schulden wir unseren Familien für die finanzielle und mentale Unterstützung während der gesamten Ausbildung. Gedankt sei auch unseren Lebenspartnern für die unermessliche Geduld während der Ausarbeitung dieser Arbeit.

Artur Galek / Jan Bubich

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	3
2	GRUNDLAGEN DER MATERIALMODELLIERUNG	5
2.1	Begriffe	5
2.1.1	Rheologie	5
2.1.2	Elastizität	6
2.1.3	Plastizität	10
2.1.4	Viskosität	11
2.1.5	Viskoelastizität	14
2.2	Wärmeverhalten	16
2.2.1	Wärmedehnung	17
2.2.2	Wärmeübertragung	20
2.3	Kopplung rheologischer Modelle	23
2.3.1	Parallelschaltung	23
2.3.2	Serienschaltung	24
2.4	Lineare rheologische Modelle	24
2.4.1	Maxwell-Modell	25
2.4.2	Kelvin-Voigt-Modell	26
2.4.3	Burgers-Modell	26
2.5	Rheologische Modelle mit parabolischen Elementen	27
2.5.1	Power-Law Modell	28
2.5.2	Huet-Modell	35
2.5.3	Huet-Sayegh-Modell	35
2.5.4	2S2P1D-Modell	36
3	ÜBERSICHT DER VERWENDETETEN PROGRAMME	38
3.1	Linear-elastische Berechnungen	38
3.1.1	BISAR	38
3.1.2	LEAP	40
3.2	Visko-elastische Berechnungen	42
3.2.1	FEAP - Rahmensoftware	42
3.2.2	FEAP 2D	45
3.2.3	FEAP 3D	47
4	VERGLEICHENDE LINEAR-ELASTISCHE SPANNUNGS-ANALYSEN	57
4.1	Basisangaben	57
4.1.1	Koordinatensystem	57
4.1.2	Straßenaufbau und geometrische Abmessungen	57
4.1.3	Temperaturmodell	58
4.1.4	Materialkennwerte	59
4.1.5	Belastung	62
4.1.6	Berechnungsspezifische Angaben	63
4.1.7	Schnitte	63
4.2	Berechnungsergebnisse	64
4.2.1	Oberflächennahe Spannungen (Schnitt 1-1)	64
4.2.2	Spannungen nahe der bituminösen Tragschichtunterseite (Schnitt 4-4)	66
4.2.3	Spannungen unter dem Rad 3 (Schnitt 2-2)	69
4.2.4	Spannungen in der Straßenachse (Schnitt 3-3)	71
4.3	Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse	73
4.3.1	Oberflächennahe Spannungen (Schnitt 1-1)	73
4.3.2	Spannungen nahe der bituminösen Tragschichtunterseite (Schnitt 4-4)	75
5	VERGLEICHENDE VISKO-ELASTISCHE BERECHNUNGEN FEAP 2D UND FEAP 3D	78
5.1	Basisangaben	78
5.1.1	Geometrie	78
5.1.2	Temperaturszenarien	78
5.1.3	Materialkennwerte	79
5.1.4	Belastung	81
5.1.5	Berechnungsspezifische Angaben	81

5.2	Berechnungsergebnisse	81
5.2.1	Oberflächennahe Spannungen (Schnitt 1-1).....	82
5.2.2	Spannungen nahe der bituminösen Tragschichtunterseite (Schnitt 4-4).....	84
5.2.3	Spannungen unter dem Rad 3 (Schnitt 2-2).....	86
5.2.4	Spannungen in der Straßenachse (Schnitt 3-3).....	88
5.2.5	Verzerrungen.....	89
5.3	Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse.....	92
5.3.1	Spannungen in der Straßenachse.....	94
5.3.2	Spannungen unter dem Rad 3.....	98
5.3.3	Verzerrungen.....	101
6	PARAMETERSTUDIEN ZUM POWER-LAW-MODELL	106
6.1	Verhältnis der Kriechnachgiebigkeiten in den gebundenen Schichten.....	106
6.1.1	Basisangaben	106
6.1.2	Berechnungsergebnisse	107
6.1.3	Schlussfolgerung	111
6.2	Parameterstudie mit dem 2D-Power-Law-Modell.....	111
6.2.1	Basisangaben	111
6.2.2	Berechnungsergebnisse	112
6.3	Parameterstudie mit dem 3D-Power-Law-Modell.....	114
6.3.1	Basisangaben	114
6.3.2	Berechnungsergebnisse	115
6.3.3	Zusammenfassung und Interpretation.....	120
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	124
8	LITERATURVERZEICHNIS	126

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Auf das komplexe Bauwerk Straße wirken neben der mechanischen Belastung aus dem Straßenverkehr zusätzlich chemische und thermische Beanspruchungen (Witterungseinflüsse) ein. Die Kombination aus Schwerlastverkehr und kritischen Temperatursituationen sowie schlechten Untergrundverhältnissen stellt eine potenzielle Ursache zur Schädigung der Straße dar. Die Lebensdauer einer Straßenbefestigung wird durch Risse maßgeblich verkürzt. Studien haben ergeben, dass von der Straßenoberfläche ausgehende Einzelrisse immer häufiger auf dem inländischen Autobahn- und Schnellstraßennetz anzutreffen sind. In den bisherigen Dimensionierungsrichtlinien ist die Zusammenwirkung von Verkehrsbelastung und thermischer Beanspruchung nicht vorgesehen bzw. berücksichtigt. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Analyse von Beanspruchungszuständen, die durch Verkehr und Einbindung tiefer Temperaturen hervorgerufen werden. Dazu wird die Straßenkonstruktion als Mehrschichtensystem betrachtet und die, aus den Einwirkungen resultierenden, Primärwirkungen anhand unterschiedlicher Modellansätze vergleichend einander gegenübergestellt.

Die Schichten einer Asphaltstraße bestehen aus Materialien, welche durch unterschiedliche Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften gekennzeichnet sind. Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens von Asphalten werden einerseits Modelle eingesetzt, welche die mikrophysikalischen Kontakteigenschaften an der Grenzfläche Korn und Matrix (=Bitumen-Füller-Gemisch) beschreiben und die makroskopischen Asphalteigenschaften anhand der Einflüsse und Einzelkomponenten berücksichtigen. Andererseits werden makroskopische, phänomenologische Materialmodelle eingesetzt, mit deren Hilfe das rheologische Werkstoffverhalten anhand von Spannungs-Dehnungs-Beziehungen als Funktion der Zeit formuliert und mit Laborversuchen an Asphaltprobekörpern validiert wird. Mit solchen makroskopischen Materialmodellen beschäftigt sich diese Diplomarbeit.

Besonders das zeit- und temperaturabhängige Verhalten stellt einen hohen Schwierigkeitsgrad in der Materialmodellierung dar. Aktuelle Forschungsprojekte setzen sich mit der Entwicklung neuer Simulationsmethoden zur Beschreibung des visko-elastischen Materialverhaltens, welche auf immer komplexeren Materialmodellen basieren, auseinander. Die Implementierung dieser rheologischen Modelle in numerische Berechnungsverfahren (Finite-Elemente-Methoden) soll die Vorhersage von kritischen Beanspruchungszuständen in Asphaltstraßen ermöglichen.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, ein zur Beschreibung des Tieftemperaturverhaltens von Asphalt entwickeltes numerisches Simulationsverfahren, welches auf dem Power-Law-Modell basiert, anhand von vergleichenden Berechnungen mit linear-elastischen und visko-elastischen Berechnungsverfahren auf seine Plausibilität zu erproben.

Diese Arbeit wird wie folgt aufgebaut: Im ersten Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen der Rheologie aufbereitet. Nach einer kurzen Einführung in das entwickelte Rechenprogramm sowie in bereits vorhandene Anwendungen erfolgt eine Gegenüberstellung der Rechenergebnisse im Rahmen von Vergleichsrechnungen unter der Annahme eines rein elastischen Materialverhaltens. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit fällt auf die Spannungsberechnung mit dem Power-Law-Modell. Im Zuge dieser Berechnungen werden zwei unterschiedliche Varianten des Strukturmodells (zwei- und

dreidimensional) angewandt, wobei mit einem Vergleich zwischen diesen beiden Modellvarianten begonnen wird. Hierfür werden zahlreiche unterschiedliche Beanspruchungssituationen angenommen und ihre Auswirkungen auf die Straßenkonstruktion simuliert. Den Abschluss dieser Arbeit bilden Studien zur Sensitivitätsprüfung der einzelnen Materialkennwerte des Power-Law-Modells. Dabei werden die unterschiedlichen Materialparameter variiert und die auf die Berechnungsergebnisse resultierenden Folgen aufgezeigt. Zusammenfassend werden schließlich die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Untersuchungen kritisch einander gegenübergestellt.

2 GRUNDLAGEN DER MATERIALMODELLIERUNG

Ziel der Materialmodellierung ist es den Zustand von Werkstoffen und Strukturen realitätsnahe zu beschreiben und die aufgrund von Einwirkungen bedingten zeitlichen Veränderungen zu prognostizieren. Hierfür ist es erforderlich, Zustands- und Evolutionsgleichungen zu formulieren. Grundsätzlich sind für die Modellierung eines Stoffes mechanische, thermische und chemische Aspekte zu berücksichtigen. Die Erstellung von Struktur- und Materialmodellen ist eine Abfolge von drei Teilschritten.

- (1) Beobachtung
- (2) Modellbildung
- (3) Simulation und Prognose

Ausgehend von den aus der Beobachtung und durch Experimente gewonnenen Erkenntnissen und Zusammenhängen wird ein Materialmodell gebildet, mit dem letztendlich Simulationen durchgeführt und Prognosen erstellt werden können.

2.1 Begriffe

Nachfolgend werden die für diese Arbeit notwendigen Begriffe und Definitionen erläutert.

2.1.1 Rheologie

Rheologie (von griechisch: rhei „fließen“ und logos „Lehre“) ist die Wissenschaft des Fließ- und Deformationsverhaltens von Stoffen. Diese Lehre stellt mit ihren drei Disziplinen, der Elastizitätstheorie, der Plastizitätstheorie und der Strömungslehre ein interdisziplinäres Teilgebiet der Physik dar.

Anlass für die Entwicklung dieser Wissenschaft gaben die zahlreichen Anomalien im Fließverhalten der Kolloide, welche von den klassischen Gesetzen der Hydrodynamik und Elastodynamik abweichen. Gegenstand der Forschung sind der progressive und der regressive Anstieg der Spannungen als Funktionen der Verformung bei Festkörpern bzw. der Verformungsgeschwindigkeit bei Flüssigkeiten, bedingt durch die Phänomene Kriechen und Relaxation.

Asphalt ist ein Mischgut, das aus Mineralstoffen und Bindemittel (Bitumen) besteht. Aufgrund dieser Zusammensetzung weist Asphalt elastische, plastische und viskose Eigenschaften auf. Der Bitumenanteil im Asphalt beträgt in etwa 5 bis 10 %. Das rheologische Verhalten von Bitumen kann elastisch oder viskos sein und ist sehr stark von der Temperatur abhängig. Ein Gemisch aus Gesteinskörnungen weist elastisches und plastisches Werkstoffverhalten auf, wobei die elastischen Eigenschaften dem Einzelkorn und die plastischen Eigenschaften dem Haufwerk zugeordnet werden.

Ebenso wie beim Bitumen ist das Werkstoffverhalten von Asphalt temperaturabhängig (siehe Abbildung 1). Im Tieftemperaturbereich ist der Asphalt spröde und weist ein annähernd linear-elastisches Materialverhalten auf. Ein Anstieg der Temperatur hat auf das rheologische Verhalten einen wesentlichen Einfluss und bewirkt, dass der Stoff zunehmend viskoser wird. Bei höheren Temperaturen hat der Stoff sowohl viskose als

auch elastische Eigenschaften, das visko-elastische Verhalten setzt sich aus linearen und nichtlinearen visko-elastischen Anteilen zusammen.

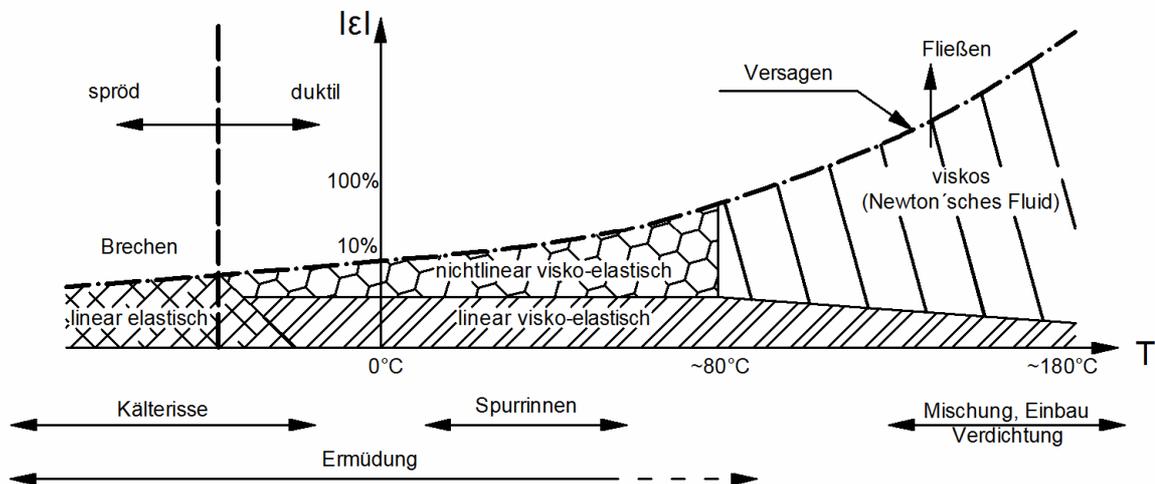


Abbildung 1: Rheologische Zustände von Asphalt in Abhängigkeit von der Temperatur (Di Benedetto, geändert)

2.1.2 Elastizität

Elastizität ist die Eigenschaft von festen Stoffen und Körpern, eine durch äußere Kräfte oder Temperaturunterschiede verursachte Gestalt- oder Volumenänderung nach Beseitigen der Einwirkungen wieder rückgängig zu machen. In festen Stoffen werden durch äußere Kräfte die Abstände und Lagen ihrer Atome und Moleküle verändert, wobei zwischen diesen Rückstellkräfte wirksam werden die mit den äußeren Kräften ins Gleichgewicht kommen. Nach Entlastung bedingen diese Rückstellkräfte im Fall vollkommener Elastizität oder elastischer Verformung dass die atomaren Bausteine wieder ihre ursprüngliche Gleichgewichtslage einnehmen, sodass der Körper wieder seine ursprüngliche Gestalt annimmt. Dabei ist zwischen linear-elastischem und nichtlinear-elastischem Werkstoffverhalten zu unterscheiden (siehe Abbildung 2). In der Regel tritt linear-elastisches Verhalten bei Werkstoffen mit Kristallstruktur wie z.B. Stahl auf. Nichtlinear-elastisches Werkstoffverhalten ist vor allem bei Kunststoffen anzutreffen, welche aus miteinander vernetzten langkettigen Molekülen (Polymeren) bestehen.

Die Einzelkörner des Asphaltzuschlages weisen grundsätzlich elastische Eigenschaften auf. Zudem verringert sich beim Bitumen bei Temperaturabnahme die Viskosität und gleichzeitig gewinnt das Bitumen zunehmend an Härte. Daher ist beim Asphalt das elastische Verhalten vorwiegend im Tieftemperaturbereich zu beobachten. Im Hinblick auf die Belastung ist anzumerken, dass kurzzeitige Belastungen elastische Antworten hervorrufen. Außerdem darf durch die Belastung die Elastizitätsgrenze nicht überschritten werden.

Ein Standardverfahren zur Messung der mechanischen Eigenschaften ist der Zugversuch, bei dem ein Probekörper, in der Regel bis zum Bruch, gedehnt wird. Während des Versuches werden laufend die aufgebrachte Kraft sowie die Verschiebung gemessen und daraus die, auf die undeformierte Querschnittsfläche bezogene, Spannung und Dehnung berechnet. Die graphische Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Bsp. Abbildung 2).

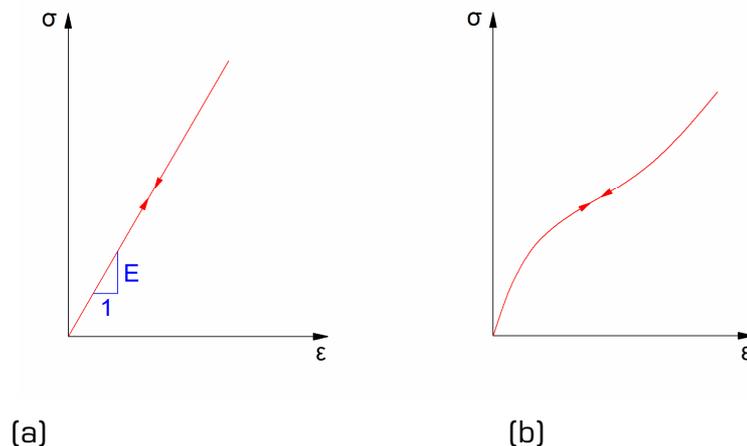


Abbildung 2: Spannungs-Dehnungsdiagramm für elastisches Werkstoffverhalten; (a) linear-elastisch; (b) nichtlinear-elastisch

Die konstitutive Beziehung für linear-elastisches Materialverhalten bei einaxialer Beanspruchung lautet:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1} \quad \text{Elastizitätsmodul [N/mm}^2\text{]} \quad \text{Gleichung 1}$$

Diese Beziehung wird als Hooke'sches Gesetz bezeichnet. In diesem Zusammenhang ist

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Spannung [N/mm}^2\text{]} \quad \text{Gleichung 2}$$

F Kraft [N]
A Querschnittsfläche [mm²]

und

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{Längsdehnung [-]} \quad \text{Gleichung 3}$$

l Länge in der Momentankonfiguration [mm]

l₀ Länge in der Referenzkonfiguration [mm]

Da die Längsdehnung ε_l eine dimensionslose Größe ist, weist der Elastizitätsmodul E die Dimension einer Spannung auf. Geometrisch kann E als Anstieg des Spannungs-Dehnungs-Diagramms interpretiert werden [siehe Abbildung 2 (a)]. Physikalisch stellt der Elastizitätsmodul die Steifigkeit des Werkstoffs dar (Mang/Hofstetter, 2000). Zu beachten gilt, dass der Elastizitätsmodul von der Temperatur bei der Versuchsdurchführung, der Geschwindigkeit der Lastaufbringung und einer Reihe weiterer Parameter abhängig ist.

Während des axialen Zugversuches tritt neben der Längsdehnung auch eine Querstauchung auf. Der Zusammenhang zwischen der Längsdehnung ε_l und der entsprechenden Querstauchung ε_q kann mit ausreichender Genauigkeit als linear angenommen werden. Es gilt

$$\nu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} \quad \text{Querdehnungszahl [-].} \quad \text{Gleichung 4}$$

Der Schubmodul ist ein Materialparameter, der sowohl vom Elastizitätsmodul E als auch von der Querdehnungszahl ν abhängig ist

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad \text{Schubmodul [N/mm}^2\text{].} \quad \text{Gleichung 5}$$

Zur Beschreibung von räumlichen Spannungs- und Verzerrungszuständen wird das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz in den Formen

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad \text{Gleichung 6}$$

und

$$\varepsilon_{kl} = D_{kl ij} \cdot \sigma_{ij} \quad \text{Gleichung 7}$$

herangezogen, mit

σ_{ij} Komponenten des Cauchy'schen Spannungstensors

ε_{kl} Komponenten des linearisierten Verzerrungstensors

C_{ijkl} Komponenten des Materialsteifigkeitstensors

$D_{kl ij}$ Komponenten des Materialnachgiebigkeitstensors.

Der Materialsteifigkeitstensor **C** ist gleich der Inversen des Materialnachgiebigkeitstensors **D**

$$\mathbf{C} = \mathbf{D}^{-1}. \quad \text{Gleichung 8}$$

Es ist zu beachten, dass Gleichung 6 und Gleichung 7 für kleine Verschiebungen und kleine Verschiebungsableitungen gültig sind. Für den Fall großer Verschiebungen und großer Verschiebungsableitungen ist der Cauchy'sche Spannungstensor σ durch den

zweiten Piola-Kirchhoff'schen Spannungstensor \mathbf{S} und der linearisierte Verzerrungstensor $\boldsymbol{\varepsilon}$ durch den Green'schen Verzerrungstensor \mathbf{E} zu ersetzen.

Zur Berücksichtigung von Wärmedehnungen ist das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetzes gemäß Gleichung 7 mit einem Temperaturterm zu erweitern. Es ergibt sich die konstitutive Beziehung

$$\varepsilon_{kl} = D_{klj} \cdot \sigma_{ij} + \alpha_{kl} \cdot (T - T_0) \quad \text{Gleichung 9}$$

mit

α_{kl} Wärmeausdehnungskoeffizient ($=\alpha_T$)

T aktuelle Temperatur

T_0 Referenztemperatur.

Für isotrope Stoffe lässt sich Gleichung 9 ausführlich zu

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2 \cdot \varepsilon_{12} \\ 2 \cdot \varepsilon_{23} \\ 2 \cdot \varepsilon_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \alpha_{kl} \cdot (T - T_0) \quad \text{Gleichung 10}$$

anschreiben (Mang/Hofstetter, 2000). Eine ausführliche Auseinandersetzung mit der Thematik Wärmedehnung erfolgt im Kapitel 2.2.1.

In der Materialmodellierung wird der Elastizität als Analogiesymbol eine lineare Feder, auch Hooke'sche Feder bezeichnet, zugeordnet (siehe Abbildung 3). Die charakteristische Größe der Hooke'schen Feder ist der Elastizitätsmodul E .

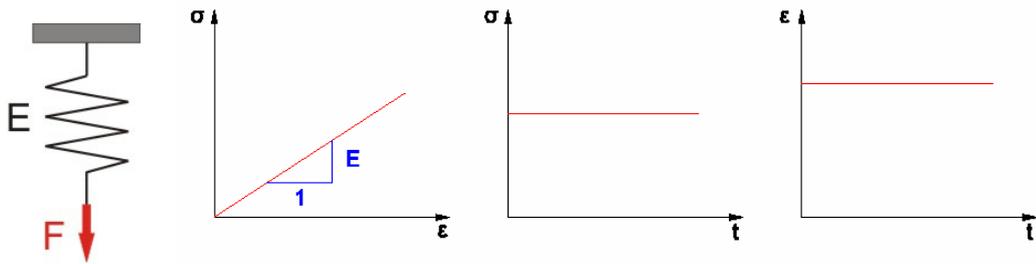


Abbildung 3: Hooke'sche Feder mit Kennlinien

2.1.3 Plastizität

Reales Stoffverhalten ist dadurch gekennzeichnet, dass das elastische Verhalten nur in einem bestimmten Bereich ausgeprägt ist. Dies bedingt, dass die Formänderung nur dann vollständig reversibel ist, wenn die mechanischen Spannungen nicht über einen stoffabhängigen Wert, die Elastizitätsgrenze, hinausgehen. Bei stärkeren Beanspruchungen tritt neben der reinen elastischen Verformung auch eine plastische Verformung (plastisches Fließen) auf.

Die Eigenschaft eines Stoffes, sich nach der Aufbringung einer Belastung irreversibel zu verformen, wird Plastizität genannt. Plastische Deformationen sind fortdauernde Verformungen, die nach Beendigung der Beanspruchung von Werkstoffen durch äußere Kräfte, bestehen bleiben. Das Material hat bei der Entlastung annähernd dieselbe Steifigkeit wie bei der Belastung. Ist Letzteres nicht der Fall, so spricht man von Schädigung (Lackner).

Plastizität ist eine wichtige Werkstoffeigenschaft, denn auf ihr beruhen die Fertigungsverfahren der bildsamen bzw. spanlosen Formgebung. Sie ist außerdem die Voraussetzung dafür, dass örtliche Spannungsspitzen an Kerben und Rissen durch Verformung abgebaut werden können. Dadurch wird die Bruchgefahr verringert.

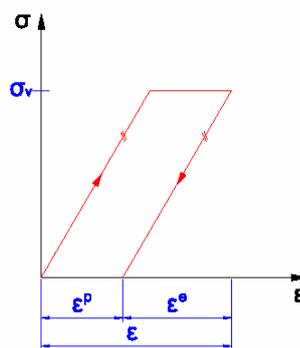


Abbildung 4: Spannungs-Dehnungsdiagramm für ideal plastisches Werkstoffverhalten

Die Verzerrung ε infolge einer einwirkenden Spannung ergibt sich aus der Summe der bleibenden Verzerrung ε^p und der elastischen Verzerrung ε^e , welche bei vollständiger Entlastung auf Null zurückgeht (siehe Abbildung 4). Somit gilt

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad \text{Gleichung 11}$$

unter Anwendung des Hooke'schen Gesetzes für den einaxialen Spannungszustand mit

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E}. \quad \text{Gleichung 12}$$

Beim Asphalt treten plastische Deformationen vorwiegend im Hochtemperaturbereich auf. Dabei ist es erforderlich, dass die Belastungen die Elastizitätsgrenze erreichen bzw. überschreiten und die Belastungsdauer längere Zeit anhält. Die plastischen Verformungen resultieren daraus, dass das Bitumen bei Zunahme der Temperatur zunehmend weicher wird.

In der Materialmodellierung wird die Plastizität durch das St.Venant'sche Reibungselement (siehe Abbildung 5) beschrieben. Dieses Element ist dadurch gekennzeichnet, dass eine bleibende Verformung erst nach Erreichen einer kritischen Fließspannung σ_v eintritt. Demnach gilt

$$\varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{für } \sigma < \sigma_v \\ \varepsilon^p & \text{für } \sigma \geq \sigma_v \end{cases} \quad \text{Gleichung 13}$$

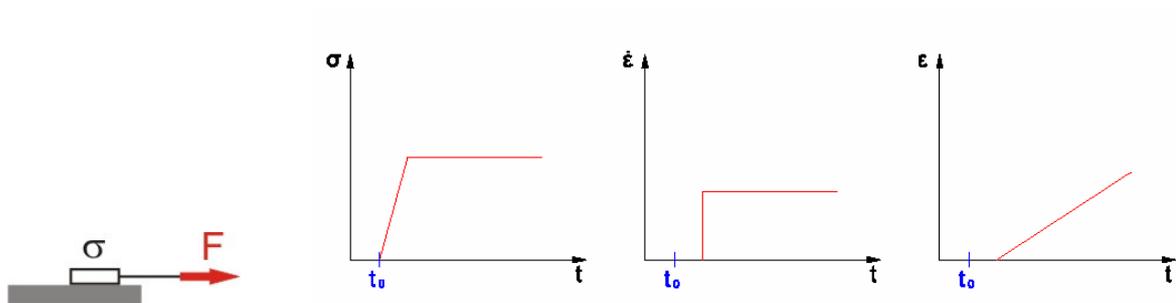


Abbildung 5: St.Venant'sches Reibungselement mit Kennlinien

2.1.4 Viskosität

Der Begriff Viskosität wird aus dem lateinischen Ausdruck „viscum“ abgeleitet und geht auf den zähflüssigen Saft der Beeren einer Pflanzenart, der Mistel, zurück. Viskosität, auch Zähigkeit oder innere Reibung genannt, ist die Eigenschaft eines fließfähigen Stoffsystems bei einer Verformung eine Spannung aufzunehmen, die von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt.

Zum besseren Verständnis wird dieses Stoffverhalten anhand des Zwei-Platten-Modells gemäß Abbildung 6 erläutert (Ucke, 1999).

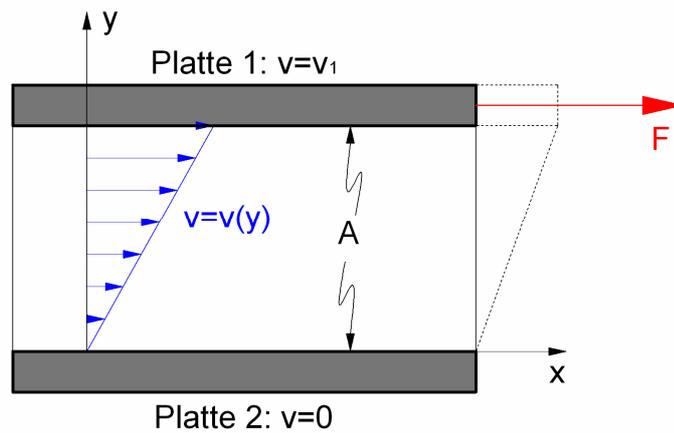


Abbildung 6: Zwei-Platten-Modell

Der Raum zwischen zwei parallelen, gleich großen Platten mit der Fläche A [m²] sei mit einer an beiden Platten haftenden Flüssigkeit gefüllt. Die obere Platte wird aufgrund der einwirkenden Kraft F [N] mit der Geschwindigkeit v_1 [m/s] bewegt, die untere Platte wird festgehalten, sodass sich ihre Lage nicht verändert. Die Haftung der Substanz an die Platten bewirkt, dass die Geschwindigkeit der Flüssigkeit an den Plattenrändern identisch mit der Geschwindigkeit der Platten ist. Dazwischen wird die Flüssigkeit aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten geschert, es entstehen Reibungskräfte. Der Versuch zeigt, dass die Kraft F , die erforderlich ist, um die Platte zu bewegen, proportional ihrer Fläche A und ihrer Geschwindigkeit v und indirekt proportional dem Abstand der Platten ist. Folgende Zusammenhänge können aus diesem Experiment abgeleitet werden:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Scherspannung [N/m}^2\text{]} \quad \text{Gleichung 14}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad \text{Scherrate [1/s]} \quad \text{Gleichung 15}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{dynamische Viskosität [Ns/m}^2\text{]}. \quad \text{Gleichung 16}$$

Die dynamische Viskosität wurde 1687 von Sir Isaac Newton als Proportionalitätsfaktor zwischen der Schubspannung und der Scherrate beschrieben. Ist die dynamische Viskosität von der Scherrate unabhängig, so spricht man von Newton'schen Fluiden, andernfalls handelt es sich um eine nicht-Newton'sche Flüssigkeit. Das Geschwindigkeitsprofil Newton'scher Flüssigkeiten ist linear (vgl. Abbildung 6) und es gelten die obigen Beziehungen. Ferner ist die dynamische Viskosität Newton'scher Flüssigkeiten eine Materialkonstante für eine gegebene Temperatur und einen gegebenen Druck. Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten werden aufgrund ihrer Änderung bei ansteigender Scherrate in dilatante Stoffe und

strukturviskose Stoffe unterschieden, wobei die Erstgenannten durch eine steigende Viskosität und letztere durch eine sinkende Viskosität gekennzeichnet sind.

Der Kehrwert der dynamischen Viskosität wird als Fluidität bezeichnet. Wird die dynamische Viskosität auf die Dichte ρ bezogen, erhält man

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{kinematische Viskosität [m}^2\text{/s]}. \quad \text{Gleichung 17}$$

Der rheologische Modellkörper für die Viskosität ist das Dämpfungselement (siehe Abbildung 7), wobei zwischen linear-viskosen und nichtlinear-viskosen Verformungsanteilen zu unterscheiden ist.

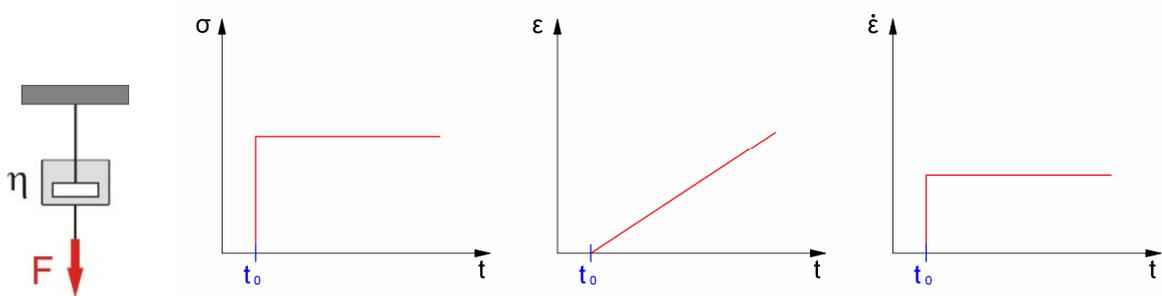


Abbildung 7: Newton'scher Dämpfer mit Kennlinien

Der lineare Dämpfer wird auch als Newton'scher Dämpfer bezeichnet und kann analog zu den Newton'schen Flüssigkeiten durch die Beziehung

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad \text{Gleichung 18}$$

beschrieben werden, mit

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}. \quad \text{Gleichung 19}$$

Wirkt auf den Modellkörper eine zeitlich konstante Spannung $\sigma^{(0)}$ ein, so gilt

$$\epsilon = \frac{\sigma^{(0)}}{\eta} \cdot t. \quad \text{Gleichung 20}$$

Letztere Beziehung kann auch in der Form

$$\epsilon(t) = J(t) \cdot \sigma^{(0)} \quad \text{Gleichung 21}$$

mit der linearen Nachgiebigkeitsfunktion

$$J_{\text{lin}}(t) = \frac{1}{\eta} \cdot t \quad [1/\text{MPa}]$$

Gleichung 22

angeschrieben werden.

Im Gegensatz dazu gilt für den parabolischen Dämpfer (siehe Abbildung 8) die allgemeine Funktion

$$J_{\text{par}}(t) = J_a \left(\frac{t}{\tau} \right)^k$$

Gleichung 23

Hierbei beschreibt der Parameter J_a [1/MPa] die initiale Kriechnachgiebigkeit zum Zeitpunkt $t = \tau$ wobei τ [s] einen charakteristischen Zeitbeiwert zur Berücksichtigung des Kriechprozesses darstellt. Der materialbezogene Parameter k ist dimensionslos.

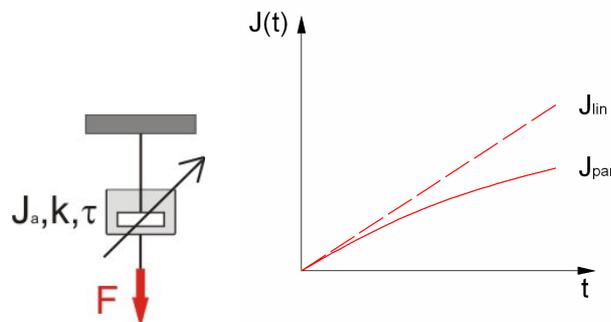


Abbildung 8: parabolischer Dämpfer mit Kennlinie

Betrachtet man die viskose Verformung auf Molekularebene, so ist sie ein irreversibler Vorgang kooperativer Bewegung von Molekülen bzw. Molekülgruppen, bei dem Nebenvalenzbindungen lokal aufgebrochen werden. Dadurch können benachbarte Molekülteile nachgeben und stückweise aneinander vorbei gleiten, bis sie an einer anderen Stelle wieder aufgehalten werden. Im Laufe der Zeit verschieben sich ganze Segmente der amorphen Struktur, wobei in jedem Augenblick die meisten Nebenvalenzbindungen intakt und nur wenige gelöst sind (Schatt, Worch, 2003).

Das viskose Materialverhalten von Asphalt ist ausschließlich auf die Eigenschaften des Bitumens zurückzuführen. Die Viskosität des Bitumens ist temperaturabhängig. Höhere Temperaturen haben einen Anstieg der Viskosität zur Folge. Da viskose Verformungen von der Zeit abhängig sind, resultieren bei langen Belastungsdauern größere viskose Deformationen als bei kurzzeitigen Belastungen.

2.1.5 Viskoelastizität

Zeigt ein durch eine Einwirkung belasteter Stoff sowohl ein viskoses als auch ein elastisches Verhalten so spricht man von Viskoelastizität. Das Verhältnis von viskosem zu elastischem Verformungsanteil ist von Spannung, Belastungsfrequenz, Zeit und

Temperatur abhängig. Zeitabhängiges Stoffverhalten wird durch die Phänomene Kriechen und Relaxation beschrieben (siehe Abbildung 9).

Die Verformungszunahme eines Probekörpers bei anhaltender konstanter Belastung wird als Kriechen bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen der zeitabhängigen Dehnung und der aufgetragenen Spannung kann durch die Kriech- oder Nachgiebigkeitsfunktion beschrieben werden (siehe Gleichung 22 bzw. Gleichung 23). Relaxation (lateinisch *relaxatio* „das Nachlassen“) ist die zeitabhängige Spannungsabnahme eines Probekörpers bei konstant gehaltener Verzerrung. Dieser Zusammenhang wird durch die konstitutive Beziehung

$$\sigma(t) = R(t) \cdot \varepsilon^{(0)} \quad \text{Gleichung 24}$$

beschrieben, wobei $R(t)$ [MPa] dem Relaxationsmodul entspricht.

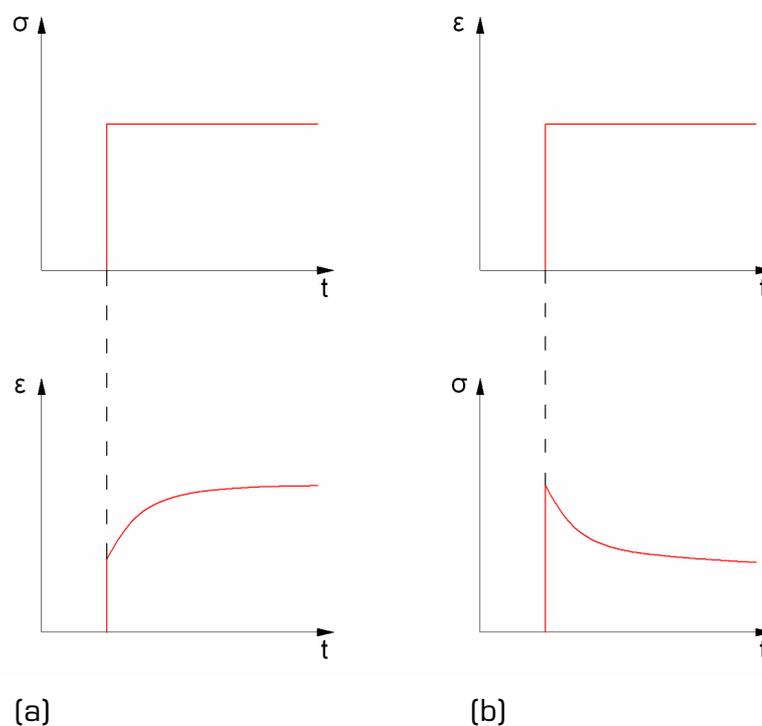


Abbildung 9: zeitabhängiges Materialverhalten: (a) Kriechen, (b) Relaxation

Die resultierende Verformung eines belasteten visko-elastischen Körpers setzt sich aus einem zeitunabhängigen (elastischen) und einem zeitabhängigen (viskosen) Anteil zusammen. Der elastische Anteil ist dadurch gekennzeichnet, dass sich eine Belastungsänderung direkt auf diesen auswirkt. Bei Entlastung gehen die elastischen Verformungsanteile ε_{el} vollkommen zurück. Der Rückgang der reversiblen Kriechanteile $\varepsilon_{k,r}$ erfolgt zeitverzögert und die irreversiblen Kriechanteile $\varepsilon_{k,ir}$ verbleiben (siehe Abbildung 10).

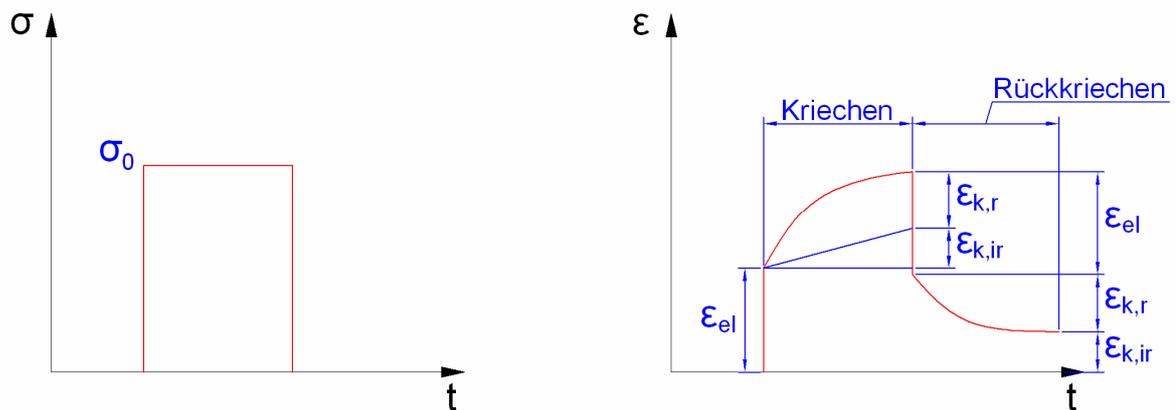


Abbildung 10: zeitlicher Spannungs- und Dehnungsverlauf für visko-elastische Stoffe

Asphalt besitzt elastische, plastische und viskose Eigenschaften. Bei niedrigen Temperaturen ist das Materialverhalten praktisch rein elastisch, bei höheren Temperaturen ist es zunehmend viskos. Das Relaxationsverhalten von Asphalt wird durch die thermo-elastischen Materialeigenschaften des Bitumens geprägt. Bei Abkühlung nimmt die Härte des Bitumens zu und gleichzeitig verringert sich das Relaxationsvermögen. Die Steifigkeit und die Relaxationsfähigkeit des Bitumens sind für die resultierenden Spannungen und Formänderungen in einer Straße von großer Bedeutung, besonders bei Abkühlvorgängen. Eine Absenkung der Umgebungstemperatur bewirkt, dass die oberste Asphaltsschicht (Deckschicht) schrumpfen möchte. Dies ist jedoch durch den Schichtenverbund bzw. die Reibung mit den darunter liegenden Schichten nicht möglich und es entstehen thermisch induzierte Zugspannungen, auch kryogene Zugspannungen genannt. Diese Zugspannungen werden bei höheren Temperaturen aufgrund der hohen Relaxationsfähigkeit des Bitumens rasch abgebaut. Im Tieftemperaturbereich ist dies nicht möglich, da das Relaxationsvermögen nicht, oder nur in verringertem Maß vorhanden ist. Der Relaxationsvorgang benötigt bei tiefen Temperaturen sehr viel Zeit. Zudem steigt bei niedrigen Temperaturen die Steifigkeit des Bitumens. Dies führt bei rascher Abkühlung im Tieftemperaturbereich zu einem fortschreitenden Aufbau der Zugspannungen. Diese kryogenen Zugspannungen können sogar die Zugfestigkeit erreichen und sind eine Ursache für die Rissbildung in einer Straße. Auch die Kombination der thermisch induzierten Spannung mit der Verkehrslastspannung kann zu einem Überschreiten der Zugfestigkeit und zu Rissen führen.

2.2 Wärmeverhalten

Die Temperaturabhängigkeit vieler Stoffeigenschaften bedingt eine Auseinandersetzung mit dem Wärmeverhalten von Bitumen und Asphalt. Daher werden in diesem Abschnitt die ausgewählten Themen Wärmeausdehnung und Wärmetransport näher erläutert.

2.2.1 Wärmedehnung

Grundsätzlich wirkt sich bei allen Stoffen eine Änderung der Temperatur auf ihre äußeren Abmessungen aus. Beim Erwärmen nimmt die Schwingungsamplitude der Atome zu und dies führt zu einer Ausdehnung des Körpers. Die thermische Dehnung ε_{th} kann im eindimensionalen Fall durch die Beziehung

$$\varepsilon_{th} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \alpha_T \cdot \Delta T \quad \text{Gleichung 25}$$

formuliert werden. In diesem Zusammenhang ist

α_T Wärmeausdehnungskoeffizient [$1/K$]

sowie

$$\Delta T = T - T_0 \quad \text{Temperaturdifferenz [K]} \quad \text{Gleichung 26}$$

T Temperatur in der Momentankonfiguration

T_0 Temperatur in der Referenzkonfiguration

Die Variablen l sowie l_0 beschreiben die Länge des Körpers in der Momentan- bzw. Referenzkonfiguration. Generell sind thermische Verformungen reversibel. Ist eine ungehinderte Wärmeausbreitung eines Körpers nicht möglich, so treten thermisch induzierte Spannungen (Wärmespannungen) hervor. In der Praxis ist eine Differenzierung in erzwungene und nicht erzwungene Wärmespannungen vorzunehmen.

(a) Erzwungene Wärmespannungen

Wird die thermische Ausdehnung eines Körpers von außen unterdrückt, so liegen erzwungene Wärmeausdehnungsbehinderungen vor und daraus resultieren erzwungene Wärmespannungen. Ein repräsentatives Beispiel hierfür ist ein an zwei Enden festgehaltener Stab gemäß Abbildung 11 (Bürgel, 2005).

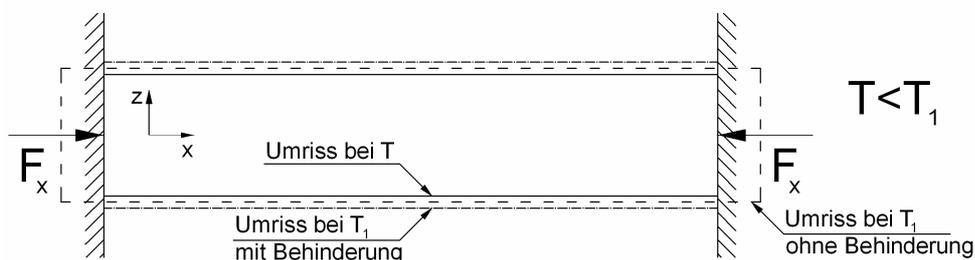


Abbildung 11: einaxiale erzwungene Wärmedehnungsbehinderung bei Erwärmung von T auf T_1 (Bürgel, verändert)

Die Behinderung der Wärmeausdehnung des Stabes bedingt, dass die Summe aus der mechanischen Deformation $\varepsilon_{mech,x}$ und der thermischen Deformation $\varepsilon_{th,x}$ null ergibt. Es gilt unter der Voraussetzung einer rein elastischen Verformung

$$\varepsilon_x = 0 = \varepsilon_{\text{mech},x} + \varepsilon_{\text{th},x} = \frac{\sigma_{\text{th},x}}{E} + \alpha_T \cdot (T_1 - T). \quad \text{Gleichung 27}$$

Somit lässt sich die Bestimmungsgleichung für die thermische Spannung $\sigma_{\text{th},x}$ mit

$$\sigma_{\text{th},x} = -\alpha_T \cdot (T_1 - T) \cdot E \quad \text{Gleichung 28}$$

anschreiben.

(b) Nicht erzwungene Wärmespannungen

Im Gegensatz dazu spricht man von nicht erzwungener Wärmeausdehnungsbehinderung, wenn ein Körper aufgrund von äußeren Einflüssen über die Wanddicke ein Temperaturgefälle aufweist. Die konstitutiven Beziehungen werden anhand des folgenden Beispiels (Bürgel, 2005) erläutert. Es sei eine ebene Platte (siehe Abbildung 12) gegeben, die ausgehend von der Temperatur T_m nach Erreichen eines stationären Wärmeleitungszustandes an der Oberseite die Temperatur T_o und an der Unterseite die Temperatur T_u aufweist, wobei T_o größer als T_u ist.

