

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Konstruktive Ausbildung von hochbelasteten Asphaltstraßen

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

o.Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Ronald BLAB
Univ. Ass. Dipl. -Ing. Elisabeth HAUSER
Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung,

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

Jan GRADYS
E610 / 0125510
1050 Wien, Siebenbrunnengasse 8/1/15

Wien, 21.05.2008

Unterschrift

KURZFASSUNG

Konstruktive Ausbildung von hochbelasteten Asphaltstraßen

Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit erfolgt einerseits eine Optimierung bituminöser Mischgüter für hochbelastete Verkehrsflächen auf Grundlage gebrauchsverhaltensorientierter Ansätze. Andererseits wird die konstruktive Ausbildung derartiger Verkehrsflächen untersucht.

Bei der Definition der hohen Belastungen müssen zwei Bereiche unterschieden werden. Einerseits bilden Einflüsse des Verkehrs, wie Achslast, Reifenart, Fahrgeschwindigkeit, und Fahrverhalten die Grundlage für die Bestimmung der maßgeblichen Belastung. Andererseits variiert die Bemessungssituation aufgrund unterschiedlicher klimatischer und straßenbautechnischer Bedingungen, wie beispielsweise Temperatur, Bindemittelgehalt, Sieblinie und verwendete Gesteinsart der Mischgüter.

Die Mischgutoptimierung erfolgte am CD-Labor durch ein umfassendes Prüfprogramm. Es wurden fünf Eignungsprüfungen für zwei Asphaltmischgüter mit unterschiedlichen Bindemittelgehalten durchgeführt. Unter den konventionellen Prüfungen fanden sich das Marshallverdichtungsverfahren und der Spurrinntest. Bei den gebrauchsverhaltensorientierten Prüfungen wurden Triaxialversuche, Abkühlversuche und Steifigkeitsversuche durchgeführt. Zwei repräsentative Asphaltmischgüter waren ein SMA 11 PmB45/80-65 als Deckschicht und ein AC 22 binder PmB25/55-65 als Tragschicht. Das Ergebnis ist einerseits die Erkenntnis, der unterschiedlichen optimalen Bindemittelgehalte für konventionelle und GVO-Eignungsprüfungen sowie andererseits einen Ansatz für die Formulierung von Anforderungen an hoch belastete Asphaltkonstruktionen.

Die konstruktive Optimierung erfolgte auf Grundlagen von Spannungsberechnungen in Kombination mit plastischen Materialmodellen zur Prognose der Spurrinnenbildung. Insgesamt werden 6 unterschiedliche Straßenoberbaukonstruktionen, 2 Lastszenarien und 2 unterschiedliche Reifentypen untersucht.

SUMMARY

Asphalt constructions for highly loaded pavements

Permanent deformations in road constructions have a negative impact to safety and comfort of traffic. They are mainly caused by the heavy traffic with low velocities in combination with high surface temperatures. The most stressed traffic areas are urban crossings, traffic circles and bus stops.

There are two main spheres that have influence to the definition of the high load. On the one hand you have to consider all the traffic factors like axle-load, tire type, velocity and vehicle behaviour. On the other hand, climatic and road construction conditions like temperature, amount of binding material and grading curve do have a major influence to the dimensioning situation.

The layered elastic analysis program LEAP and an approach to determine the plastic deformations allow the calculation of the state of stresses and the amount of permanent deformations.

The optimization of the asphalt mixture was realized at the CD-Laboratory. We examined two asphalt constructions (one surface layer and one base layer mixture) on five different aptitude tests to determine the optimal binder amount. The conventional and fundamental tests result in different ideal binder contents. As a further conclusion of the tests, we can now define requirements for asphalt mixtures for highly loaded pavements.

DANKSAGUNG

Ich möchte mich zuerst bei Uni. Prof. Dipl.-Ing. Ronald Blab für die Betreuung dieser Arbeit bedanken. Durch sein fachliches Wissen, seine Erfahrung und die zahlreichen, überaus professionellen und wissenschaftlichen Beiträge war es möglich, diese Arbeit zu verfassen. Besonders dankbar bin ich für die soziale Kompetenz und das persönliche Engagement, welche sich im kompletten Team des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung wieder findet.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei Dipl.-Ing. Elisabeth Hauser bedanken. Ich hatte die Ehre, als erster Diplomand von ihr betreut zu werden. Trotz der vielen laufenden Forschungsprojekte am Christian-Doppler Labor fand Elisabeth immer Zeit für die Betreuung der Diplomarbeit. Die Hilfestellungen von Elisabeth waren besonders wertvoll – von anfänglicher Literatursuche und Hilfestellung, über die Ausarbeitung bis zum Abschluss der Arbeit stand sie immer mit Ratschlägen und Ergänzungen zur Seite.

Das Christian-Doppler Labor des Instituts wurde 2007 mit dem Forschungsprojekt über die Untersuchung hochbelasteter Verkehrsflächen beauftragt. Die vorliegende Diplomarbeit wurde in Anlehnung an diesen Forschungsauftrag erstellt. Im Zuge der Arbeiten im Labor durfte ich deren Mitarbeiter kennen lernen. Vielen Dank an Markus Gmeiner, Bernhard Hofko, Karl Kappl, Lukas Kirchmaier, Katharina Landerl, Thomas Riedmayer, Klaus Stangl, David Valentin und Michael Wagner für die gute Zusammenarbeit.

Meine vielen lieben Freunde - Gerald Bohrn, Florian Döpfl, Christoph Kosch, Gerhard Matzinger, Michael Wagner, Elisabeth Weber. Ihr wart während meiner gesamten Studienzzeit immer für mich da. Mit vielen von Euch verbrachte ich meine Schul- und/oder Studienzzeit. Ich möchte mich für die Aufmunterungen und die Unterstützung bedanken.

Neben meinen Freunden konnte ich auch immer auf die Unterstützung durch meine Familie, allen voran meinen Eltern Andrea und Ernst Schelepet, zählen. Meine Eltern ermöglichten mir diese wertvolle Ausbildung und haben einen sehr großen Anteil an meinem Erfolg - besonders durch ihr Vertrauen in mich.

An letzter Stelle seien noch die Mitarbeiter der Firma Strabag erwähnt, die mich auch in den letzten vier Jahren des Studiums unterstützten. Nicht nur die unbezahlbaren Erfahrungen innerhalb des Baukonzerns während der Studienzzeit, sondern ganz besonders eure persönliche Unterstützung haben mir sehr geholfen. Vielen herzlichen Dank an Ing. Thomas Huber und Bmst. Ing. Harald Scharf.

Jan Gradys

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	2
1.1 Aufgabenstellung und Ziel der Diplomarbeit	2
1.2 Stand der Technik	2
1.2.1 Verkehr	2
1.2.2 Klima.....	3
1.2.3 Mischgut.....	3
1.2.4 Allgemeines über das CD Labor	4
1.3 Vorgehensweise.....	4
2. MASSGEBLICHE VERKEHRSELASTUNG	5
2.1 Einleitung	5
2.2 Grundlagen	5
2.2.1 Lastabtragung Reifen-Straße	5
2.2.2 Einflussparameter beim Reifen.....	7
2.2.3 Reifenarten	7
2.2.4 Übertragbare Kräfte, Haftreibbeiwerte.....	10
2.3 Maßgebendes Bemessungsfahrzeug	15
2.4 Verbessertes Modell zur Lastabtragung.....	18
2.5 Lastszenarien	18
2.5.1 Busbucht	20
2.5.2 Kreisverkehr	20
3. KLIMA UND TEMPERATUR	25
3.1 Maßgebliche Lufttemperaturen.....	25
3.2 Temperaturverteilung im bituminösen Oberbau	25
3.3 Einschränkungen	26
4. MISCHGUTOPTIMIERUNG	27
4.1 Einleitung	27
4.2 Allgemeines über Asphalt	28
4.2.1 Splittmastixasphalt.....	28
4.2.2 Asphaltbetonschichten	29
4.3 Materialien, Mischgüter und Oberbauvarianten	30
4.4 Materialtechnologische Untersuchungen und Ergebnisse	34
4.4.1 Übersicht.....	34
4.4.2 Konventionelle Prüfmethode	35
4.4.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode	40
4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	50
4.6 Anforderungen an Mischgüter	51
5. ANALYTISCHES SPURRINNENPROGNOSEMODELL	52
5.1 Grundlagen der Berechnung	52
5.1.1 Linear elastische Modelle.....	53
5.1.2 Viskoelastische Modelle	53
5.2 Ermittlung der Spannungen.....	54
5.2.1 Mehrschichtenprogramm LEAP	54
5.2.2 Validierung der Spannungsberechnungen	59
5.2.3 Elastische Verformungen	62
5.2.4 Deviatorspannungen und plastische Verformungen	62
5.2.5 Ergebnisse, Auswertung und Interpretation.....	66
5.3 Empfohlene Aufbauten für hochbelastete Verkehrsflächen.....	72
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	74
6.1 Zusammenfassung	74
6.2 Ausblick.....	74
7. LITERATURVERZEICHNIS	75
8. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	77
9. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	79
10. TABELLENVERZEICHNIS	82
ANHANG	83