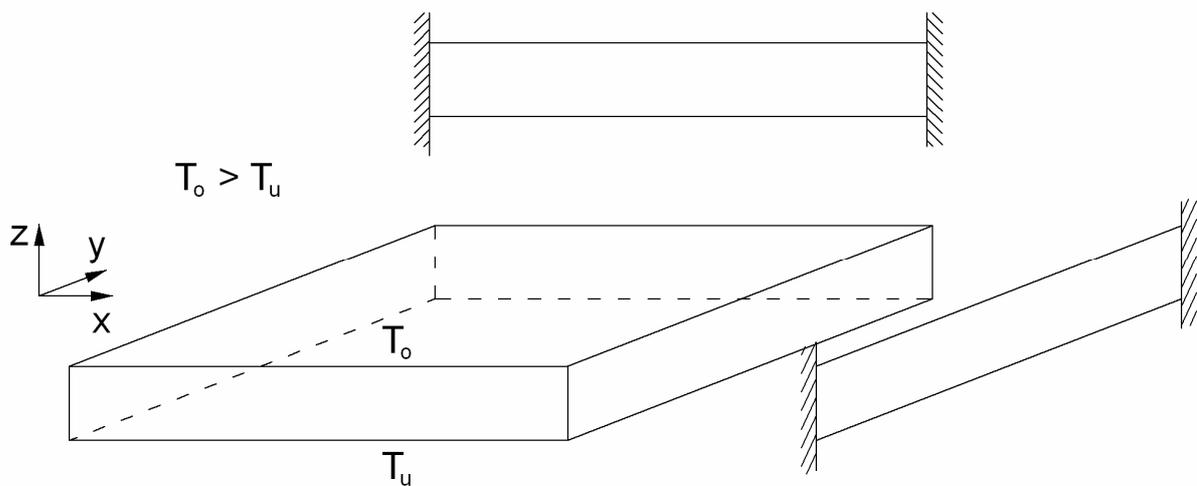


Abbildung 12: ebene Platte mit Temperaturgefälle über die Wanddicke (Bürgel, verändert)

Die Platte besteht aus einem isotropen Stoff und somit ist der Wärmeausdehnungskoeffizient α_T in alle Richtungen gleich groß. Als Randbedingung gilt, dass die Wärmeausdehnung in x- und y- Richtung vollkommen behindert ist, in z- Richtung gibt es keine Wärmeausdehnungsbehinderung. Daher liegt auf der Ober- und Unterseite ein ebener Spannungszustand vor.

Das Konzept der Herleitung beruht auf der Zerlegung der Verformungen (in allen drei Achsen) in ihre Einzelanteile und anschließender Summation. Betrachtet man zunächst die Oberseite, so ergeben sich die rein thermisch bedingten Verformungen mit

$$\varepsilon_{th,x}^o = \varepsilon_{th,y}^o = \varepsilon_{th,z}^o = \alpha_T \cdot (T_o - T_m). \quad \text{Gleichung 29}$$

Die vorerst unbekannte Normalspannung in x-Richtung bewirkt eine mechanische Deformation unter Voraussetzung der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes mit

$$\varepsilon_x^o = \frac{\sigma_x^o}{E}. \quad \text{Gleichung 30}$$

Gleichzeitig tritt gemäß Gleichung 4 eine Querdeformation

$$\varepsilon_y^o = \varepsilon_z^o = -\nu \cdot \varepsilon_x^o \quad \text{Gleichung 31}$$

auf. Für die Verformungen in y-Richtung ergeben sich analog die Beziehungen

$$\varepsilon_y^o = \frac{\sigma_y^o}{E} \quad \text{Gleichung 32}$$

sowie

$$\varepsilon_x^o = \varepsilon_z^o = -\nu \cdot \varepsilon_y^o. \quad \text{Gleichung 33}$$

Aufgrund der Isotropie gilt der Zusammenhang

$$\sigma_x^o = \sigma_y^o = \sigma^o \quad \text{bzw.} \quad \sigma_x^u = \sigma_y^u = \sigma^u. \quad \text{Gleichung 34}$$

Summation der Einzelanteile der Dehnungen für die Plattenoberseite ergibt

$$\varepsilon_x^o = \sum_i \varepsilon_{x_i}^o = \varepsilon_y^o = \sum_i \varepsilon_{y_i}^o = \alpha_T \cdot (T_o - T_m) + \frac{\sigma^o}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma^o}{E}. \quad \text{Gleichung 35}$$

Analog gilt für die Unterseite der Platte die Beziehung

$$\varepsilon_x^u = \sum_i \varepsilon_{x_i}^u = \varepsilon_y^u = \sum_i \varepsilon_{y_i}^u = \alpha_T \cdot (T_u - T_m) + \frac{\sigma^u}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma^u}{E}. \quad \text{Gleichung 36}$$

Die Verformungen in den jeweiligen Richtungen auf der Ober- und Unterseite der Platte müssen aufgrund von Verformungskompatibilitätsgründen gleich sein. Unter Annahme eines über die Plattenhöhe temperaturunabhängigen konstanten E-Moduls gilt

$$-\sigma^o = \sigma^u. \quad \text{Gleichung 37}$$

Da die Verformung auf der Ober- und Unterseite gleich groß ist, erhält man die Randbedingung

$$\varepsilon_x^o = \varepsilon_y^o = \varepsilon_x^u = \varepsilon_y^u. \quad \text{Gleichung 38}$$

Die gesuchten Wärmespannungen ergeben sich durch gleichsetzen von Gleichung 35 und Gleichung 36 und unter Berücksichtigung von Gleichung 37 zu

$$\sigma^o = -\sigma^u = \frac{E \cdot \alpha_T \cdot (T_u - T_o)}{2 \cdot (1 - \nu)}. \quad \text{Gleichung 39}$$

2.2.2 Wärmeübertragung

Physikalisch ist der Begriff Wärme als Inhalt an kinetischer Energie der Moleküle eines Stoffes definiert. Mit steigender Temperatur ist eine Zunahme der kinetischen Energie zu beobachten. Wärmetransport findet aufgrund von Temperaturunterschieden statt, wobei zwischen den Übertragungsformen Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung zu unterscheiden ist. Da die Auseinandersetzung mit diesen Phänomenen sehr aufwendig ist, beschränken wir uns in dieser Arbeit auf die Wärmeleitung.

Zur Lösung eines Wärmeleitungsproblems sind im allgemeinen Fall zwei von einander abhängige Vorgänge, Wärmetransport durch das Medium und Erwärmung des Mediums, zu verknüpfen. Gemäß obiger Erläuterung ist der Wärmetransport eine Auswirkung von Temperaturunterschieden. Zunächst ist es notwendig ein paar Begriffe einzuführen. Der Wärmestrom P [W] ist als Ableitung der Wärmemenge [J oder Ws] nach der Zeit als

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad \text{Gleichung 40}$$

definiert.

Ferner kann der Wärmestrom auch als Integral der Wärmestromdichte q [W/m²] über die durchströmte Fläche A [m²] mit

$$P = \int_A q \, dA. \quad \text{Gleichung 41}$$

angeschrieben werden. Die Wärmestromdichte ist sowohl von der Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] des durchströmten Mediums als auch vom Temperaturgefälle $\text{grad}T$ [K/m] abhängig:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T .$$

Gleichung 42

Anhand eines infinitesimalen Volumenelements kann die Wärmestrombilanz wie folgt aufgestellt werden.

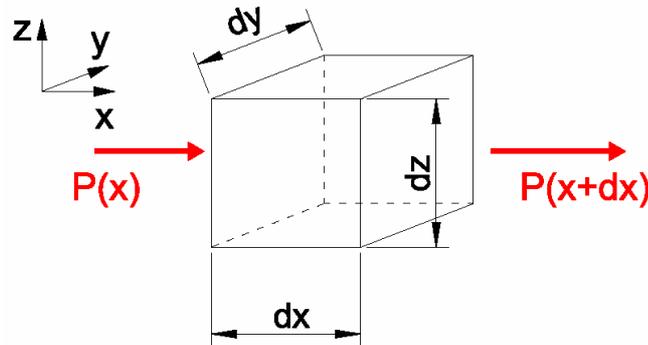


Abbildung 13: Wärmestrom durch ein infinitesimales Volumenelement

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird vorerst nur der Wärmetransport in x-Richtung betrachtet, für die anderen Koordinatenrichtungen ist sinngemäß vorzugehen. Der Wärmezufluss P_{zu} in das Kontrollobjekt ergibt sich zu

$$P_{zu}(x) = \int_A q(x) dA = q(x) \cdot dx dy .$$

Gleichung 43

Analog dazu beträgt der Abfluss P_{ab}

$$P_{ab}(x + dx) = \int_A q(x + dx) dA = q(x + dx) \cdot dx dy .$$

Gleichung 44

Entwicklung von $q(x+dx)$ in eine Taylorreihe ergibt

$$q(x + dx) = q(x) + \frac{\partial q}{\partial x} dx + \dots$$

Gleichung 45

Da es sich hier um ein infinitesimales Volumenelement (Abbildung 13) handelt, können die Glieder höherer Ordnung vernachlässigt werden. Bildet man nun die Wärmestrombilanz unter Berücksichtigung des Wärmestromes in allen drei Richtungen (vgl. Gleichung 42), so ergibt sich der Differenzwärmestrom P zu

$$P = P_{zu} - P_{ab} = -\left(\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z}\right) \cdot dx dy dz = \lambda \cdot \text{div}(\text{grad}T) \cdot dV$$

Gleichung 46

Alternativ lässt sich Gleichung 46 durch Verwendung des Laplace-Operators Δ und Berücksichtigung von Gleichung 40 anschreiben als

$$\lambda \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad}T) \cdot dV = \lambda \cdot \Delta T \cdot dV = \frac{dQ}{dt} . \quad \text{Gleichung 47}$$

Die spezifische Wärmekapazität c [kJ/(kg K)] eines Mediums gibt an, wie viel Wärmemenge erforderlich ist, um 1 kg des Mediums um 1 K zu erwärmen. Es gilt die Beziehung

$$c \cdot \rho \cdot dV = \frac{dQ}{dT} , \quad \text{Gleichung 48}$$

wobei ρ [kg/m³] der Dichte des Mediums entspricht. Durch Gleichsetzen der letzten beiden Gleichungen erhält man die Wärmeleitungsgleichung mit

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \Delta T . \quad \text{Gleichung 49}$$

Für stationäre Verhältnisse ist der linke Term dieser Differenzialgleichung gleich null und diese Gleichung ist numerisch lösbar. Die Lösung für instationäre Verhältnisse ist wesentlich komplexer (siehe dazu Kalb, Steinhilber, 2006). Im Zuge dieser Diplomarbeit werden die Temperaturverläufe mit einer eindimensionalen Finite-Elemente Software berechnet.

2.3 Kopplung rheologischer Modelle

Das Verformungsverhalten von realen Stoffen setzt sich aus elastischen, plastischen und viskosen Anteilen zusammen, wobei der Einfluss dieser Verformungsanteile unterschiedlich ausgeprägt ist. Dies folgt aus dem zweiten Axiom der Rheologie. Jeder reale Stoff besitzt eine einzigartige Ausprägung dieser Anteile und dies spiegelt sich im jeweiligen Deformationsverhalten wider. Mit Hilfe von rheologischen Modellen wird versucht ein solches Stoffverhalten bestmöglich zu beschreiben. Durch die Kombination von elastischen, plastischen und viskosen Modellkörpern kann elastisches und anelastisches Werkstoffverhalten simuliert werden. Die realen Stoffeigenschaften bestimmen den Aufbau bzw. die Anzahl und Anordnung der benötigten Elemente. Wird das Deformationsverhalten eines Stoffes hauptsächlich durch ein oder zwei Verformungsanteile bestimmt, so besteht die Möglichkeit näherungsweise einen Modellkörper mit entsprechend ein oder zwei Verformungsanteilen unter Vernachlässigung des Anteiles mit der geringeren Einflussnahme auf das Gesamtverhalten zu bilden. Die Schaltung von mehreren Elementen erfolgt in Serie oder parallel, wobei diese Schaltungsarten auch miteinander kombiniert werden können. Grundlegende Beispiele solcher Kombinationen werden in der Folge behandelt.

2.3.1 Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung wird die Erregung des Modellkörpers auf die einzelnen Elemente so aufgeteilt, dass ihre Antworten gleich sind. Wirkt auf den Verbund gemäß Abbildung 14 eine Belastung ein, so stellt sich in beiden Elementen die gleiche Dehnung ein. Ferner ist die Gesamtdehnung gleich den Einzeldehnungen

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \varepsilon_1 = \varepsilon_2.$$

Gleichung 50

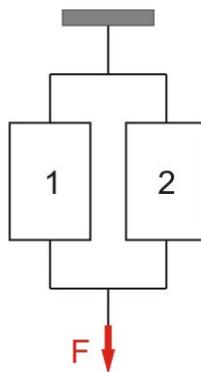


Abbildung 14: Parallelschaltung

Die Gesamtspannung setzt sich aus der Summe der Einzelspannungen zusammen, daher gilt

$$\sigma_{\text{ges}} = \sigma_1 + \sigma_2.$$

Gleichung 51

2.3.2 Serienschaltung

Werden die Elemente in Serie geschaltet, so muss die gesamte Erregung des Modellkörpers durch jedes Element übertragen werden. Das Gesamtverhalten des Modellkörpers setzt sich aus den Anteilen der jeweiligen Elemente zusammen.

Eine Einwirkung auf das in Abbildung 15 dargestellte Modell bewirkt, dass sich in den Elementen die Dehnungen ε_1 sowie ε_2 einstellen. Demnach setzt sich die Gesamtdehnung aus der Summe der Einzeldehnungen zusammen und es gilt

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 .$$

Gleichung 52

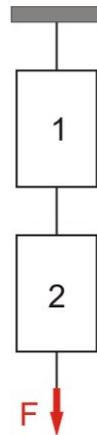


Abbildung 15: Serienschaltung

Die Gleichung für die Gesamtspannung ergibt sich aus Überlegungen für die Spannungen eines auf Zug beanspruchten Stabes mit konstantem Querschnitt. Für letzteren gilt, dass die Spannung an jeder Stelle gleich ist. Damit kann man den Analogieschluss ziehen, dass die Spannungen des Serienschaltungsmodells, auch an jeder Stelle, d. h. in jedem Element gleich sind und es gilt

$$\sigma_{\text{ges}} = \sigma_1 = \sigma_2 .$$

Gleichung 53

2.4 Lineare rheologische Modelle

Rheologische Modellkörper bestehen aus den bereits beschriebenen Grundmodellen (Elastizität, Plastizität und Viskosität), wobei bei linearen Modellen die Modellierung der Viskosität nur durch den Einsatz des linearen Dämpfers erfolgt und nicht etwa durch nichtlineare Elemente wie z.B. parabolische Dämpfer.

Ein charakteristisches Merkmal der linearen visko-elastischen Materialmodelle ist der lineare Zusammenhang zwischen der Spannung und der zeitabhängigen Verzerrung.

Im Folgenden werden solche Modelle erläutert. Zuerst werden Modelle, deren Aufbau aus zwei Grundelementen besteht (Maxwell-Modell und Kelvin-Voigt-Modell) behandelt. Danach folgt das Burgers-Modell.

2.4.1 Maxwell-Modell

Das Maxwell-Modell (benannt nach James Clark Maxwell [1831-1879]) ist durch die Reihenanordnung einer elastischen Feder und eines Newton'schen Dämpfers definiert (siehe Abbildung 16).



Abbildung 16: Maxwell-Modell

Diesem Modell liegt die Vorstellung zugrunde, dass sich zu einem bestimmten Zeitpunkt t die resultierende Verzerrung aus der Summe eines elastischen Anteiles ε^e und eines viskosen Anteiles ε^v ergibt zu

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^v . \quad \text{Gleichung 54}$$

Ferner gilt für die Spannungen $\sigma^e = \sigma^v = \sigma$. Die elastische Feder entspricht dem Hooke'schem Gesetz und folglich lautet die konstitutive Gleichung für den elastischen Verzerrungsanteil

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} . \quad \text{Gleichung 55}$$

Der viskose Anteil ergibt sich aus folgendem konstitutiven Gesetz

$$\dot{\varepsilon}^v = \frac{\sigma}{\eta} . \quad \text{Gleichung 56}$$

Unter diesen Voraussetzungen bzw. Zusammenhängen kann die rheologische Gleichung des Maxwell-Modells mit

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{Gleichung 57}$$

angeschrieben werden.

2.4.2 Kelvin-Voigt-Modell

Die Parallelanordnung einer elastischen Feder und eines viskosen Dämpfers begründet sich auf das nach Lord W. T. Kelvin (1824-1907) und W. Voigt (1850-1919) benannte Werkstoffmodell (siehe Abbildung 17).

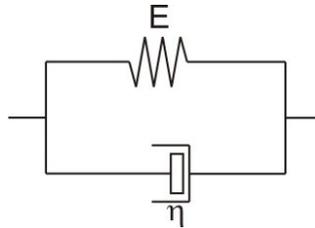


Abbildung 17: Kelvin-Voigt-Modell

Aufgrund dieser Anordnung und der daraus resultierenden Modelleigenschaften ergibt sich die Beziehung

$$\sigma = \sigma^e + \sigma^v . \quad \text{Gleichung 58}$$

sowie

$$\varepsilon = \varepsilon^e = \varepsilon^v . \quad \text{Gleichung 59}$$

Weiters gelten folgende konstitutiven Gesetze

$$\sigma^e = E \cdot \varepsilon \quad \text{Gleichung 60}$$

und

$$\sigma^v = \eta \cdot \dot{\varepsilon} . \quad \text{Gleichung 61}$$

Die Berücksichtigung der Gleichung 58 bis Gleichung 61 führt zur mathematischen Beschreibung des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens nach Kelvin-Voigt durch die Differentialgleichung

$$\dot{\varepsilon} + \frac{E}{\eta} \cdot \varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} . \quad \text{Gleichung 62}$$

2.4.3 Burgers-Modell

Durch Serienschaltung eines Maxwell- und eines Kelvin-Voigt-Körpers entwickelte der Physiker Burgers ein Materialmodell, welches gemäß Abbildung 18 aus vier Elementen besteht.

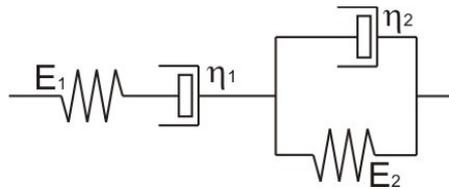


Abbildung 18: Burgers-Modell

Die resultierende Verzerrung zu einem bestimmten Zeitpunkt t ergibt sich aus der Summe eines elastischen Anteiles ε^e , eines viskosen Anteiles ε^v und eines visko-elastischen Anteiles ε^{ve} , somit gilt

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^v + \varepsilon^{ve}. \quad \text{Gleichung 63}$$

In diesem Zusammenhang ist

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E_1} \quad \text{elastischer Verzerrungsanteil} \quad \text{Gleichung 64}$$

$$\varepsilon^v = \frac{\sigma}{\eta_1} \cdot t \quad \text{viskoser Verzerrungsanteil} \quad \text{Gleichung 65}$$

$$\varepsilon^{ve} = \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2}} \right) \quad \text{visko-elastischer Verzerrungsanteil.} \quad \text{Gleichung 66}$$

Eine ausführliche Ausarbeitung dieses Materialmodells ist in der Diplomarbeit von Hofko enthalten.

2.5 Rheologische Modelle mit parabolischen Elementen

Das rheologische Materialverhalten von Asphalt lässt sich mit Hilfe der zuvor erwähnten linearen Materialmodelle nicht ausreichend genau beschreiben. Aus Laborversuchen geht hervor, dass es sich bei den Fließeigenschaften von Asphalt um ein inhomogenes Fließverhalten handelt. Dabei ist der lineare Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dehnungsrate nicht mehr gegeben. Materialien, die ein solches Verhalten aufweisen, werden als „allgemeine Flüssigkeiten“ bezeichnet. Durch die Nichtlinearität des Fließverhaltens solcher Stoffe ist für die rheologische Modellierung die Einführung inhomogener Modellelemente notwendig. Die Modellierung der Viskosität erfolgt bei nichtlinearen Modellen durch den Einsatz von parabolischen Dämpfern. Im Folgenden werden vier solche nichtlineare rheologische Modelle näher erläutert und die charakteristischen Gleichungen zur Formulierung der Kriechnachgiebigkeit angegeben.

2.5.1 Power-Law Modell

Das Power-Law-Modell ist ein nichtlineares rheologisches Materialmodell zur Beschreibung des Materialverhaltens von Asphalt. Besonders das Tieftemperaturverhalten wird durch dieses Modell gut beschrieben. Es handelt sich dabei um eine veränderte Form des Maxwell'schen Modells. Die Serienschaltung einer Feder und eines nichtlinearen (parabolischen) Dämpfers bilden dieses Modell (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Power-Law-Modell

Die Feder des Power-Law-Modells wird durch die Federkonstante E charakterisiert. Dieser Modellparameter entspricht dem dynamischen Steifigkeitsmodul von Asphalt bei tiefen Temperaturen – auch als Glasmodul E_{inf} [MPa] bezeichnet. Die Eigenschaften des parabolischen Dämpfers lassen sich mit

J_a initiale Kriechnachgiebigkeit [1/MPa]

k Konstante [-]

τ Parameter zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit des Dämpfers [s] beschreiben.

Aus der Eigenschaft der Serienschaltung (gemäß 2.3.2) ergibt sich aus der Summe des elastischen und des viskosen Verformungsanteiles die Kriechnachgiebigkeit $J(t)$ [1/MPa] (siehe Gleichung 67 bis Gleichung 69).

$$J(t) = J^e(t) + J^{par}(t) = J_0 + J_a \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^k \quad \text{Gleichung 67}$$

mit

$$J_0 = \frac{1}{E_{inf}} \quad \text{konstanter elastischer Verformungsanteil} \quad \text{Gleichung 68}$$

$$J_a \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^k \quad \text{zeitabhängiger Verformungsanteil.} \quad \text{Gleichung 69}$$

Mit Hilfe der Ableitung der Kriechnachgiebigkeit $J(t)$ nach der Zeit t erhält man die Kriechnachgiebigkeitsrate dJ/dt (siehe Gleichung 70).

$$\frac{dJ}{dt} = J_a \cdot k \cdot \frac{t^{k-1}}{\tau^k} = H \cdot t^p \quad [1/MPa/s] \quad \text{Gleichung 70}$$

H Kriechnachgiebigkeitsrate [1/MPa/s] nach $t = 1$ s

p zeitabhängiges Verhalten des Dämpfers [-] mit dem Zusammenhang $k=p+1$

Der bestehende Zusammenhang zwischen der Konstanten k und dem Parameter p gemäß Gleichung 70 liefert zwei Spezialfälle des Materialverhaltens. Einerseits zeigt die Bedingung $p=-1$ den Fall der reinen Elastizität und andererseits beschreibt der Grenzfall $p=0$ die rein viskose Materialverformung.

Mit der Variation von p zwischen 0 und -1 kann man Materialien mit unterschiedlichstem viskosen Verhalten beschreiben. Die Parameter H und p stellen somit eine wesentliche Grundlage für die Vergleichbarkeit des Kriechverhaltens der unterschiedlichen Materialien (Bitumen, Mastix und Asphalt) dar (Lanschützer, 2007).

Möchte man das Rückkriechen eines Probekörpers beschreiben, so ist das Power-Law-Modell nicht sehr gut geeignet, da die Verzerrungen bei vollständiger Entlastung nach dem spontanen Rückgang des elastischen Anteiles konstant bleiben (Hofko, 2006).

Die in Gleichung 67 beschriebene Kriechnachgiebigkeit $J(t)$ gilt für den einaxialen Spannungszustand. Analog zur Erweiterung des Hooke'schen Gesetzes vom einaxialen in den dreidimensionalen Spannungs- und Verzerrungszustand (vgl. Gleichung 1 und Gleichung 7), muss die Kriechnachgiebigkeitsfunktion für den dreidimensionalen Fall erweitert werden. Dies geschieht durch eine normalisierte Nachgiebigkeitsmatrix \mathbf{G}

$$\mathbf{G} = E_{\text{inf}} \cdot \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{bmatrix}, \quad \text{Gleichung 71}$$

mit

\mathbf{D} Materialnachgiebigkeitstensor

E_{inf} dynamischer Steifigkeitsmodul bei tiefen Temperaturen

ν Querdehnzahl.

Schließlich führt die Erweiterung der Gleichung 21 für den dreidimensionalen Fall zum Kriechdehnungstensor $\boldsymbol{\varepsilon}$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad [1/\text{MPa}/\text{s}] \quad \text{Gleichung 72}$$

mit

\mathbf{J} Kriechnachgiebigkeit

\mathbf{G} normalisierte Nachgiebigkeitsmatrix

$\boldsymbol{\sigma}$ Spannungstensor.

Die für das Power-Law-Modell erforderlichen Modellparameter werden durch dynamische und statische Laborversuche bestimmt.

Mit Hilfe von dynamischen Prüfverfahren lässt sich der Glasmodul E_{inf} des Asphalts ermitteln. Bei diesen Prüfverfahren handelt es sich um Zug-Druck-Wechselastversuche, welche bei verschiedenen Frequenzen und unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden (siehe Abbildung 20).

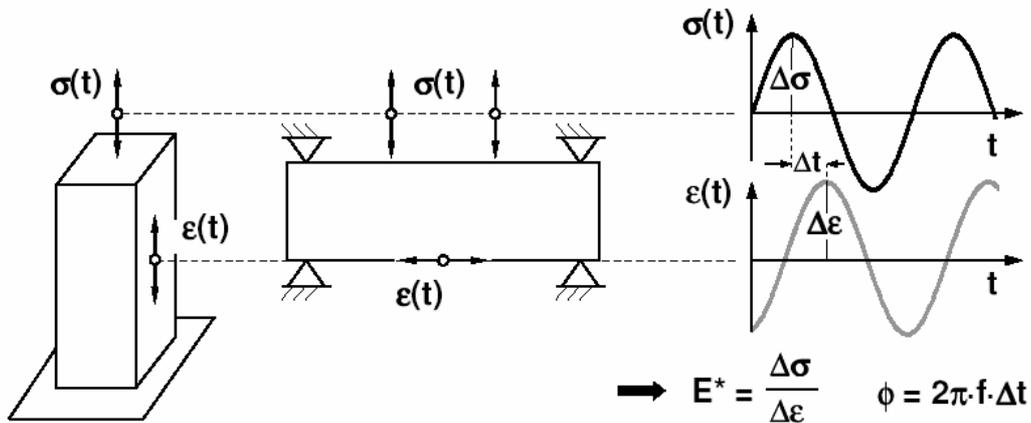


Abbildung 20: Schema eines Zug-Druck-Wechselastversuches (Wistuba, 2002)

In Abbildung 21 sind die Ergebnisse von solchen dynamischen Versuchen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Zunahme der Belastungsfrequenz höhere dynamische Steifigkeitsmoduln zur Folge hat. Im Gegensatz dazu wirkt sich eine Temperaturerhöhung gegenteilig aus. Bei höheren Temperaturen hat die Steifigkeit einen Wert, der einen Bruchteil des Wertes bei Temperaturen im Tieftemperaturbereich beträgt. Daher lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass der größte Wert des dynamischen Steifigkeitsmoduls E_{inf} bei einer sehr hohen Frequenz und einer sehr niedrigen Temperatur vorzufinden ist.

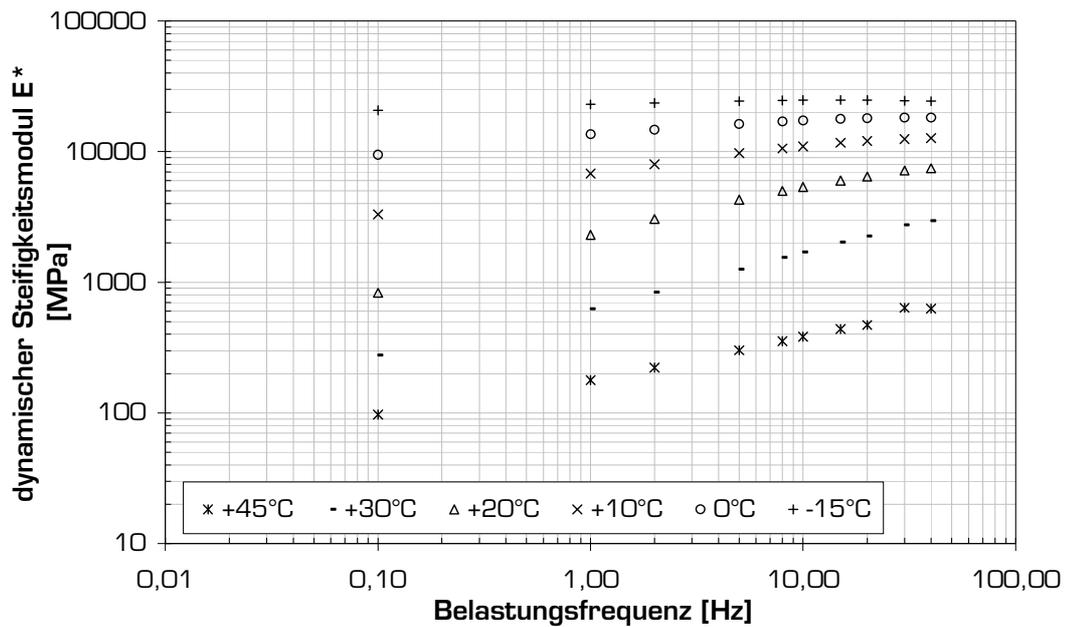


Abbildung 21: Steifigkeitsergebnisse von Zug-Druck-Wechselastversuchen am Deckschichtasphalt SMA 11 70/100 - dynamischer Modul E^* als Funktion von der Belastungsfrequenz und der Temperatur (Spiegl, 2007, verändert)

Die Darstellung in Abbildung 22 wird als Cole-Cole-Diagramm bezeichnet. Hier sind die reellen und imaginären Anteile des dynamischen Steifigkeitsmoduls E^* für bestimmte Versuchsbedingungen (Temperatur, Frequenz) aufgetragen. In diesem Diagramm besteht die Möglichkeit eine Approximationsfunktion zu definieren, und der Wert E_{inf} ergibt sich aus dem Schnittpunkt dieser Funktion mit der reellen Achse.

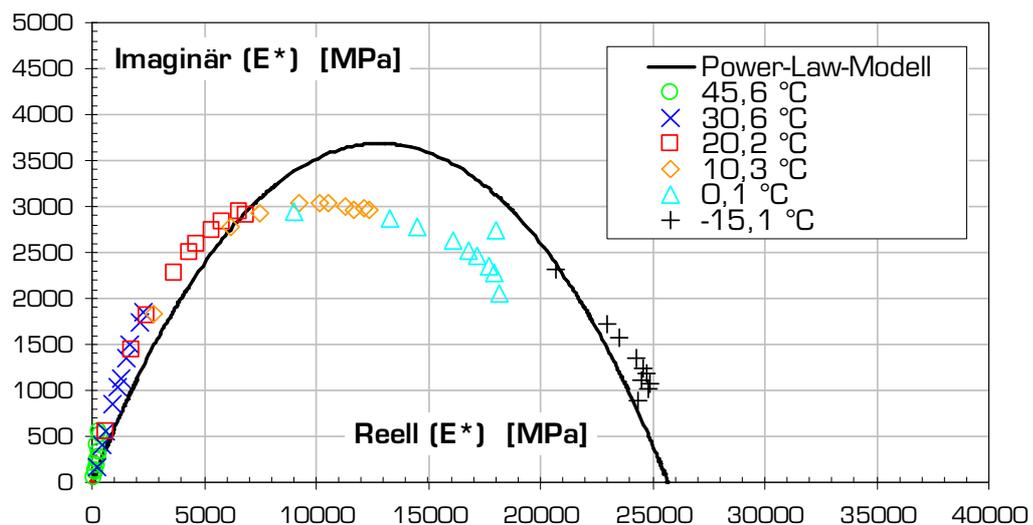


Abbildung 22: Bestimmung der Modellparameter für das Power Law Modell am Cole-Cole-Diagramm für SMA 11 70/100, (Spiegl, 2007, verändert)

Eine andere Möglichkeit zur Darstellung der Versuchsergebnisse ist das Black-Diagramm (Abbildung 23), in welchem die Beziehung zwischen dem Phasenwinkel ϕ und dem dynamischen Steifigkeitsmodul E^* enthalten ist.

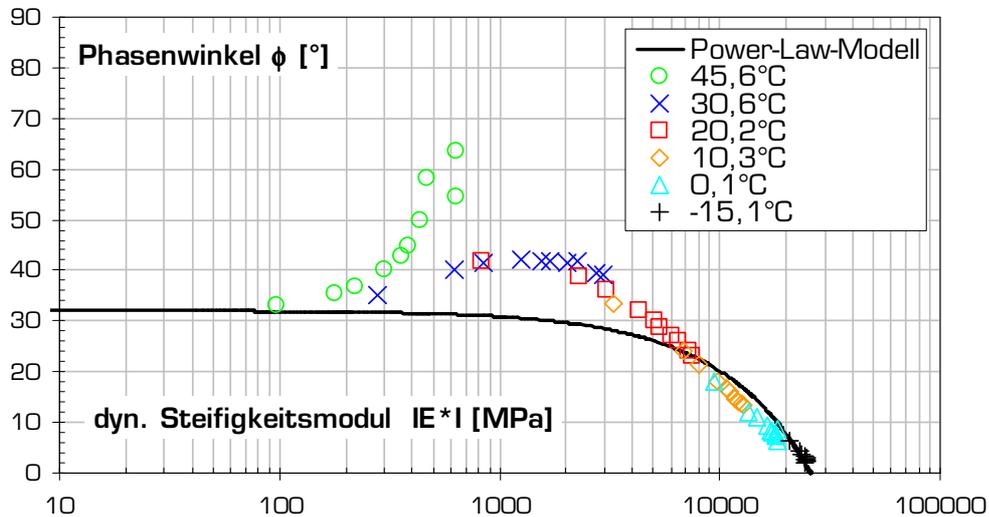


Abbildung 23: Black-Diagramm für SMA 11 70/100, (Spiegl, 2007, verändert)

Die Dämpferparameter J , k und τ werden aus den Ergebnissen der statischen Kriechversuche abgeleitet. Diese Modellparameter ermöglichen gegenüber Modellen mit linearen Dämpfereigenschaften (z.B. Maxwell-Modell) eine bessere Approximation der Kriechgeschwindigkeit. Im statischen Kriechversuch wird ein Probekörper mit einer konstanten Zugspannung σ_0 belastet und die Verformungen während der gesamten Versuchszeit laufend gemessen. Die Versuche können für unterschiedliche Laststufen sowie bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden, um die Temperatur- und Lastabhängigkeit der Materialantwort zu erhalten. Mit Hilfe der Verformungen lässt sich der Dehnungsverlauf $\epsilon(t)$ über die Versuchsdauer ermitteln (vgl. Gleichung 3). Das Verhältnis von Dehnung $\epsilon(t)$ zur konstanten Spannung σ_0 führt auf die Kriechnachgiebigkeit $J(t)$ mit

$$J(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0}. \quad \text{Gleichung 73}$$

Die Ermittlung der beiden Parameter H und p erfolgt mit Hilfe einer linearen Annäherung an die, aus dem statischen Kriechversuch resultierende und nach der Zeit abgeleitete Kriechnachgiebigkeit (siehe Abbildung 24).

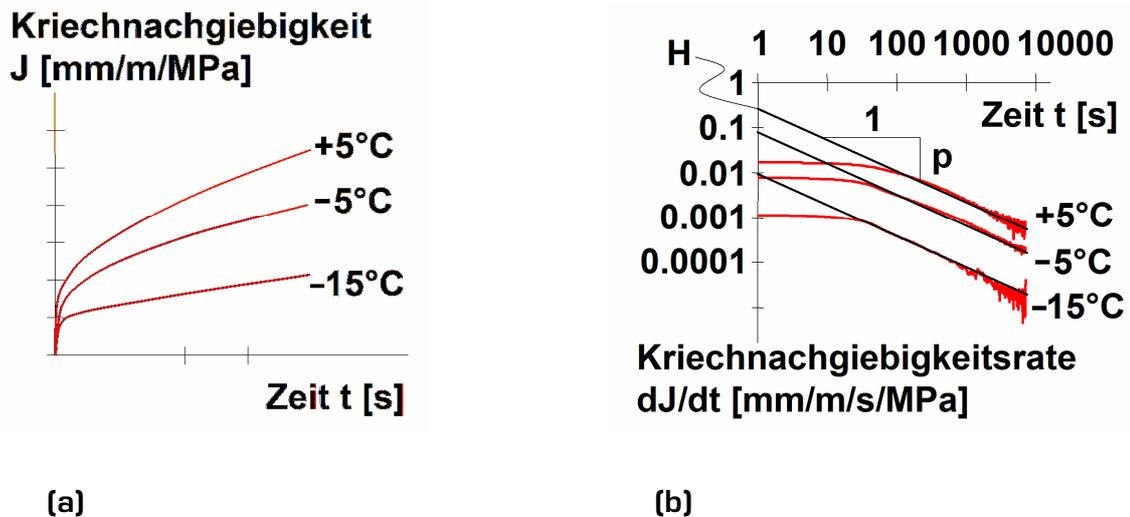


Abbildung 24: Statische Kriechversuchsergebnisse, Schematische Darstellung: (a) Kriechnachgiebigkeit und (b) Kriechnachgiebigkeitsrate mit linearen Approximationsfunktion zur Ermittlung der Power Law Modellparameter H und p (Wistuba, 2007)

Das Diagramm (a) enthält die Relation zwischen der Kriechnachgiebigkeit $J(t)$ und der Zeit t . Es ist abzulesen, dass der Anstieg der Kriechnachgiebigkeit, die Kriechnachgiebigkeitsrate dJ/dt , mit fortschreitender Zeit geringer wird. Im Diagramm (b) sind im doppelt logarithmischen Maßstab die Kriechnachgiebigkeitsrate dJ/dt und die Zeit t aufgetragen. Aus diesem Diagramm können die Modellparameter H und p (vgl. Gleichung 70) durch eine Approximationsfunktion ermittelt werden (Lackner et al., 2004).

Die beiden Parameter H und p von Bitumen sind temperaturabhängig, was aus den beiden Diagrammen in Abbildung 25 ersichtlich ist, wobei die Abhängigkeit von p annähernd linear ist. In dieser Abbildung wurde bei H_b Bitumen der Index b für Bitumen eingeführt, in der Folge wird auf diesen Index verzichtet.

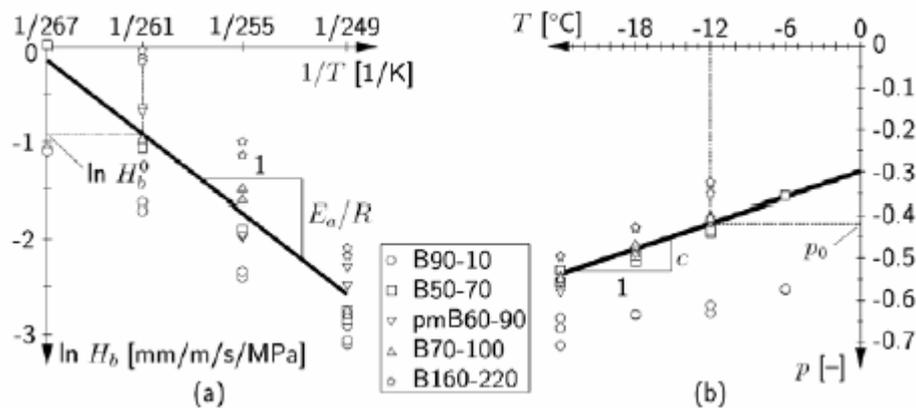


Abbildung 25: H_b und p für verschiedene Bindemittel und verschiedene Temperaturen (a) Temperaturabhängigkeit von H_b und (b) linearer Zusammenhang zwischen p und T (Lackner et al., 2004)

Der Parameter $p(T)$ kann näherungsweise durch die Relation

$$p(T) = p_0 + c \cdot (T - T_0), \quad \text{Gleichung 74}$$

mit

p_0 Konstanter Wert [-] zum Zeitpunkt $T = T_0$

c Konstante [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

T aktuelle Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]

T_0 Referenztemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

berechnet werden.

Die Abhängigkeit des Parameters H ist im Gegensatz dazu nicht linear und resultiert aus der Zunahme der Molekularbewegung bei steigender Temperatur. Dieses Phänomen lässt sich durch das Arrhenius Gesetz

$$H(T) = H_0 \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad \text{Gleichung 75}$$

beschreiben (Lackner et al., 2004). In dieser Gleichung sind

T aktuelle Temperatur [K]

T_0 Referenztemperatur [K]

H Kriechnachgiebigkeitsrate [s/MPa]

H_0 Kriechnachgiebigkeitsrate zum Zeitpunkt $t=\tau$ [s/MPa]

R Gaskonstante = 8,32 [J/mol/K]

E_a Aktivierungsenergie [J/mol].

2.5.2 Huet-Modell

Betrachtet man das zuvor beschriebene Power-Law-Modell und erweitert den Modellaufbau um einen zusätzlich in Serie geschalteten nichtlinearen Dämpfer so erhält man das 1963 von Huet entwickelte Modell (siehe Abbildung 26).

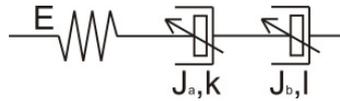


Abbildung 26: Huet-Modell

Die Formulierung der Kriechnachgiebigkeit erfolgt in ähnlicher Weise wie beim Power-Law-Modell, mit dem Unterschied, dass zwei zeitabhängige nichtlineare Einzelkriechnachgiebigkeiten [$J^{\text{par}1}(t)$ und $J^{\text{par}2}(t)$], welche die Eigenschaften der beiden parabolischen Dämpfer beschreiben, zu berücksichtigen sind.

$$J(t) = J^e(t) + J^{\text{par}1}(t) + J^{\text{par}2}(t) = \frac{1}{E_e} + J_a \left(\frac{t}{\tau} \right)^k + J_b \left(\frac{t}{\tau} \right)^l \quad \text{Gleichung 76}$$

Dieses Materialmodell eignet sich sehr gut zur Beschreibung des Tieftemperaturverhaltens von Asphalt bzw. Bitumen. Die Anordnung von zwei nichtlinearen Dämpfern ermöglicht eine bessere Anpassung des Kriechverhaltens an die Belastung. Das Rückkriechen lässt sich analog zum Power-Law-Modell nicht gut beschreiben, da ebenfalls eine reine Serienschaltung vorliegt (Hofko, 2006).

2.5.3 Huet-Sayegh-Modell

Im Jahre 1965 entwickelte Sayegh im Rahmen seiner Dissertation ein neues Materialmodell, welches aus der Parallelschaltung des Huet-Modells mit einer Feder besteht (siehe Abbildung 27). Die Motivation zur Entwicklung dieses Modells bestand darin, eine brauchbare Beschreibung des Rückkriechens von Asphalt zu ermöglichen.

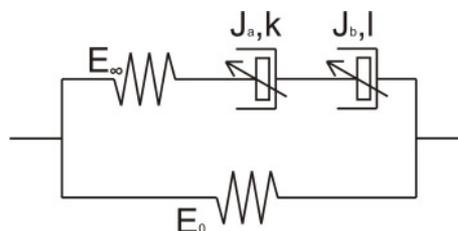


Abbildung 27: Huet-Sayegh-Modell

Die Kriechnachgiebigkeit $J(t)$ des Huet-Sayegh-Modells lässt sich im Gegensatz zu den bisher beschriebenen parabolischen Modellen nicht auf analytischem Weg herleiten. Die mathematische Beschreibung dieses Modells kann der Dissertation von Sayegh entnommen werden.

2.5.4 2S2P1D-Modell

Olard und Di Benedetto schufen durch Implementierung eines zusätzlichen linearen Dämpfers in den Ast mit den parabolischen Dämpfern des zuletzt erläuterten Huet-Sayegh-Modells ein Materialmodell mit fünf Elementen. Die Motivation zu dieser Weiterentwicklung war, ein Materialmodell zu entwickeln, welches sowohl für Asphalt als auch für Bitumen eine bestmögliche Annäherung an die realen rheologischen Eigenschaften beider Materialien bietet.

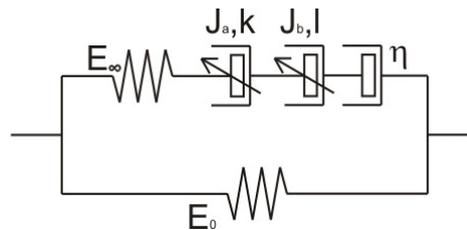
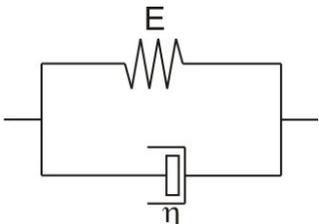
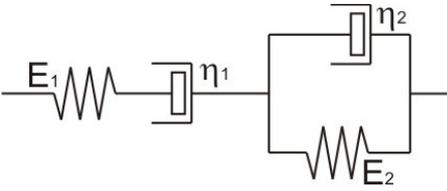
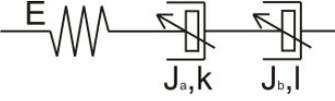
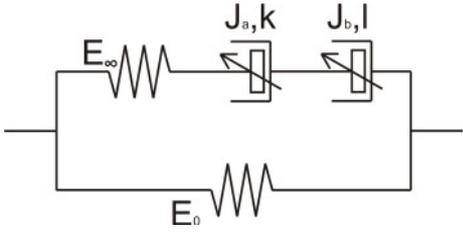
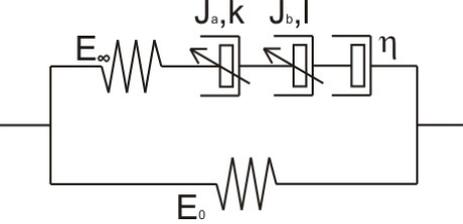


Abbildung 28: 2S2P1D-Modell

Durch die große Anzahl an in Serie angeordneten Elementen ist die mathematische Beschreibung des 2S2P1D sehr komplex. An dieser Stelle möchten wir auf die Literatur der Wissenschaftler Olard und Di Benedetto verweisen.

Tabelle 1: Übersicht der rheologischen Modelle für Asphalt und Bitumen

Modell	Schema
Maxwell	
Kelvin-Voigt	
Burgers	
Power-Law	
Huet	
Huet-Sayegh	
2S2D1P (Olard - Di Benedetto)	

3 ÜBERSICHT DER VERWENDETEN PROGRAMME

3.1 Linear-elastische Berechnungen

3.1.1 BISAR

Das auf der Mehrschichtentheorie basierende Programm BISAR (Bitumen Structures Analysis in Roads) wurde von der Firma Shell entwickelt. Die Berechnung eines mehrschichtigen Aufbaues beruht auf der Lösung der Differentialgleichung für die Biegezug- und Druckspannungen eines zweischichtigen Systems auf elastischer Unterlage von Burmister aus dem Jahr 1943.

BISAR besitzt für die Eingabe der Inputparameter und für die Darstellung der Ergebnisse eine graphische Benutzeroberfläche, über die die Festlegung der Belastung, der einzelnen Schichten und der erwünschten Punkte für die Berechnung erfolgt (siehe Abbildung 29).