1. EINLEITUNG

1.1 Aufgabenstellung und Ziel der Diplomarbeit

Die an der Straßenoberfläche sichtbaren Spurrinnen beeinträchtigen einerseits die Fahrsicherheit, da es bei Regen speziell bei Pkws mit höheren Fahrgeschwindigkeiten zu Aquaplaningunfällen führen kann. Des Weiteren verringern Unebenheiten den Fahrkomfort aller Verkehrsteilnehmer.

Ursache für die Bildung von Spurrinnen ist hauptsächlich der langsam fahrende Schwerverkehr in Kombination mit hohen Temperaturen. Insbesondere Verkehrsanlagen wie Kreuzungen, Kreisverkehrsanlagen und Busbuchten sind hoher Beanspruchung ausgesetzt, da die eingebrachten Brems-, Beschleunigungs- und Fliehkräfte zusätzlich die Straßenoberbaukonstruktion beeinträchtigen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen deshalb die maßgebenden Einflussgrößen auf eine hoch beanspruchte Asphaltkonstruktion aufgelistet werden und dargelegt werden.

Des Weiteren sollen mit Hilfe von gebrauchtsverhaltensorientierten Asphaltprüfmethoden (GVO) materialtechnologische Kenngrößen abgeleitet werden. Die dabei herangezogenen Mischguttypen sollen insbesondere in Hinblick auf ihre Verformungsbeständigkeit im Hochtemperaturbereich optimiert werden. Schließlich sollen mit Hilfe eines analytischen Spurrinnenprognosemodells unterschiedliche Oberbauvarianten miteinander verglichen und eine geeignet Asphaltkonstruktion für hochbelastete Verkehrsfläche konzipiert werden.

Aus diesen Ergebnissen und Berechnungen sollen letztendlich materialtechnologische und bemessungsrelevante Anforderungen formuliert werden.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Verkehr

Die Qualität und Quantität stellt einen großen Einflussfaktor zur Bildung von Spurrinnen dar. Neben der stetig zunehmenden Anzahl der Verkehrsteilnehmer wird vor allem durch die Verwendung von neuartigen Reifen und Federungssystemen die Belastung für den Straßenkörper erhöht. Überbreite Einzelreifen, die immer häufiger eingesetzt werden, bilden eine ungünstigere Spannungsverteilung, als die gängigen Zwillingsreifen.

Besonders in städtischen Bereichen verursachen schwere Nutzlastfahrzeuge zusätzliche Lasten in den Bereichen von Kreisverkehren, Kreuzungen oder Busbuchten. Durch Anfahren, Bremsen und Seitenführungskräfte werden neben den vertikalen Lasten auch Schubkräfte in die Deckschicht eingeleitet.

Neben der Fahrzeuggeometrie aus Einzelachsen, Doppelachsen oder Sattelzuganhängern stellen vor allem der Reifenzustand und die Reifenart einen Haupteinflussfaktor für den zu erwartenden Spannungszustand dar. Zu niedriger oder zu hoher Reifendruck ist eine der Ursache für eine ungleichförmige (und somit ungünstige) Belastung an der Kontaktfläche zwischen Reifen und Straße.