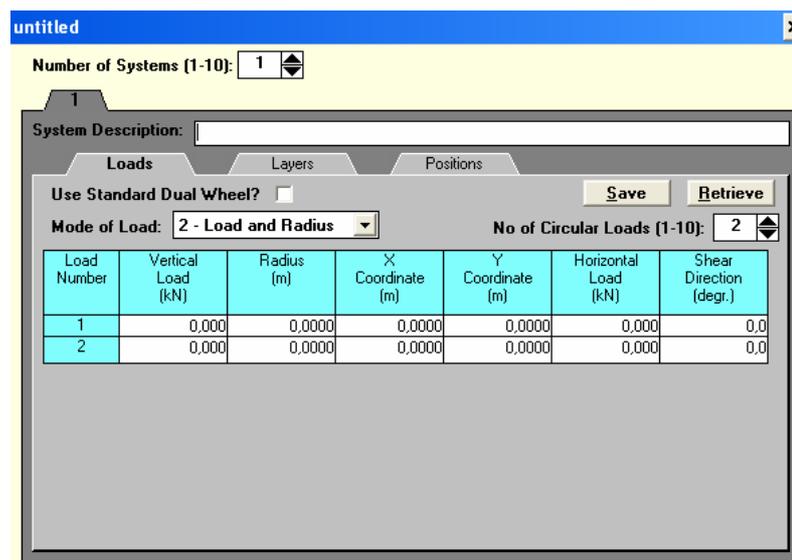


Abbildung 29: BISAR - Benutzeroberfläche

Bei der Bestimmung des Aufbaues können bis zu zehn unterschiedliche Schichten definiert werden. Für die Eingabe der Belastung stehen drei verschiedene Inputmöglichkeiten zur Verfügung:

- Spannung und Last
- Last und Radius der belasteten Kreisfläche
- Spannung und Radius der belasteten Kreisfläche.

Das Programm beschränkt die Ausgabe der Berechnungsergebnisse auf maximal zehn vordefinierte Punkte. Diese werden mit Hilfe von Koordinaten festgelegt. Bei der

Zusammenstellung der Ergebnisse kann der Benutzer zwischen einer tabellarischen Form oder einem Bericht der berechneten Ergebnisse wählen.

BISAR 3.0 - Block Results Table

	C	D	E	F	G	H	I
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21				Stress	Stress	Stress	Strain
22	X-Coordinate	Y-Coordinate	Depth	XX	YY	ZZ	XX
23	(m)	(m)	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	µstrai
24	0,000E+00	0,000E+00	1,500E-01	-1,475E-02	-9,446E-02	-1,290E-01	1,263E
25	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-01	1,919E-01	1,409E-01	-5,623E-02	3,246E
26	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-01	1,416E-02	3,954E-03	-5,623E-02	3,246E
27	0,000E+00	0,000E+00	6,500E-01	2,704E-02	2,539E-02	-1,327E-02	2,849E
28	0,000E+00	0,000E+00	6,500E-01	1,399E-03	9,881E-04	-1,327E-02	2,849E
29	0,000E+00	-1,575E-01	1,500E-01	-2,084E-02	-3,776E-02	-2,388E-01	1,519E
30	0,000E+00	-1,575E-01	3,000E-01	1,834E-01	1,450E-01	-5,453E-02	3,034E
31	0,000E+00	-1,575E-01	3,000E-01	1,319E-02	5,514E-03	-5,453E-02	3,035E
32	0,000E+00	-1,575E-01	6,500E-01	2,563E-02	2,317E-02	-1,262E-02	2,743E

Copy to Clipboard Cancel

(a)

BISAR 3.0 - Block Report

Read Selected Total X Page
64 15 64 100 1 of 2

BISAR 3.0 - Block Report
Example Project
System 1: Positions Between the Wheels and Under a Wheel

Structure				Loads										
Layer Number	Thickness (µ)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical (kN)	Stress (MPa)	Horizontal (kN)	Load (kN)	Stress (MPa)	Radius (µ)	X Coord (µ)	Y Coord (µ)	Shear Angle (Degrees)
1	4,288	1,490E+02	0,35	1	2,490E+01	1,774E+12	4,990E+00	1,099E+00	1,059E+01	0,000E+00	1,059E+01	0,000E+00	-1,575E-01	0,400E+00
2	4,288	1,490E+02	0,35	2	2,490E+01	1,774E+12	1,990E+00	1,099E+00	1,059E+01	0,000E+00	1,059E+01	0,000E+00	-1,575E-01	0,400E+00
3	4,288	1,490E+02	0,35											
4	2,490E+02													

Position Number	Layer Number	X Coord (µ)	Y Coord (µ)	Depth (µ)	XX Stress (MPa)	YY Stress (MPa)	ZZ Stress (MPa)	XX Strain (µm/m)	YY Strain (µm/m)	ZZ Strain (µm/m)	UX Displacement (µm)	UY Displacement (µm)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-1,475E-02	-9,446E-02	-1,290E-01	1,263E-06	-9,770E-06	-1,263E-05	0,000E+00	0,000E+00
2	1	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-01	1,919E-01	1,409E-01	-5,623E-02	1,919E-06	1,409E-06	-5,623E-06	0,000E+00	0,000E+00
3	2	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-01	1,416E-02	3,954E-03	-5,623E-02	1,416E-06	3,954E-06	-5,623E-06	0,000E+00	0,000E+00
4	2	0,000E+00	0,000E+00	6,500E-01	2,704E-02	2,539E-02	-1,327E-02	2,704E-06	2,539E-06	-1,327E-06	0,000E+00	0,000E+00
5	4	0,000E+00	0,000E+00	6,500E-01	1,399E-03	9,881E-04	-1,327E-02	1,399E-06	9,881E-06	-1,327E-06	0,000E+00	0,000E+00
6	1	0,000E+00	-1,575E-01	1,500E-01	-2,084E-02	-3,776E-02	-2,388E-01	-2,084E-06	-3,776E-06	-2,388E-05	0,000E+00	0,000E+00
7	1	0,000E+00	-1,575E-01	3,000E-01	1,834E-01	1,450E-01	-5,453E-02	1,834E-06	1,450E-06	-5,453E-06	0,000E+00	0,000E+00
8	2	0,000E+00	-1,575E-01	3,000E-01	1,319E-02	5,514E-03	-5,453E-02	1,319E-06	5,514E-06	-5,453E-06	0,000E+00	0,000E+00
9	2	0,000E+00	-1,575E-01	6,500E-01	2,563E-02	2,317E-02	-1,262E-02	2,563E-06	2,317E-06	-1,262E-06	0,000E+00	0,000E+00
10	4	0,000E+00	-1,575E-01	6,500E-01	2,563E-02	2,317E-02	-1,262E-02	2,563E-06	2,317E-06	-1,262E-06	0,000E+00	0,000E+00

(b)

Abbildung 30: BISAR – Darstellungsart der Ergebnisse (a) tabellarisch, (b) Bericht

Als Inputparameter für den Berechnungsvorgang mit der Software BISAR werden, neben der Definition des Aufbaus mit den zugehörigen Dicken der einzelnen Schichten, die Querdehnzahl und der E-Modul der einzelnen Materialien, der Radius der Radaufstandsfläche und die einwirkende Belastung benötigt. Als einwirkende Belastung können nur statische Einwirkungen berücksichtigt werden, was auf die Eigenschaften der Mehrschichtentheorie zurückzuführen ist. Um die Belastungsdauer und die

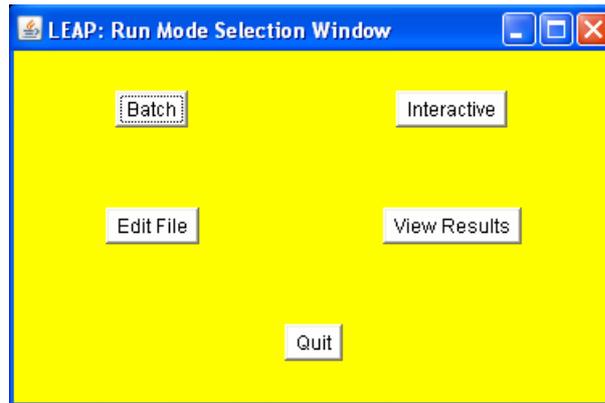
Temperatureinflüsse berücksichtigen zu können werden Asphalteeigenschaften durch einen, an die Belastung angepassten, dynamischen E-Modul E_{dyn} beschrieben. Dieser E-Modul wird aus dynamischen Versuchen in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur bestimmt. Zusätzlich zu diesen Inputparametern kann der Verbund der einzelnen Schichten untereinander mit dem Spring Compliance Parameter definiert werden. Mit Hilfe dieser Kenngröße können sämtliche Verbundzustände des Aufbaues in der Berechnung berücksichtigt werden.

3.1.2 LEAP

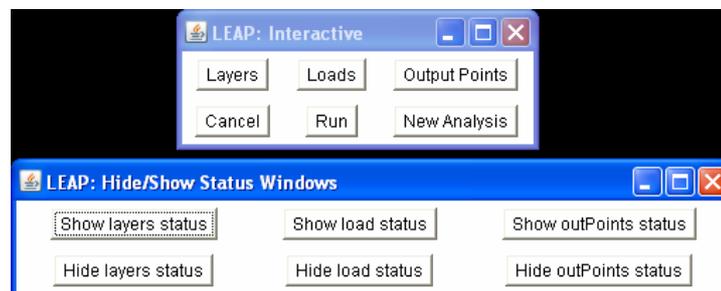
LEAP (Layerd Elastic Analysis Program) ist eine von der Symplectic Engineering Corporation entwickelte Software. Dieses Programm basiert wie BISAR auf der Mehrschichtentheorie und dient der elastischen Untersuchung von mehrschichtigen Aufbauten.

Der Aufbau des LEAP-Programms bietet dem Benutzer zwei unterschiedliche Berechnungsvorgangsweisen, den Interactive- und den Batch-Modus, an. Die Wahl der interaktiven Eingabe ermöglicht die Definition aller für die Berechnung erforderlichen Parameter mit Hilfe einer graphischen Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 6). Die Berechnung kann somit ohne Kenntnis der spezifischen Inputbefehle erfolgen. Für den Batch-Modus ist die Erstellung eines Inputfiles notwendig. Die benötigte Eingabedatei wird mit Hilfe eines Texteditors erstellt und dann in das Programm eingelesen. Das Inputfile ist in drei Blöcke aufgeteilt:

- Aufbau
- Belastung
- Ausgabepunkte der Ergebnisse.



(a)



(b)

Abbildung 31: LEAP - Benutzeroberfläche (a) Hauptfenster, (b) Interactive Mode

Die Berechnungsergebnisse werden in einer Outputdatei gespeichert. Sie können direkt nach dem Berechnungsvorgang im LEAP angezeigt werden oder nachträglich dem Outputfile entnommen werden.

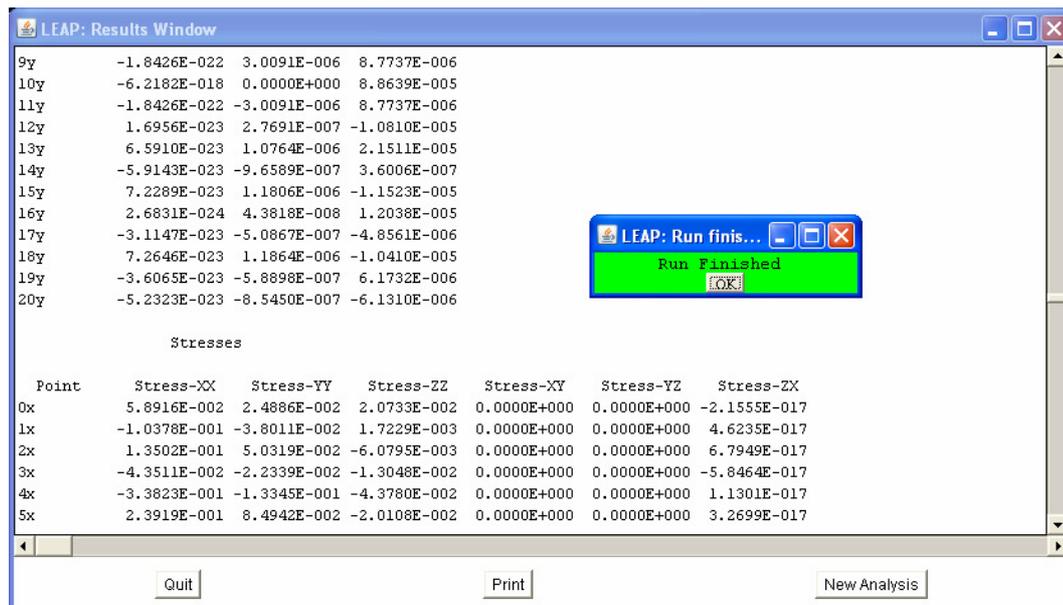


Abbildung 32: LEAP – direkte Darstellung der Ergebnisse

Im Vergleich zum Programm BISAR sind der Aufbau, die Anzahl der Lasten und die gewünschten Punkte für die Ausgabe der Ergebnisse uneingeschränkt definierbar.

Für die Festlegung des Systemaufbaus sind neben der Schichtbezeichnung folgende Inputparameter erforderlich:

- Elastizitätsmodul E
- Querdehnzahl μ
- Dicke der einzelnen Schicht
- Verbundart der Schichten (vollständiger Verbund, teilweiser Verbund, Gleiten), inklusive zusätzlichen Parameter bei der Verbundart Gleiten

Die Generierung der Belastung erfolgt durch die Bezeichnung und Größe der Last, ergänzt mit der Position der Lasteinwirkungsstelle sowie dem Radius der Lasteinwirkungsfläche.

Die Festlegung der Punkte, für die Ergebnisse berechnet und dargestellt werden sollen, erfolgt durch die Definition der entsprechenden Koordinaten dieser Stellen.

3.2 Visko-elastische Berechnungen

3.2.1 FEAP - Rahmensoftware

Die auf der Finite-Elemente-Methode basierende Software FEAP (Finite-Element-Analysis-Program) wurde an der Universität von Berkeley (Kalifornien, USA) entwickelt. Der Haupteinsatzbereich dieses Programms liegt in der Lehre sowie in der Forschung und Entwicklung. Mit Hilfe dieses Werkzeuges können verschiedenste zwei- und dreidimensionale Aufgabenstellungen wie Balken, Fachwerke, Scheiben, Platten und Schalentragwerke berechnet werden. Zusätzlich zu den bereits im Programm vorhandenen Elementen (z.B. linear-elastische Berechnung) ist die Implementierung neuer Berechnungsmethoden und Materialmodelle möglich.

Die Grundlage jeder Berechnung ist die in einem Editor erstellte Eingabedatei (Inputfile). Diese Datei enthält sämtliche Befehle und Parameter welche für die Analyse des untersuchten Problems erforderlich sind. Insbesondere sind Kommandos für Eingabe, Berechnung und die Ergebnisausgabe zu definieren. Die Programmiersprache ist ähnlich zu Fortran. Für komplexe Aufgaben ist es von Vorteil, die Eingabedatei mit verschiedenen Unterdateien zu verknüpfen.

```

FEAP * * 3D model street
0,0,0,3,3,8, ! numnp,numel,nummat,ndim,ndof,nodes/element
!
=====
! PARAMETERS FOR ANALYSIS
=====
!
GLOBal
  SMALl
!
=====
! SIMULATION CONDITIONS
=====
!
! set parameters of 3D street simulation
!
PARAMeter
  v = 4 ! segments in vertical (=z) direction
  t = 2 ! segments in concentric dimension !bei t=2 bug
  s = 2 ! segments in radial direction
  a = 40 ! [mm] thickness (wear course)
  b = 210 ! [mm] thickness (base course)
  c = 200 ! [mm] thickness (unbound base course)
  d = 300 ! [mm] thickness (unbound subbase)
  e = 1250 ! [mm] thickness (subgrade)
  F = 115000 ! [N] axle load
  h = 1000 ! [mm] horizontal dim. (symmetry line - tire1)
  i = 300 ! [mm] horizontal dim. (tire1)
  j = 2000 ! [mm] horizontal dim. (tire1 - tire2)
  k = 300 ! [mm] horizontal dim. (tire2)
  l = 700 ! [mm] horizontal dim. (tire2 - right boundary)
  lx = 2000 ! [mm] 3rd dimension of street
  r = 150 ! [mm] radius of circular load
  n = 1 ! [-] number of elements in wear course
  tc = 1.0*3600 ! [s] cooling time
  wl = 0.02 ! [s] duration of wheel-load impact
  x = 100 ! [mm] horizontal size of finite elements
  y = 2 ! 10 ! number of increments
  q = -0.8135 ! [MPa] aequivalent tire pressure
  pi = 4*atan(1.0)
!
=====

```

Abbildung 33: Ausschnitt einer FEAP - Eingabedatei

Die Makrobefehle der Berechnungseingabe dienen zur Spezifikation des analysierten Finite-Elemente-Netzes und beinhalten Angaben über:

- globale Problemdefinition (z.B. 2D, 3D,...)
- Netzaufbau (geometrische Abmessungen, Netzteilung, Elementtyp)
- Materialeigenschaften (Materialmodell, Materialparameter, Elementzuordnung)
- Belastung und Belastungsbedingungen
- Lagerungs- bzw. Randbedingungen

Grundsätzlich ist die Reihenfolge der Eingabemakrobefehle frei wählbar.

Die Kommandos für die Problemlösung enthalten Makrobefehle zur Vorgabe der Rechenalgorithmen. Abschließend sind Makrobefehle zur Definition der auszugebenden Berechnungsergebnisse einzugeben. Die Ergebnisse können sowohl graphisch am Bildschirm als auch listenförmig in einer Ausgabedatei dargestellt werden. Weiters besteht die Möglichkeit nach Beendigung des Rechengvorganges interaktiv Makrobefehle (siehe Tabelle 2) auszuführen, um z.B. einen Bereich vergrößert darzustellen, die Ansicht zu ändern oder eine andere Spannungskomponente anzeigen zu lassen (siehe Abbildung 34).

Vor Beginn einer Berechnung sind alle erforderlichen Angaben in der Eingabedatei festzulegen. Die Berechnung erfolgt mit der Ausführungsdatei „Feap.exe“, welche nach Eingabe oder Bestätigung der Verknüpfung auf die Eingabedatei(en) zugreift. Der Berechnungsverlauf und die Berechnungsergebnisse werden in der Ausgabedatei archiviert.

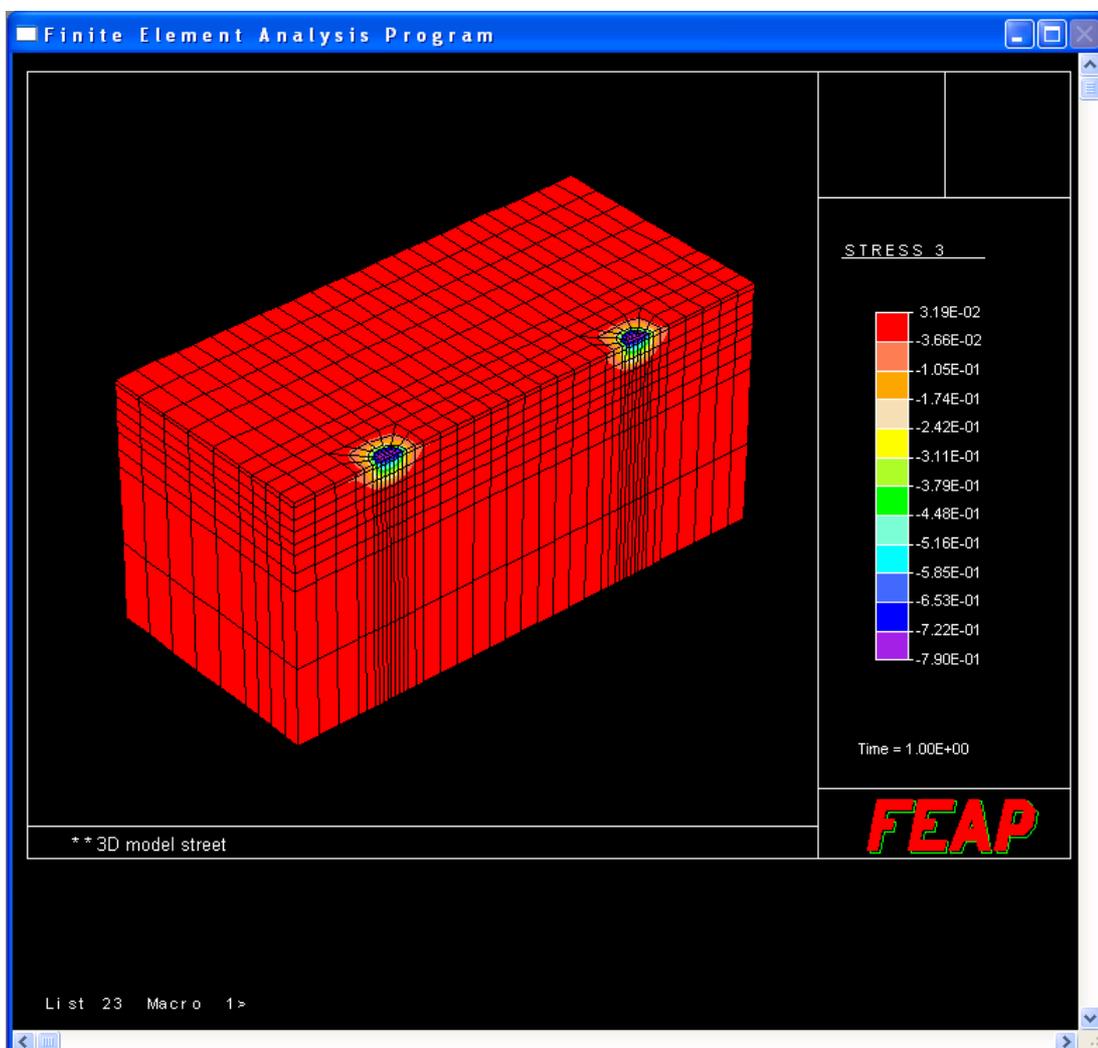


Abbildung 34: FEAP – Benutzeroberfläche zur interaktiven Makroeingabe

Tabelle 2: Beispiele für FEAP Makrobefehle

Aufgabe	Makro	Makro- befehl	Funktion
Ende der Makrobefehlsfolge	end	end	Ende ohne Erstellung einer Restart-Datei
	exit	exit	Ende mit Erstellung einer Restart-Datei
Ausgabe	plot	axis	Darstellung der Achsen
		boun	Darstellung der Achsen
		defo	Darstellung der Randbedingungen
		elem	Darstellung der Elemente
		load	Darstellung der Belastung
		mesh	Netzdarstellung
		node	Darstellung der Knoten
		stress	Darstellung der gewünschten Spannung
Hilfe	help	help	Anzeige der verfügbaren Makrocommandos eines Makors

3.2.2 FEAP 2D

Die zweidimensionale visko-elastische Anwendung setzt sich aus den nachfolgenden Bausteinen zusammen.

3.2.2.1 Verkehrsmodell

Die Verkehrsbelastung entspricht einer Achslast von 115 kN. Diese Achslast wird durch äquivalente Streckenlasten ersetzt, wobei hierfür je Rad vier Lasteinleitungsstellen definiert sind (siehe Abbildung 35).

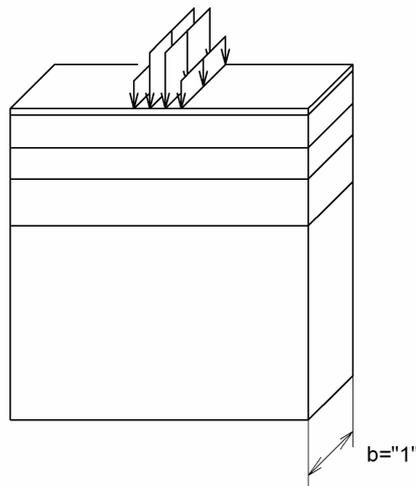


Abbildung 35: FEAP 2D – Lasteinleitung

3.2.2.2 Temperaturmodell

Die Temperaturverteilung wird mit der Temperaturberechnungssoftware „temp1d.exe“ berechnet. Die Grundlagen der Temperaturberechnung sind im Kapitel 2.2.2 erläutert. Grundsätzlich wird eine Abkühlrate von 5°C je Stunde angenommen.

3.2.2.3 Materialmodell

Das rheologische Materialverhalten wird durch das Power-Law-Modell gemäß Kapitel 2.5.1 beschrieben. Die gebundenen Schichten sind durch folgende Materialparameter charakterisiert:

- Wärmedehnzahl α_t [1/K]
- Querdehnzahl ν [-]
- Glasmodul E_{inf} [MPa]
- Initiale Kriechnachgiebigkeit J_a [1/MPa]
- k-Wert [-].

Die ungebundenen Schichten und der Untergrund werden durch die Querdehnzahl ν und den E-Modul E_1 beschrieben.

3.2.2.4 Strukturmodell

Für den Berechnungsvorgang entspricht das zweidimensionale Netz einem dreidimensionalen Körper mit einer fiktiven Breite von einem Meter (vgl. Abbildung 35). Die Lagerungsbedingungen sind in Abbildung 36 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die horizontale Verschiebung der ungebundenen Schichten durch seitliche Auflager verhindert ist.

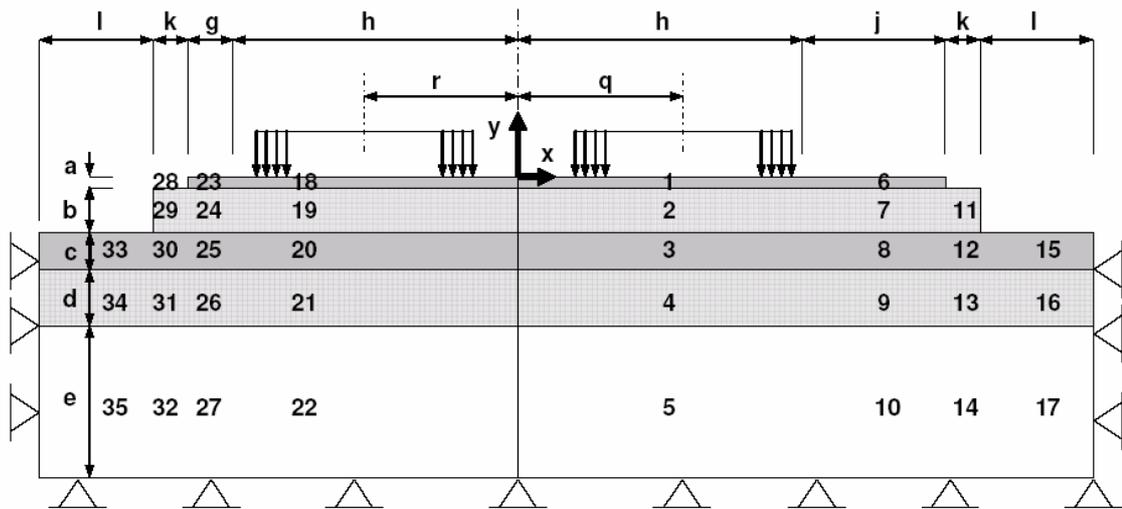


Abbildung 36: Strukturmodell FEAP 2D (Wistuba, 2007)

3.2.3 FEAP 3D

3.2.3.1 Verkehrsmodell

Die Verkehrsbelastung wird mit einer Achslast von 115 kN definiert. Diese Achslast wird symmetrisch auf die Kreisfläche zweier Räder mit einem Kreisdurchmesser von 0,30 m aufgeteilt, wobei die Lasteinleitung durch eine Topflast (Gleichlast) erfolgt (siehe Abbildung 37).

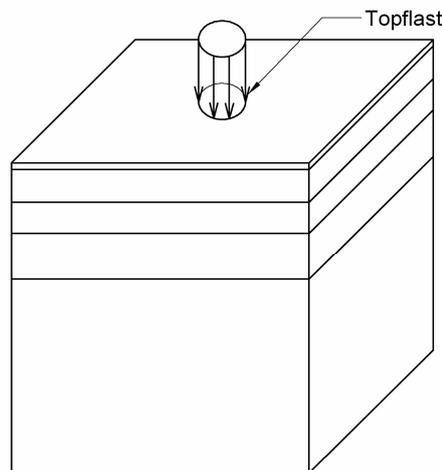


Abbildung 37: FEAP 3D – Lasteinleitung

3.2.3.2 Temperaturmodell

Die Temperaturberechnung wird analog zur zweidimensionalen Anwendung mit der eindimensionalen Temperaturberechnungssoftware „temp1d.exe“ durchgeführt. Detaillierte Angaben dazu erfolgen in Abschnitt 5.1.2.

3.2.3.3 Materialmodell

Die Simulation des zeitlichen Materialverhaltens erfolgt durch das Power-Law-Modell (siehe 2.5.1). Die zur Beschreibung der gebundenen Schichten erforderlichen Materialparameter sind:

- Wärmedehnzahl α_t [1/K]
- Querdehnzahl ν [-]
- Glasmodul E_{inf} [MPa]
- Initiale Kriechnachgiebigkeit J_a [1/MPa]
- k-Wert [-].

Sämtliche ungebundenen Schichten werden durch die Querdehnzahl ν und den E-Modul E_1 charakterisiert.

3.2.3.4 Strukturmodell

Nachfolgend wird der Aufbau des Strukturmodells näher erläutert. Die Abmessungen des Netzes sind im „I3Dstreet_v3“-file definiert. Weiters sind in diesem Inputfile auch die Größe der Verkehrslast, sämtliche Materialparameter (E-Modul, Querdehnzahl) sowie die Lagerungsbedingungen festgelegt.

Die Zuordnung der Materialkennwerte zu den einzelnen Schichten und die vertikale Unterteilung der Teilschichten, also die Höhe der Finiten Elemente, erfolgt für jede einzelne Schichte in den „layer“-files. Grundsätzlich ist das Gesamtsystem in drei Hauptblöcke, „Tire“, „Betwblock“ und „Restblock“ gegliedert. Diese Hauptblöcke definieren die Netzteilung in der Grundrissebene (siehe Abbildung 38). Die Größe der Belastung wird, wie bereits beschrieben, im Inputfile bestimmt, die Zuordnung auf einzelne Netzelemente erfolgt im separaten „pressure“-file.

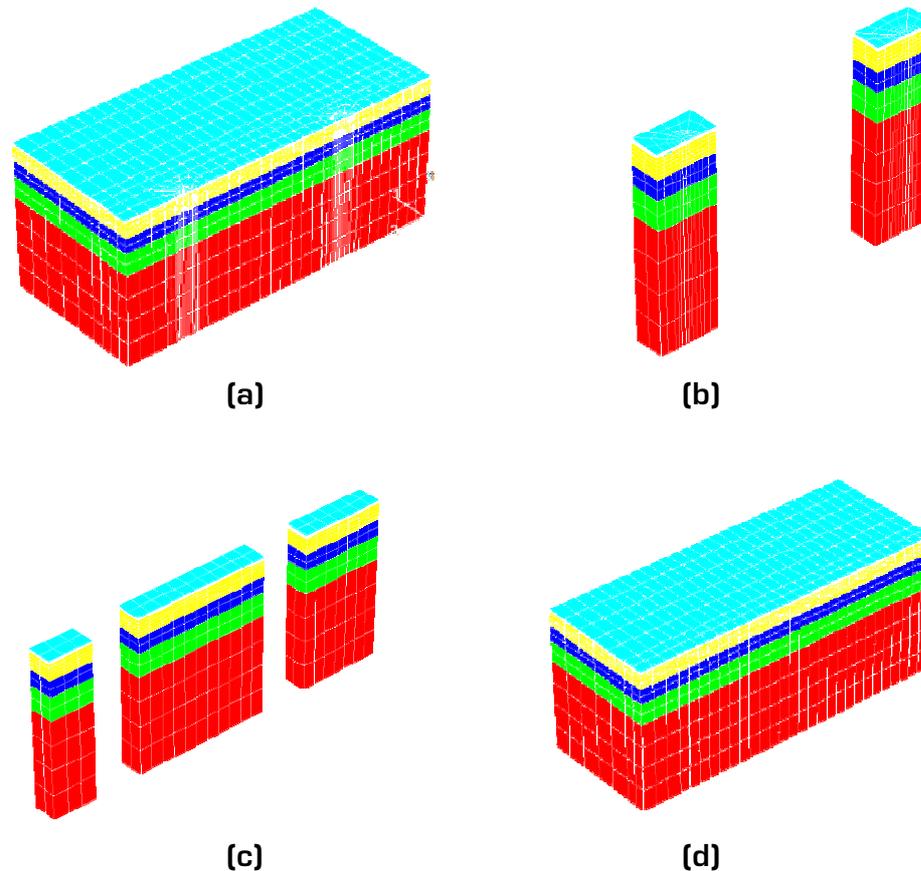


Abbildung 38: Zusammensetzung des Finite-Elemente-Netzes (a) Gesamtsystem; (b) Tire; (c) Betwblock; (d) Restblock

3.2.3.5 Plausibilitätskontrolle

In diesem Abschnitt der Diplomarbeit wird die Programmversion „3Dstreet_v3“ untersucht. Diese Version berechnet, unter Zugrundelegung eines linear-elastischen Materialmodells, Spannungen und Verformungen aufgrund von einwirkenden äußeren Lasten (Verkehrslast) für einen Straßenquerschnitt. Das untersuchte Straßenmodell ist ein zweifach symmetrisches System. Zur Verringerung des Rechenumfanges sowie der Rechenzeit werden die vorliegenden Symmetrieeigenschaften ausgenutzt. Die Berechnung erfolgt daher nur auf einem Viertel des zu untersuchenden Bereiches unter Festlegung entsprechender Randbedingungen auf den Symmetrieachsen.

An einem Kontrollmodell soll zunächst überprüft werden, ob die Reduktion des Systems auf ein Viertel seiner Ausdehnung, sowie die Wahl der Lagerungsbedingungen auf den Symmetrieachsen korrekt ist. Diese Kontrolle erfolgt an einem, im Grundriss adaptierten, Modell. Das gewählte Kontrollmodell ist ein Quadrat, welches mittig durch eine Topflast belastet wird. Die Symmetrieachsen sind die Koordinatenachse_1 sowie die Koordinatenachse_2.

a) Kontrolle der Symmetriebedingungen aufgrund des Verlaufs der 1- 2 und 3-Spannungen

Im ersten Schritt der Plausibilitätskontrolle wird analog zum zuletzt beschriebenen Programm „3Dstreet_v3“ ein Viertel des Kontrollmodells untersucht, welches nachfolgend mit Kontrollmodell_1 bezeichnet wird. Dies geschieht auf Grundlage der bereits aufgelisteten Hauptblöcke durch Entfernen des zweiten Radaufstandbereiches einschließlich seiner näheren Umgebung sowie durch Veränderung der Begrenzungen der verbleibenden Blöcke. Weiters wird eine Transformation des Koordinatensystems durchgeführt, sodass der Koordinatenursprung mit dem Mittelpunkt des Kontrollmodells (Kontrollmodell_3) zusammenfällt. Dieser Bearbeitungsschritt ist nicht zwingend notwendig, bringt jedoch Vorteile und Vereinfachungen für die weitere Erstellung von Kontrollmodell_2 und Kontrollmodell_3. Abschließend werden sämtliche Lagerungsbedingungen an die vorliegende Situation angepasst [siehe Abbildung 38(b)]. Die roten Linien stellen die unverschieblichen Lagerungsbedingungen dar.

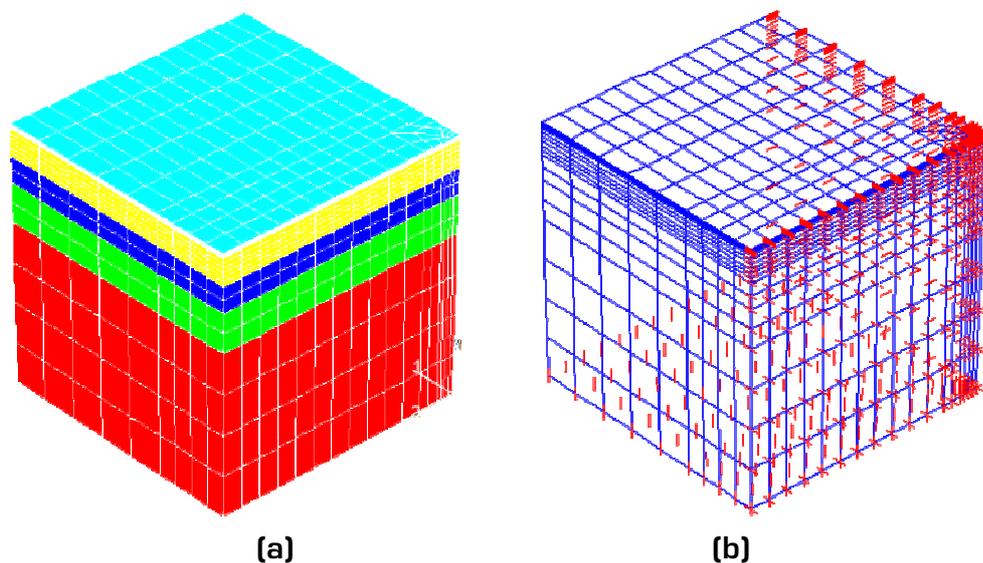
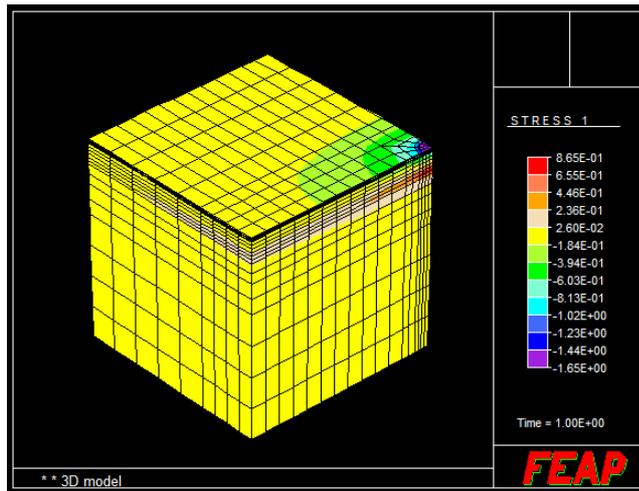


Abbildung 39: Kontrollmodell_1; (a) Netzansicht; (b) Lagerungsbedingungen

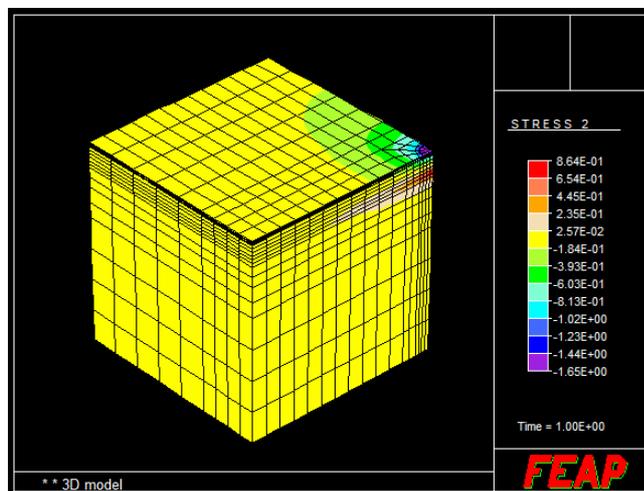
Die errechneten Spannungen des Kontrollmodells_1 müssen folgende Bedingungen erfüllen:

- (1) Die qualitative und quantitative Gleichheit des Verlaufes der σ_1 -Spannungen in Bezug auf die Koordinatenachse_1 mit dem Verlauf der σ_2 -Spannungen in Bezug auf die Koordinatenachse_2.
- (2) Die Symmetrie der σ_3 -Spannungen bezüglich der Achse _1-2, die mit der Koordinatenachse_1 sowie der Koordinatenachse_2 einen Winkel von 45° einschließt.

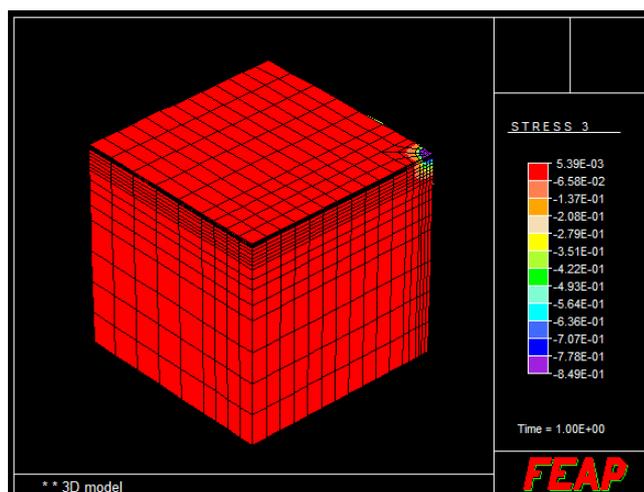
Gemäß Abbildung 40 (a) und Abbildung 40 (b) ist zu sehen, dass der Verlauf der Spannungen σ_1 und σ_2 der ersten Bedingung genügt. Aus der Abbildung 40 (c) ist die radiale Symmetrieeigenschaft der σ_3 -Spannungen erkennbar. Durch diese Eigenschaft ist auch die zweite der beiden aufgestellten Bedingungen erfüllt.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 40: Spannungsverläufe Kontrollmodell_1; (a) σ_1 ; (b) σ_2 ; (c) σ_3

b) Kontrolle der Symmetriebedingungen um die Koordinatenachse_1

Der zweite Schritt der Plausibilitätskontrolle ist die Erstellung von Kontrollmodell_2. Als Basis wird dazu das Kontrollsystem_1 herangezogen. Das Kontrollmodell_2 besteht aus der Zusammensetzung von Kontrollmodell_1 mit dem um die Koordinatenachse_1 gespiegelten Kontrollmodell_1. Die Programmierung erfolgt durch Erweiterung der Blocks „Betwblock“ und „Restblock“ sowie der Erweiterung des „pressure“-files mit den um die Koordinatenachse_1 gespiegelten Elementen. Dabei ist zu beachten, dass die Richtung der Netzgenerierung im Grundriss gegen den Uhrzeigersinn erfolgt. Daher ist es nicht nur ausreichend die Koordinaten mit negativem Vorzeichen zu versehen, die Reihenfolge der Eckpunkte der Elemente ist ebenso anzupassen. Die Anpassung der Lagerungsbedingungen an die neue Situation schließt die Adaptierung dieses Kontrollmodells ab.

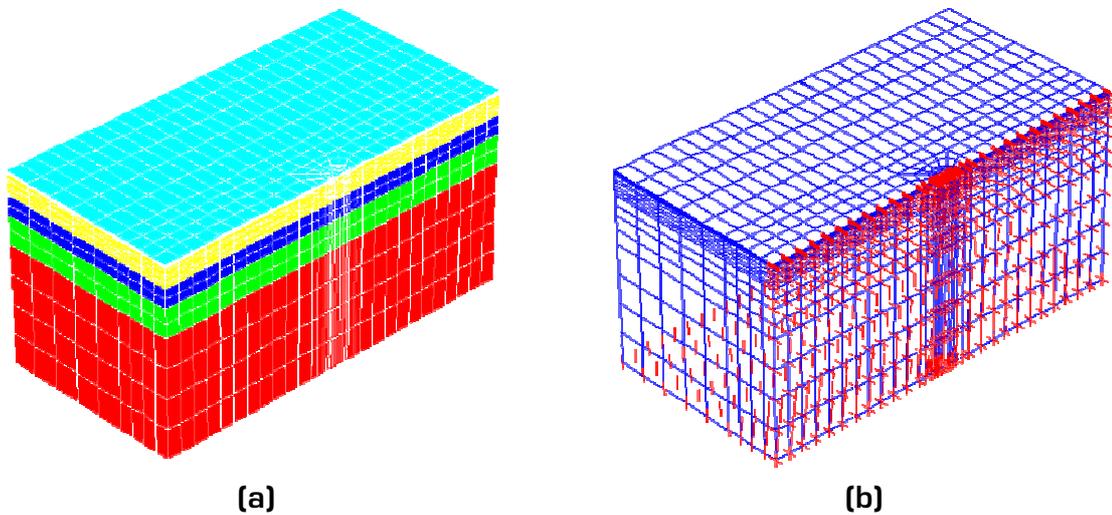
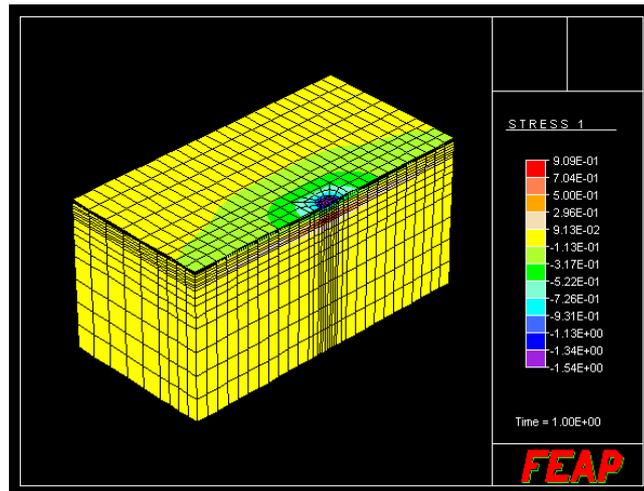


Abbildung 41: Kontrollmodell_2; (a) Netzansicht; (b) Lagerungsbedingungen

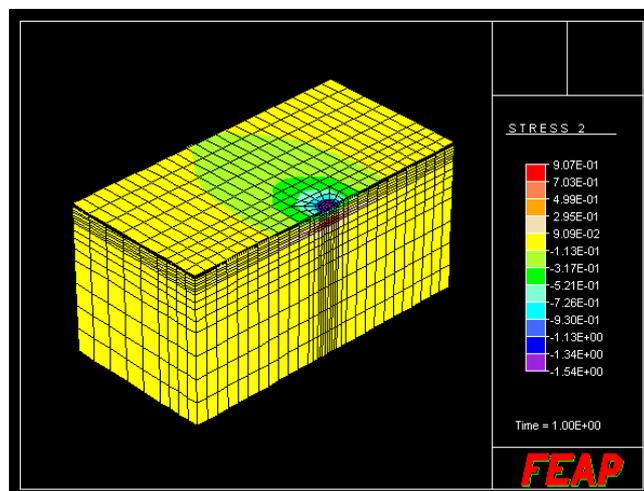
Die Ergebnisse der Spannungsberechnung für Kontrollmodell_2 (siehe Abbildung 41) müssen folgende Bedingungen erfüllen:

- (1) Die qualitative und quantitative Gleichheit des Verlaufes der σ_1 -Spannungen in Bezug auf die Koordinatenachse_1 mit dem Verlauf der σ_2 -Spannungen in Bezug auf die Koordinatenachse_2.
- (2) Symmetrie der Spannungsverläufe der Spannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 bezüglich der Koordinatenachse_1.
- (3) Alle drei Spannungsverläufe für den von Kontrollmodell_1 und Kontrollmodell_2 gemeinsam enthaltenen Bereich müssen qualitativ und quantitativ identisch sein.

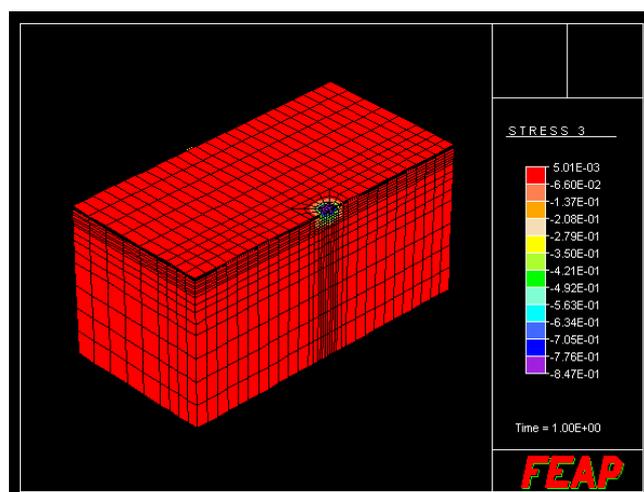
Bei Betrachtung von Abbildung 40 und Vergleich mit Abbildung 42 ist zu sehen, dass sämtliche Bedingungen eingehalten sind.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 42: Spannungsverläufe Kontrollmodell_2; (a) σ_1 ; (b) σ_2 ; (c) σ_3

c) Kontrolle der Symmetriebedingungen um die Koordinatenachse_2

Im dritten und letzten Schritt dieser Plausibilitätskontrolle wird nun das obig beschriebene Kontrollmodell_3 erstellt, welches aus einem Quadrat besteht, auf das eine mittige kreisförmige Last einwirkt [siehe Abbildung 43 (a)]. Die Generierung erfolgt gleichsam zur Generierung von Kontrollmodell_2, wobei Kontrollmodell_2 als Basis herangezogen wird und die Spiegelung um Koordinatenachse_2 erfolgt. Die Lagerungsbedingungen an den Symmetrieachsen werden ebenfalls angepasst [Abbildung 43(b)].

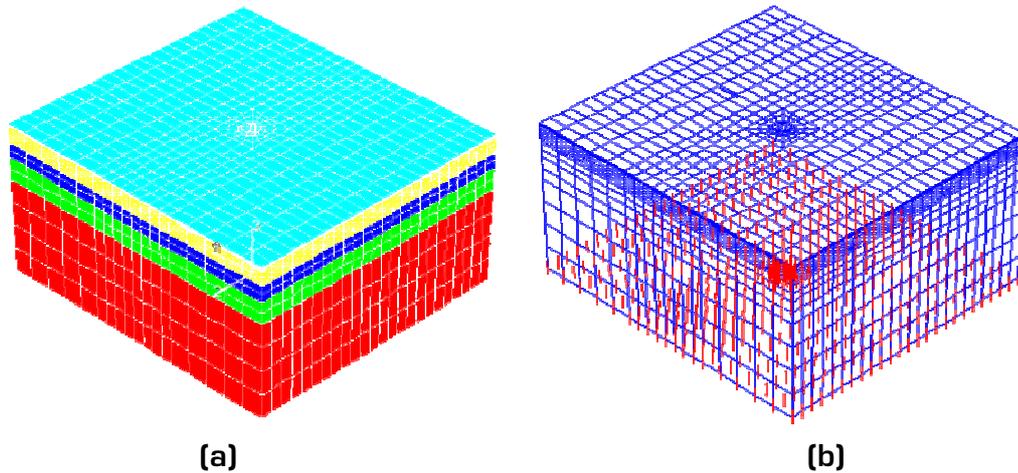


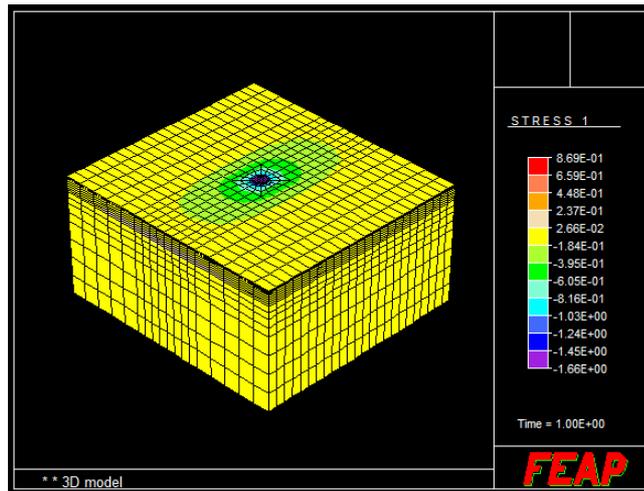
Abbildung 43: Kontrollmodell_3; (a) Netzansicht; (b) Lagerungsbedingungen

Die bisher aufgestellten Bedingungen für die Spannungsverläufe gelten ebenfalls für Kontrollmodell_3, wobei diese noch um die Bedingung der Symmetrie von σ_1 , σ_2 und σ_3 bezüglich der Koordinatenachse_2 zu erweitern sind.

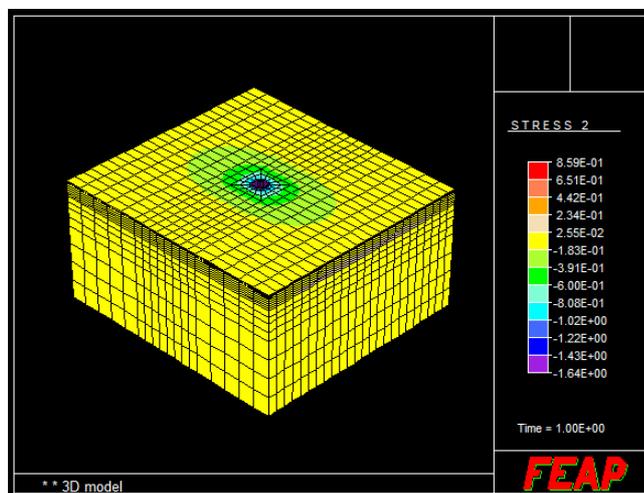
Die Ergebnisse der Spannungsberechnung für Kontrollmodell_3 (siehe Abbildung 43) müssen folgende Bedingungen erfüllen:

- (1) Die qualitative und quantitative Gleichheit des Verlaufes der σ_1 - Spannungen in Bezug auf die Koordinatenachse_1 mit dem Verlauf der σ_2 - Spannungen in Bezug auf die Koordinatenachse_2.
- (2) Symmetrie der Spannungsverläufe der Spannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 bezüglich der Koordinatenachse_1.
- (3) Symmetrie der Spannungsverläufe der Spannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 bezüglich der Koordinatenachse_2.
- (4) Alle drei Spannungsverläufe für den von Kontrollmodell_1, Kontrollmodell_2 und Kontrollmodell_3 gemeinsam enthaltenen Bereich müssen qualitativ und quantitativ identisch sein.

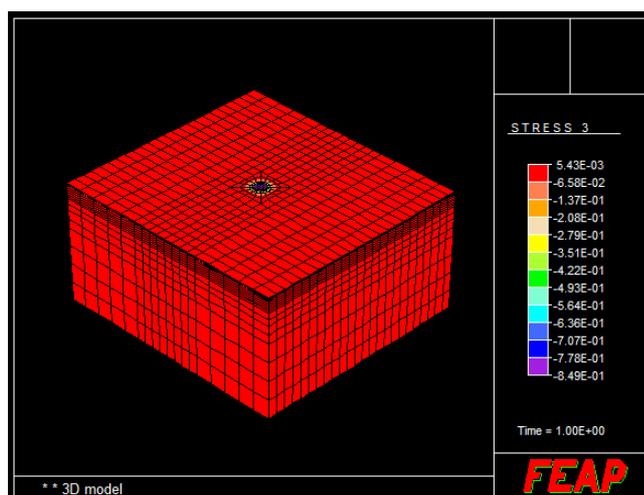
Bei Betrachtung der Abbildung 44 und Vergleich mit Abbildung 42 sowie Abbildung 40 ist zu sehen, dass sämtliche Bedingungen bezüglich der Symmetrieeigenschaften der Spannungsverläufe eingehalten sind.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 44: Spannungsverläufe Kontrollmodell_3; (a) σ_1 ; (b) σ_2 ; (c) σ_3

Aufgrund der Erfüllung sämtlicher aufgestellten Symmetriebedingungen wird geschlossen, dass die Erweiterung bzw. Reduktion des zweifach symmetrischen Systems mit entsprechender Anpassung der Lagerungsbedingungen keinen Einfluss auf die Qualität und Quantität der Ergebnisse hat. Es wird somit davon ausgegangen, dass für die nachfolgend durchgeführten Simulationen und Berechnungen, die Beschränkung auf ein Viertel des Systems richtig ist.

4 VERGLEICHENDE LINEAR-ELASTISCHE SPANNUNGSANALYSEN

In diesem Abschnitt werden Vergleichsrechnungen mit den Programmen FEAP, LEAP und BISAR anhand eines dreidimensionalen Strukturmodells bei rein elastischer Berechnung (ohne zeitabhängigem Materialverhalten) für einen bestimmten Lastfall durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse.

4.1 Basisangaben

4.1.1 Koordinatensystem

Das rechtwinkelige kartesische Koordinatensystem ist für die Berechnungen dieses Kapitels wie folgt definiert. Die Lage der Straße in Bezug auf das Koordinatensystem ist in Abbildung 45 dargestellt.

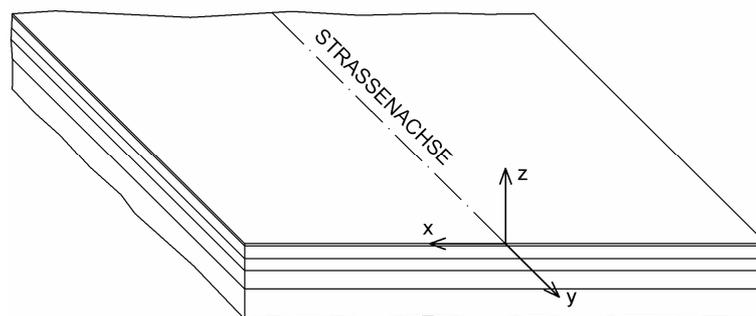


Abbildung 45: Orientierung des Koordinatensystems

Die geometrischen Abmessungen des Straßenaufbaus sowie die Spannungen werden auf dieses x, y, z -Koordinatensystem bezogen.

4.1.2 Straßenaufbau und geometrische Abmessungen

Der gewählte Straßenquerschnitt entspricht einem Oberbau der Lastklasse S (höchste Verkehrsbeanspruchung) gemäß RVS 03.08.63 (2007). Der Schichtaufbau, die geometrischen Abmessungen sowie die Belastung sind in Abbildung 46 dargestellt.

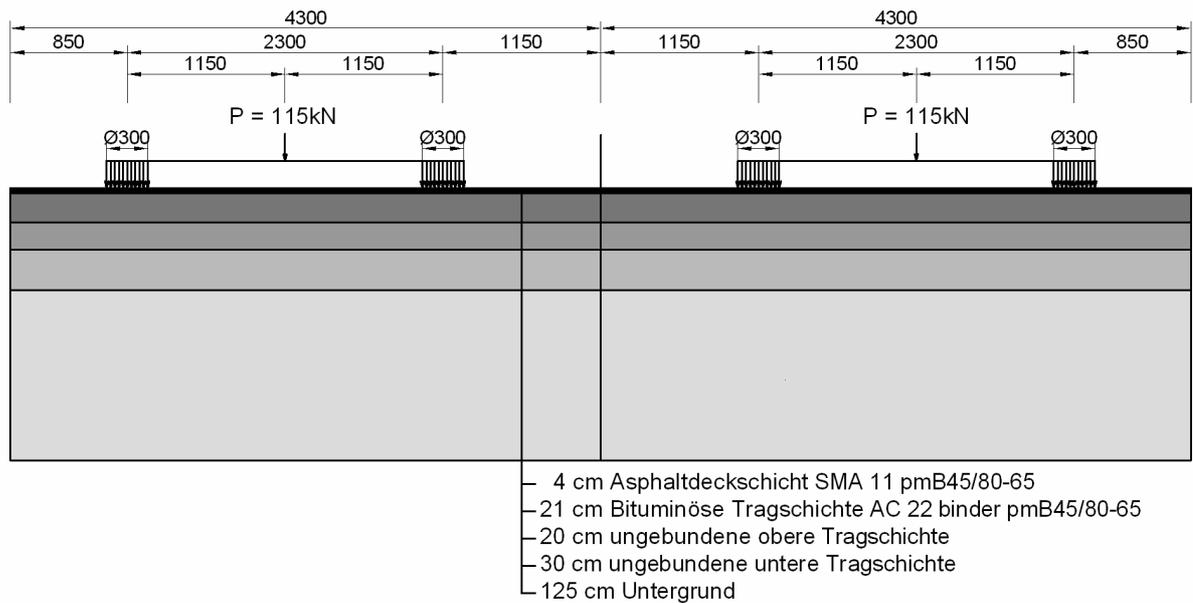


Abbildung 46: Strukturmodell des gewählten Straßenaufbaus

Die seitliche Begrenzung der Straße kann im Programm FEAP generiert werden. Im Gegensatz dazu ist in bei Anwendung von LEAP und BISAR keine Definition der Straßenbreite möglich.

4.1.3 Temperaturmodell

Im Zuge dieser linear-elastischen Berechnung werden keine thermischen Spannungen berechnet. Die Temperatur hat jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Materialparameter. Dies wird bei der Wahl der Materialkennwerte berücksichtigt.

Die Berechnung des Temperaturverlaufes innerhalb des Schichtenaufbaues erfolgt mit der Software Temp1D. Im Zuge der Berechnung werden die Schichten des Straßen-aufbaus in dünnere Teilschichten unterteilt. Dieses Programm liefert als Ergebnis einen eindimensionalen Temperaturverlauf (siehe Abbildung 47). Der resultierende Temperaturverlauf nach der Abkühlung der Straßenoberfläche von -10 °C auf -15 °C dient als Basis zur Ermittlung der Materialkennwerte.

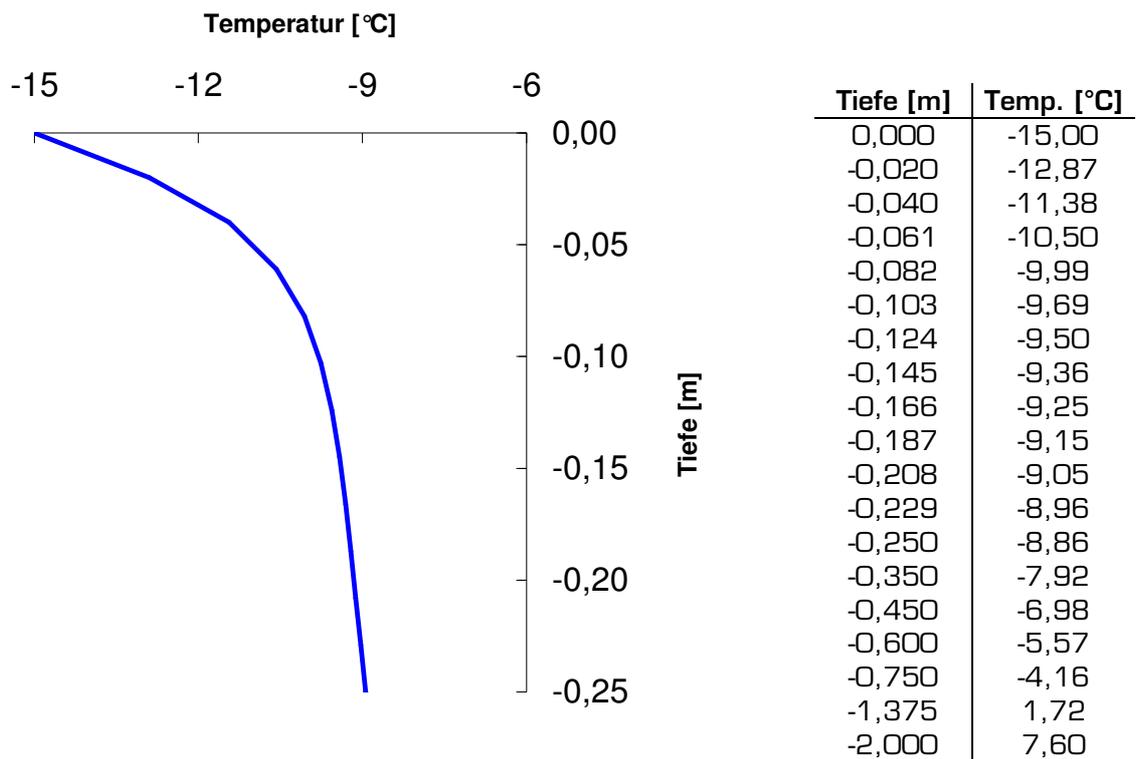


Abbildung 47: Angenommene Temperaturverteilung über die Tiefe z

4.1.4 Materialkennwerte

Zur Berechnung der, von der Temperaturverteilung abhängigen, E-Moduln der gebundenen Schichten werden vorhandene Daten aus Laborversuchen herangezogen (Spiegel, 2007). Diese Werte werden in einem Diagramm aufgetragen und daraus zwei Trendlinien (Parabel 2.Ordnung, Minimierung der absoluten Abstandsquadrate) errechnet (siehe Abbildung 48 und Abbildung 49). Die Teilung in zwei Bereiche bzw. zwei Trendlinien wird aufgrund des Bildes der vorliegenden Punkteschar gewählt. Mit Hilfe dieser Trendlinien können die Werte des dynamischen E-Moduls für bestimmte Temperaturen bestimmt werden. Die Querdehnzahl ν aller im gewählten Straßenaufbau verwendeten Schichten wird mit 0,35 gewählt.

4.1.4.1 Asphaltdeckschichte

Die Asphaltdeckschichte besteht aus der Mischgutsorte SMA 11 pmB45/80-65. Zur Bestimmung des von der Temperaturverteilung abhängigen E-Moduls stehen insgesamt sechs verschiedene Werte des dynamischen E-Moduls zur Verfügung (siehe Tabelle 3). Aus dem Temperaturverlauf (siehe Abbildung 47) ergibt sich eine Temperatur in der Mitte der Asphaltdeckschichte von -12,87 °C in 2 cm Tiefe. Für diese Temperatur erfolgt die Bestimmung des E-Moduls mit Hilfe der Trendlinie (siehe Abbildung 48). Der resultierende E-Modul und die dazugehörigen Berechnungswerte befinden sich in der Tabelle 4.

Tabelle 3: Vorhandene Materialparameter E_{dyn} der Asphaltdeckschichte (Spiegl, 2007)

Frequenz [Hz]	Temperatur [°C]	E_{dyn} [MPa]
40	-15,0	22641
	0,3	16750
	10,2	10673
	20,0	6210
	30,7	2749
	45,5	663

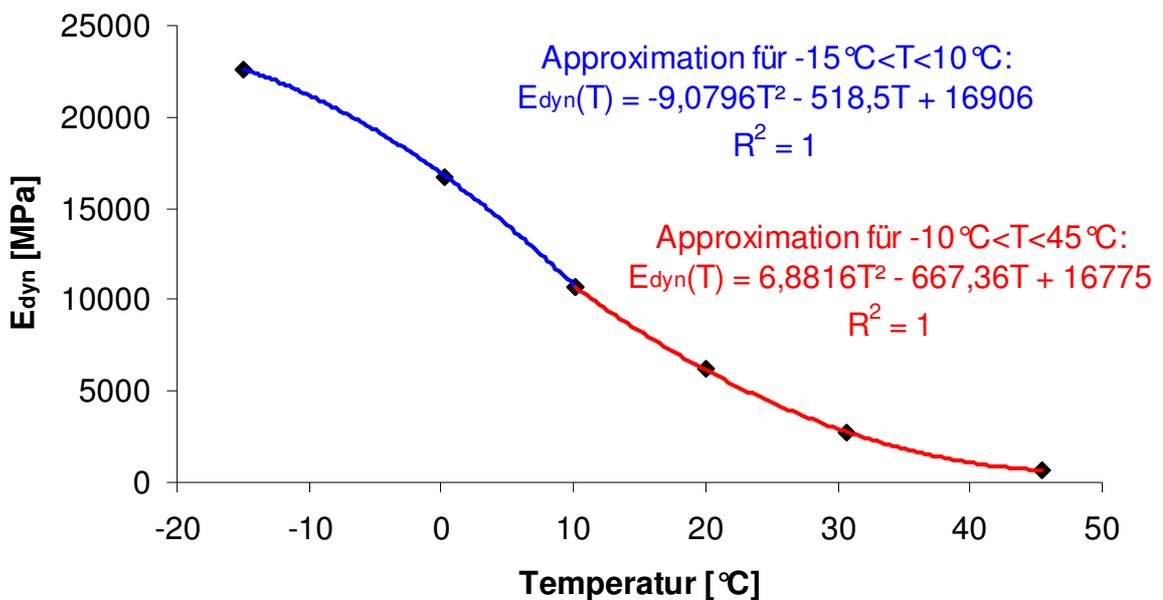


Abbildung 48: Relation zwischen E_{dyn} und T für SMA 11 pmB45/80-65, $f = 40$ Hz

Tabelle 4: Materialparameter E_{dyn} der Asphaltdeckschichte (Spiegl, 2007)

Schicht	Teilschichtdicke	mittlere Tiefe	Temperatur	E_{dyn}
	[cm]	[cm]	[°C]	[MPa]
SMA 11 pmB45/60-85	4,00	2,00	-12,87	22075

4.1.4.2 Bituminöse Tragschichte

Für die Bestimmung des dynamischen E-Modules der bituminösen Tragschichte in Abhängigkeit des Temperaturverlaufes, werden die in der Tabelle 5 angeführten temperatur- und frequenzabhängige E-Moduln sowie der Temperaturverlauf (siehe Abbildung 47) herangezogen.

Tabelle 5: Vorhandene Materialparameter E_{dyn} der bituminösen Tragschichte (Spiegl, 2007)

Frequenz [Hz]	Temperatur [°C]	E_{dyn} [MPa]
40	-14,7	27576
	-10,1	23825
	-0,1	16997
	10,4	9132
	20,2	5477
	30,5	2496

Die Abbildung 49 zeigt Trendlinien des dynamischen E-Moduls für die bituminöse Tragschichte.

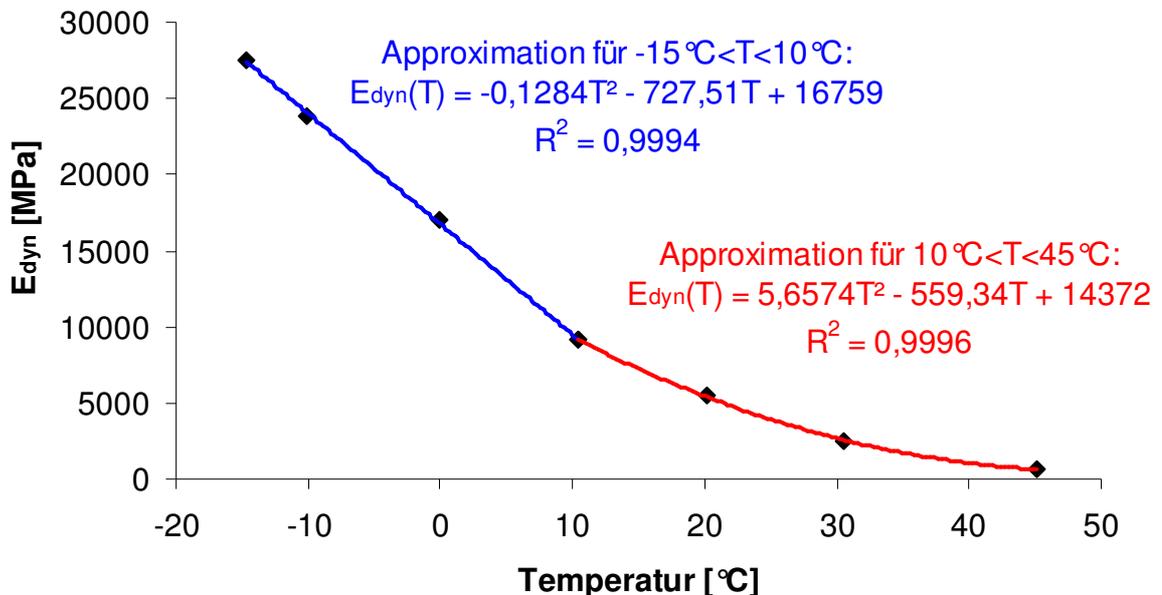


Abbildung 49: Relation zwischen E_{dyn} und T für AC 22 binder pmb45/80-65, $f = 40\text{ Hz}$

Um den Einfluss der Temperatur auf die Änderung des E-Moduls innerhalb dieser Schichte mit ausreichender Genauigkeit darstellen zu können, wird die betrachtete 21 cm dicke Tragschichte in fünf gleich große Bereiche unterteilt. Die Temperaturen der einzelnen Bereiche und die entsprechenden E-Moduln sind in der Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Materialparameter E_{dyn} der bituminöse Tragschichte

Schicht	Teilschichtdicke [cm]	mittlere Tiefe [cm]	Temperatur [°C]	E_{dyn} [MPa]
AC 22 binder pmB45/80-65	4,20	6,10	-10,50	24387
AC 22 binder pmB45/80-65	4,20	10,30	-9,69	23796
AC 22 binder pmB45/80-65	4,20	14,50	-9,36	23558
AC 22 binder pmB45/80-65	4,20	18,70	-9,15	23404
AC 22 binder pmB45/80-65	4,20	22,90	-8,96	23265

4.1.4.3 Ungebundene Schichten

Die Materialkennwerte der ungebundenen Schichten werden so gewählt, sodass schlechte Untergrundverhältnisse, wie sie im Frühjahr während der Tauperiode üblich sind, simuliert werden. Im Zuge der Simulationen werden für die ungebundenen Schichten sowie den Untergrund Materialkennwerte gemäß Tabelle 7 berücksichtigt.

Tabelle 7: Materialparameter E_1 und ν für die ungebundenen Schichten

Schicht	Schichtdicke [cm]	E-Modul E_1 [MPa]	Querdehnzahl ν [-]
Obere ungebunden Tragschichte	20	266	0,35
Untere ungebunden Tragschichte	30	140	0,35
Untergrund	125	70	0,35

4.1.5 Belastung

Als maßgebende Belastung werden zwei sich begegnende LKW mit einer Achslast von 115 kN gewählt. Die Aufteilung der Achslast erfolgt symmetrisch auf beide Reifen, die Latschfläche (Radaufstandsfläche) entspricht einem Kreis mit 30 cm Durchmesser. Die Lage der Lasteinwirkungsstellen kann der Abbildung 46 entnommen werden.

4.1.6 Berechnungsspezifische Angaben

Im Zuge der Simulation werden für alle drei Programme (BISAR, LEAP, FEAP) dieselben Inputparameter (Straßenbau, Materialkennwerte und Belastung) berücksichtigt. Die Anzahl der errechneten Werte ist nicht in allen Programmen gleich. In FEAP werden die Ergebnisse der Spannungs- und Dehnungsberechnung für jedes Element ausgegeben, in Abhängigkeit von der Elementgeometrie gibt es mehrere Werte. In den nachfolgenden Abbildungen ist je Element ein Spannungswert berücksichtigt. Im Gegensatz dazu besteht bei den Programmen LEAP und BISAR die Möglichkeit, die Ergebnisse für einen beliebigen Punkt, der mittels Koordinaten definiert wird, zu erhalten. Die Ausgabe der Ergebnisse bei BISAR ist auf maximal 10 Werte je Berechnung beschränkt. Es sind daher viele Berechnungen erforderlich um einen repräsentativen Spannungsverlauf zu erhalten. Abweichend davon können im Programm LEAP mit einer Berechnung die Ergebnisse beliebig vieler Punkte listenförmig ausgegeben werden.

4.1.7 Schnitte

Die Darstellung der errechneten Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz} erfolgt für vier verschiedene Schnittlinien (siehe Abbildung 50). Der Schnitt 1-1 zeigt die oberflächennahen Spannungen in der Fahrzeugachse, die Schnitte 2-2 und 3-3 bilden die vertikale Spannungsverteilung unter dem Rad 3 sowie in der Straßenachse ab. Die in der Nähe der bituminösen Tragschichtunterseite resultierenden Spannungen werden im Schnitt 4-4 dargestellt.

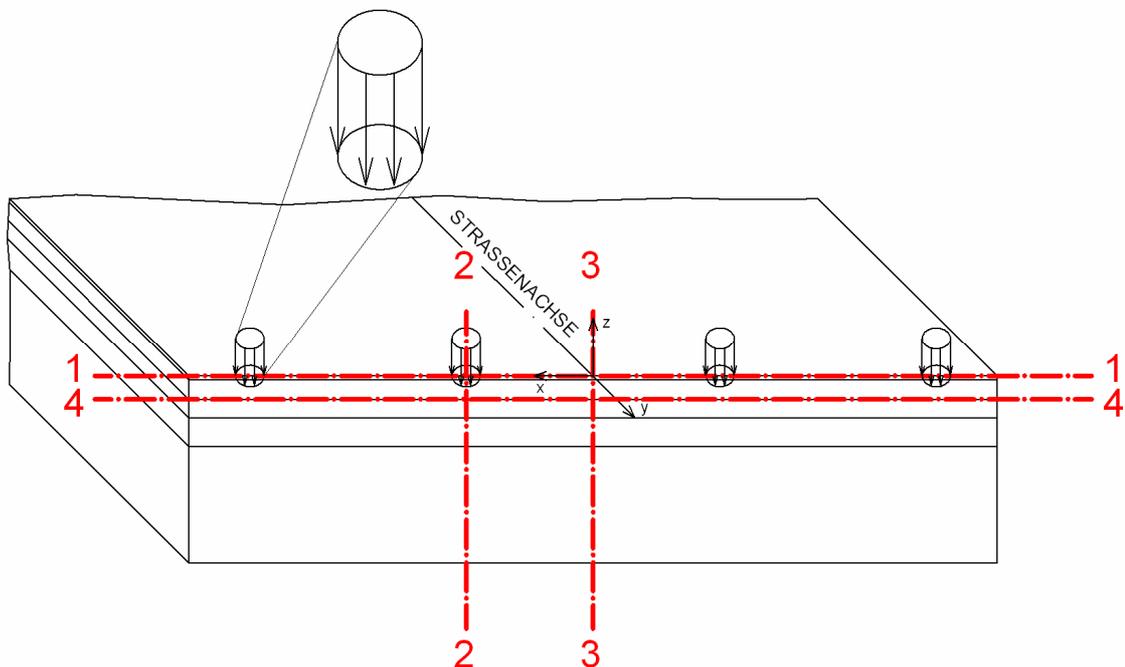


Abbildung 50 Schnittführung

4.2 Berechnungsergebnisse

Die nachfolgenden Unterabschnitte enthalten graphische Darstellungen ausgewählter Berechnungsergebnisse. In jedem Diagramm sind die Ergebnisse für alle vier Berechnungsprogramme (BISAR, LEAP, FEAP 3D und FEAP 2D) dargestellt. Die Ergebnisse aller Berechnungen sind im Anhang enthalten.

4.2.1 Oberflächennahe Spannungen (Schnitt 1-1)

Die Normalspannungen für die Schnittlinie 1-1 sind in Abbildung 52 bis Abbildung 54 dargestellt. Die Schnittlinie 1-1 verläuft parallel zur Straßenoberfläche, die x -Koordinate ist variabel und die y - sowie z -Koordinate ist konstant. Im Bereich der Lasteinleitungen ergeben sich in der Nähe der Straßenoberfläche Druckspannungen für die Normalspannungskomponenten in x - und y -Richtung. Zwischen den Rädern treten sowohl in der Straßenachse als auch bei den Fahrzeugachsen Zugspannungen auf. Dieser Spannungsverlauf ist für elastisch gebettete Platten charakteristisch. Bei dreidimensionaler Berechnung (BISAR, LEAP und FEAP 3D) sind die Druckspannungen betragsmäßig größer als die Zugspannungen. Im Bereich der Straßenachse sowie zwischen den Rädern werden bei zweidimensionaler Berechnung mit FEAP 2D hohe Zugspannungen errechnet.

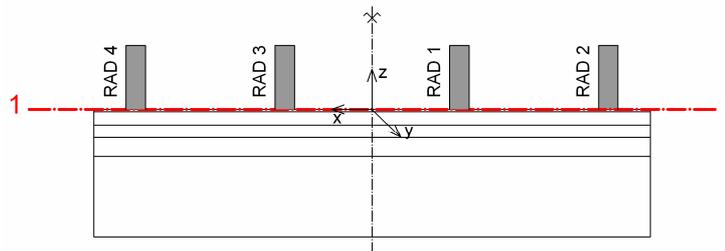


Abbildung 51: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 1-1

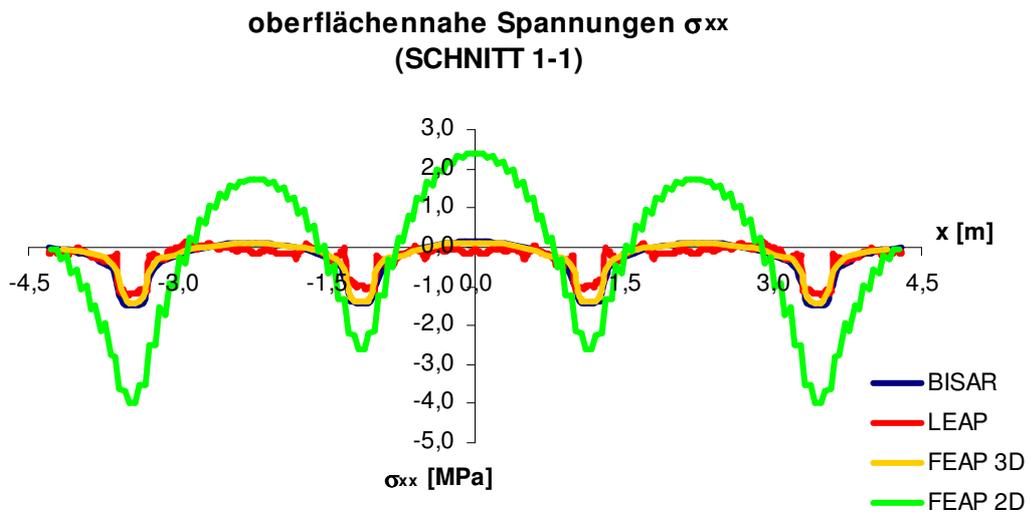


Abbildung 52: oberflächennahe Spannungen σ_{xx} im Schnitt 1-1

Der Vergleich zwischen den beiden horizontalen Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} zeigt, dass die Verläufe dieser beiden Spannungskomponenten zueinander ähnlich sind. Bei den dreidimensionalen Berechnungen sind die in Straßenlängsrichtung wirkenden Spannungen σ_{yy} betragsmäßig größer als die in Straßenquerrichtung orientierten Komponenten σ_{xx} . Im Fall der zweidimensionalen Berechnung sind die Spannungen σ_{xx} betragsmäßig größer als die Spannungen σ_{yy} .

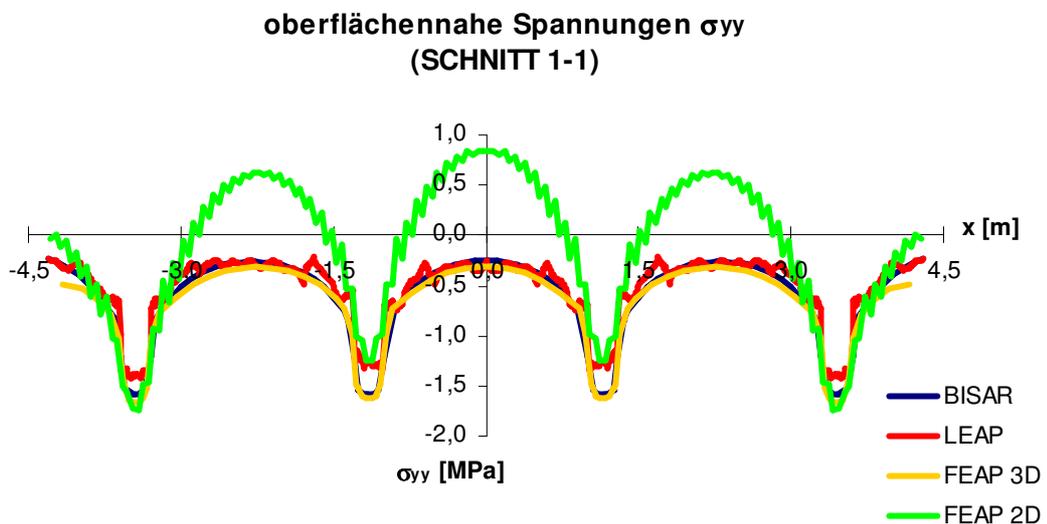


Abbildung 53: oberflächennahe Spannungen σ_{yy} im Schnitt 1-1

Die vertikale Spannungskomponente σ_{zz} ist in den Lasteinleitungsbereichen gleich der einwirkenden Belastung von 0,81 MPa (siehe Abbildung 54).

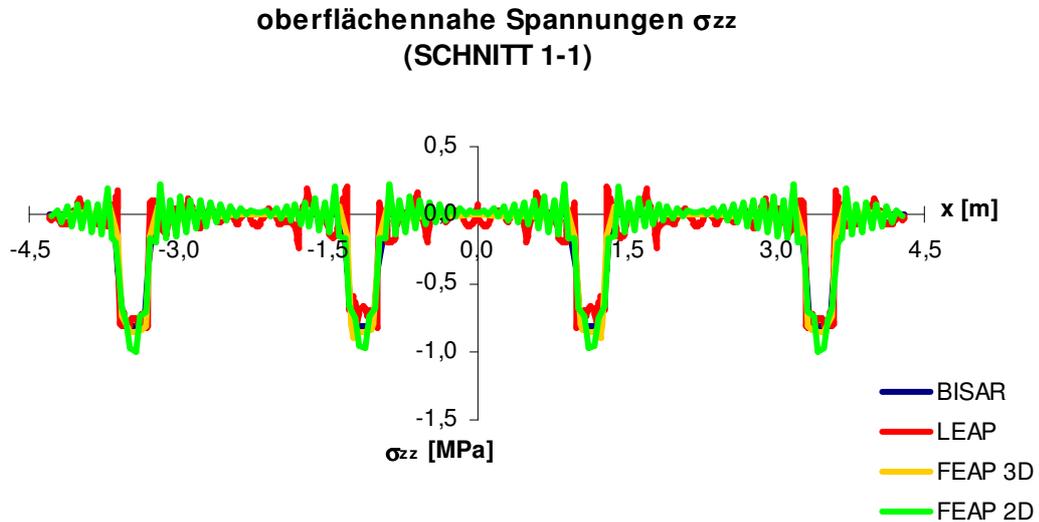


Abbildung 54: oberflächennahe Spannungen σ_{zz} im Schnitt 1-1

4.2.2 Spannungen nahe der bituminösen Tragschichtunterseite (Schnitt 4-4)

Die Darstellung der Spannungen für die Schnittlinie 4-4 erfolgt in Abbildung 56 bis Abbildung 58. Die Schnittlinie 4-4 verläuft nahe der Unterseite der bituminösen Tragschichte. Sie ist durch eine variable x - Koordinate und die konstante y - sowie z -Koordinate gekennzeichnet. An der Unterseite der bituminösen Tragschichte entstehen unterhalb der Radaufstandsbereiche in horizontaler Richtung wirkende Zugspannungen σ_{xx} und σ_{yy} . Diese Zugspannungen nehmen mit Vergrößerung des Abstandes von den Rädern ab und es bilden sich zwischen den Rädern Druckspannungen aus. Im Vergleich zu den oberflächennahen Spannungen in x - und y -Richtung haben diese Spannungskomponenten an der Unterseite der bituminösen Tragschichte umgekehrte Vorzeichen, d.h. treten an der Straßenoberfläche Zugspannungen auf, so ergeben sich für die selbe Position an der Unterseite der bituminösen Tragschichte Druckspannungen, und umgekehrt. Ähnlich zu Kapitel 4.2.1 stimmen die Ergebnisse der dreidimensionalen Berechnungen untereinander gut überein, die Resultate der zweidimensionalen Berechnung weichen aber stark davon ab.

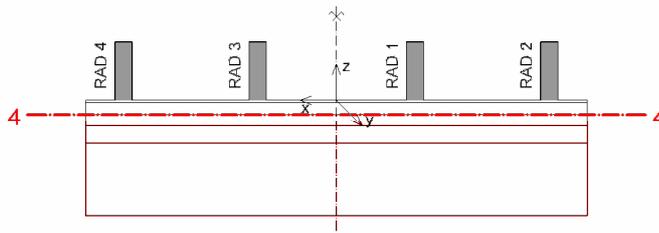


Abbildung 55: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 4-4

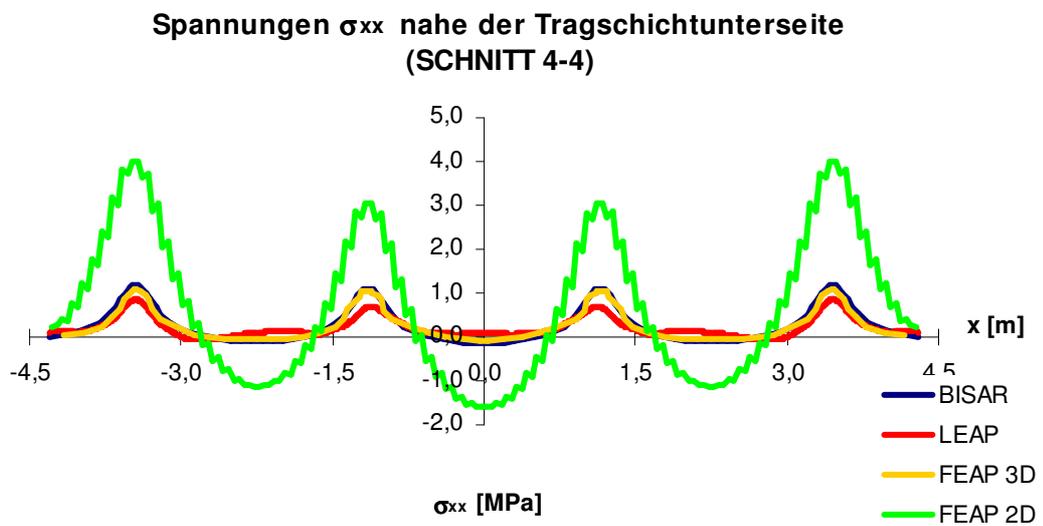


Abbildung 56: Spannungen σ_{xx} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

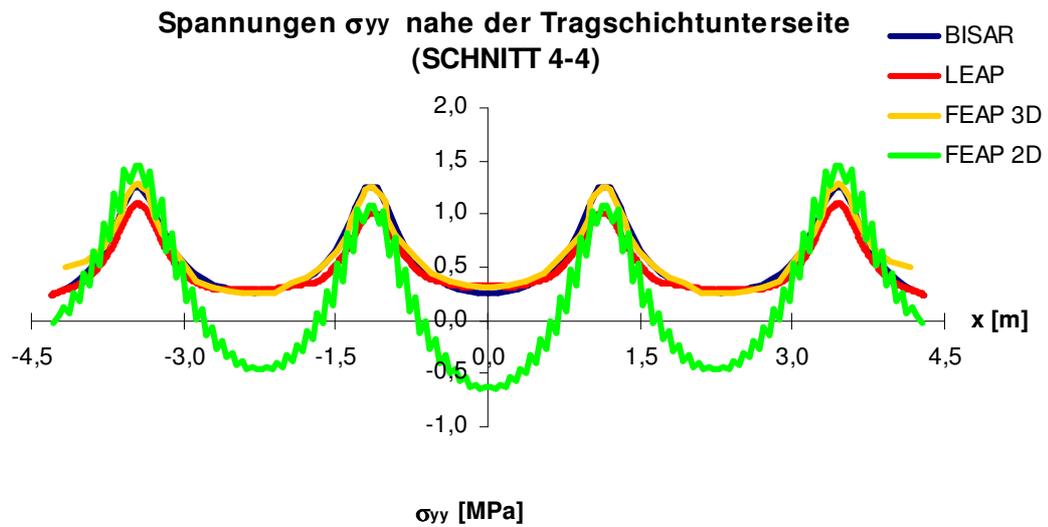


Abbildung 57: Spannungen σ_{yy} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

Die vertikalen Spannungen σ_{zz} sind an der Unterseite der bituminösen Tragschichte annähernd gleich null (siehe Abbildung 58).

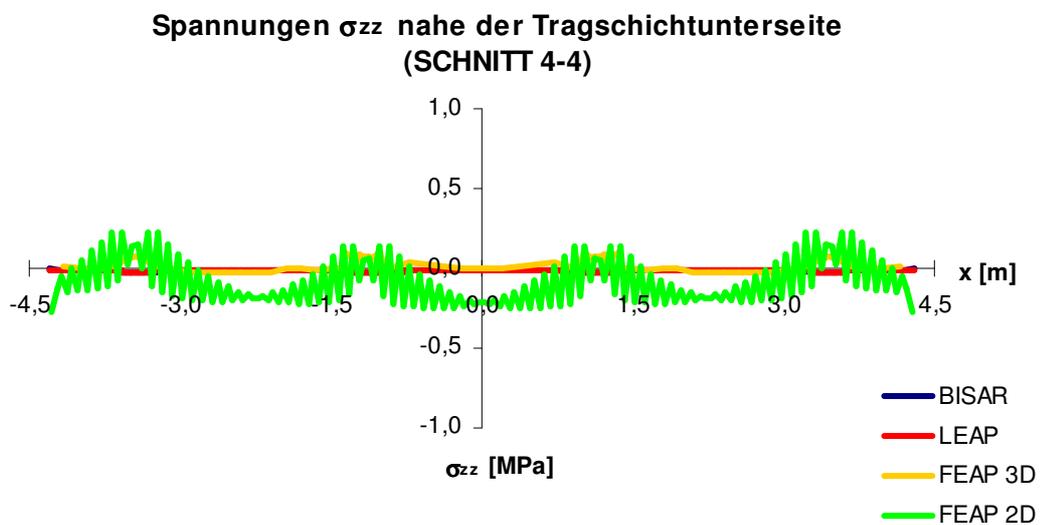


Abbildung 58: Spannungen σ_{zz} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

4.2.3 Spannungen unter dem Rad 3 (Schnitt 2-2)

In Abbildung 60 bis Abbildung 62 sind die Spannungen für die Schnittlinie 2-2 veranschaulicht. Die Schnittlinie 2-2 verläuft vertikal durch das Zentrum der Aufstandsfläche des Rades 3. Sie ist durch eine variable z- Koordinate und die konstante x- sowie y- Koordinate gekennzeichnet. Unter dem Rad 3 entstehen für die Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} an der Oberseite der gebundenen Schichten Zugspannungen und an der Unterseite Druckspannungen. Dazwischen ist der Spannungsverlauf annähernd linear. Vergleicht man diese Spannungsrichtungen, so ist zu erkennen, dass die Spannung σ_{xx} betragsmäßig etwas kleiner ist als die Spannung σ_{yy} . In den ungebundenen Schichten sind diese horizontalen Spannungen sehr gering bzw. gleich null.