1.2.2 Klima

Die Temperatur der Asphaltkonstruktion ist der größte Einflussparameter bei der Bestimmung des Widerstands gegen bleibende Verformungen. Asphalt und bituminöse Baustoffe besitzen ein stark temperaturabhängiges Materialverhalten. Unter Situationen mit hohen Lasten, niedrigen Frequenzen und hohen Temperaturen wird das Materialverhalten des Bitumens nicht mehr ausschließlich durch ein elastisches, sondern viel mehr durch ein viskoses Verformungsmodell beschrieben.

Die maßgeblichen Temperaturen der Asphaltkonstruktion ermitteln sich über maßgebliche Tagesganglinien der Lufttemperatur an einem heißen Sommertag. Die gesuchten Asphalttemperaturen, welche für die Verformung maßgeblich sind, müssen allerdings erst über die Lufttemperaturen bestimmt werden. Dies geschieht über die Energiebilanzgleichung und über den Grundsatz der Fourier'schen Wärmeleitung. Auf diese Weise kann die maximale Temperatur für jede beliebige Tiefe der Asphaltkonstruktion ermittelt werden.

1.2.3 Mischgut

Asphaltmischgüter flexibler Straßenaufbauten bestehen aus Gestein und Bindemittel. Die Zusammensetzung/Rezeptur verleiht der gewählten Konstruktion ihre Eigenschaften hinsichtlich Standfestigkeit, Rissicherheit, Einbaufähigkeit, Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit etc.

Für hochbelastete Verkehrsflächen werden heutzutage häufig Splittmastixkonstruktionen als Deckschichten verbaut. Ihr hoher Splitt- und Fülleranteil führen zur Bildung eines tragenden Splittgerüsts.

Es werden Deck-, Trag- oder Tragdeckschichten aus Asphaltbeton hergestellt. Im Gegensatz zur Splittmastixkonstruktion besitzen die Asphaltbetone eine kontinuierliche Sieblinie. Die Wahl fällt relativ häufig auf den Einbau einer Asphaltbetonschicht, da durch die zahlreichen stationären Mischwerke und die damit verbundenen kurzen Transportwege der Materialien eine wirtschaftliche Lösung darstellen. Weiters ist die Konstruktion leicht an die Verkehrs- und Konstruktionsbedingungen anpassbar.

Die unterschiedlichen Mischgutoptimierungen nach konventionellen und gebrauchsverhaltensorientierten Ansätzen liefern Aussagen über die Eignung des Mischguts für hoch belastete Verkehrsflächen.

Unter den konventionellen Eignungsprüfungen finden sich der Marshallverdichtungsversuch zur Ermittlung der optimalen Raumdichte, sowie der Spurbildungstest WTT. Beide Methoden dienen der Bestimmung des optimalen Bindemittelgehalts.

Die Gebrauchsverhaltensorientierten (GVO) - Prüfungen geben Auskunft über die Verformungsstabilität bei hohen Temperaturen (Triaxialversuch), das Tieftemperaturverhalten (Abkühlversuch) und über das Steifigkeitsverhalten (Steifigkeitsversuch).

1.2.4 Allgemeines über das CD Labor

Das „Christian-Doppler-Labor für gebrauchtsverhaltenorientierte Optimierung flexibler Straßenbefestigungen“ wurde 2002 eingerichtet. Das Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien betreibt das Labor, welches durch die Christian-Doppler-Forschungsgesellschaft gefördert wird.

Das CD-Labor wird durch folgende Industriepartner unterstützt: Allgemeine Bau-gesellschaft – A. Porr AG, Teerag-Asdag AG, Nievelt Labor Ges.m.b.H., Alpine Mayreder BauGmbH, Swietelsky Baugesellschaft m.b.H. und OMV Aktiengesellschaft.

1.3 Vorgehensweise

In Anlehnung an die Aufgabestellung der Diplomarbeit lässt sich eine grundlegende Reihenfolge der notwendigen Arbeitsschritte formulieren. Das allgemeine Konzept wurde vor Beginn der Arbeit verfasst und mit Fortschritt der Ausarbeitung ergänzt und verfeinert.