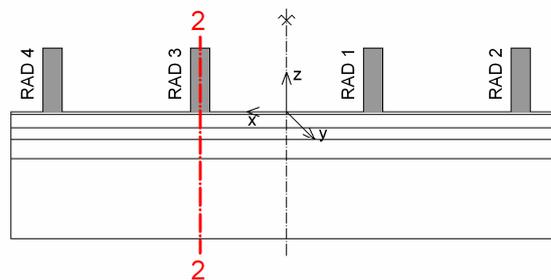


Abbildung 59: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 2-2

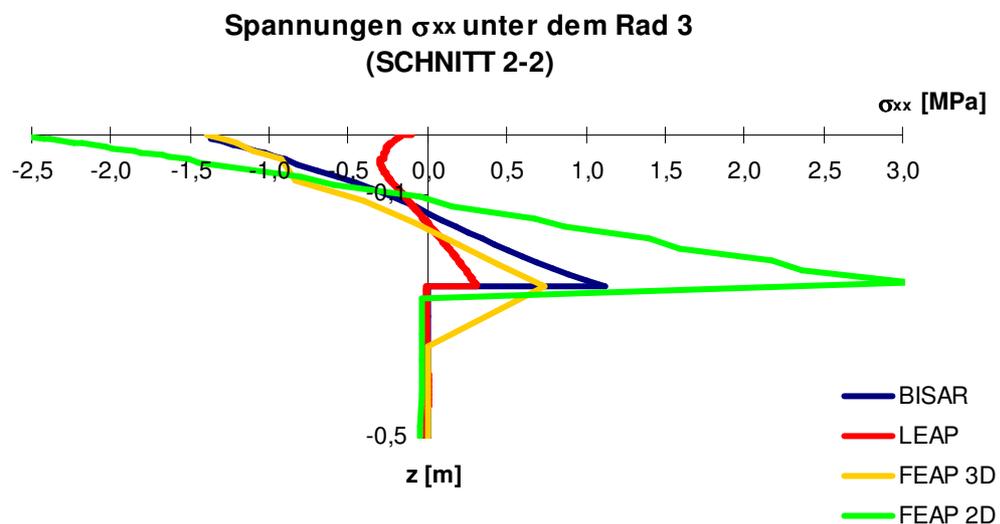


Abbildung 60: Spannungen σ_{xx} unter dem Rad 3 im Schnitt 2-2

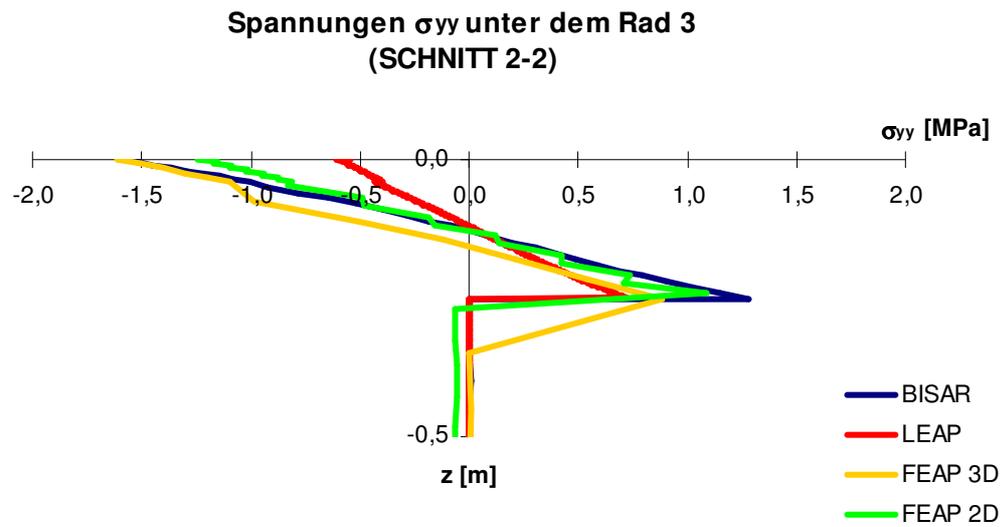


Abbildung 61: Spannungen σ_{yy} unter dem Rad 3 im Schnitt 2-2

Die vertikalen Spannungen σ_{zz} sind an der Straßenoberfläche Druckspannungen und dort betragsmäßig am größten. Diese Druckspannungen nehmen mit zunehmender Tiefe der Tragschichte ab. Unterhalb der bituminösen Tragschichte haben sie nur mehr einen kleinen Betrag, der sich mit zunehmender Tiefe in den ungebundenen Schichten nicht mehr wesentlich ändert.

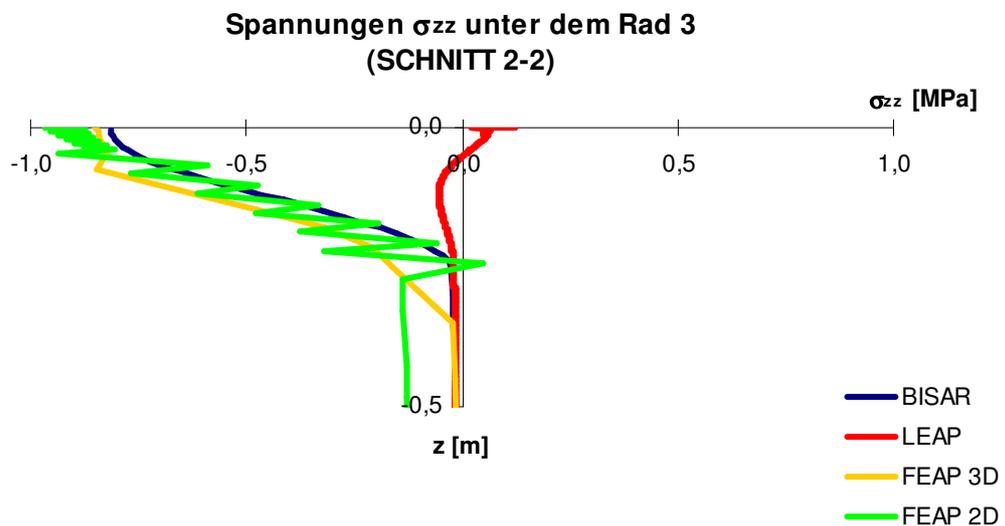


Abbildung 62: Spannungen σ_{zz} unter dem Rad 3 im Schnitt 2-2

4.2.4 Spannungen in der Straßenachse (Schnitt 3-3)

Die Darstellung der Spannungen für die Schnittlinie 3-3 erfolgt in Abbildung 64 bis Abbildung 66. Die Schnittlinie 3-3 verläuft vertikal durch die Straßenachse. Analog zur Schnittlinie 2-2 ist die z-Koordinate variabel und die x- sowie y- Koordinate konstant. Im Gegensatz zu den Bereichen der Radaufstandsfläche bilden sich an der Oberfläche horizontal wirkende Zugspannungen und an der Tragschichtunterseite Druckspannungen aus. Die horizontalen Spannungen sind bei dreidimensionaler Berechnung betragsmäßig wesentlich geringer als im Schnitt 2-2 und analog zum Schnitt 2-2 sind die Komponenten σ_{xx} geringer als σ_{yy} . Ähnlich zu den bisherigen Vergleichen werden bei der zweidimensionalen Berechnungsvariante wesentlich höhere Zug- bzw. Druckspannungen in den gebundenen Schichten berechnet.

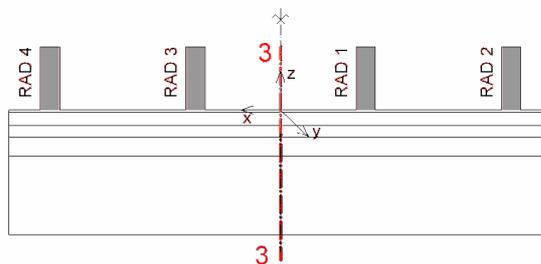


Abbildung 63: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 3-3

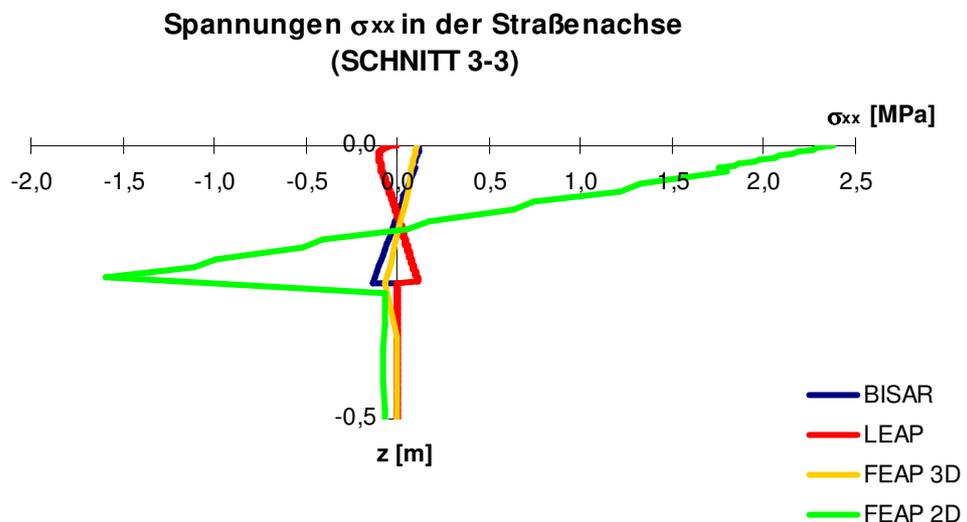


Abbildung 64: Spannungen σ_{xx} in der Straßenachse im Schnitt 3-3

Spannungen σ_{yy} in der Straßenachse (SCHNITT 3-3)

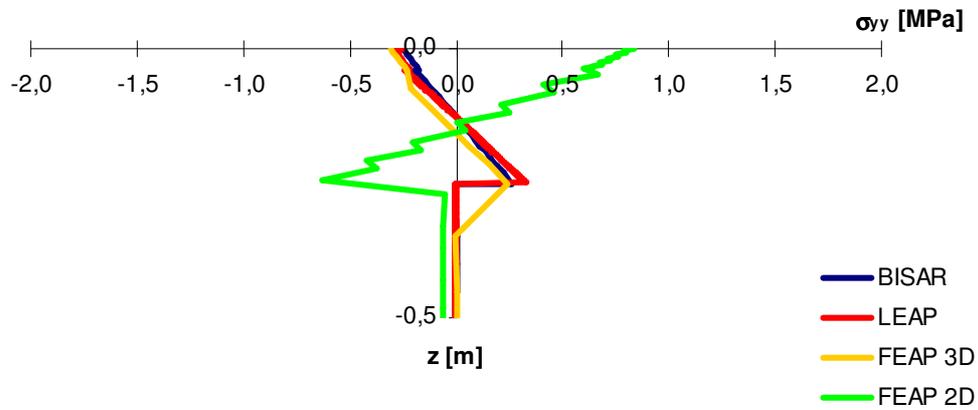


Abbildung 65: Spannungen σ_{yy} in der Straßenachse im Schnitt 3-3

Im vertikalen Schnitt durch die Straßenachse sind die errechneten Spannungen σ_{zz} ungefähr gleich null.

Spannungen σ_{zz} in der Straßenachse (SCHNITT 3-3)

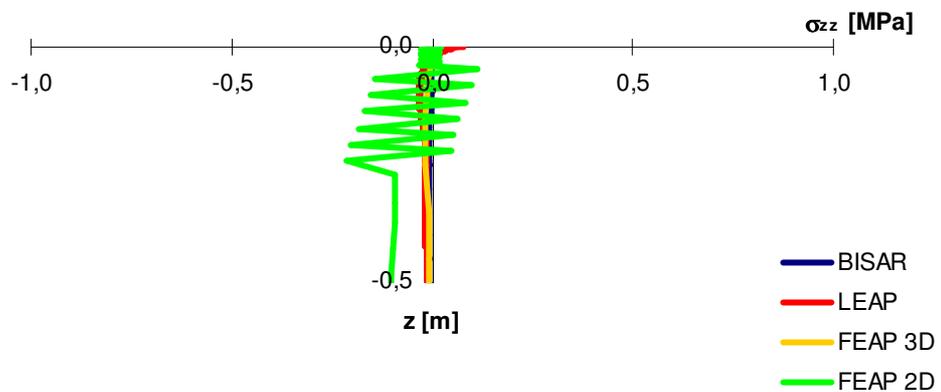


Abbildung 66: Spannungen σ_{zz} in der Straßenachse im Schnitt 3-3

4.3 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Berechnungsergebnisse der vier Programme (BISAR, LEAP, FEAP 3D und FEAP 2D) miteinander verglichen. Dabei werden die Spannungen an der Straßenseite und der Tragschichtunterseite an folgenden Positionen gegenübergestellt:

- Straßenachse
- unter dem Rad 3
- zwischen Rad 3 und Rad 4 (Fahrzeugachse)
- unter dem Rad 4.

4.3.1 Oberflächennahe Spannungen (Schnitt 1-1)

An der Straßenseite entstehen als Folge der Belastung Extremwerte für sämtliche Spannungskomponenten der gebundenen Schichten. In Abbildung 68 ist ersichtlich, dass die mit den unterschiedlichen Programmen errechneten oberflächennahen Spannungen σ_{xx} in den betrachteten Punkten ähnliche Werte aufweisen. Besonders gut stimmen die Ergebnisse von BISAR und FEAP 3D überein. Hingegen weichen die mit LEAP ermittelten Größen an allen vier Stellen geringfügig, und die mit FEAP 2D errechneten Spannungen wesentlich davon ab. Grundsätzlich liefert FEAP 3D oberflächennahe Spannungen, die zwischen den Spannungen der anderen beiden Programme BISAR und LEAP liegen. Daher wird die Berechnung mit FEAP 3D im Vergleich zu FEAP 2D als realistischere Variante eingeschätzt

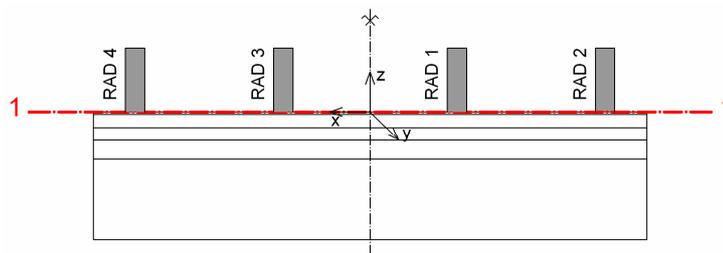


Abbildung 67: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 1-1

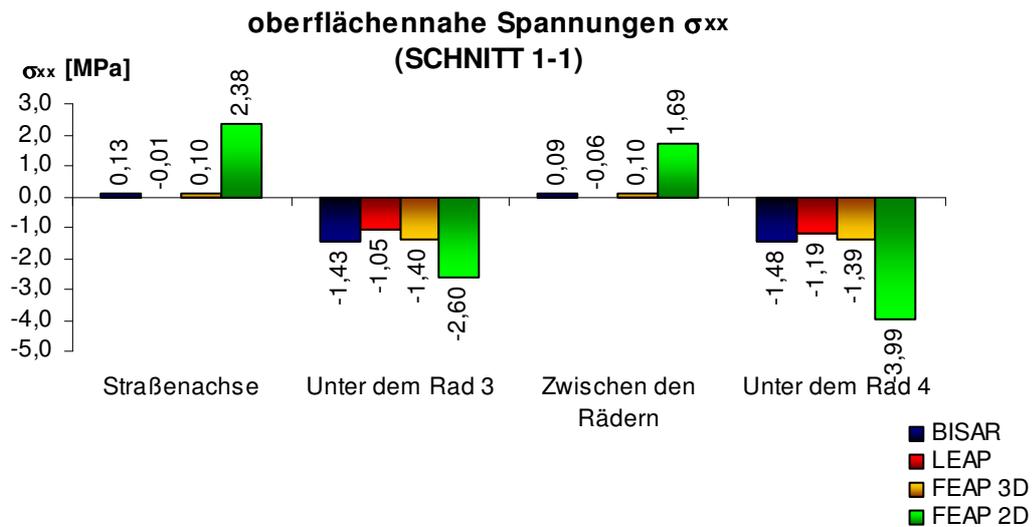


Abbildung 68: Gegenüberstellung - oberflächennahe Spannungen σ_{xx} im Schnitt 1-1

Abbildung 69 stellt dar, dass die Übereinstimmung der oberflächennahen Spannungen σ_{yy} ebenfalls sehr gut ist, mit Ausnahme der FEAP 2D Berechnungsergebnisse. Die mit FEAP 3D errechneten Spannungen weisen geringfügig niedrigere Absolutwerte auf, d.h. die Druckspannungen sind betragsmäßig etwas größer. In den Punkten zwischen den Rädern und der Straßennachse stimmen die Werte von BISAR und LEAP besonders gut überein, sie sind beinahe identisch.

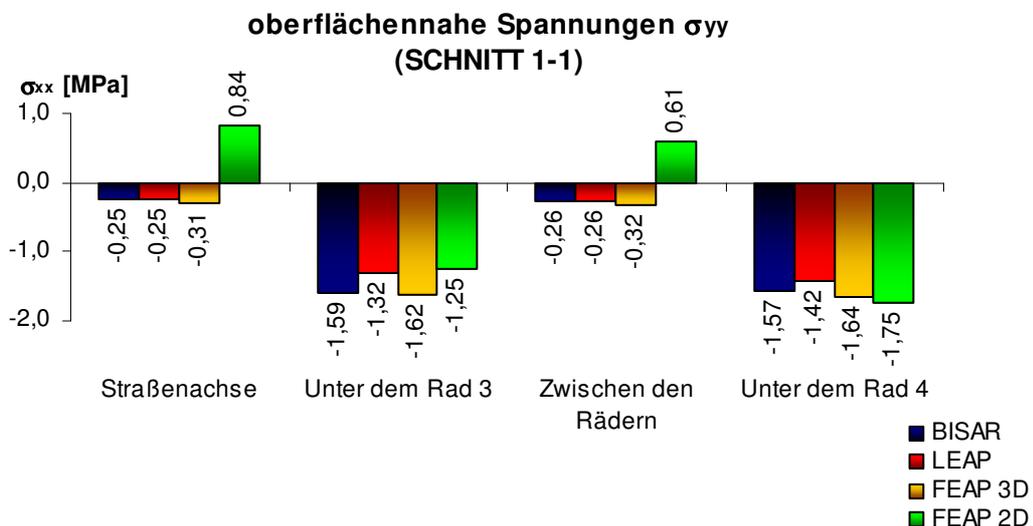


Abbildung 69: Gegenüberstellung - oberflächennahe Spannungen σ_{yy} im Schnitt 1-1

Die oberflächennahen vertikalen Spannungen σ_{zz} sind in den Bereichen der Räder gleich der aufgebracht Belastung und an allen verbleibenden Punkten der Straßenoberfläche gleich null. Die Belastung beträgt ca. $-0,81$ MPa. Die mit BISAR errechneten Ergebnisse zeigen in dieser Hinsicht die beste Übereinstimmung (siehe

Abbildung 70). Im Gegensatz dazu weichen die Ergebnisse von LEAP und FEAP 3D geringfügig davon ab, wobei diese Abweichung als unbedeutend einzustufen ist. Die erhöhten Druckspannungen bei Berechnung mit FEAP 2D sind ein Resultat des Ersatzes der Flächenlast durch äquivalente Knotenlasten.

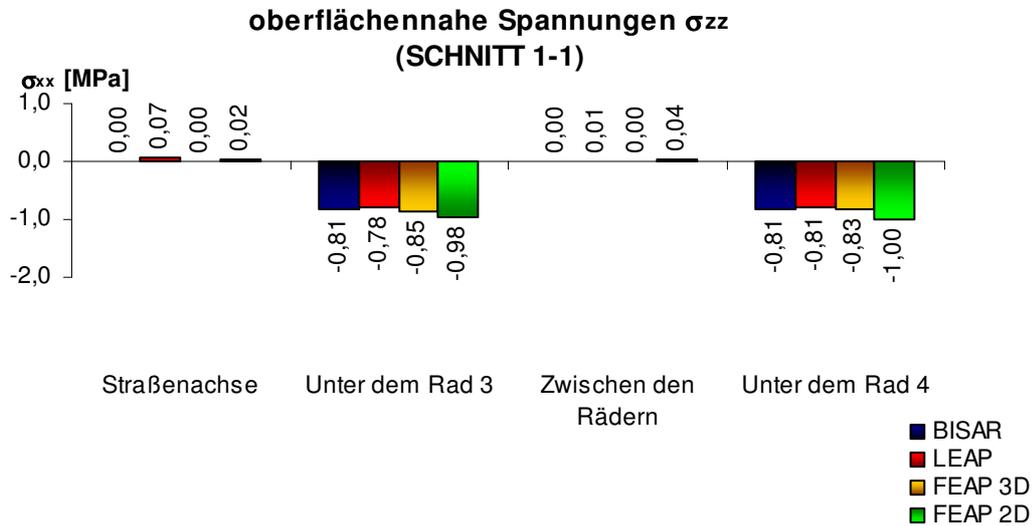


Abbildung 70: Gegenüberstellung - oberflächennahe Spannungen σ_{zz} im Schnitt 1-1

4.3.2 Spannungen nahe der bituminösen Tragschichtunterseite (Schnitt 4-4)

An der Unterseite der bituminösen Tragschichte entstehen analog zur Straßenoberfläche lokale Extremwerte der horizontalen Spannungskomponenten. Der Vergleich der vier Berechnungsvarianten fällt ähnlich zu Pkt. 4.3.2 aus. Abbildung 72 zeigt, dass FEAP 3D und BISAR an den Stellen unter den Rädern sehr ähnliche Werte für σ_{xx} errechnen. Die Ergebnisse dieser Programme stimmen auch zwischen den Rädern gut überein, wenn man den Unterschied in Absolutwerten betrachtet. Bei einer relativen Gegenüberstellung ergeben sich für diese Stellen beachtliche Abweichungen, doch aufgrund der niedrigen Werte ist dies von untergeordneter Bedeutung. Die Ergebnisse der LEAP-Berechnungen für die Spannung σ_{xx} haben im Vergleich zu den Ergebnissen von FEAP 3D und BISAR eine größere Abweichung und die Ergebnisse der Berechnungen mit FEAP 2D zeigen eine eklatante Abweichung zu den Resultaten der anderen drei Programme.

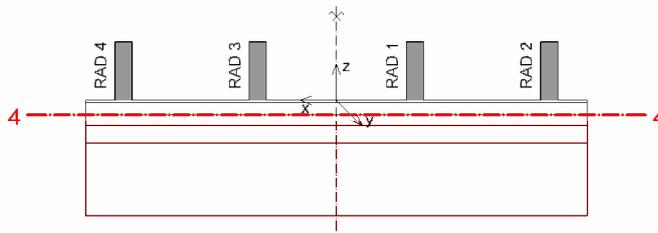


Abbildung 71: Schnittführung Schnitt 4-4 und Lasteinleitungsstellen

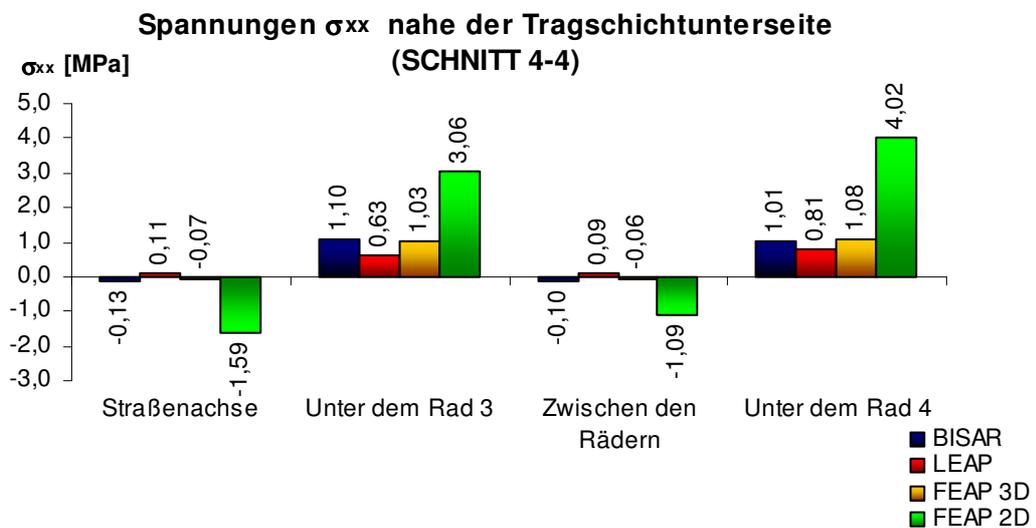


Abbildung 72: Gegenüberstellung - Spannungen σ_{xx} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

In der Abbildung 73 sind die Ergebnisse der Spannungsberechnung für σ_{yy} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite gegenübergestellt. Für die Übereinstimmung der Spannung σ_{yy} zeigt sich ein ähnliches Bild wie an der Straßenoberfläche (siehe Abbildung 69). Die Gleichheit der drei Programme (BISAR, LEAP und FEAP 3D) in Bezug auf σ_{yy} ist besser als bei der Spannung σ_{xx} . Der Unterschied der LEAP-Ergebnisse zu den anderen Ergebnissen ist wesentlich geringer, besonders an den Stellen zwischen den Rädern. Die Resultate von FEAP 2D zeigen in den Bereichen unter den Rädern deutlich weniger Abweichung auf, als in den Bereichen zwischen den Rädern.

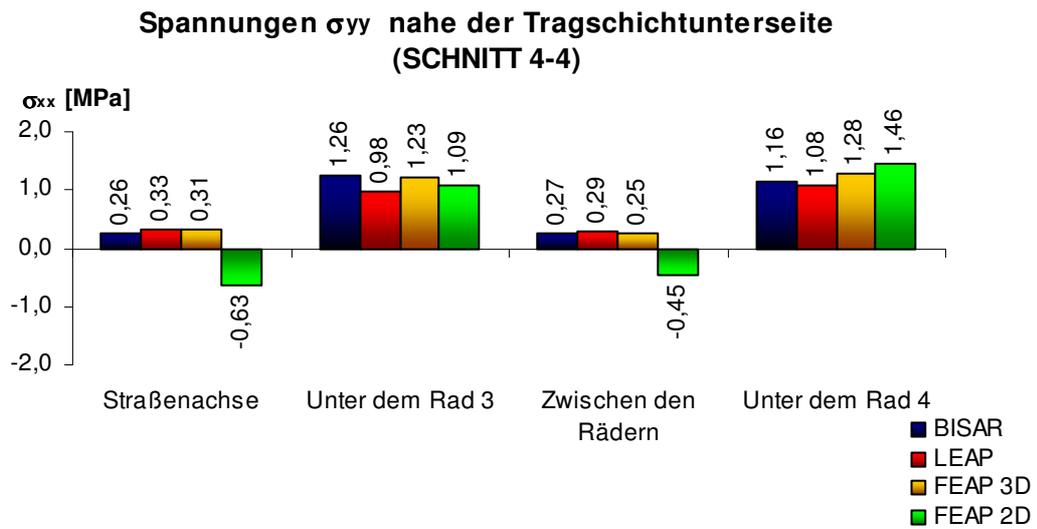


Abbildung 73: Gegenüberstellung – Spannungen σ_{yy} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

Die Gegenüberstellung der Spannungen σ_{zz} an der Unterseite der bituminösen Tragschichte ergibt, dass die Spannungen relativ gesehen erheblich voneinander abweichen. Allerdings haben die Werte eine sehr geringe Größenordnung und daher sind die Differenzen als unbedeutend anzusehen. Auch hier sind die Ergebnisse von FEAP 2D eher als Ausreißer anzusehen.

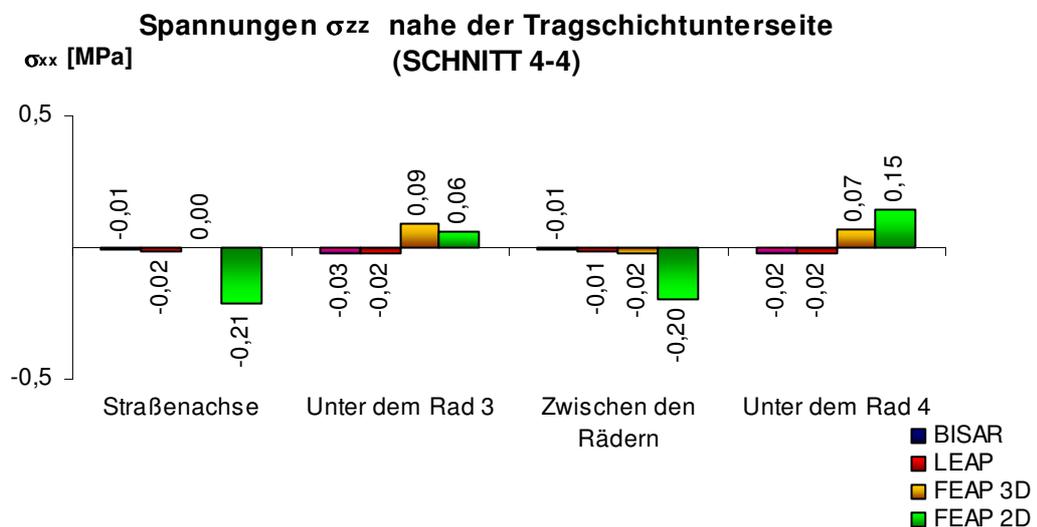


Abbildung 74: Gegenüberstellung – Spannungen σ_{zz} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

5 VERGLEICHENDE VISKO-ELASTISCHE BERECHNUNGEN FEAP 2D UND FEAP 3D

Der nachfolgender Abschnitt beinhaltet visko-elastische Vergleichsrechnungen mit FEAP 2D und FEAP 3D.

5.1 Basisangaben

5.1.1 Geometrie

Sämtliche Spannungsverläufe beziehen sich auf das rechtwinkelige kartesische Koordinatensystem gemäß Abbildung 45. Die Straßenabmessungen sowie der Schichtaufbau entsprechen den Angaben in Abbildung 46.

5.1.2 Temperaturszenarien

Die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf das visko-elastische Materialverhalten von Asphalt. Die Kriechnachgiebigkeit eines Asphaltmischgutes nimmt mit Erhöhung der Temperatur zu. Zur Veranschaulichung dieses Effektes werden folgende Temperaturszenarien untersucht:

- Oberflächenabkühlung von 0 °C auf -5 °C in einer Stunde (Lastfälle 2DT1 und 3DT1)
- Oberflächenabkühlung von -5 °C auf -10 °C in einer Stunde (Lastfälle 2DT2 und 3DT2)
- Oberflächenabkühlung von -10 °C auf -15 °C in einer Stunde (Lastfälle 2DT3 und 3DT3)
- Oberflächenabkühlung von -15 °C auf -20 °C in einer Stunde (Lastfälle 2DT4 und 3DT4)
- Oberflächenabkühlung von -20 °C auf -25 °C in einer Stunde (Lastfälle 2DT5 und 3DT5)

Die Temperatur des Untergrundes in 2,0 m Tiefe, von der Straßenoberfläche gemessen, wird mit 6,3 °C zeitlich konstant angenommen. Ein eindimensionales FEM-Temperaturberechnungsprogramm ermittelt die erforderlichen Temperaturen für verschiedene Zeitinkremente unter Berücksichtigung der Materialparameter gemäß Tabelle 8.

Tabelle 8: Parameter für die Berechnung von Temperaturverlauf

Schicht	Volumetrische Wärmekapazität [kJ/(m³K)]	Wärmeleitfähigkeit [kJ/(mhK)]
SMA 11 pmB45/80-65	2078	3,63
AC 22 binder PmB45/80-65, F3, G4	2117	3,91
Obere ungebundene Tragschichte	2400	1,87
Untere ungebundene Tragschichte	2550	1,87
Untergrund	2550	1,87

5.1.3 Materialkennwerte

Zur Berechnung von thermischen und mechanogenen Spannungen müssen die verschiedenen Schichten durch Materialparameter charakterisiert werden. Zur Beschreibung der Eigenschaften der gebundenen Schichten sind folgende Parameter erforderlich:

- Wärmedehnzahl α_t [1/K]
- Querdehnzahl ν [-]
- Glasmodul E_{inf} [MPa]
- Initiale Kriechnachgiebigkeit J_a [1/MPa]
- k-Wert [-]

In der Literatur wird der k-Wert alternativ auch als m-Wert bezeichnet. Da bei den ungebundenen Schichten kein zeitabhängiges Materialverhalten berücksichtigt wird, sind für die Charakterisierung nur die beiden Materialparameter

- Querdehnzahl ν [-]
- E-Modul E_1 [MPa]

notwendig.

Im Zuge der visko-elastischen Vergleichsrechnungen mit dem zwei- und dreidimensionalen Modell werden für alle Temperaturszenarien dieselben Materialkennwerte herangezogen. Die im Folgenden angeführten Materialkennwerte wurden aus Daten von bereits durchgeführten Laborprüfungen entnommen bzw. abgeleitet.

5.1.3.1 Asphaltdeckschichte

Analog zu den linear-elastischen Berechnungen (siehe Kapitel 4) werden für die Deckschichte Materialkennwerte der Mischgutsorte SMA 11 pmB45/80-65 gemäß Tabelle 9 herangezogen.

Tabelle 9: Materialparameter für die Asphaltdeckschichte SMA 11 pmB45/80-65

Parameter	Wert
Wärmedehnzahl α_t [1/K]	0,0000311
Querdehnzahl ν [-]	0,35
Glasmodul E_{inf} [MPa]	30570
Initiale Kriechnachgiebigkeit J_a [1/MPa]	0,0000105
k-Wert [-]	0,41

5.1.3.2 Bituminöse Tragschichte

Die Materialparameter der bituminösen Tragschichte entsprechen den Eigenschaften der Mischgutsorte AC 22 binder pmB45/80-65 und sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Materialparameter für die bituminöse Tragschichte AC 22 pmB45/80-65

Parameter	Wert
Wärmedehnzahl α_t [1/K]	0,0000236
Querdehnzahl ν [-]	0,35
Glasmodul E_{inf} [MPa]	31170
Initiale Kriechnachgiebigkeit J_a [1/MPa]	0,0000298
k-Wert [-]	0,39

5.1.3.3 Ungebundene Schichten

Die Charakterisierung der Eigenschaften der ungebundenen Schichten erfolgt mit Kennwerten gemäß Tabelle 11.

Tabelle 11: Materialparameter E_1 und ν für die ungebundenen Schichten

Schicht	E-Modul E_1 [MPa]	Querdehnzahl ν [-]
Obere ungebunden Tragschichte	266	0,35
Untere ungebunden Tragschichte	140	0,35
Untergrund	70	0,35

5.1.4 Belastung

Die Belastung erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird die Temperaturbelastung durch die Abkühlrate gemäß Abschnitt 5.1.2 aufgebracht. Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass schon mit zwei Zeitinkrementen zur Berechnung der kryogenen Spannungen eine ausreichende Genauigkeit erzielt werden kann. Die Abweichung zu einer Berechnung mit 50 Zeitinkrementen beträgt etwa 10 %. Da besonders bei den dreidimensionalen Strukturmodellen erhebliche Rechenzeiten (ca. 6 min je Zeitinkrement) entstehen, werden sämtliche Studien dieser Arbeit mit 2 Zeitinkrementen durchgeführt.

Nach Beendigung des Abkühlszenarios erfolgt die Belastung mit der Verkehrslast durch einen Impuls mit einer Dauer von 0,02 Sekunden. Die Verkehrslast resultiert aus einer Achslast von 115 kN, welche symmetrisch auf zwei Reifen aufgeteilt wird. Im dreidimensionalen Modell wird diese vertikale Last als Toplast auf die Latschfläche, welche einem Kreis von 30 cm Durchmesser entspricht, aufgeteilt (siehe Abbildung 37). Dabei beträgt die Flächenpressung 0,81 MPa. Im Gegensatz dazu wird die Belastung im zweidimensionalen Modell durch äquivalente Streckenlasten an vier Stellen gemäß Abbildung 35 je Rad aufgebracht. Die genaue Position der Belastung ist in Abbildung 46 dargestellt.

5.1.5 Berechnungsspezifische Angaben

Für die Vergleichsrechnungen des zwei- und dreidimensionalen Strukturmodells werden die selben Inputparameter berücksichtigt:

- Straßenaufbau und -abmessungen
- Materialkennwerte
- Netzteilung
- Belastung
- Zeitinkremente

Geringfügige Unterschiede in der Netzgeometrie aufgrund der Generierung der Kreisauflandsfläche sind unvermeidbar. Ebenso bestehen bei der Aufbringung der Verkehrslast Abweichungen (siehe Abschnitt 5.1.4).

5.2 Berechnungsergebnisse

Die resultierenden Spannungen zufolge Temperaturabsenkung und Verkehrslast werden graphisch für die vier Schnitte gemäß Abbildung 50 dargestellt. Nachfolgend werden repräsentative Spannungsverläufe für das Temperaturszenario einer Oberflächenabkühlung von -10 °C auf -15 °C in einer Stunde (Lastfälle 2DT3 und 3DT3) abgebildet. Eine detaillierte Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse für alle Lastfälle befindet sich im Anhang.

5.2.1 Oberflächennahe Spannungen (Schnitt 1-1)

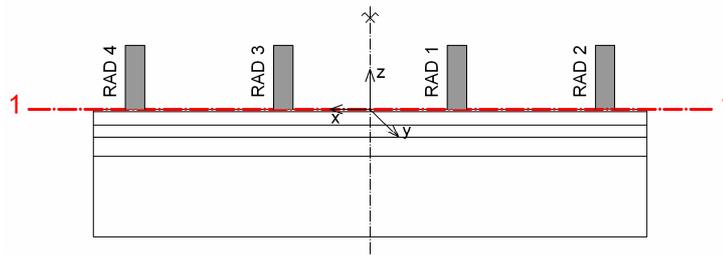


Abbildung 75: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 1-1

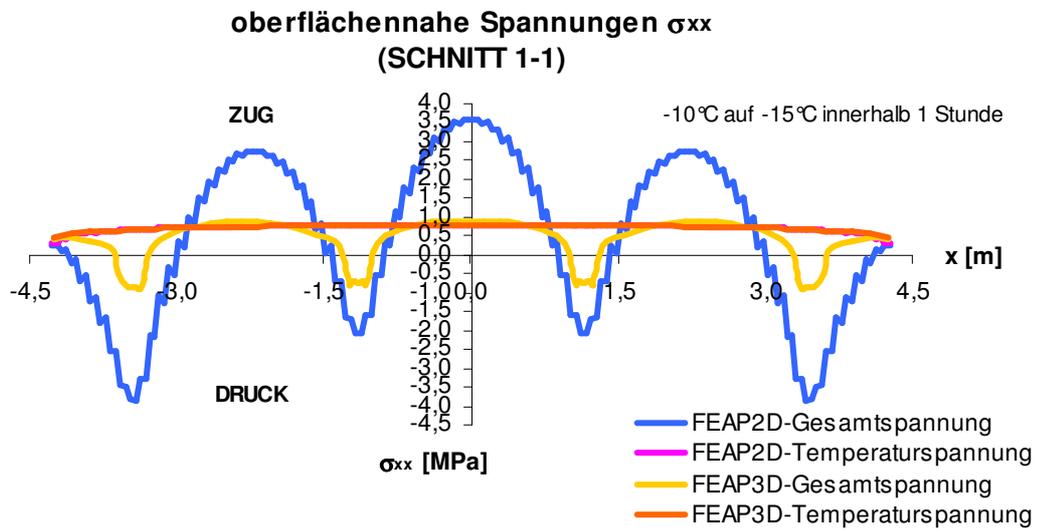


Abbildung 76: oberflächennahe Spannungen σ_{xx} im Schnitt 1-1

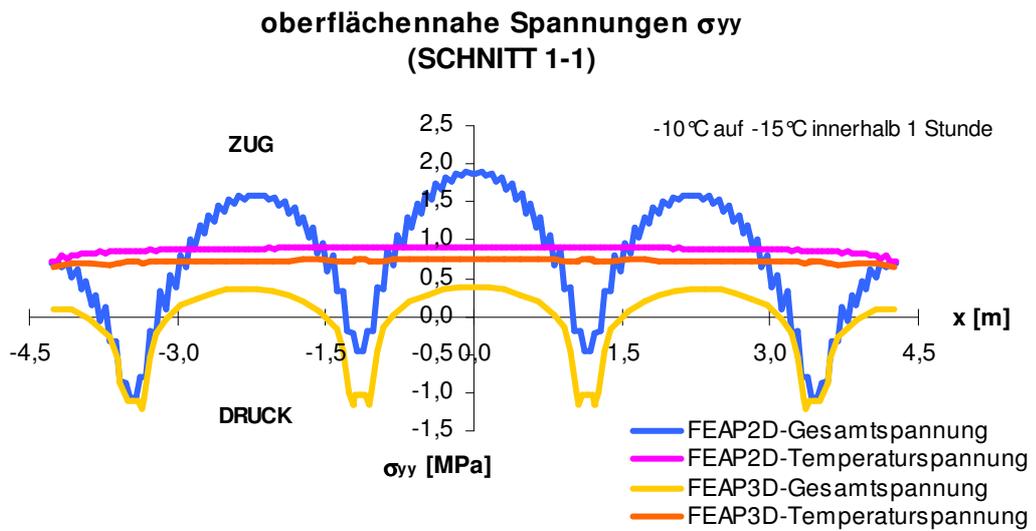


Abbildung 77: oberflächennahe Spannungen σ_{yy} im Schnitt 1-1

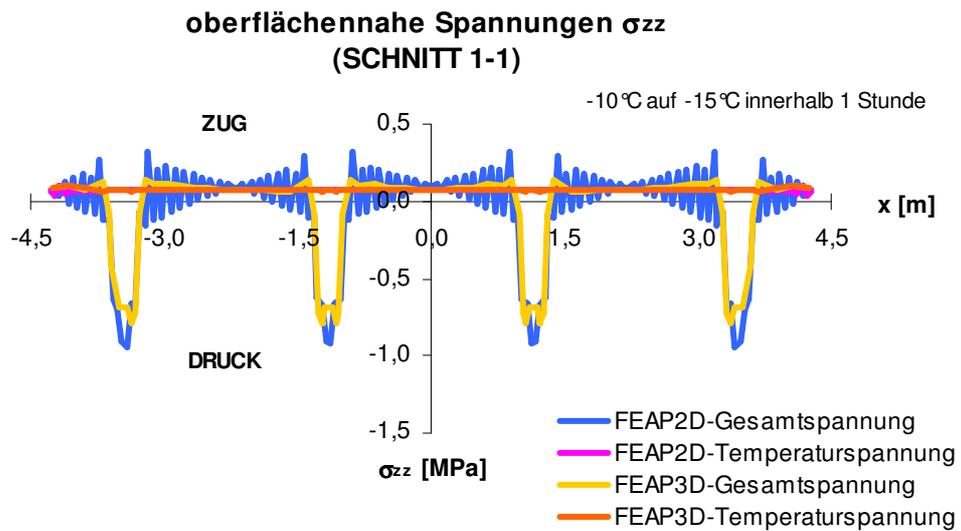


Abbildung 78: oberflächennahe Spannungen σ_{zz} im Schnitt 1-1

5.2.2 Spannungen nahe der bituminösen Tragschichtunterseite (Schnitt 4-4)

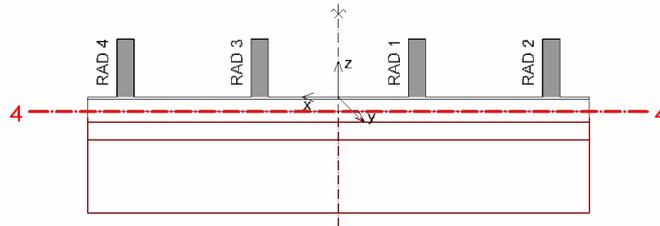


Abbildung 79: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 4-4

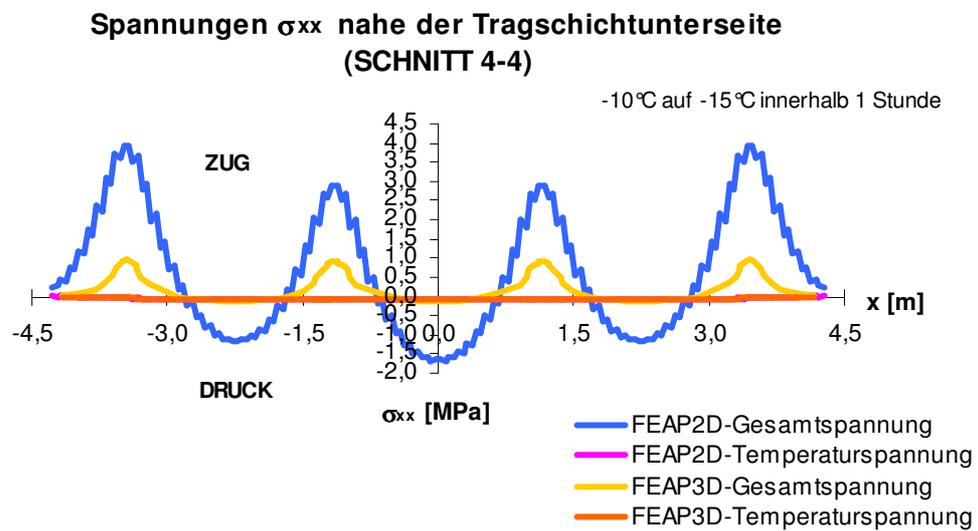


Abbildung 80: Spannungen σ_{xx} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

**Spannungen σ_{yy} nahe der Tragschichtunterseite
(SCHNITT 4-4)**

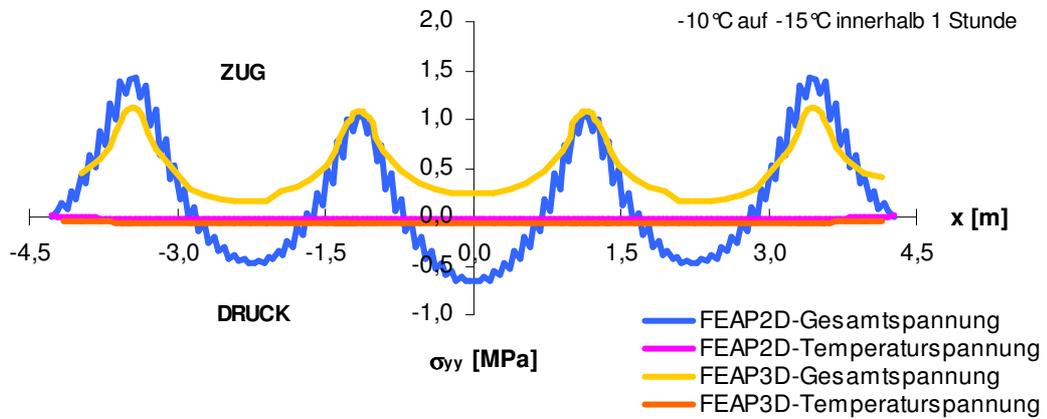


Abbildung 81: Spannungen σ_{yy} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

**Spannungen σ_{zz} nahe der Tragschichtunterseite
(SCHNITT 4-4)**

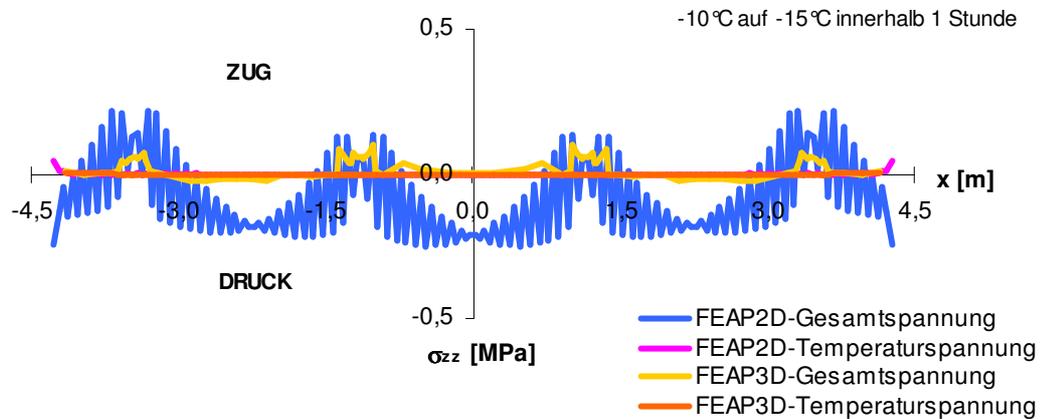


Abbildung 82: Spannungen σ_{zz} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite im Schnitt 4-4