- Definition von hochbelasteten Verkehrsflächen (Radlasten, Szenarien, Parameter)
- Literaturrecherche über gängige und bekannte Asphaltkonstruktionen für hochbelastete Verkehrsflächen, national und international.
- Laborversuche zur Bestimmung der Materialparameter
- Bestimmen der maßgeblichen Spannungen in hochbelasteten Verkehrsflächen.
- Abschätzung plastischer Verformungen auf Grundlage analytischer Spurrinnenmodelle.
- Interpretation der Ergebnisse, Vergleiche und Aussage
- Empfehlung von besonders geeigneten Rezepturen für hochstandfeste Verkehrsflächen.

2. MASSGEBLICHE VERKEHRSELASTUNG

2.1 Einleitung

Flexible Straßenoberbaukonstruktionen werden nicht nur aufgrund der Belastungshäufigkeit – Quantität des Straßenverkehrs – beansprucht, sondern sind auch hinsichtlich der Belastungsgröße – Qualität des Straßenverkehrs – besonderen Belastungen ausgesetzt. Dies äußert sich in Kombination mit sommerlichen Temperaturen in der Form von Spurrinnen, insbesondere in Zusammenhang mit niedrigen Fahrgeschwindigkeiten des Schwerverkehrs.

Des Weiteren beeinflussen die nachfolgend aufgelisteten Parameter zusätzlich die Spurrinnenbildung:

- Rad- bzw. Achslasten
- Achsanordnung
- Reifenart
- Reifeninnendruck

Im nun folgenden Kapitel der Diplomarbeit werden die Berechnung der Spannungen und Dehnungen in den Deck- und Binderschichten der Asphaltkonstruktion erläutert.

- Zuerst wird das Projekt auf einige Parameter wie z.B. Temperatur, Oberflächenbedingungen und Reifenart, spezialisiert und eingeschränkt.
- Wie erfolgt die Lastabtragung Reifen-Straße? Es folgt eine Zusammenfassung von Reifenarten, und Einflussparametern des Reifens.
- Grundlagen über Haftreibbeiwerte, Schlupf und max. übertragbare Kräfte
- Für alle Berechnungen muss ein Bemessungsfahrzeug gewählt werden, welches realistische aber zugleich ungünstige Achslasten auf die Straßenkonstruktion aufbringt.
- Weiters wird eine Auswahl an Lastszenarien aufgelistet. Welchen Einfluss haben Flieh- und Bremskräfte auf die maßgeblichen Spannungen? Hier wird bestimmt, welche Fahrmanöver ungünstige Kräfte und Spannungen im Straßenkörper hervorrufen.
- Mit all diesen definierten Einschränkungen, Rechengrößen und Lastszenarien wird mit Hilfe eines Mehrschichtenprogramms der Spannungszustand ermittelt. Hier ist vor allem auf Plausibilität der Ergebnisse zu achten.

2.2 Grundlagen

2.2.1 Lastabtragung Reifen-Straße

Der Reifen stellt die einzige Verbindung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn dar. Somit sind an die Reifenaufstandsfläche, die so genannte Latschfläche, eine Vielzahl an Aufgaben und Forderungen gestellt. In vertikaler Richtung wird die Last des Fahrzeuges auf die Fahrbahn gestützt. Durch die Einsenkung des Reifens durch die Fahrzeuglast bildet sich die Reifenaufstandsfläche, welche die Übertragung von longitudinalen und transversalen Kräften ermöglicht. Die Größe der übertragbaren

Kräfte ist abhängig von den herrschenden Zustandsbedingungen der Straße und des Reifens, wie etwa Nässe, Reifeninnendruck, Straßenzustand etc.