5.2.3 Spannungen unter dem Rad 3 (Schnitt 2-2)

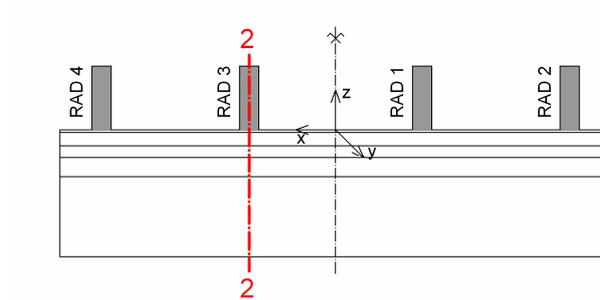


Abbildung 83: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 2-2

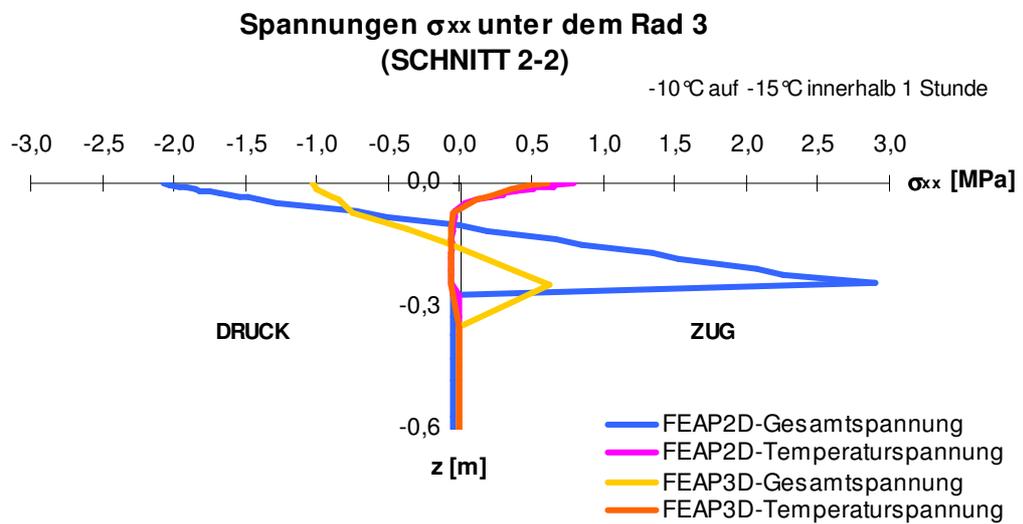


Abbildung 84: Spannungen σ_{xx} unter dem Rad 3 im Schnitt 2-2

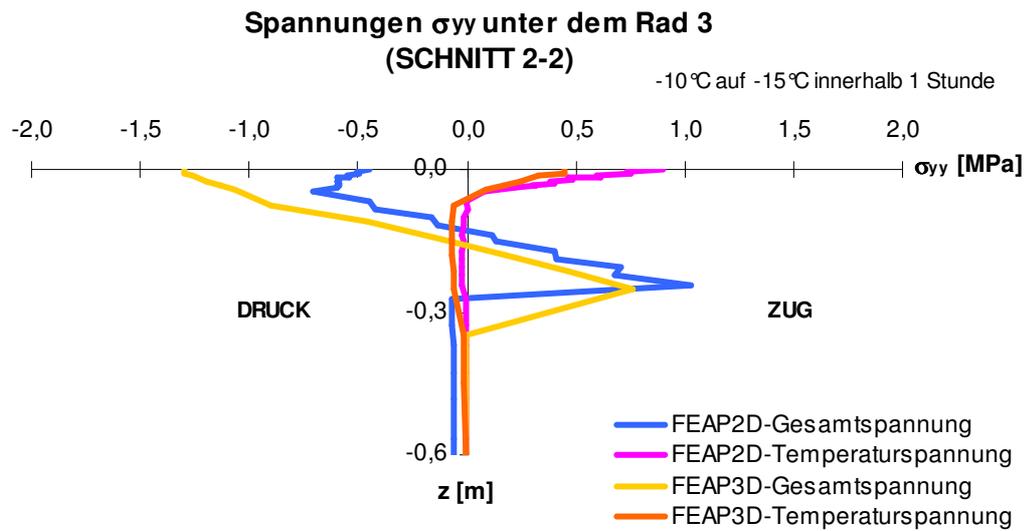


Abbildung 85: Spannungen σ_{yy} unter dem Rad 3 im Schnitt 2-2

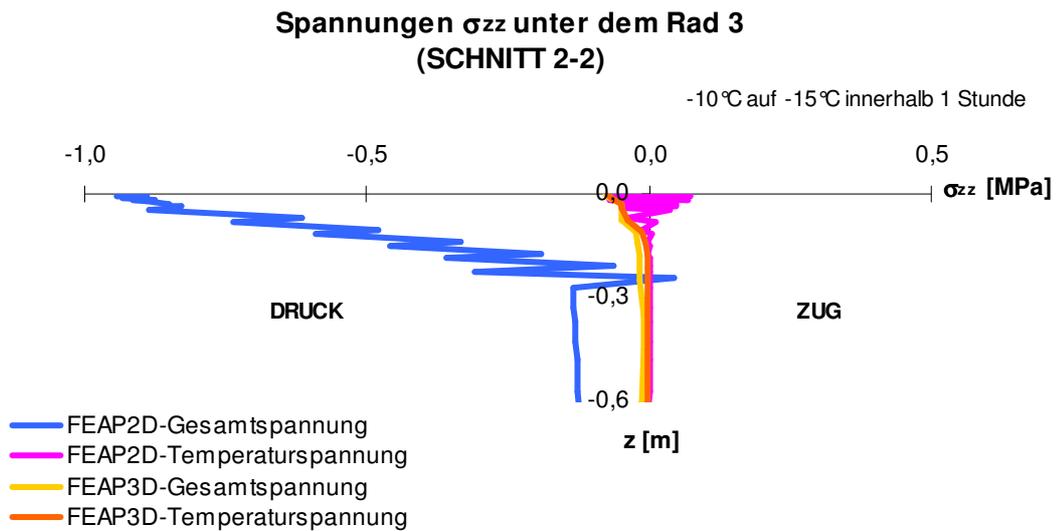


Abbildung 86: Spannungen σ_{zz} unter dem Rad 3 im Schnitt 2-2

5.2.4 Spannungen in der Straßenachse (Schnitt 3-3)

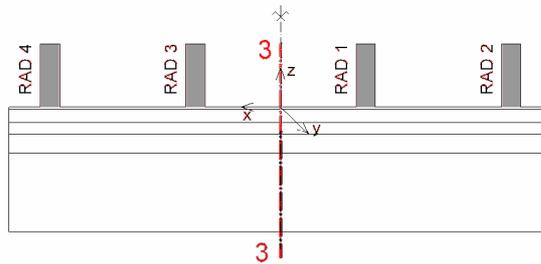


Abbildung 87: Schnittführung und Lasteinleitungsstellen Schnitt 3-3

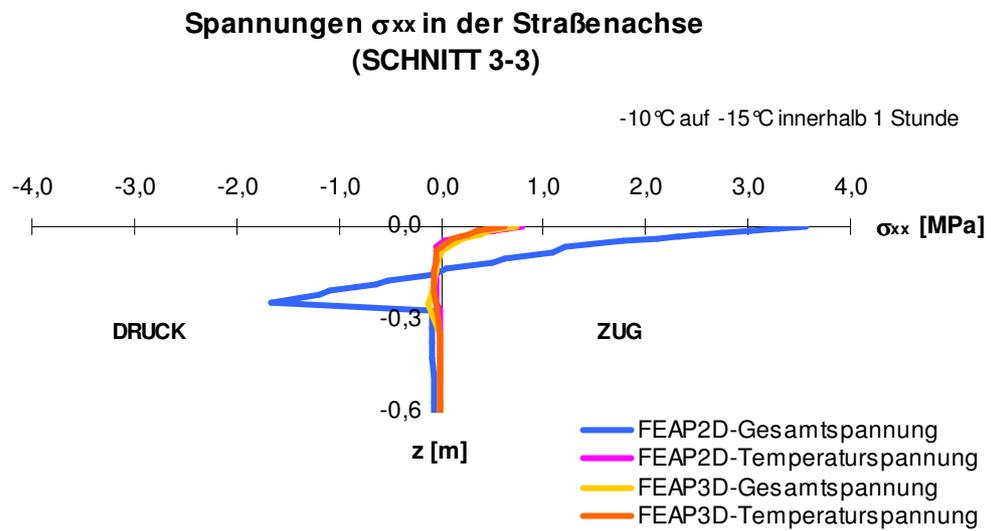


Abbildung 88: Spannungen σ_{xx} in der Straßenachse im Schnitt 3-3

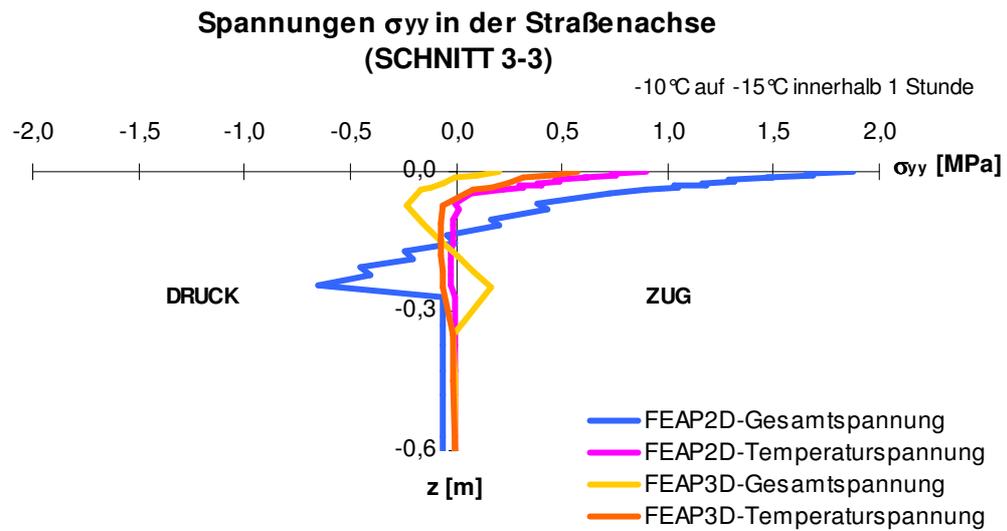


Abbildung 89: Spannungen σ_{yy} in der Straßenachse im Schnitt 3-3

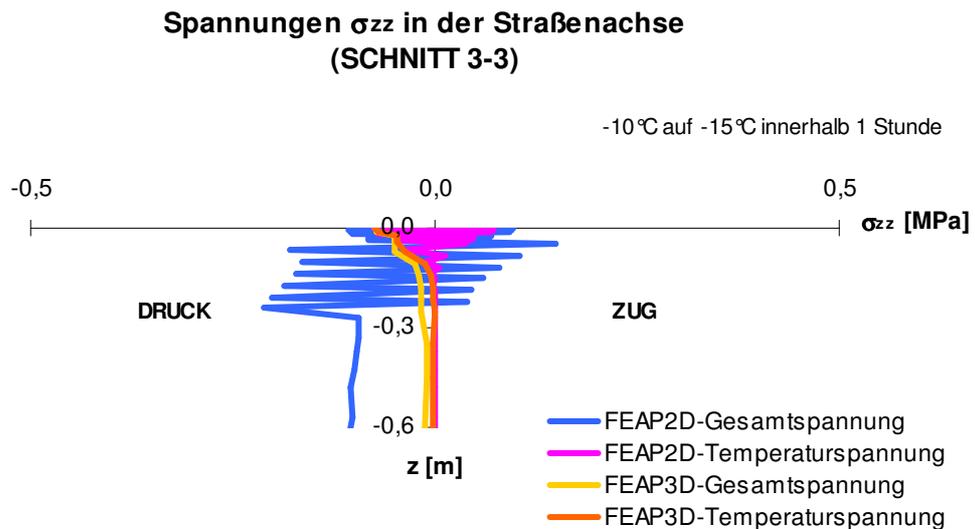


Abbildung 90: Spannungen σ_{zz} in der Straßenachse im Schnitt 3-3

5.2.5 Verzerrungen

Aufgrund von Kriechen und Relaxation besteht bei visko-elastischen Berechnung kein linearer Zusammenhang zwischen den Spannungen und den Verzerrungen. Im Anschluss werden die berechneten Verzerrungen der Lastfälle 2DT3 und 3DT3 für ausgewählte Punkte des Straßenquerschnittes tabellarisch aufgelistet. Die Ergebnisse der FEAP 2D Berechnungen sind in Tabelle 12 bis Tabelle 14 angeführt. Tabelle 15 bis Tabelle 17 enthalten die, mit der dreidimensionalen Variante (FEAP 3D), berechneten Verzerrungen.

Tabelle 12: FEAP 2D - Verzerrungen zufolge Temperaturabsenkung, Lastfall 2DT3

Punkt	Oberflächennah			Unterseite BTS		
	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]
Straßenachse	-34,62	-	-282,79	-36,94	-	19,72
Rad 3	-36,35	-	-281,91	-37,43	-	19,97
Fahrzeugachse	-42,56	-	-278,68	-37,88	-	20,27
Rad 4	-60,35	-	-269,50	-31,04	-	16,91

Tabelle 13: FEAP 2D - Verzerrungen zufolge Verkehrslast, Lastfall 2DT3

Punkt	Oberflächennah			Unterseite BTS		
	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]
Straßenachse	81,82	-	-43,51	-51,56	-	22,57
Rad 3	-61,36	-	17,25	93,08	-	-51,87
Fahrzeugachse	55,76	-	-30,02	-32,72	-	13,63
Rad 4	-117,77	-	41,90	134,74	-	-69,11

Tabelle 14: FEAP 2D - Verzerrungen zufolge Temperaturabsenkung und Verkehrslast, Lastfall 2DT3

Punkt	Oberflächennah			Unterseite BTS		
	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]
Straßenachse	47,20	-	-326,30	-88,50	-	42,49
Rad 3	-97,71	-	-264,66	55,65	-	-31,90
Fahrzeugachse	13,20	-	-308,70	-70,60	-	33,90
Rad 4	-178,12	-	-227,60	103,70	-	-52,20

Tabelle 15: FEAP 3D - Verzerrungen zufolge Temperaturabsenkung, Lastfall 3DT3

Punkt	Oberflächennah			Unterseite BTS		
	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]
Straßenachse	-25,94	-37,89	-267,10	-27,28	-30,72	30,62
Rad 3	-25,11	-36,24	-267,20	-27,25	-30,19	30,08
Fahrzeugachse	-31,49	-37,09	-264,40	-28,38	-30,51	30,92
Rad 4	-43,47	-35,87	-258,30	-23,55	-29,93	26,74

Tabelle 16: FEAP 3D - Verzerrungen zufolge Verkehrslast, Lastfall 3DT3

Punkt	Oberflächennah			Unterseite BTS		
	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]
Straßenachse	9,28	-14,84	2,90	-6,72	12,60	-3,70
Rad 3	-23,48	-37,12	13,90	21,32	31,63	-32,55
Fahrzeugachse	9,32	-15,21	3,20	-6,72	12,83	-3,88
Rad 4	-23,9	-38,34	14,60	21,52	33,02	-34,31

Tabelle 17: FEAP 3D - Verzerrungen zufolge Temperaturabsenkung und Verkehrslast, Lastfall 3DT3

Punkt	Oberflächennah			Unterseite BTS		
	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]	ϵ_{xx} [μ]	ϵ_{yy} [μ]	ϵ_{zz} [μ]
Straßenachse	-16,66	-52,73	-264,20	-34,00	-18,12	26,92
Rad 3	-48,59	-73,36	-253,30	-5,93	1,44	-2,47
Fahrzeugachse	-22,17	-52,30	-261,20	-35,10	-17,68	27,04
Rad 4	-67,37	-74,21	-243,70	-2,03	3,09	-7,57

5.3 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse

Nachfolgend werden die errechneten Spannungskomponenten σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz} für den Lastfall 3DT3 an markanten Stellen nahe der Straßenoberfläche sowie an der Unterseite der bituminösen Tragschichte gegenübergestellt. Folgende Punkte werden dabei näher untersucht:

- Straßenachse
- unter dem Rad 3.

Die Spannungsverläufe in der Fahrzeugachse sowie unter dem Rad 4 sind den Spannungen der letztgenannten Positionen sehr ähnlich (siehe Abbildung 91 bis Abbildung 93.)

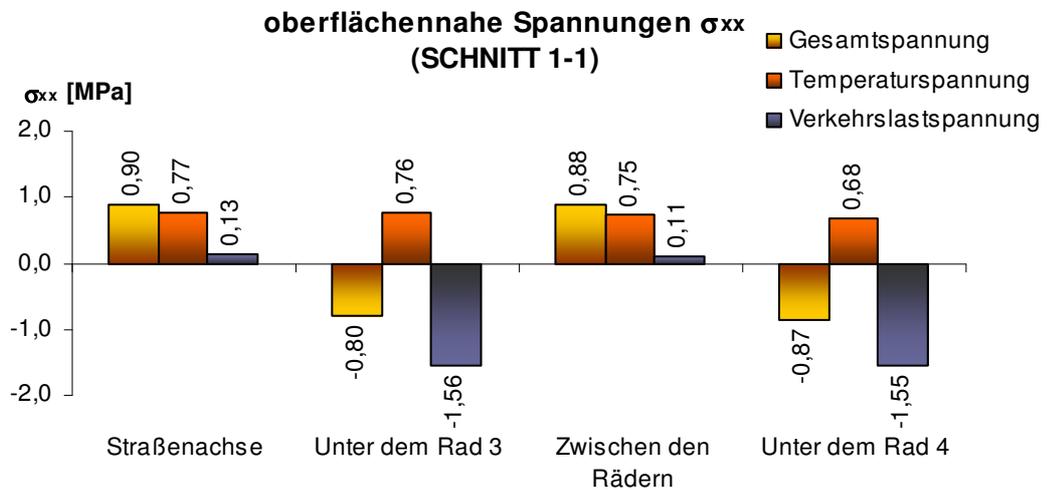


Abbildung 91: oberflächennahe Spannungen σ_{xx} – Auswahlpunkte für Lastfall 3DT3

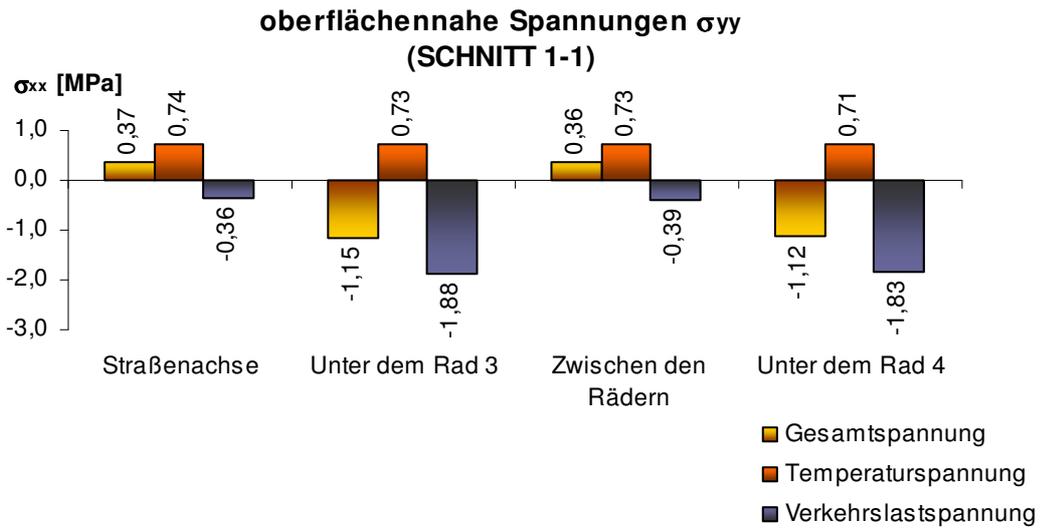


Abbildung 92: oberflächennahe Spannungen σ_{yy} – Auswahlpunkte für Lastfall 3DT3

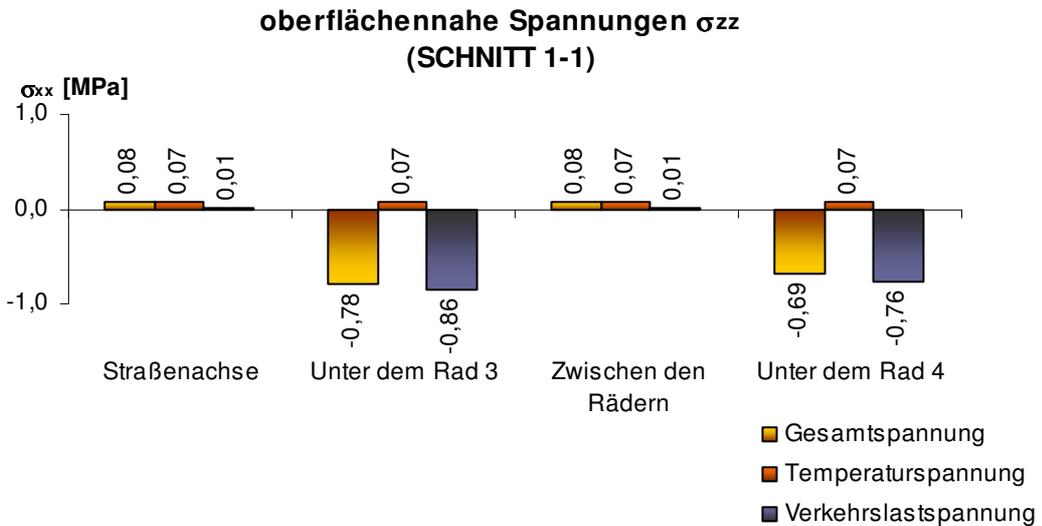


Abbildung 93: oberflächennahe Spannungen σ_{zz} – Auswahlpunkte für Lastfall 3DT3

Die Separation der Gesamtspannung in die Anteile zufolge Temperaturabsenkung (=kryogene Spannung) und Verkehrslast ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Auswirkungen verschiedener Temperaturszenarien.

5.3.1 Spannungen in der Straßenachse

Die numerische Simulation liefert bei der gewählten Laststellung in der Straßenachse die größten Biegezugspannungen in horizontaler Richtung an der Straßenoberfläche. Aus diesem Grund ist die Straßenachse eine von zwei Stellen, an denen die Spannungen miteinander verglichen werden.

5.3.1.1 Oberflächennahe Spannungen

In Abbildung 94 bis Abbildung 96 sind die oberflächennahen Spannungen in der Straßenachse dargestellt. Im Zuge der Berechnung der Temperaturspannungen erhält man durch Anwendung der zweidimensionalen Berechnung für alle Spannungsrichtungen annähernd gleiche Ergebnisse wie bei der dreidimensionalen Variante. Erhebliche Unterschiede ergeben sich für die Verkehrslastspannungen in horizontaler Richtung, (σ_{xx} und σ_{yy}). Das zweidimensionale Modell errechnet für die Spannung σ_{xx} Werte, welche um ein Vielfaches größer sind als jene, die mit dem dreidimensionalen Modell berechnet werden (siehe Abbildung 94).

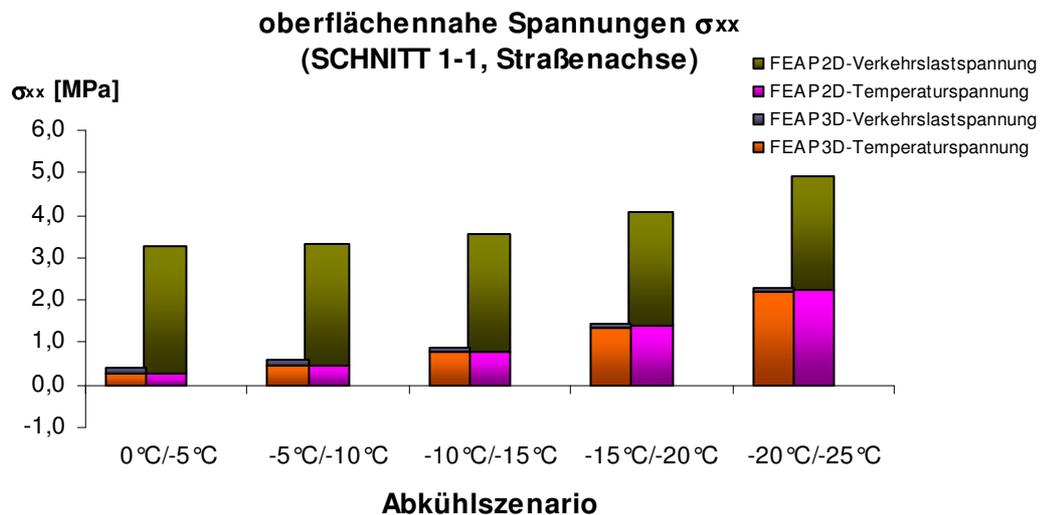


Abbildung 94: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – oberflächennahe Spannungen σ_{xx} in der Straßenachse

Auch bei den Spannungen σ_{yy} treten große Differenzen auf, das zweidimensionale Modell errechnet an dieser betrachteten Stelle Zugspannungen, das dreidimensionale Druckspannungen.

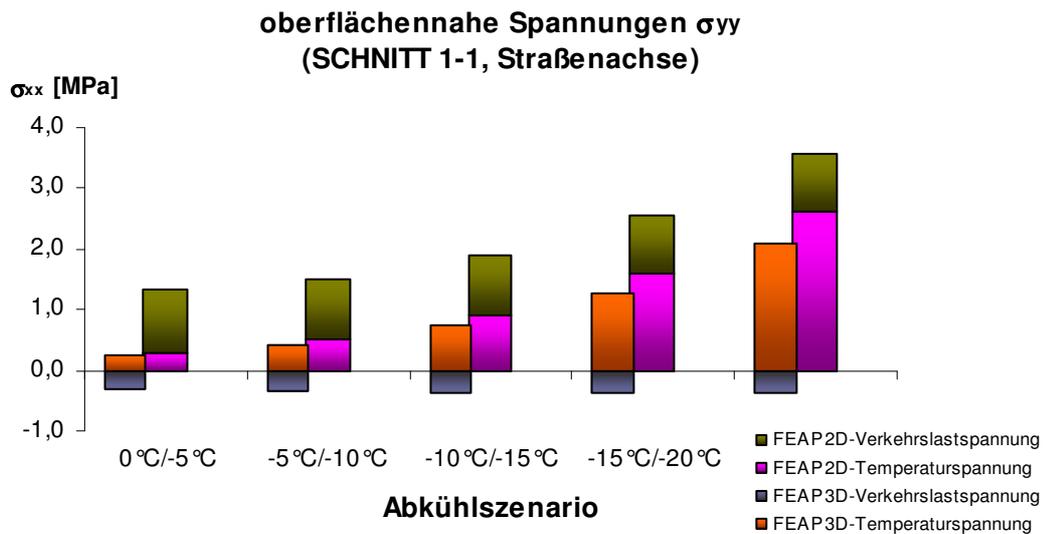


Abbildung 95: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – oberflächennahe Spannungen σ_{yy} in der Straßenachse

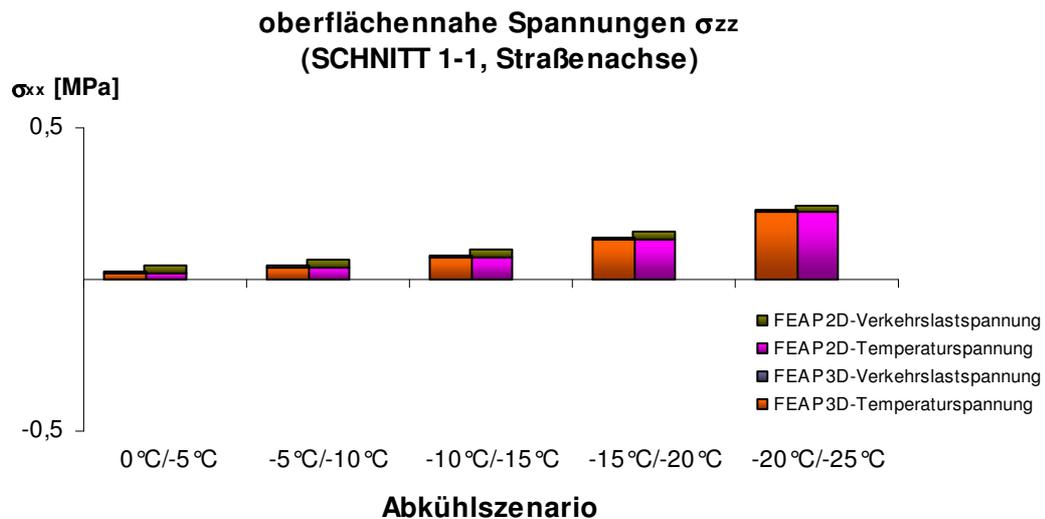


Abbildung 96: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – oberflächennahe Spannungen σ_{zz} in der Straßenachse

Die verschiedenen Temperaturszenarios wirken sich unterschiedlich auf die Temperatur- und Verkehrslastspannungen aus. Eine konstante Abkühlrate von 5 °C hat in Abhängigkeit von der Starttemperatur ungleiche Auswirkungen auf die resultierenden Spannungen. Je niedriger die Starttemperatur des Abkühlscenario ist, desto höher werden die kryogenen Spannungen. Dies resultiert aus dem Relaxations- bzw. Kriechverhalten des Asphalts. Bei tiefen Temperaturen sinkt die Relaxationsfähigkeit, die thermischen Spannungen können nicht so schnell abgebaut werden wie bei höheren Temperaturen. Gleichzeitig erhöht sich mit Abnahme der

Temperatur die Steifigkeit des Materials. Daher ist die Zunahme der kryogenen Spannungen plausibel.

Vergleicht man die Verkehrslastspannungen, so ist nur eine sehr geringe Veränderung bei unterschiedlichen Abkühl Szenarios zu beobachten. Dabei nehmen die Spannungen geringfügig mit Abnahme des Temperaturniveaus ab. Diese Systemreaktion ist auf den ersten Blick nicht erklärbar. Im Zuge dieser Simulation ist nur die Komponente J_a der Kriechnachgiebigkeit J temperaturabhängig (siehe Gleichung 67). Daher wird in weiterer Folge noch eine separate Studie (siehe 6.1) durchgeführt.

5.3.1.2 Spannungen nahe der bituminösen Tragschichtunterseite

Bei den Spannungen an der Unterseite der bituminösen Tragschichte ergeben sich ebenso erhebliche Differenzen in den Ergebnissen der beiden Rechenmodelle. Analog zu der Straßenoberfläche sind die größten Unterschiede bei den horizontalen Verkehrslastspannungen σ_{xx} und σ_{yy} zu beobachten. Auch hier berechnet das 2D-Modell betragsmäßig höhere Werte für σ_{xx} als das 3D-Modell (siehe Abbildung 97). Außerdem haben die Spannungen σ_{yy} in Abbildung 98 ein unterschiedliches Vorzeichen.

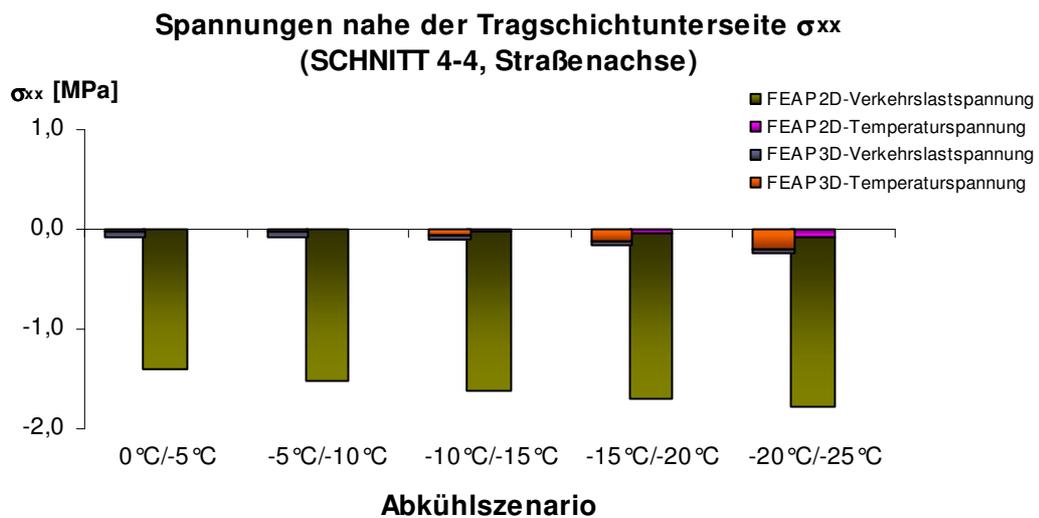


Abbildung 97: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – Spannungen σ_{xx} in der Straßenachse nahe der bituminösen Tragschichtunterseite

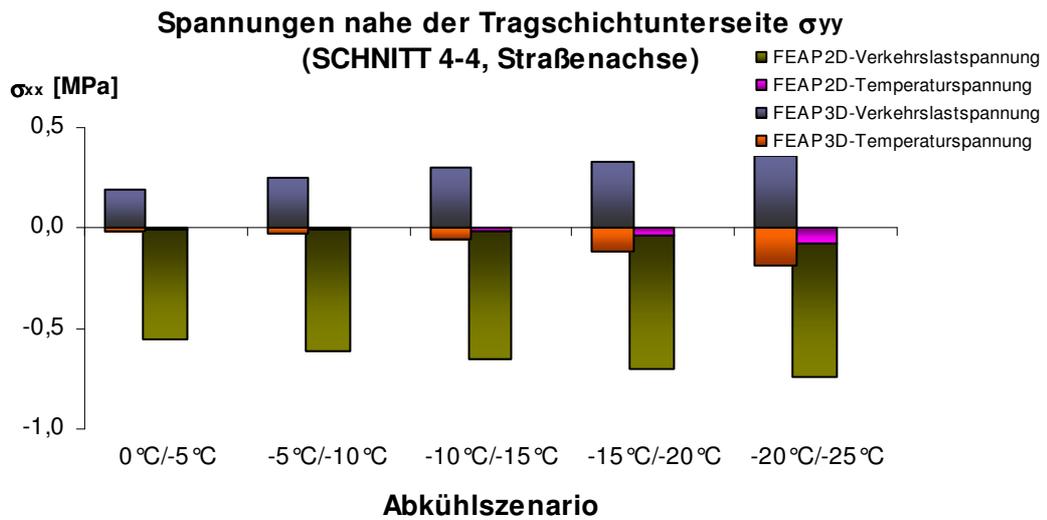


Abbildung 98: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – Spannungen σ_{yy} in der Straßenachse nahe der bituminösen Tragschichtunterseite

Die Gegenüberstellung der vertikalen Spannungen σ_{xx} bringt ebenfalls keine Übereinstimmung der Ergebnisse des zwei- und dreidimensionalen Modells zum Vorschein (siehe Abbildung 99).

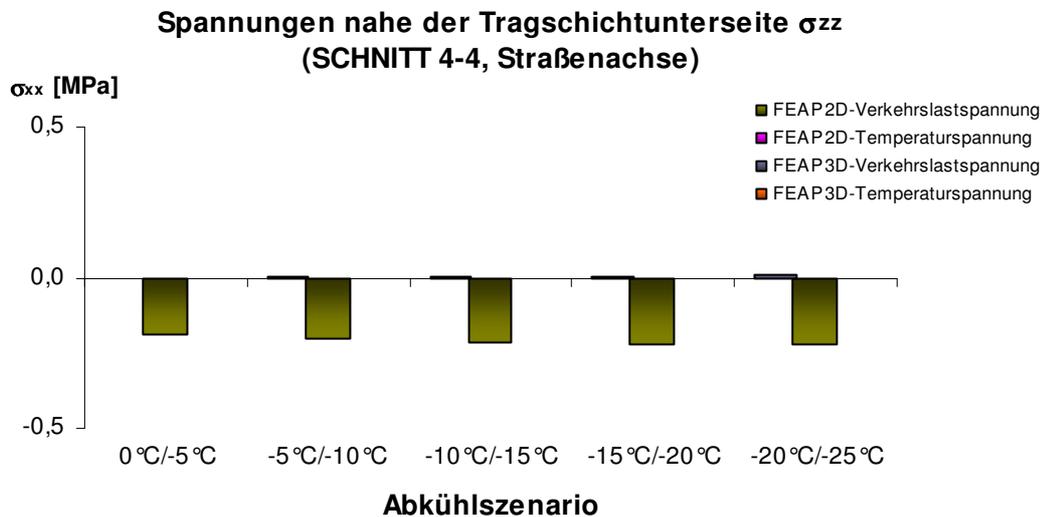


Abbildung 99: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – Spannungen σ_{zz} in der Straßenachse nahe der bituminösen Tragschichtunterseite

Betrachtet man die Temperaturspannungen, so sind gleichfalls Abweichungen in den horizontalen Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} ersichtlich, allerdings nicht so gravierend wie bei den Spannungen zufolge Verkehrslast. Da die kryogenen Spannungen an der

Unterseite der Tragschichte, im Vergleich zur Straßenoberfläche, nur geringe Werte annehmen, wird diese Abweichung nicht näher untersucht.

5.3.2 Spannungen unter dem Rad 3

Unterhalb der Lasteinleitung ist generell mit den größten Biegedruckspannungen an der Straßenoberfläche und den größten Biegezugspannungen an Unterseite der gebundenen Tragschichte zu rechnen. Daher werden auch an dieser Stelle die Spannungen gegenübergestellt.

5.3.2.1 Oberflächennahe Spannungen

In Abbildung 100 ist ersichtlich, dass gleichartig zur Straßenachse, die Temperaturspannungen σ_{xx} beim 2D- und 3D-Modell annähernd gleich sind. Diese Übereinstimmung ist auch bei den anderen beiden Richtungen gegeben.

Im Gegensatz dazu differieren die Spannungen zufolge Verkehrslast, vor allem in x- und y- Richtung. Das zweidimensionale Modell errechnet Verkehrslast-Druckspannungen σ_{xx} , welche etwa doppelt so groß sind, als jene die durch das dreidimensionale Modell ermittelt werden (siehe Abbildung 100).

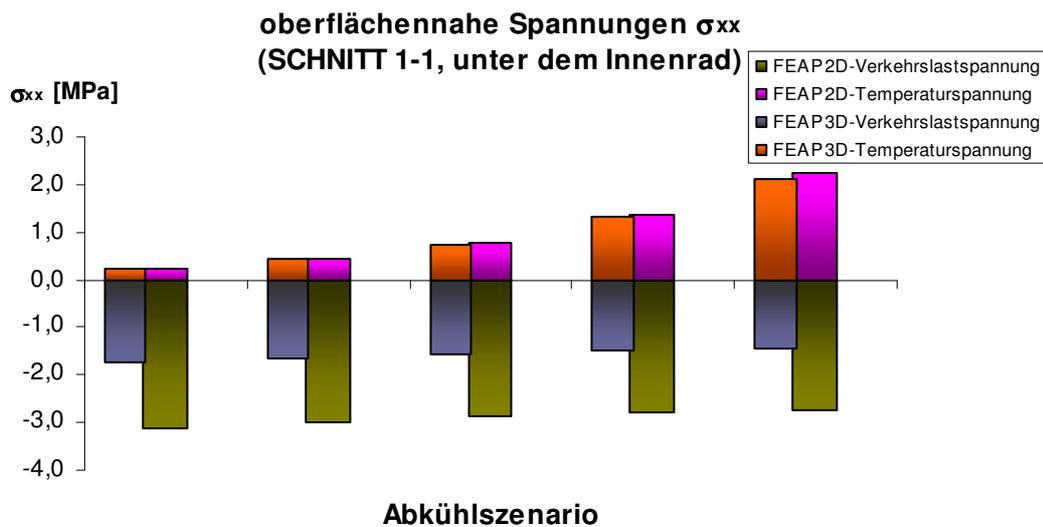


Abbildung 100: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – oberflächennahe Spannungen σ_{xx} unter dem Rad 3

Ein umgekehrtes Bild ergibt sich für die Spannungskomponente σ_{yy} , wie in Abbildung 101 erkennbar ist. Hier liefert das 3D-Modell größere Druckspannungen als das 2D-Modell.

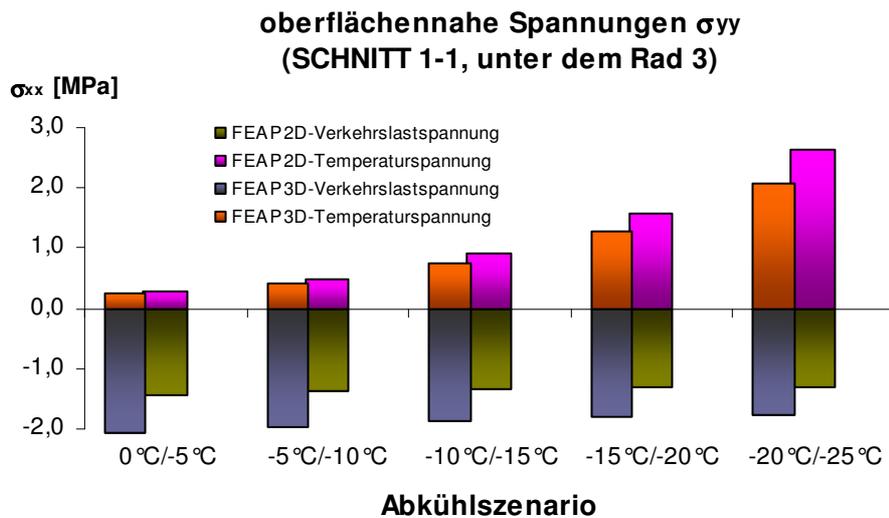


Abbildung 101: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – oberflächennahe Spannungen σ_{yy} unter dem Rad 3

Betrachtet man die vertikalen Spannungen σ_{zz} , so sind gute Übereinstimmungen, sowohl bei der kryogenen Spannung als auch bei der Verkehrslastspannung, beider Simulationsmodelle ersichtlich (siehe Abbildung 102).

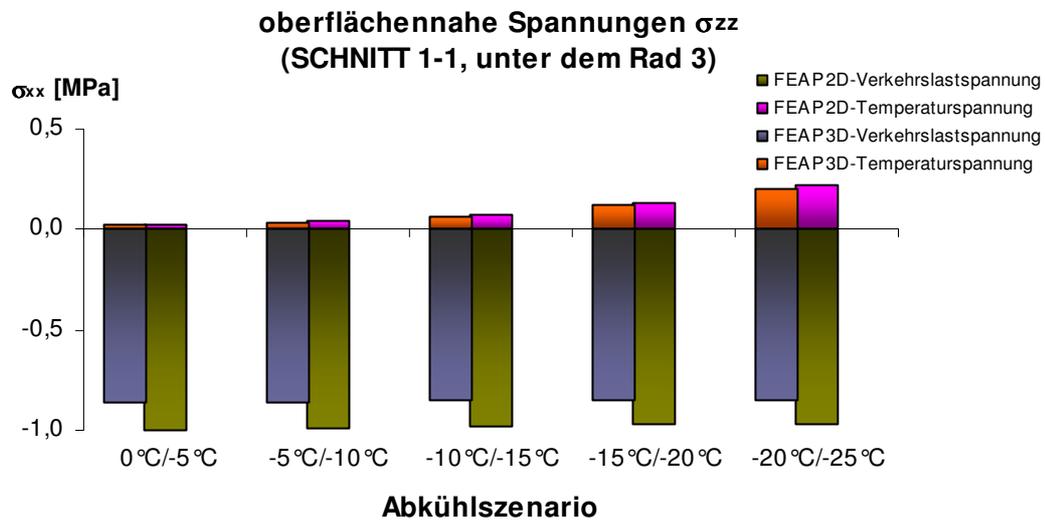


Abbildung 102: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – oberflächennahe Spannungen σ_{zz} unter dem Rad 3

5.3.2.2 Spannungen nahe der bituminösen Tragschichtunterseite

An der Unterseite der bituminösen Tragschichte entstehen unter der Lasteinleitungsstelle die größten Biegezugspannungen zufolge Verkehrslast. Die Ergebnisse für die Spannung σ_{xx} beider Rechenmodelle sind nicht übereinstimmend.

Ähnlich wie an der Straßenoberfläche führt die 2D-Berechnung auf größere Spannungen (siehe Abbildung 103.) Die Temperaturspannungen in x-Richtung sind sehr gering und weisen kaum Differenzen auf.

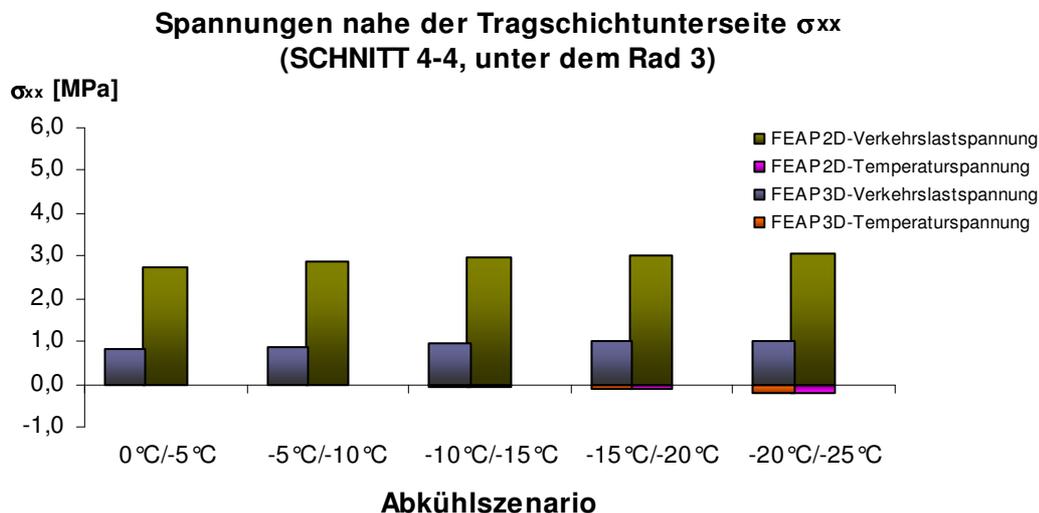


Abbildung 103: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – Spannungen σ_{xx} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite unter dem Rad 3

Gute Übereinstimmung ist gemäß Abbildung 104 bei der Spannung σ_{yy} gegeben. Sowohl Temperatur- als auch Verkehrslastspannung differieren nur sehr gering. Bemerkenswert ist, dass die Spannungen zufolge Verkehrslast in der zweidimensionalen Simulation einen höheren Anstieg mit Abnahme des Temperaturniveaus aufweisen als jene der 3D-Berechnung.

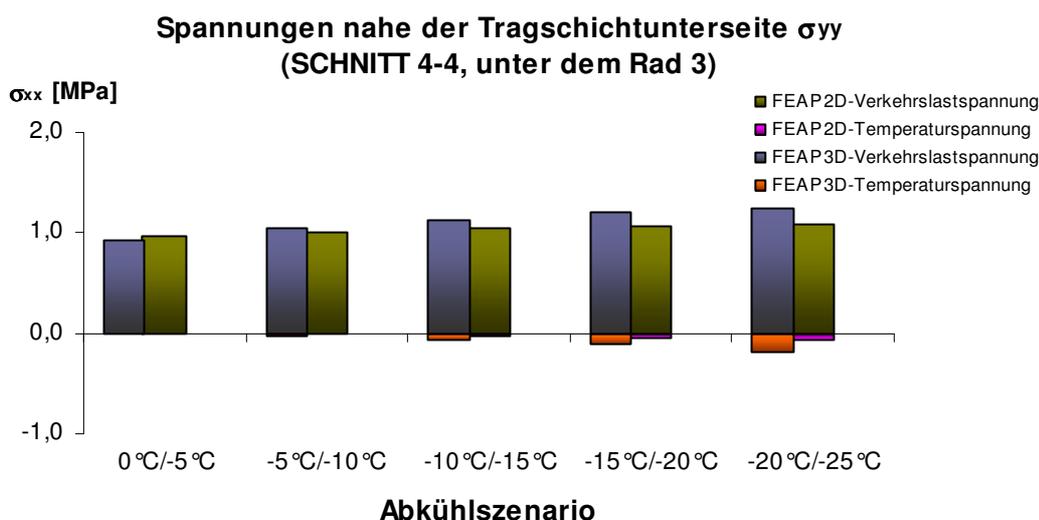


Abbildung 104: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – Spannungen σ_{yy} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite unter dem Rad 3

Für die Spannungskomponente σ_{zz} werden bei beiden Simulationsmodellen geringe Werte berechnet, wobei die 3D-Berechnung etwas höhere Zugspannungen ausgibt.

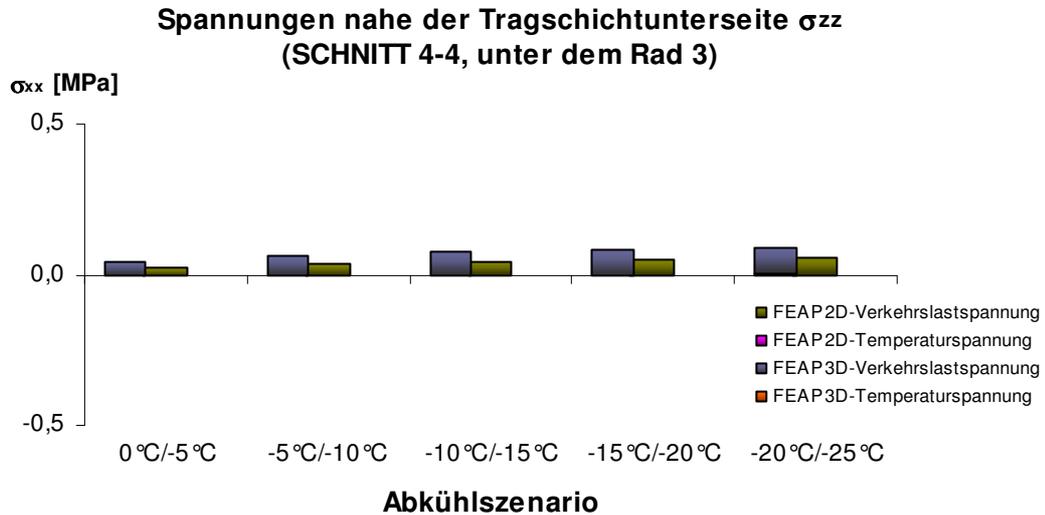


Abbildung 105: Gegenüberstellung verschiedener Temperaturszenarien – Spannungen σ_{zz} nahe der bituminösen Tragschichtunterseite unter dem Rad 3

5.3.3 Verzerrungen

Das Ergebnis der Verformungsberechnung mit FEAP 2D ist ein ebener Verzerrungszustand. Aus einem ebenen Verzerrungszustand resultiert ein räumlicher Spannungszustand (Mang/Hofstetter 2000). Da bei der zweidimensionalen Berechnung alle Normalverzerrungskomponenten ϵ_{yy} gleich null sind, werden nachfolgend nur die Normalverzerrungskomponenten ϵ_{xx} und ϵ_{zz} gegenübergestellt.

5.3.3.1 oberflächennahe Verzerrungen

Der Vergleich der oberflächennahen Verzerrungen zufolge Temperaturabsenkung zeigt, dass mit FEAP 2D etwas höhere Werte für die Verzerrungen in x- sowie z-Richtung berechnet werden (siehe Abbildung 106 und Abbildung 107). Betrachtet man die Resultate der Verzerrungskomponente ϵ_{xx} so beträgt die Differenz der beiden Programme bis zu 38 %.

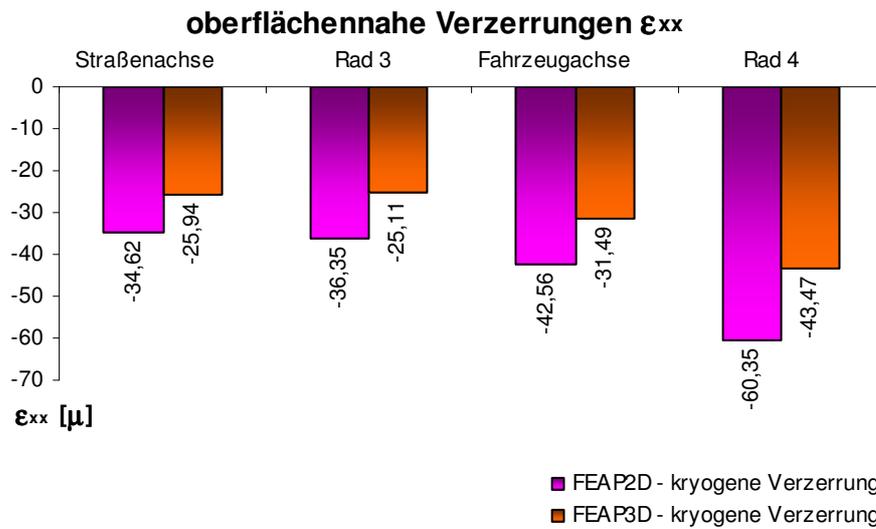


Abbildung 106: Gegenüberstellung der Lastfälle 2DT3 vs. 3DT3 - oberflächennahe Verzerrungen ϵ_{xx} zufolge Temperaturabsenkung

Bei der Komponente ϵ_{zz} ist der Unterschied geringer und beträgt bis zu 6 %.

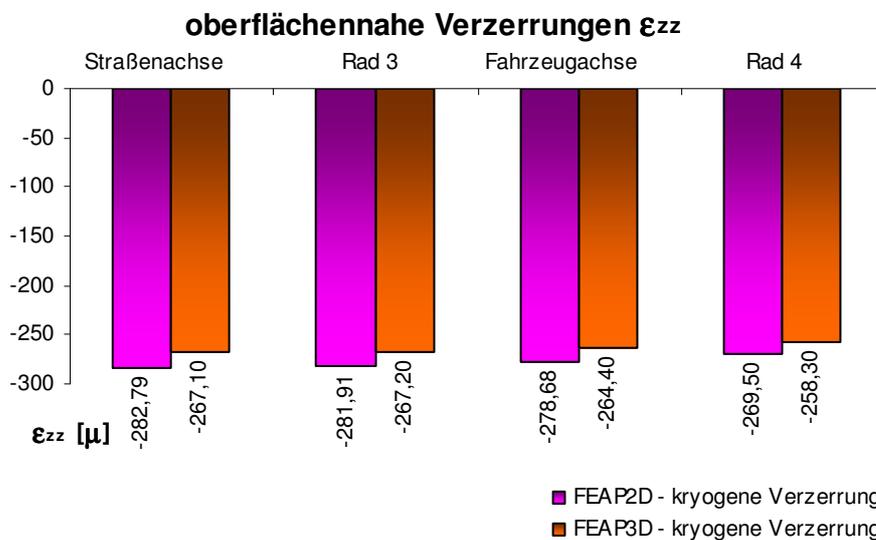


Abbildung 107: Gegenüberstellung der Lastfälle 2DT3 vs. 3DT3 - oberflächennahe Verzerrungen ϵ_{zz} zufolge Temperaturabsenkung

Die Gegenüberstellung der oberflächennahen Verzerrungen zufolge Verkehrslast zeigt ähnliche Tendenzen wie der Vergleich der Spannungen. Das zweidimensionale Programm berechnet Verzerrungen ϵ_{xx} und ϵ_{zz} , die um ein Vielfaches größer sind als jene, die mit FEAP 3D berechnet werden (siehe Abbildung 108 und Abbildung 109). Im Falle der Komponente ϵ_{zz} weisen die Ergebnisse teilweise sogar unterschiedliche Vorzeichen auf.

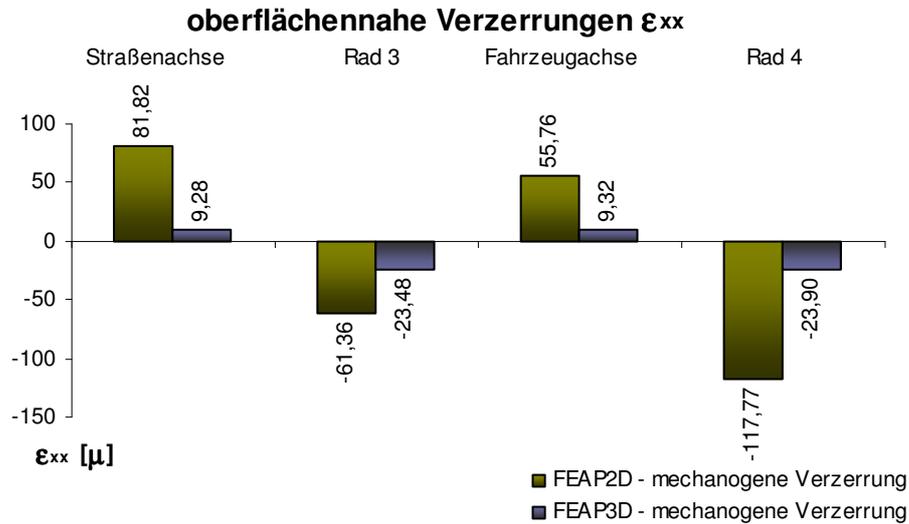


Abbildung 108: Gegenüberstellung der Lastfälle 2DT3 vs. 3DT3 - oberflächennahe Verzerrungen ϵ_{xx} zufolge Verkehrslast

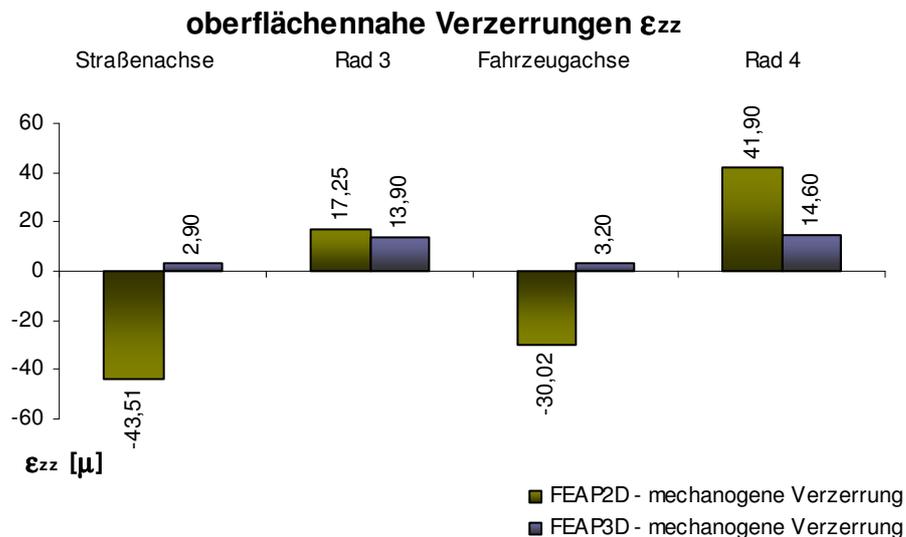


Abbildung 109: Gegenüberstellung der Lastfälle 2DT3 vs. 3DT3 - oberflächennahe Verzerrungen ϵ_{zz} zufolge Verkehrslast

5.3.3.2 Verzerrungen an der Unterseite der bituminösen Tragschichte

In Abbildung 110 ist ersichtlich, dass, analog zur Straßenoberfläche, FEAP 2D betragsmäßig größere Werte für die Verzerrungskomponente ϵ_{xx} zufolge Temperaturabsenkung an der Unterseite der gebunden Schichte berechnet. Die Differenz der beiden Berechnungsvarianten beträgt bis zu 37 %.

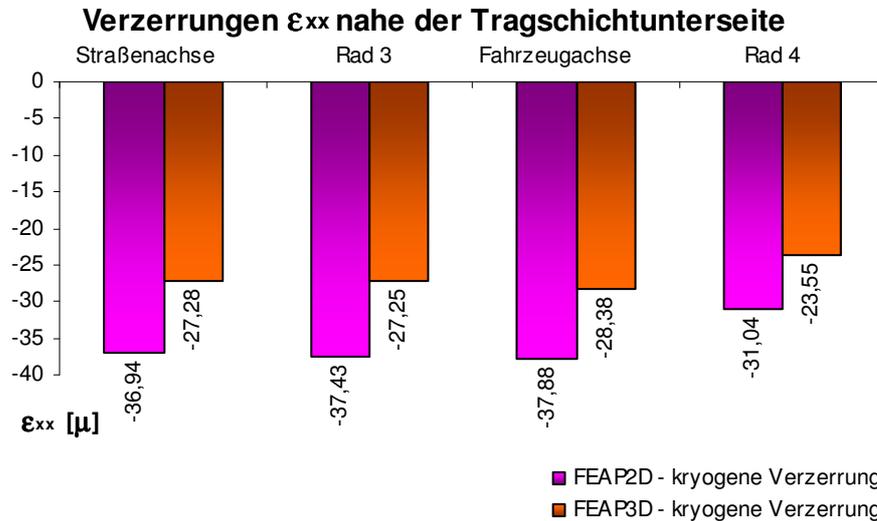


Abbildung 110: Gegenüberstellung der Lastfälle 2DT3 vs. 3DT3 - Verzerrungen ϵ_{xx} nahe der bit. Tragschichtunterseite zufolge Temperaturabsenkung

Im Fall der Komponente ϵ_{zz} ist es umgekehrt, die mit dem dreidimensionalen Programm errechneten Werte sind höher als jene mit dem zweidimensionalen Modell (siehe Abbildung 111).

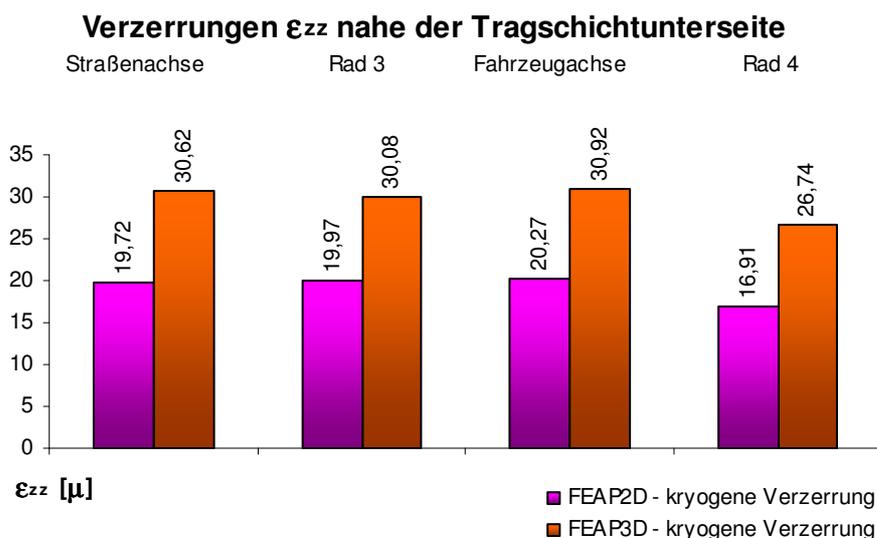


Abbildung 111: Gegenüberstellung der Lastfälle 2DT3 vs. 3DT3 - Verzerrungen ϵ_{zz} nahe der bit. Tragschichtunterseite zufolge Temperaturabsenkung

Bei den mechanogenen Verzerrungen an der Unterseite der bituminösen Tragschichte sind die Unterschiede wesentlich größer. Dies ist in Abbildung 112 und Abbildung 113 ersichtlich. Ähnlich zu den oberflächennahen Verzerrungen errechnet FEAP 2D wesentlich höhere Werte für die Verzerrungskomponente ϵ_{xx} als FEAP 3D.

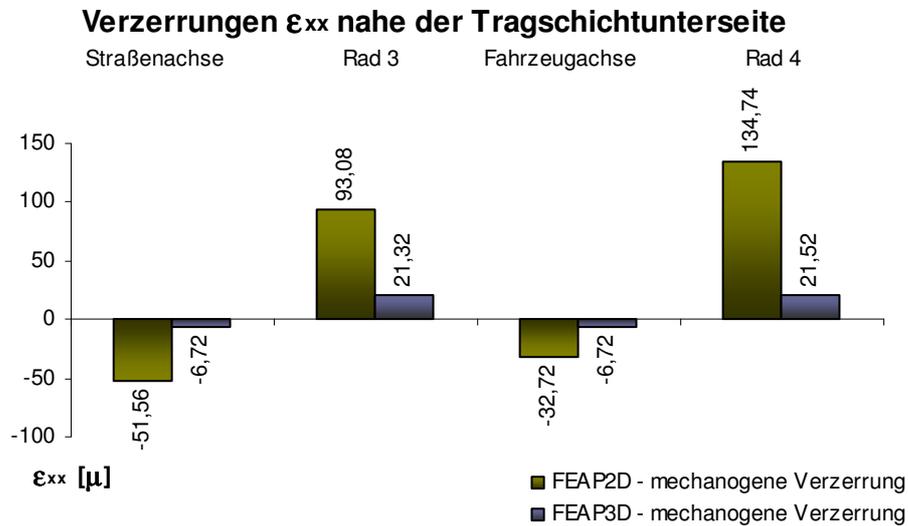


Abbildung 112: Gegenüberstellung der Lastfälle 2DT3 vs. 3DT3 - Verzerrungen ϵ_{xx} nahe der bit. Tragschichtunterseite zufolge Verkehrslast

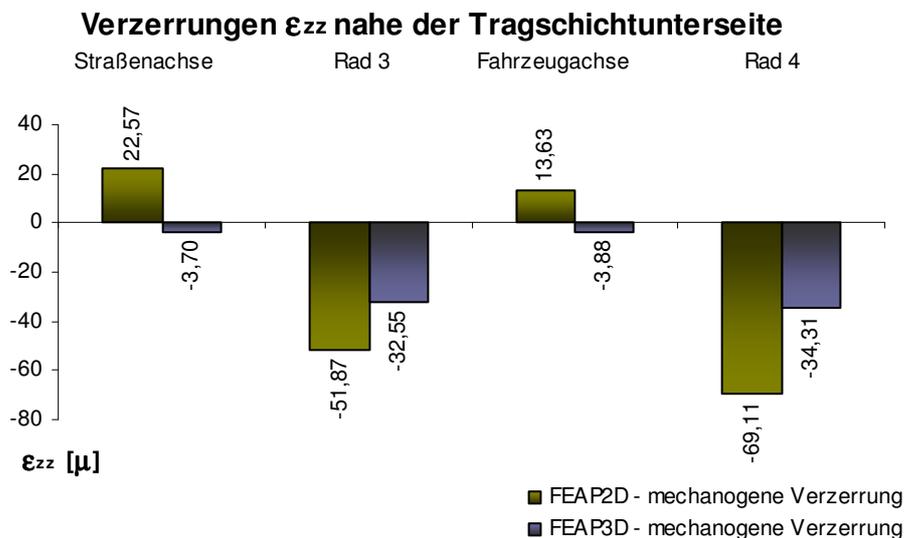


Abbildung 113: Gegenüberstellung der Lastfälle 2DT3 vs. 3DT3 - Verzerrungen ϵ_{zz} nahe der bit. Tragschichtunterseite zufolge Verkehrslast

6 PARAMETERSTUDIEN ZUM POWER-LAW-MODELL

Dieser Abschnitt beinhaltet Studien zur Abschätzung des Einflusses einzelner Materialparameter auf die resultierenden Spannungen. Die Analysen erfolgen entweder durch zwei- oder dreidimensionale Berechnungen. Dabei werden hauptsächlich die horizontalen Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} an bestimmten Stellen untersucht. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse befindet sich im Anhang.

6.1 Verhältnis der Kriechnachgiebigkeiten in den gebundenen Schichten

6.1.1 Basisangaben

Im Kapitel 5.3.1.1 wurde eine Abnahme der oberflächennahen horizontalen Zugspannungen zufolge Verkehrslast in der Straßenachse mit Abnahme des Temperaturniveaus beobachtet. Daher beschäftigt sich diese Studie mit dem Verhältnis der initialen Kriechnachgiebigkeiten J_a von der Deckschichte zur bituminösen Tragschichte.

Sämtliche Simulationen erfolgen anhand des 2D-Modells für das Abkühl Szenario -10 °C auf -15 °C in einer Stunde. Im Referenzszenario bestehen beide gebundenen Schichten aus dem gleichen Material und werden durch die Kennwerte in Tabelle 18 beschrieben.

Tabelle 18: Referenzszenario - Materialparameter für die ungebundenen Schichten

Parameter	SMA 11 pmB45/80-65	AC 22 binder pmB45/80-65
Wärmedehnzahl α_t [1/K]	0,00003	0,00003
Querdehnzahl ν [-]	0,35	0,35
Glasmodul E_{inf} [MPa]	30000	30000
Initiale Kriechnachgiebigkeit J_a [MPa]	0,00002	0,00002
k-Wert [-]	0,40	0,40

Die ungebundenen Schichten haben die Eigenschaften gemäß Tabelle 7.

In dieser Studie wird der Parameter J_a der bituminösen Tragschichte variiert. Die Auswirkungen auf die Temperatur-, Verkehrs- und Gesamtspannungen werden untersucht und für folgende zwei Punkte gemäß Abbildung 114 ausgewertet:

- Punkt A: Straßenachse nahe der Straßenoberfläche
- Punkt B: unter dem Rad 3 an der Unterseite der bituminösen Tragschichte.

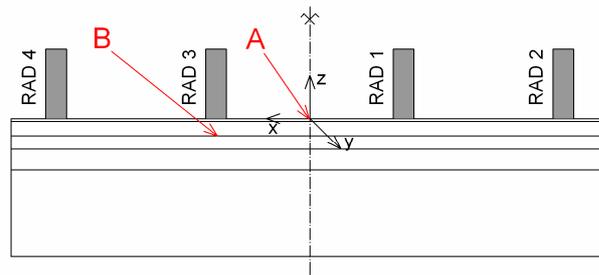


Abbildung 114: Punkt A und B

6.1.2 Berechnungsergebnisse

6.1.2.1 Ergebnisse im Punkt A

Abbildung 115 und Abbildung 116 zeigen die unterschiedlichen Auswirkungen auf die Verkehrslastspannung und die Temperaturspannung im Punkt A. Die Abnahme der initialen Kriechnachgiebigkeit $J_{a,AC}$ der bituminösen Tragschichte bewirkt eine Abnahme der Verkehrslastspannungen und eine Zunahme der Temperaturspannungen σ_{xx} und σ_{yy} an der Straßenoberfläche. Diese Systemreaktionen erfolgen aufgrund verschiedener Zusammenhänge. Die zeitliche Veränderung der Systemantwort ist durch eine Mischform von Kriechen und Relaxation gekennzeichnet.

Die Abnahme der Kriechnachgiebigkeit $J_{a,AC}$ bewirkt, dass mit zunehmender Zeit die Formänderungen in der bituminösen Tragschichte im Verhältnis zur Asphaltdeckschichte geringer werden bzw. dass sich die Relaxation langsamer ausbildet. Die Asphaltdeckschichte relaxiert, relativ gesehen, schneller und somit ist die Abnahme der Verkehrsspannungen in Abbildung 115 als realistisch einzustufen. Bei der Spannung zufolge Temperaturabsenkung ist es genau umgekehrt. Hier wirkt die bituminöse Tragschichte der Schrumpfung der Deckschichte entgegen. Wie bereits erwähnt hat eine Abnahme der Kriechnachgiebigkeit eine Abnahme der Formänderung zufolge. Ist die Verformung der bituminösen Tragschichte an der Grenzfläche zur Asphaltdeckschichte geringer, so hat dies eine Zunahme der Krümmung und daraus resultierenden Temperaturspannungen an der Straßenoberfläche zur Folge.

Zum besseren Verständnis werden die Abszissen- sowie die Ordinatenbeschriftungen der nachfolgenden Abbildungen näher erläutert:

- σ/σ_0 ist der Verhältnis der Spannung des jeweiligen Lastfalles zum Referenzlastfall, bei dem die Materialparameter der beiden ungebundenen Schichten identisch sind
- $J_{a,SMA}/J_{a,AC}$ ist der Quotient der initialen Kriechnachgiebigkeiten von der Deckschichte und Tragschichte für den betrachteten Lastfall.

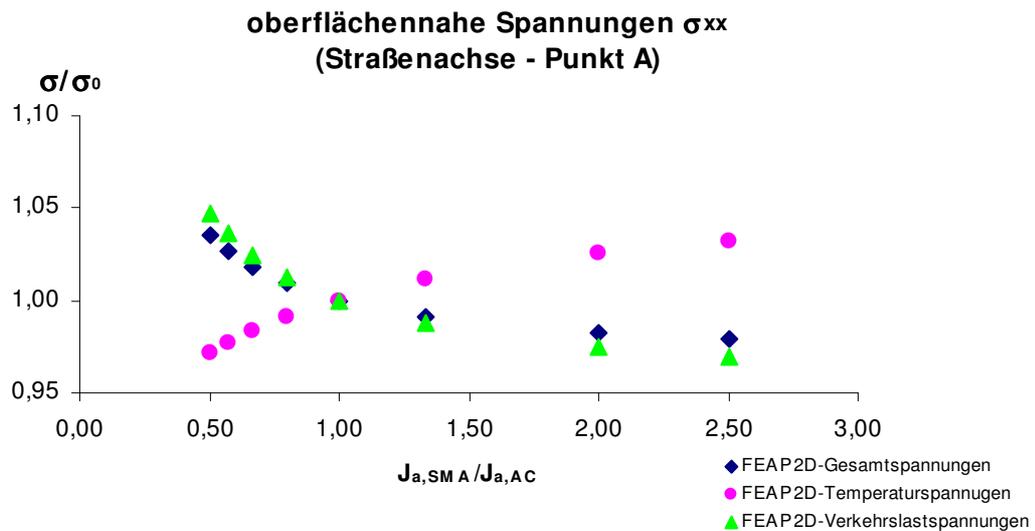


Abbildung 115: Auswirkung der Kriechnachgiebigkeit J_a auf die Spannung σ_{xx} im Punkt A

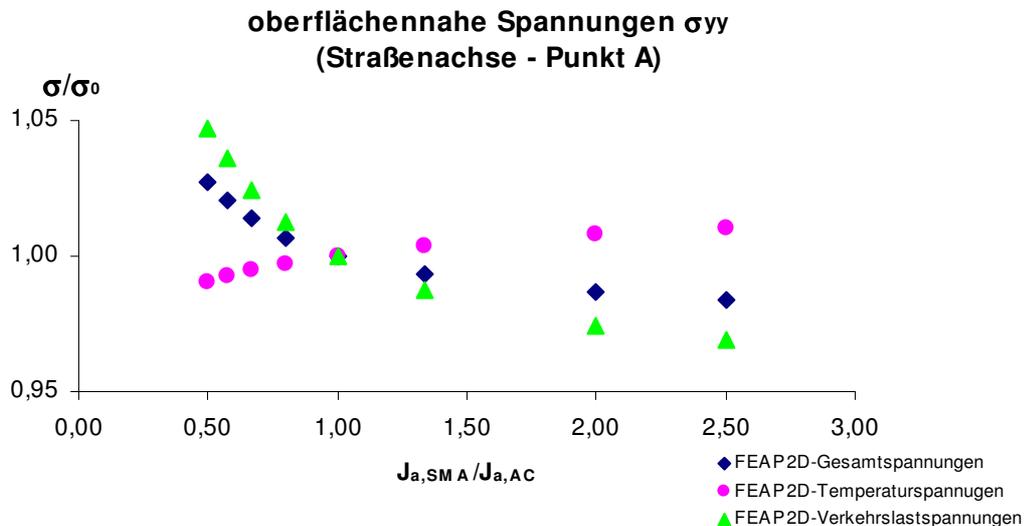


Abbildung 116: Auswirkung der Kriechnachgiebigkeit J_a auf die Spannung σ_{yy} im Punkt A

6.1.2.2 Ergebnisse im Punkt B

Im Gegensatz zu Punkt A ist im Punkt B mit Abnahme der initialen Kriechnachgiebigkeit $J_{a,AC}$ eine Zunahme von Temperaturspannung und Verkehrslastspannung zu beobachten. Gemäß Abbildung 117 sowie Abbildung 118 ist die relative Erhöhung bei der Temperaturspannung besonders ausgeprägt. Diese Vergrößerung der Temperaturspannungen resultiert aus der verminderten Relaxation

in der bituminösen Tragschichte. Ebenso bewirkt diese, relativ zur Deckschichte, verminderte Relaxation eine Zunahme der Spannungen zufolge Verkehrslast, da sich die Deckschichte mit zunehmender Dauer der Mitwirkung entzieht. Letzteres hat eine Spannungsumlagerung in die bituminöse Tragschichte zur Folge.

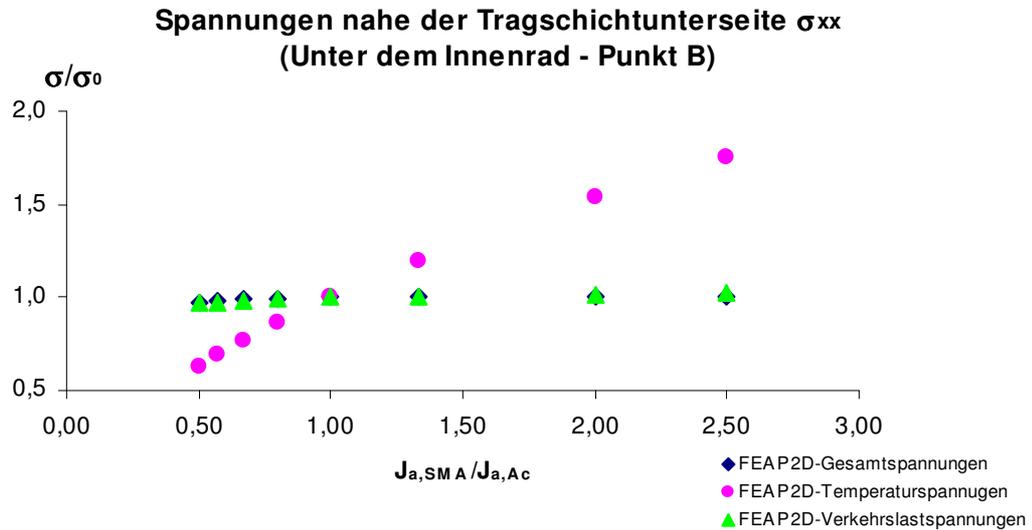


Abbildung 117: Auswirkung der Kriechnachgiebigkeit J_a auf die Spannung σ_{xx} im Punkt B

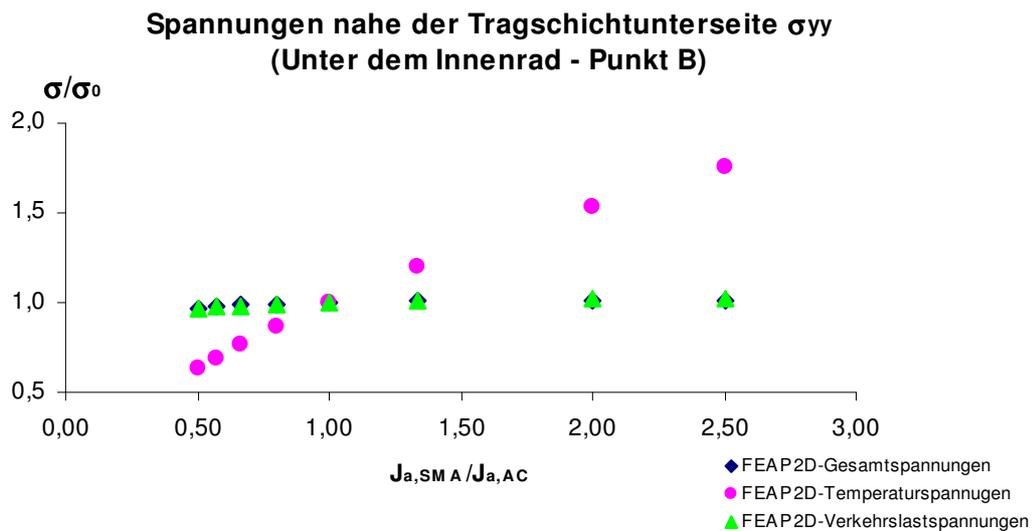


Abbildung 118: Auswirkung der Kriechnachgiebigkeit J_a auf die Spannung σ_{yy} im Punkt B

Zur besseren Erkennbarkeit ist die geringfügige relative Zunahme der Verkehrslastspannung in Abbildung 119 und Abbildung 120 nochmals abgebildet.

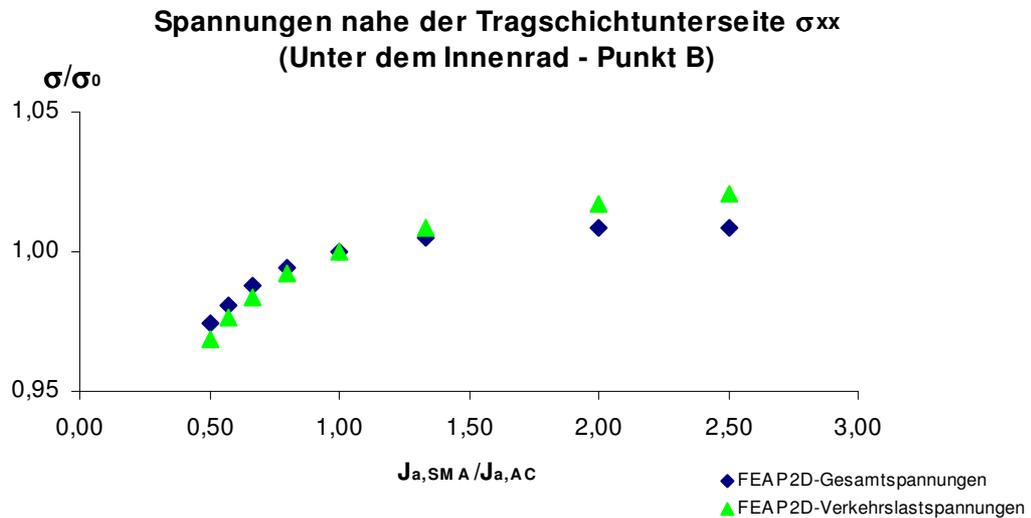


Abbildung 119: Auswirkung der Kriechnachgiebigkeit J_a auf die Spannung σ_{xx} im Punkt B (ohne Temperaturspannung)

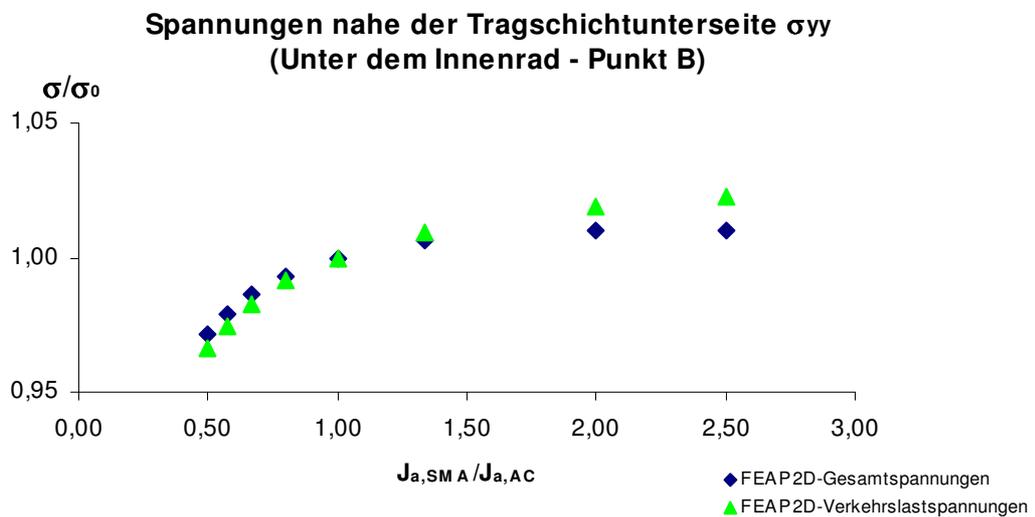


Abbildung 120: Auswirkung der Kriechnachgiebigkeit J_a auf die Spannung σ_{yy} im Punkt B (ohne Temperaturspannung)

6.1.3 Schlussfolgerung

Eine Prognose der Auswirkung unterschiedlicher Kriechnachgiebigkeiten J_a auf die Gesamtspannung ist nicht möglich, da die Einzelanteile zufolge Temperatur und Verkehr sich unterschiedlich, erhöhend oder vermindern, auswirken. Bei verschiedenen Temperaturniveaus ergeben sich bei gleicher Abkühlrate unterschiedliche Temperaturspannungen. Je tiefer die Temperatur, desto größer die kryogenen Spannungen, und desto höher wird der Anteil der Temperaturspannung an der Gesamtspannung.

6.2 Parameterstudie mit dem 2D-Power-Law-Modell

Diese Studie untersucht die Auswirkung einer 1%-igen Materialparameteränderung in der Asphaltdeckschichte mit dem zweidimensionalen Strukturmodell.

6.2.1 Basisangaben

Die Parameter des Referenzlastfalls für die gebundenen Schichten sind in Tabelle 19 angeführt.

Tabelle 19: Referenzlastfall FEAP 2D - Materialparameter für die ungebundenen Schichten

Parameter	SMA 11 pmB45/80-65	AC 22 binder pmB45/80-65
Wärmedehnzahl α_t [1/K]	0,000028	0,000025
Querdehnzahl ν [-]	0,35	0,35
Glasmodul E_{inf} [MPa]	35000	36000
Initiale Kriechnachgiebigkeit J_a [MPa]	0,0000076	0,000085
m-Wert [-]	0,35	0,25

Die ungebundenen Schichten haben eine gemäß der Frühjahrsperiode verminderte Tragfähigkeit (siehe Tabelle 7).

Die Variation der Parameter erfolgt gemäß nachstehender Auflistung:

- Jeder Deckschichtparameter gemäß Tabelle 20 wird um 1 % erhöht und die Auswirkung auf die resultierenden kryogenen, Verkehrslast- und Gesamtspannungen ermittelt.
- Die Abkühlrate beträgt 5 °C in einer Stunde.
- Die Starttemperaturen sind 0 °C, -10 °C und -20 °C.

Das Strukturmodell entspricht der Abbildung 36.

6.2.2 Berechnungsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Spannungen σ_{xx} für den Punkt A gemäß Abbildung 114 dargestellt.

Den größten Einfluss auf die kryogenen Spannungen bei 1%-iger Parameteränderung hat der k-Wert (in Abbildung 120 als m-Wert bezeichnet). Die Studie zeigt, dass die eine Änderung des k-Wertes bei niedrigerer Starttemperatur eine geringere Auswirkung auf die Temperaturspannungen hat als bei einer höheren Starttemperatur.

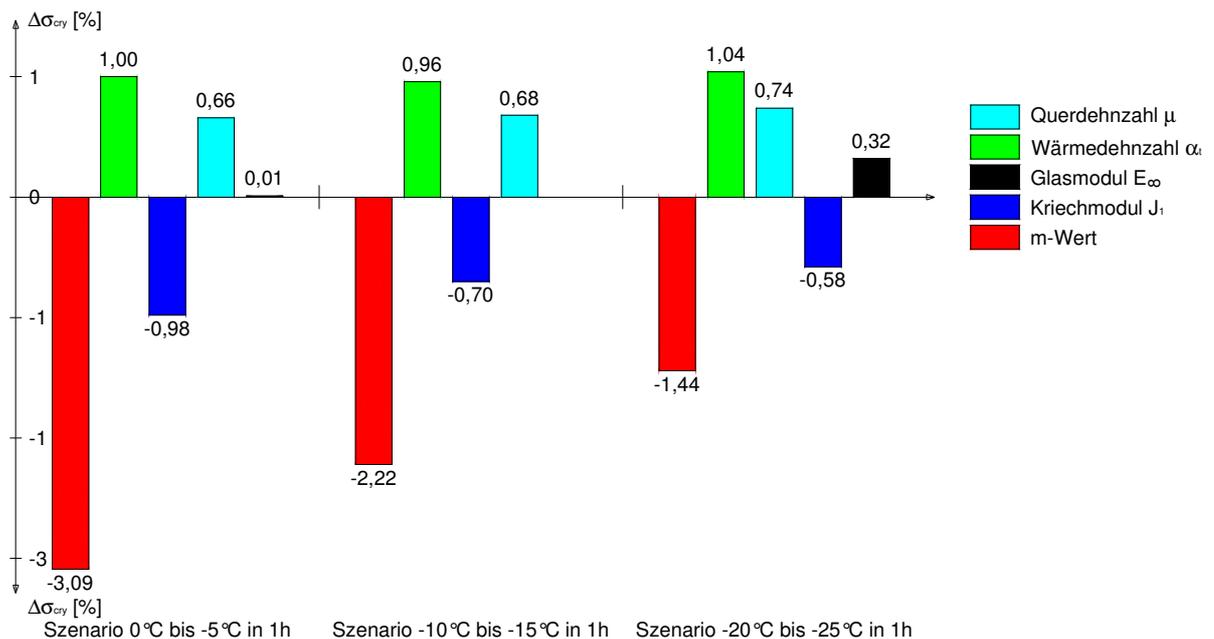


Abbildung 121: Auswirkung der Deckschichtparameteränderung von 1 % auf die kryogene Spannung σ_{xx} im Punkt A

Im Gegensatz zu den kryogenen Spannungen hat die 1 %-ige Änderung des Glasmoduls E_{inf} (auch als E_∞ bezeichnet) auf die Verkehrslastspannung die größte Auswirkung. Dies ist bei allen drei Temperaturszenarios zu beobachten.

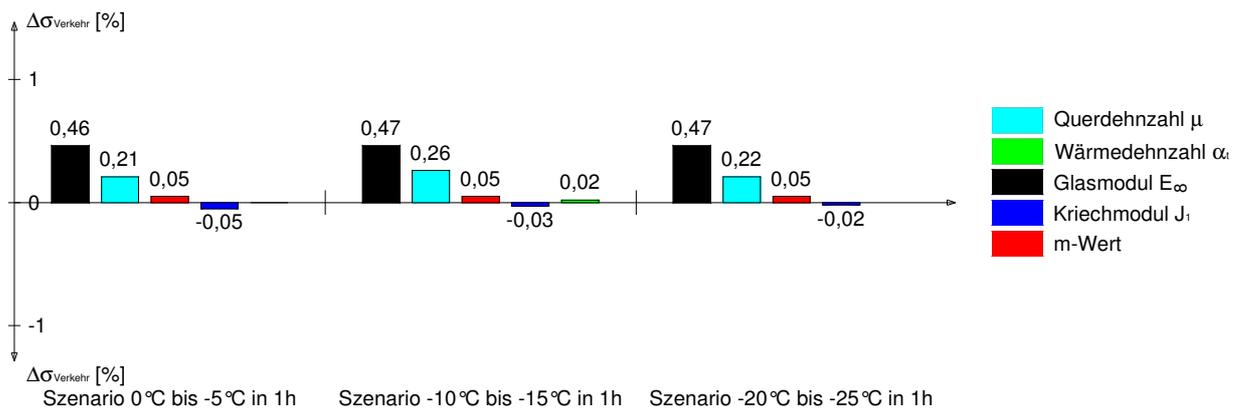


Abbildung 122: Auswirkung der Deckschichtparameteränderung von 1 % auf die Verkehrslastspannung σ_{xx} im Punkt A

Die Einflüsse der Deckschicht-Materialparameter auf die resultierende Gesamtspannung sind temperaturabhängig (siehe Abbildung 123). Bei sehr niedrigen Temperaturen haben alle Materialparameter einen bedeutenden Einfluss, wobei der Einfluss des k-Wertes (entspricht dem m-Wert gemäß Abbildung 123) betragsmäßig am größten ist. Mit Temperaturzunahme nimmt der Einfluss des k-Wertes ab. Bei Temperaturszenarien mit höheren Temperaturen hat der Materialparameter Glasmodul E_{inf} bzw. E_∞ den größten Einfluss.

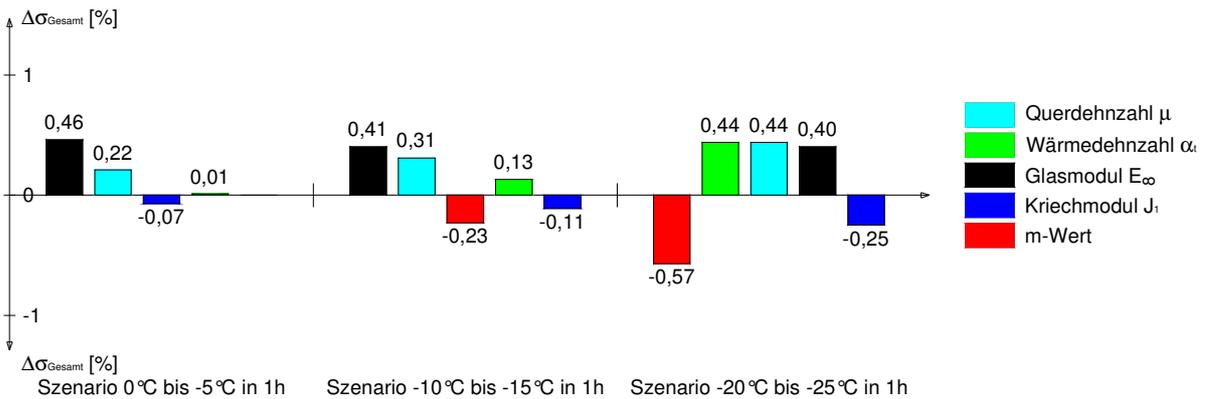


Abbildung 123: Auswirkung der Deckschichtparameteränderung von 1 % auf die Gesamtspannung σ_{xx} im Punkt A

6.3 Parameterstudie mit dem 3D-Power-Law-Modell

Die Systemreaktion des untersuchten Modells wird zu einem beachtlichen Anteil durch die Materialparameter der gebundenen Schichten beeinflusst. Die Veränderung eines Materialkennwertes hat somit eine Auswirkung auf das Berechnungsergebnis. Daher beschäftigt sich diese Studie mit Parametervariationen und den daraus resultierenden Effekten. Die Untersuchung beschränkt sich auf die oberflächennahen Spannungen σ_{xx} in der Straßenachse. Diese Spannungen wirken in Straßenquerrichtung und können Längsrisse hervorrufen. Eine Zusammenstellung der Verläufe aller Spannungs-komponenten ist im Anhang enthalten.

6.3.1 Basisangaben

Als Basis der nachfolgenden Analysen mit dem dreidimensionalen Rechenmodell wird ein Referenzlastfall definiert. Alle Untersuchungen erfolgen für eine Oberflächenabkühlung von -10 °C auf -15 °C in einer Stunde. Im Referenzlastfall sind die gebundenen Schichten durch die Materialparameter gemäß Tabelle 20 charakterisiert.

Tabelle 20: Referenzlastfall FEAP 3D- Materialparameter für die ungebundenen Schichten

Parameter	SMA 11 pmB45/80-65	AC 22 binder pmB45/80-65
Wärmedehnzahl α_t [1/K]	0,0000311	0,0000236
Querdehnzahl ν []	0,35	0,35
Glasmodul E_{inf} [MPa]	30570	31170
Initiale Kriechnachgiebigkeit J_a [MPa]	0,0000105	0,0000298
k-Wert []	0,41	0,41

Die ungebundenen Schichten haben eine gemäß der Frühjahrsperiode verminderte Tragfähigkeit (siehe Tabelle 7).

Die Variation der Parameter erfolgt folgendermaßen:

- Jeder Parameter gemäß Tabelle 20 wird ein Mal um 10 % erhöht sowie ein Mal um 10 % vermindert
- In den einzelnen Lastfällen wird immer nur ein Materialparameter variiert, die verbleibenden Kennwerte sind identisch mit dem Referenzlastfall.

Wie bereits erwähnt, gilt den horizontalen oberflächennahen Spannungen σ_{xx} besondere Aufmerksamkeit. Dabei wird folgender Punkt betrachtet:

- Punkt A: Straßenachse nahe der Straßenoberfläche (siehe Abbildung 114).

6.3.2 Berechnungsergebnisse

6.3.2.1 Ergebnisse zufolge Variation der Deckschichtparameter

Die Variation des Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T,SMA}$ um $\pm 10\%$ und die daraus resultierende Auswirkung auf die Spannungen ist in Abbildung 124 dargestellt. Nur die Temperaturspannung wird durch diesen Materialkennwert beeinflusst. Eine Zunahme der Wärmedehnzahl führt zu einer Vergrößerung der kryogenen Spannungen.

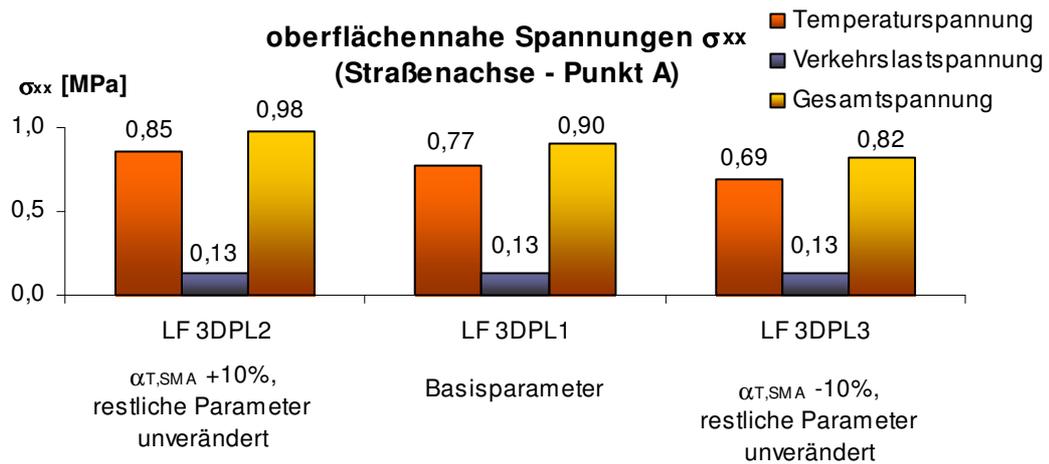


Abbildung 124: Spannung σ_{xx} bei Variation der Wärmedehnzahl $\alpha_{T,SMA}$ in der Asphaltdeckschichte

Die Querdehnzahl ν ist in der Materialnachgiebigkeitsmatrix G enthalten (siehe Gleichung 72). Daher wirkt sich eine Änderung der Querdehnzahl ν_{SMA} des Deckschichtmaterials auch auf die resultierenden Spannungen aus. Eine Erhöhung dieses Parameters führt laut Abbildung 125 zu einer Verminderung der Temperaturspannung und der Gesamtspannung sowie einer Zunahme der Verkehrslastspannung im Punkt A des Straßenquerschnittes.

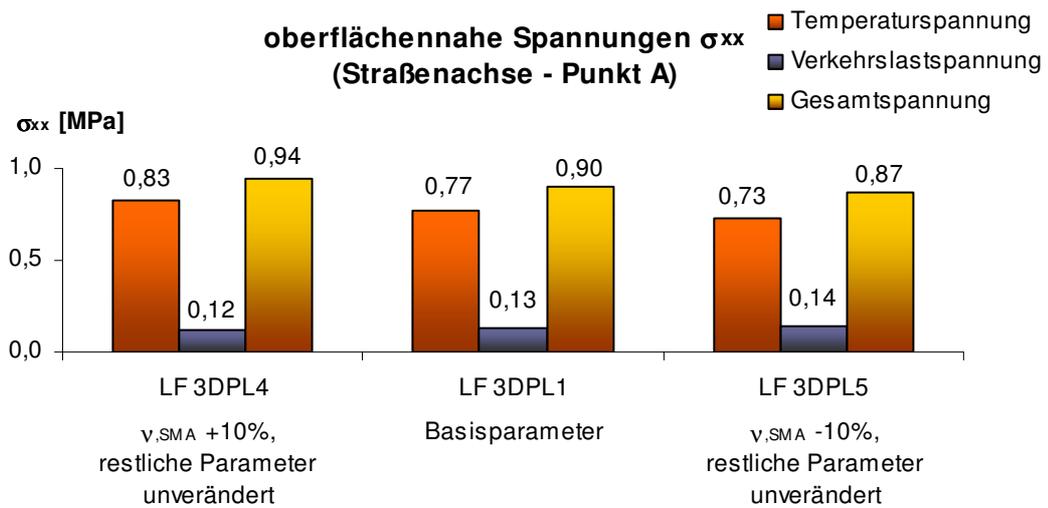


Abbildung 125: Spannung σ_{xx} bei Variation der Querdehnzahl ν_{SMA} in der Asphaltdeckschichte

Der Glasmodul $E_{inf,SMA}$ beeinflusst sowohl die Temperatur- als auch die Verkehrslastspannungen in einem geringen Ausmaß (siehe Abbildung 126). Größere Werte für den Glasmodul haben eine Zunahme der Spannungen zur Folge.

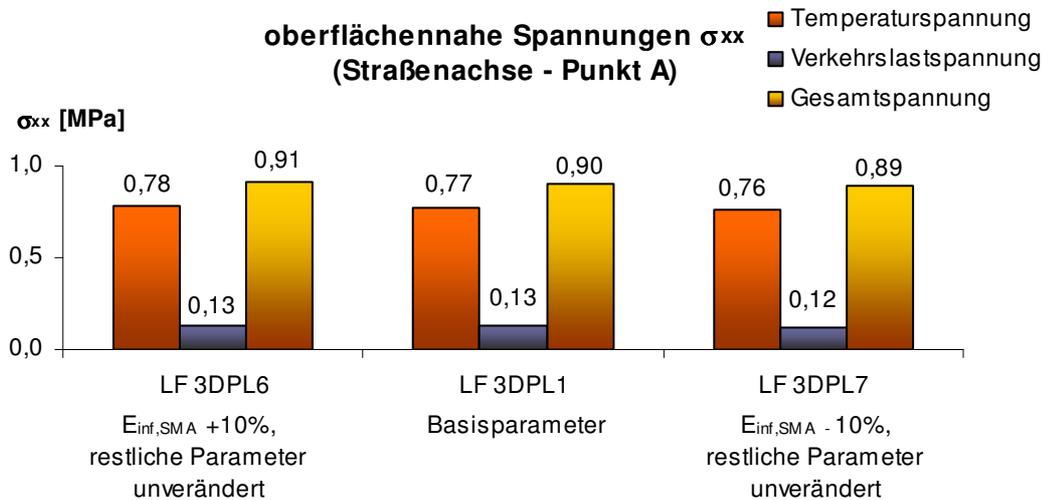


Abbildung 126: Spannung σ_{xx} bei Variation des Glasmoduls $E_{inf,SMA}$ in der Asphaltdeckschichte

Eine beachtliche Auswirkung auf die kryogenen Spannungen entsteht bei Veränderung der initialen Kriechnachgiebigkeit $J_{a,SMA}$ (vgl. Abbildung 127). Die Temperaturspannung nimmt bei Abnahme dieses Materialparameters zu.

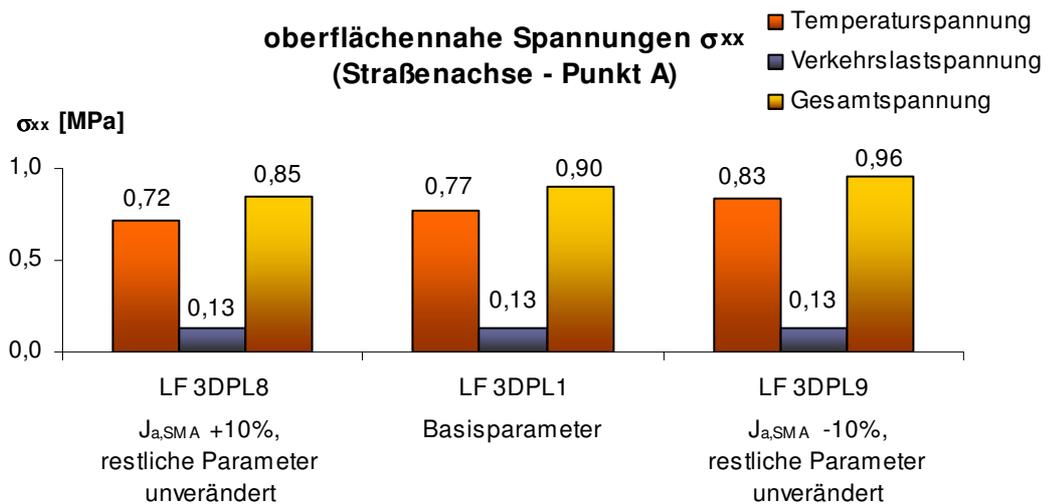


Abbildung 127: Spannung σ_{xx} bei Variation der initialen Kriechnachgiebigkeit $J_{a,SMA}$ in der Asphaltdeckschichte

Die Veränderung des Parameters k_{SMA} hat ebenfalls erhebliche Folgen auf die kryogenen Spannungen (siehe Abbildung 128). Geringere k_{SMA} -Werte führen zu höheren Temperaturspannungen.

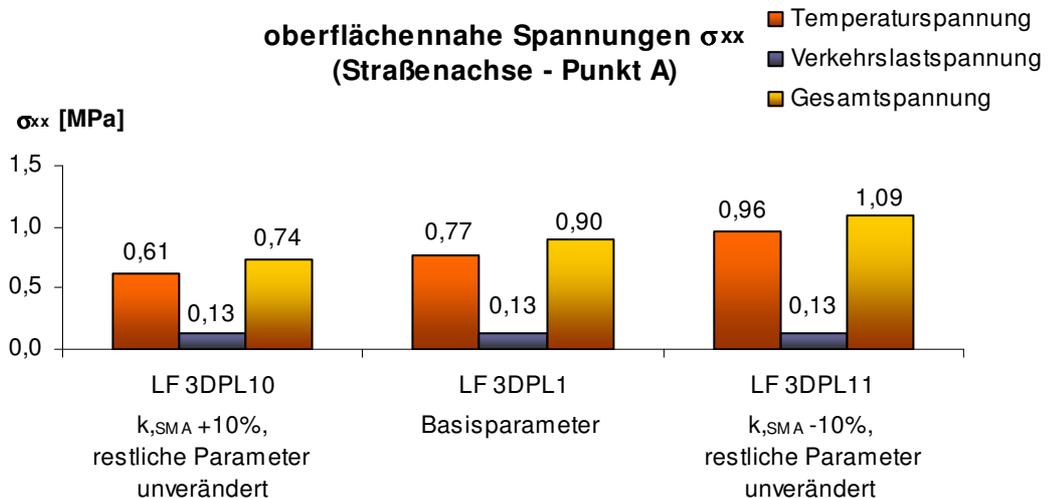


Abbildung 128: Spannung σ_{xx} bei Variation des Parameters k_{SMA} in der Asphaltdeckschichte

6.3.2.2 Ergebnisse zufolge Parametervariation in der bituminösen Tragschichte

Die Wärmedehnzahl $\alpha_{T,AC}$ hat einen geringen Einfluss auf die kryogenen Spannungen an der Straßenoberfläche (siehe Abbildung 129). Analog zur Wärmedehnzahl der

Deckschichte $\alpha_{T,SMA}$ führt eine Vergrößerung von $\alpha_{T,AC}$ zu höheren Temperaturspannungen an der Oberfläche.

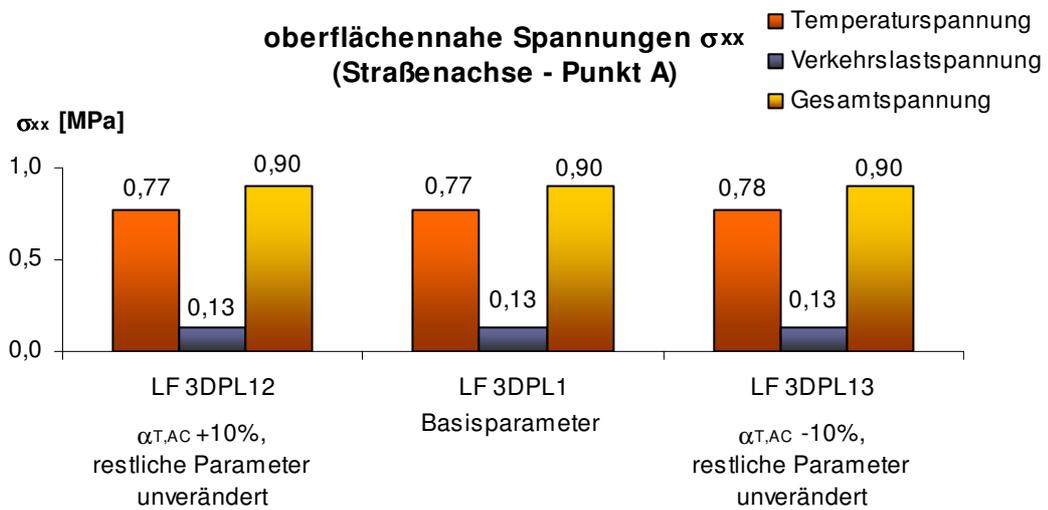


Abbildung 129: Spannung σ_{xx} bei Variation der Wärmedehnzahl $\alpha_{T,AC}$ in der bituminösen Tragschichte

Eine Modifikation der Querdehnzahl ν_{AC} der bituminösen Tragschichte verändert laut Abbildung 130 die resultierenden Temperatur-, Verkehrslast- und Gesamtspannungen in einem sehr geringen Ausmaß.

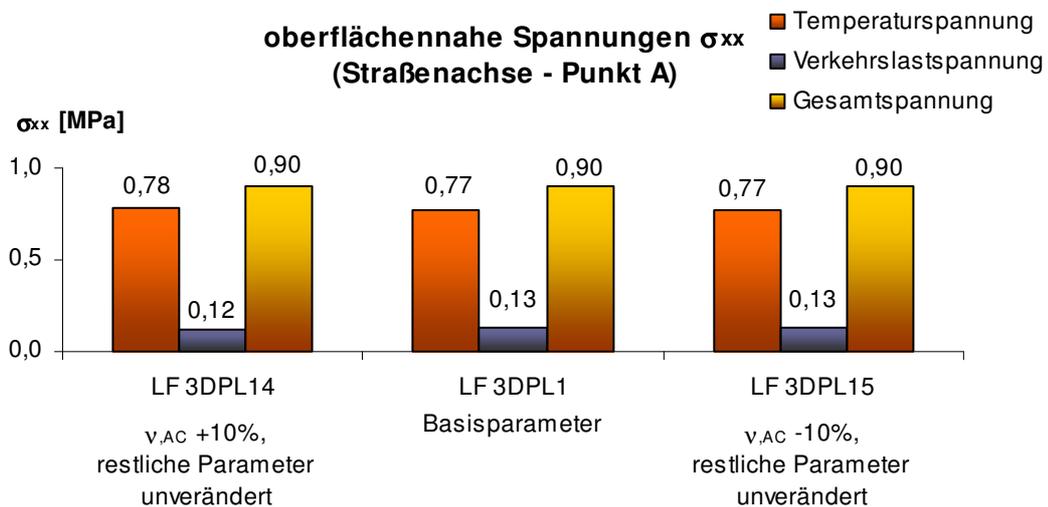


Abbildung 130: Spannung σ_{xx} bei Variation der Querdehnzahl ν_{AC} in der bituminösen Tragschichte

Variation des Glasmoduls $E_{inf,AC}$ führt zu Veränderungen der Verkehrslastspannungen. Gemäß Abbildung 131 hat die Zunahme des Parameters $E_{inf,AC}$ eine Verminderung der oberflächennahen Spannungen zur Folge.

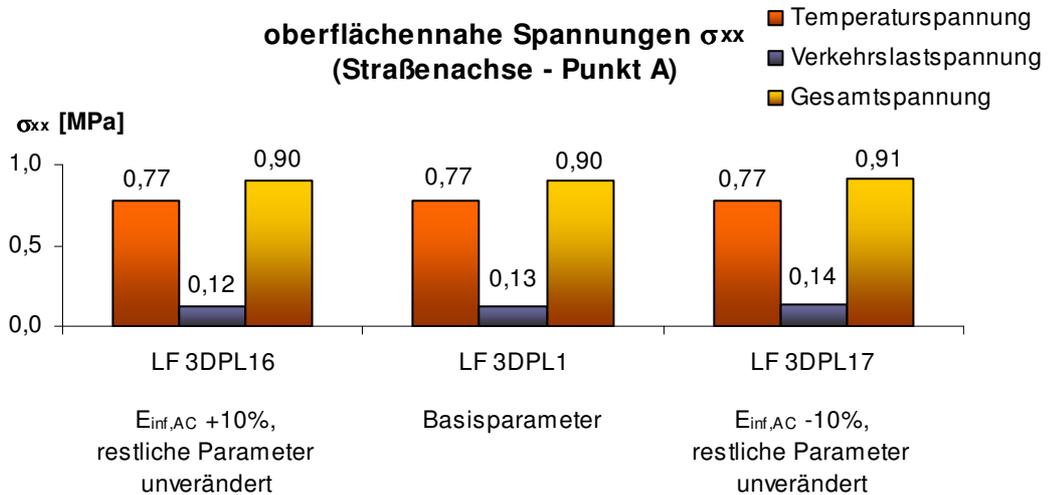


Abbildung 131: Spannung σ_{xx} bei Variation des Glasmoduls $E_{inf,AC}$ in der bituminösen Tragschichte

In Abbildung 132 ist ersichtlich, dass die Temperaturspannung mit Abnahme der initialen Kriechnachgiebigkeit $J_{a,AC}$ anwächst.

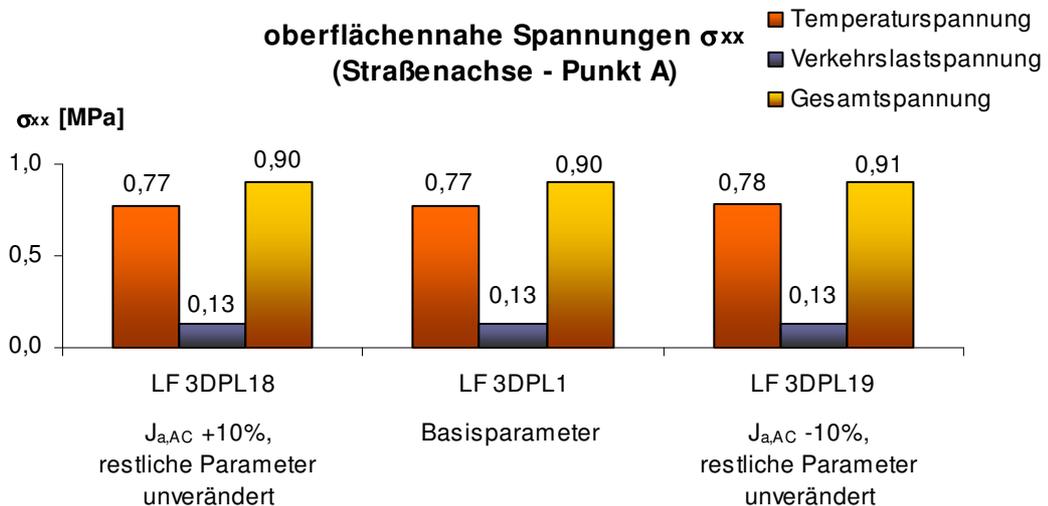


Abbildung 132: Spannung σ_{xx} bei Variation der initialen Kriechnachgiebigkeit $J_{a,AC}$ in der bituminösen Tragschichte

Ebenso bewirkt die Abnahme des Parameters k_{AC} eine Vergrößerung der kryogenen Spannungen (siehe Abbildung 133).

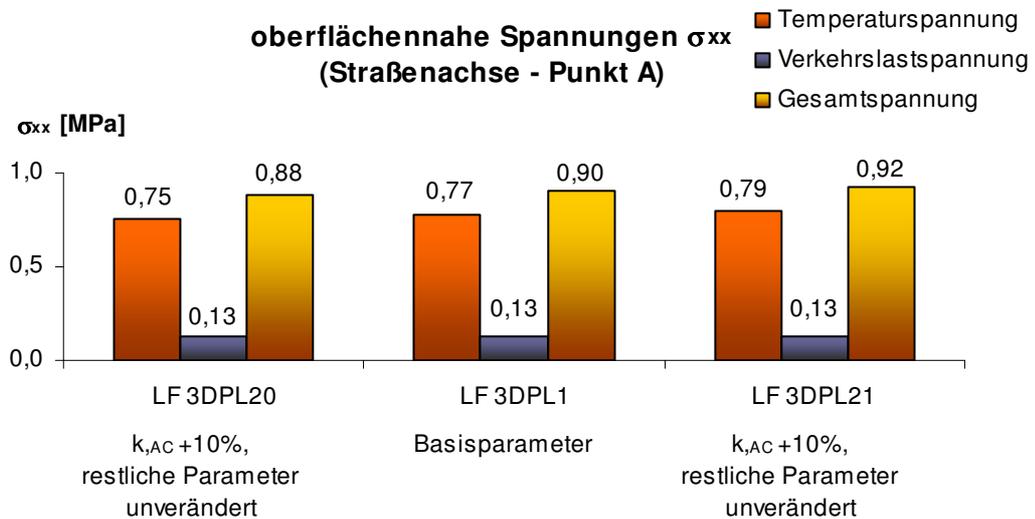


Abbildung 133: Spannung σ_{xx} bei Variation des Parameters k_{AC} in der bituminösen Tragschichte

6.3.3 Zusammenfassung und Interpretation

Die einzelnen Materialparameter wirken sich unterschiedlich auf die Temperatur-, Verkehrslast- und die Gesamtspannung aus. In Abbildung 134 sind die relativen Spannungsänderungen an der Straßenoberfläche bei Erhöhung der einzelnen Deckschichtparameter um +10 % dargestellt.

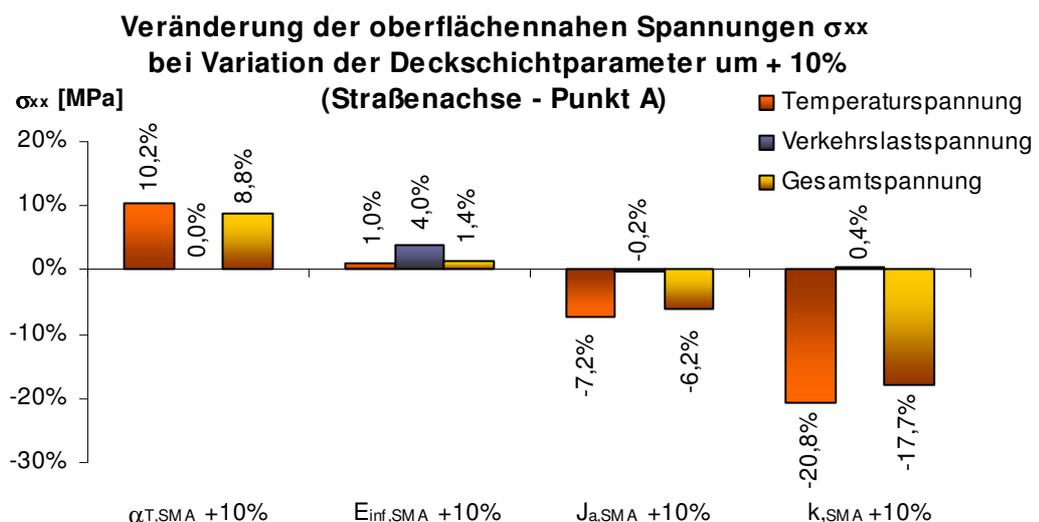


Abbildung 134: Einfluss der Deckschichtparameter auf die Spannungen σ_{xx}

Abbildung 135 veranschaulicht die Auswirkungen einer Erhöhung der einzelnen bituminösen Tragschichtparameter um +10 %.

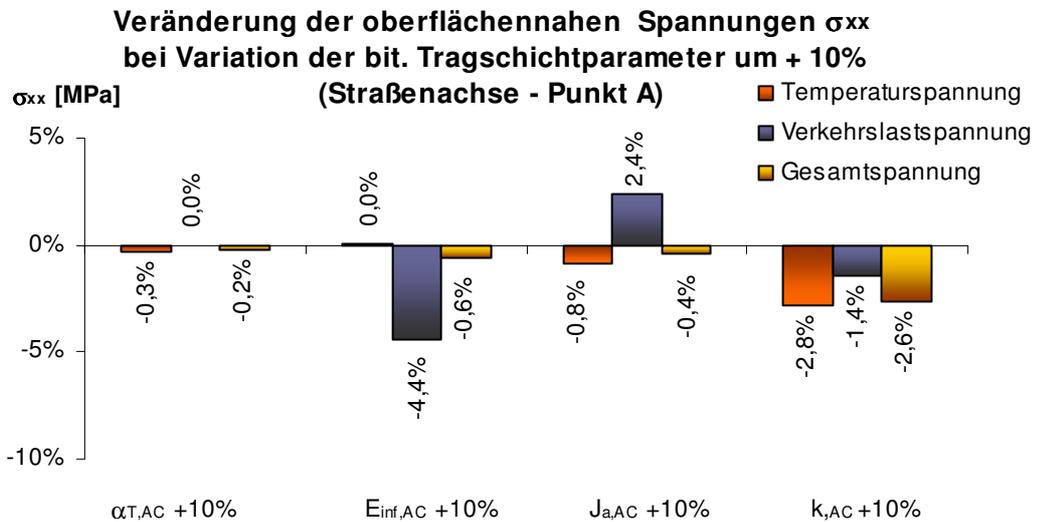


Abbildung 135: Einfluss der bit. Tragschichtparameter auf die Spannungen σ_{xx}

Generell haben die Parameter der Deckschichte eine größere Auswirkung auf die oberflächennahen Spannungen. Dies spiegelt sich in den Reihung aller untersuchten Parameter wider. Eine solche Reihung für die Temperaturspannung ist in Abbildung 136 dargestellt.

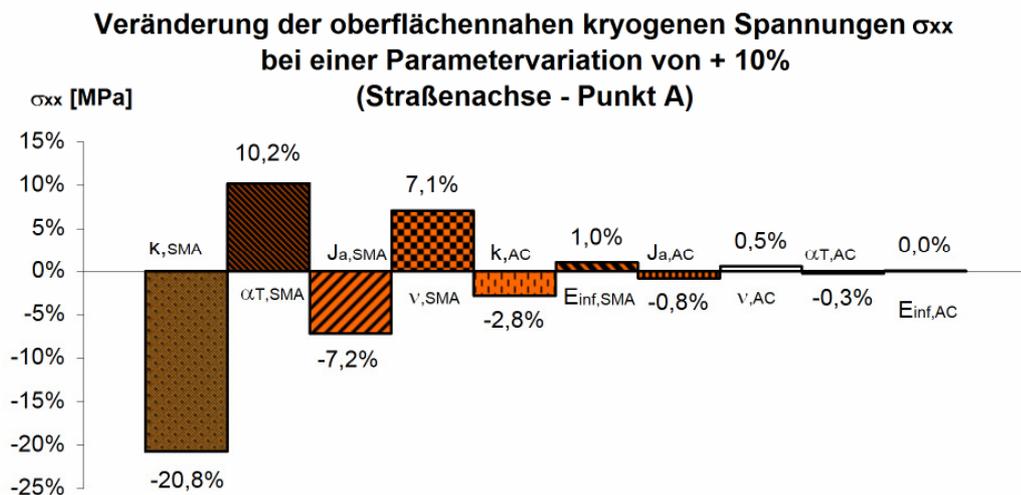


Abbildung 136: Einfluss der Materialparameter auf die kryogenen Spannungen σ_{xx}

Der einflussreichste Materialparameter der gebundenen Schichten für die oberflächennahe Temperaturspannung im Punkt A ist somit der k-Wert der Asphaltdeckschichte. An zweiter Stelle folgt ebenfalls ein Deckschichtparameter, die

Wärmedehnzahl $\alpha_{T,SMA}$ gefolgt von der initialen Kriechnachgiebigkeit $J_{a,SMA}$ und der Querdehnzahl ν_{SMA} . Erst an fünfter Position befindet sich der bestgereichte Tragschichtparameter k_{AC} mit einer geringen Auswirkung von -2,8 % bei +10 % Parametermodifikation. Die verbleibenden Parameter beeinflussen die kryogenen Spannungen kaum.

Die Hintergründe dieser Reihung können anhand der rheologischen und thermischen Gleichungen näher erläutert werden. Ein Aspekt, weshalb die Deckschichtparameter die oberflächennahen Temperaturspannungen am meisten beeinflussen, liegt darin, dass diese Parameter sich in der betrachteten Schichte befinden. Zudem wirkt sich die Temperaturabsenkung hauptsächlich auf die Deckschichte aus. Jener Parameter, der direkt von der Temperaturabsenkung „aktiviert“ wird, ist die Wärmedehnzahl α_T . Ferner ist auch die Kriechnachgiebigkeit $J(t)$ temperatur- und zeitabhängig. Die mathematische Formulierung der Kriechnachgiebigkeit erfolgte in Gleichung 67 im Kapitel 2.5.1. Da der zur Beschreibung des viskosen Verformungsanteiles verwendete Parameter k im Exponent steht, wirkt sich dieser deutlicher aus, als die initiale Kriechnachgiebigkeit J_a .

Die Reihung der Parameter in Bezug auf die Verkehrslastspannung wird in Abbildung 137 gezeigt. Im Gegensatz zu den kryogenen Spannungen hat für die mechanogenen Spannungen (=Verkehrslastspannungen) eine Änderung der Querdehnzahl ν_{SMA} die größte Auswirkung, gefolgt von den Glasmoduln E_{inf} beider gebundenen Schichten. Der Glasmodul ist temperatur- und zeitunabhängig. Aufgrund der Kurzzeitbelastung, einer Impulsbelastungsdauer von 0,02 Sekunden, ist der Einfluss der zeitabhängigen Parameter auf die Verkehrslastspannungen geringer als auf die Temperaturspannungen.

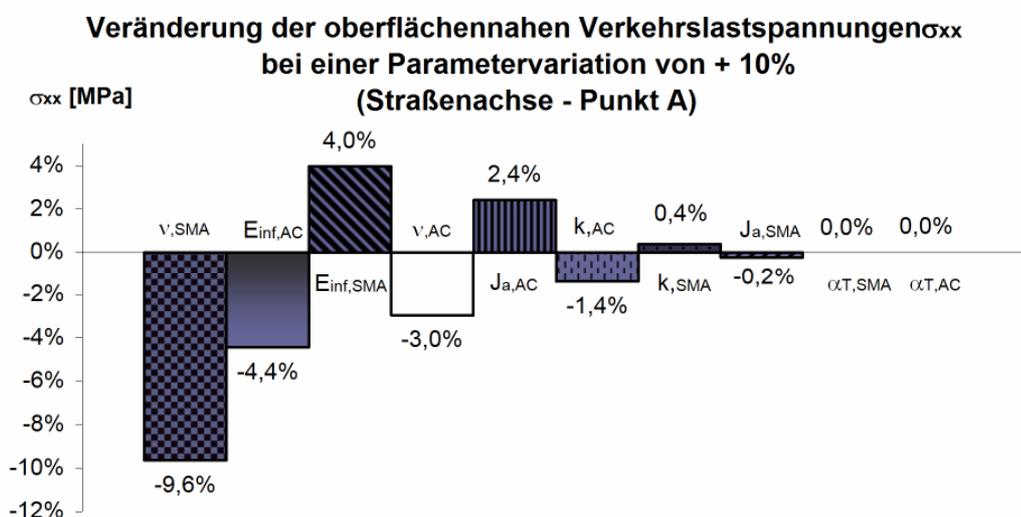


Abbildung 137: Einfluss der Materialparameter auf die Verkehrslastspannungen σ_{xx}

In Abbildung 138 sind die Zu- und Abnahme der Gesamtspannung σ_{xx} bei einer Erhöhung der einzelnen Materialkennwerte um +10% dargestellt. Diese Reihung ergibt sich jedoch nur für dieses untersuchte Abkühlzenario.

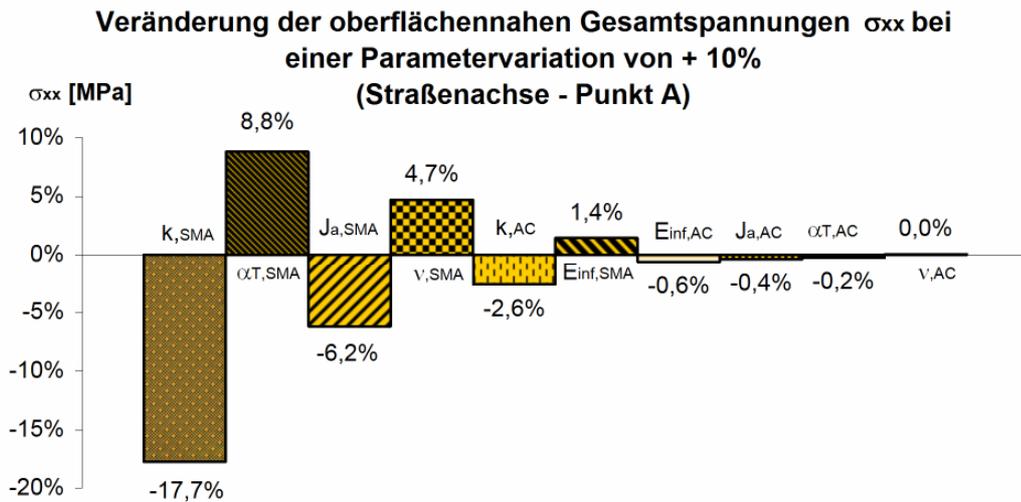


Abbildung 138: Einfluss der Materialparameter auf die Gesamtspannungen σ_{xx}

Aufgrund der unterschiedlichen Reihungen für die mechanogenen Spannungen sowie die kryogenen Spannungen ist es nicht möglich eine allgemeingültige Reihung für die Gesamtspannungen aufzustellen. Da der Temperaturspannungsanteil an der Gesamtspannung im Vergleich zum Anteil der Verkehrslastspannung wesentlich größer ist, sind auch jene Parameter vorne gereiht, die auch für die kryogene Spannung von großer Bedeutung sind. Für andere Abkühl Szenarios oder andere Positionen im Straßenquerschnitt können aber auch jene Parameter für die Gesamtspannung ganz vorne platziert sein, die mehr die Verkehrslastspannung ansprechen. Dies ist davon abhängig, wie groß der Anteil der mechanogenen Spannung an der Gesamtspannung ist. Es besteht auch die Möglichkeit, dass, obwohl sich ein Parameter auf Temperaturspannung erhöhend und auf die Verkehrslastspannung vermindern auswirkt, bei der Gesamtspannung keine Beeinflussung ersichtlich ist. Für den Tragschichtparameter v_{AC} ist dieses Phänomen anzutreffen (vgl. Abbildung 136 bis Abbildung 138).

Um genauere Aussagen über den Einfluss der einzelnen Materialkennwerte für andere Stellen des Straßenquerschnitts oder andere Abkühl Szenarios treffen zu können, wird die Durchführung weiterer Parameterstudien empfohlen.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Basis der gegenständlichen Arbeit besteht aus den Grundlagen zur Beschreibung von Stoffeigenschaften. Mit Hilfe dieser theoretischen Grundlagen soll der Leser in die Thematik der Rheologie eingeführt werden. Beginnend mit einfachen Materialmodellen mit linearen Elementen, wie jenem von Maxwell oder Kelvin-Voigt, bis hin zu komplexen rheologischen Modellen, mit parabolischen Elementen (z.B. Huet-Sayegh-Modell), werden verschiedene Möglichkeiten zur Beschreibung des zeitabhängigen Stoffverhaltens vorgestellt.

In den nächsten zwei Abschnitten dieser Arbeit erfolgen Analysen mit drei unterschiedlichen Berechnungsprogrammen, welche zum Teil auf unterschiedlichen Theorien bzw. Methoden aufgebaut sind. LEAP und BISAR sind zwei bereits bestehende, auf der Mehrschichtentheorie basierende Programme und eignen sich nur für rein elastische Simulationen. Das im Zuge dieser Forschungsarbeit untersuchte Programm FEAP ist auf der Methode der Finiten Elemente aufgebaut. Vor der Durchführung der Vergleichsrechnungen werden allgemeine Material- und Modellangaben festgelegt, die für alle drei Anwendungen ihre Gültigkeit haben. Zusätzlich erfolgt beim dreidimensionalen FEAP-Modell eine Plausibilitätskontrolle, um zu gewährleisten, dass die Reduktion auf ein Viertel des zu untersuchenden Systems, aufgrund doppelt symmetrischer Eigenschaften, korrekte Ergebnisse liefert.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse bei linear-elastischem Berechnungsmodus ergibt ein durchaus positives Resultat. Im Zuge dieser Berechnungsvariante besteht die Belastung nur aus der Verkehrslast. Die neue Anwendung errechnet Spannungen, welche im Bereich zwischen jenen der anderen, bereits bestehenden Programmen liegen. Daraus wird geschlossen, dass das dreidimensionale Simulationsmodell bei reiner linear-elastischer Berechnung akzeptable Ergebnisse erzielt.

Der folgende Abschnitt dieser Diplomarbeit beinhaltet visko-elastische Berechnungen. Für die visko-elastische Berechnung stehen ein zweidimensionales sowie ein dreidimensionales Strukturmodell zur Verfügung. In beiden Modellen ist zur Beschreibung des zeitabhängigen Verhaltens das Power-Law-Modell implementiert. Die Belastung wird in zwei Schritten aufgebracht. Zuerst wirkt die thermische Beanspruchung in Form einer konstanten Oberflächenabkühlrate ein. Nach Beendigung des Temperaturszenarios erfolgt die Aufbringung der Verkehrslast in Form einer impulsartigen Belastung.

Die Berechnungen erfolgen für fünf verschiedene Lastfälle, welche den Temperatureinfluss auf die Berechnungsergebnisse widerspiegeln. Zwischen den beiden Modellen (2D sowie 3D) kann eine gute Übereinstimmung der berechneten kryogenen Spannungen erzielt werden. Im Gegensatz dazu weichen die Ergebnisse der Verkehrslastspannungen gravierend voneinander ab. Da das 3D-Modell bei rein elastischer Berechnung annähernd gleiche Ergebnisse liefert wie bereits bestehende Programme, wird vermutet, dass bei visko-elastischer Berechnung die mit der numerischen Simulation errechneten Spannungen des dreidimensionalen eher der Realität entsprechen als jene des zweidimensionalen Modells. Für eine Bestätigung dieser Vermutung wäre die Durchführung entsprechender Feldversuche erforderlich.

Die im letzten Teil dieser Arbeit durchgeführte Parameterstudie setzt sich mit dem Einfluss der Materialparameter beider gebundenen Schichten auf die

oberflächennahen Spannungen in Straßenquerrichtung in der Straßenachse auseinander. Die Entstehung der Einzelrisse in Straßenlängsrichtung wird auf diese Spannungen zurückgeführt. Die Analyse bringt zum Vorschein, dass die Temperaturspannung durch die angesetzten Materialparameter mehr beeinflusst wird, als die Verkehrslastspannung. Die Gesamtspannung wird durch Superposition von Verkehrslastspannung und kryogener Spannung berechnet. Die Anteile dieser Spannungskomponenten an der resultierenden Gesamtspannung sind davon abhängig, in welchem Temperaturbereich das Abkühlscenario simuliert wird. Ist der Anteil der Temperaturspannung an der Gesamtspannung sehr groß, so wirkt sich analog dazu eine Änderung jener Parameter auf die Gesamtspannung aus, welche auch die Temperaturspannung beeinflussen.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Aigner, E., Lackner, R., Wistuba, M., Spiegl, M., Blab, R., Eberhardsteiner, J.: Integration Schemes and Parameter Identification in Viscoelastic Modeling of Asphalt: Application to Low-Temperature Assessment of Flexible Pavements/"; in: "/Progress in Computational Mechanics - Proceedings of the Special Mini-Symposium in Honor of Professor Arantes e Oliveira 73rd Birthday (7th WCCM)/", ICIST-IST (Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção-Instituto Superior Técnico), 2007, (eingeladen), ISBN: 978-989-95625-0-9, S. 99 - 120.
- Aigner, E., Lackner, R., Wistuba, M., Spiegl, M., and Blab, R.: Application of material models for low-temperature characterization of asphalt mixtures. Draft paper, nicht veröffentlicht, TU Wien, 2006.
- Blab, R., Wistuba, M., Lackner, R., Spiegl, M.: Consequences of increasing heavy goods vehicle traffic on the Austrian alpine road infrastructure, [Auswirkungen von Schwerverkehrszuwächsen auf Österreichs Straßeninfrastruktur im alpinen Raum], TU Wien, März 2007.
- Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim: Der Brockhaus – Naturwissenschaft und Technik, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 2003.
- Burmister: Theory of stresses and displacements in layered systems, Proceedings of Highway Research Board, pp. 127-148, 1943.
- Bürgel, R.: Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik, Band 1, 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Oktober 2005.
- Dimitrov, Henninger: Lueger Lexikon der Technik – Lexikon der Bautechnik, Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart, 1961.
- Heinrich, M: Dehnungsberechnungen im bituminösen Straßenaufbau mit Hilfe eines linear-elastischen Modellansatzes im Vergleich mit Messungen aus Großversuchen, , Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien, Diplomarbeit, 2005.
- Holm, Altenbach: Werkstoffmechanik – Einführung, 1. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig – Stuttgart, 1993.
- Hofko, B: Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt, Diplomarbeit, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien, 2006.
- Huet, C.: Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés, Dissertation, Faculté des Sciences de l'université de Paris, Paris, 1963.

- Kalb, J., Steinhilber, T.: Arbeitsunterlagen zu den Vorlesungen
Wärmetransportphänomene, Wärme- und Stoffübertragung, Lehrstuhl für
Thermodynamik, TU München, 2006.
- Lackner, R.: Nano- und Mikromechanik von Werkstoffen, Vorlesung, Institut für
Mechanik der Werkstoffe und Strukturen, TU Wien, WS 2007/08.
- Lanschützer, J.: Statisches Kriechverhalten von bituminösen Werkstoffen,
Diplomarbeit, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien, 2007.
- Mang, H. A.; Hofstetter, G.: Festigkeitslehre. 2. Auflage, Verlag Springer Wien /
New York, Wien, 2004.
- Matzdorf R.: Einführung in die Physik I, Wärme-Seite84ff.pdf, Skript zur Vorlesung,
Institut für Physik, Universität Kassel, 2004.
- Olard, F., Di Benedetto, H.: General „2S2P1D“ Model and Relation between the linear
viscoelastic Behaviours of bituminous Binders and Mixes, Road Materials &
Pavement Design. Volume 4 – No. 2/2003, 2003.
- Sayegh, G: Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux,
Dissertation, Faculté des Sciences de l'université de Paris, Paris, 1965.
- Schatt; Worch: Werkstoffwissenschaft, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,
Weinheim, 2003.
- Taylor, R.: FEAP – A Finite Element Analyse Program, User Manual, Version 8.1,
Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at
Berkeley, 2006.
- Ucke, C.: Arbeitsunterlagen zum physikalischen Praktikum für Mediziner,
Physikdepartment E 20, Technische Universität München, 1999.
- Wagner, W: A Finite Element Analyse Program Version 02/2007, Manual, Institut
für Baustatik, Universität Karlsruhe, 2007.
- Wellinger, Krägeloh: Lueger Lexikon der Technik – Werkstoffe und Werkstoffprüfung,
Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart, 1961.
- Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R., Spiegl, M.: Low-temperature performance
prediction of asphalt mixtures used for LLP – new approach based on
fundamental test methods and numerical modeling, International Journal of
Pavement Engineering, 2005.
- Wistuba, M.: Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen: Maßgebende Temperatur für die
analytische Oberbaubemessung in Österreich, Heft 15.
- Wistuba, M: Vermeidung von Kälterissen in Asphaltstraßen, Straße und Verkehr, Nr.
10, Oktober 2006.

- o. A.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Rheologie>, 31.10.2007
- o. A.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>, 1.11.2007
- o. A.: <http://users.physik.tu-muenchen.de/cucke/medprakt/Viskosit%C3%A4t.PDF>, [S. 3], 1.11.2007
- o. A.: http://de.wikipedia.org/wiki/Plastische_Verformung, 1.11.2007
- o. A.: http://de.wikipedia.org/wiki/Elastizit%C3%A4t_%28Physik%29, 31.10.2007
- o. A.: http://de.wikipedia.org/wiki/Hookesches_Gesetz, 31.10.2007
- o. A.: http://de.encarta.msn.com/encyclopedia_761562140/Hooke%E2%80%99sches_Gesetz.html, 31.10.2007
- o. A.: http://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Fluid, 1.11.2007
- o. A.: http://de.wikipedia.org/wiki/Nichtnewtonsches_Fluid, 1.11.2007
- o. A.: http://www.wkm.mw.tum.de/Mitarbeiter/personal_html/schwarz/PR-Kriechen.pdf, 2.11.2007
- o. A.: http://www.vieweg.de/freebook/978-3-8348-0077-0_l.pdf, 3.11.2007
- o. A.: http://www.SMA_11viatop.com/SMA_11viatop/schichtenverbund/start_schichtenverbund.shtml, 11.11.2007
- o. A.: <http://www.asphalt.de>, 11.11.2007
- o. A.: http://www.tu-darmstadt.de/fb/bi/ifv/sw/stud/kfm/r_kutschera.pdf, 11.11.2007
- o. A.: <http://list-sachsen.de/info/info0298.pdf>, 11.11.2007
- o. A.: http://books.google.com/books?id=WNOvCdoY4FoC&pg=PA61&lpg=PA61&dq=bisar+schell&source=web&ots=00o6GzKbjQ&sig=uXFQ4J5Xtn_Z7DaSsf4BTXkOovU, 11.11.2007

Anhang A:

Eine Zusammenstellung sämtlicher Berechnungsdaten und Ergebnisse befindet sich auf dem beiliegenden Datenträger.