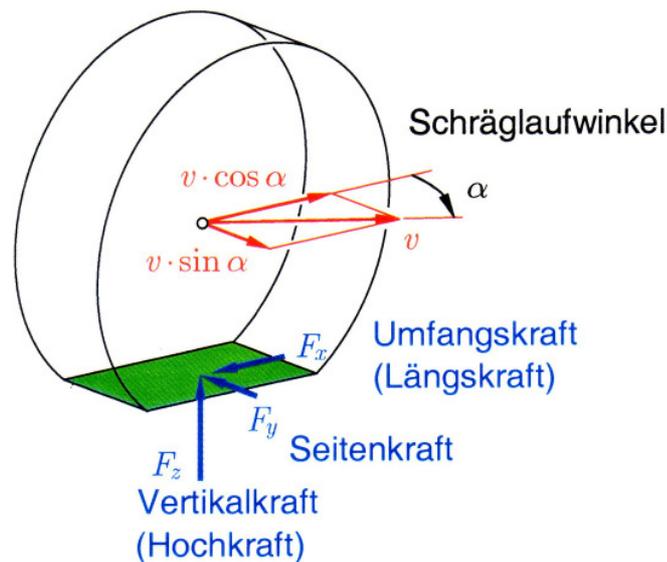


Abbildung 1 – Aufstandsfläche und Lastkomponenten (Hoepke, 2006)

Die Latschfläche kann in unterschiedlicher Genauigkeit erfasst werden. Die Radlast kann vereinfachend als Einzellast angenommen werden, um beispielsweise den Überrollvorgang eines kompletten Fahrzeuges in einem Mehrschichtenprogramm zu simulieren. Eine detailliertere Darstellung erreicht man durch die Verwendung von kreisförmigen Gleichlasten, so genannten Topflasten. Die Kontaktfläche zwischen Fahrbahn und Reifen wird hierbei mit einer konstanten Gleichlast, welche dem Reifeninnendruck entspricht, belastet. Aus einer Vielzahl an Reifenkontaktdruckmessungen lässt sich allerdings erkennen, dass die Latschfläche keinesfalls einer gleichmäßigen Druckverteilung entspricht, sondern vielmehr eine komplexe Spannungsverteilung mit unterschiedlichsten Einflussfaktoren ist. Neben der Geometrie und den Abmessungen der Latschfläche variiert auch die Spannungsverteilung. Ursache für eine ungleichförmige Spannungsverteilung sind einerseits die auftretenden Brems-, Beschleunigungs- und Fliehkräfte und andererseits der Steifigkeitsunterschied im Gürtel des Reifens.

Das Fahrzeug verursacht durch statische und dynamische Kräfte eine Belastung für den Straßenkörper. Das maximale Gewicht der Halbachse eines Lastkraftwagens kann als vertikale Kraftkomponente herangezogen werden. Die übertragbaren horizontalen Kraftanteile werden über die Haftbeiwerte reduziert und setzen sich aus den Antriebs- und Bremskräften sowie aus den Seitenführungskräften zusammen. Die Ermittlung der maßgeblichen Spannungen erfolgt in dieser Reihenfolge:

- Ermittlung der äußeren Kräfte am Fahrzeug (Bremsen, Beschleunigen, Seitenführung, Fliehkräfte, Lasten, etc)
- Bestimmung der Kontaktfläche / Latschfläche
- Einrechnung der Haftbeiwerte
- Bestimmung der Reaktionskräfte der Straßenoberfläche mit dem Mehrschichtenprogramm LEAP

- Im Bereich der dynamischen Lasten sei hier auf unebene Fahrbahnen, Schwerpunktsverlagerung während Beschleunigungs- und Bremsvorgängen verwiesen. Dynamische Lasten werden nicht berücksichtigt.
- Die Abmessung und die Spannungen der Kontaktfläche „Reifen-Straße“ kann in unterschiedlicher Genauigkeit erfasst werden. Die Lasten können als Punktlast, konstante Flächenlast oder als Flächenlast mit Spannungsverteilung (sogenannter „Footprint“) erfasst werden.

2.2.2 Einflussparameter beim Reifen

Beim Reifen haben folgende Parameter Einfluss auf die Größe der zu übertragenden Kräfte:

- Reifenbauart
- Reifenabnutzung
- Reifeninnendruck

Die Transportunternehmen verfolgen das Ziel eines möglichst wirtschaftlichen Einsatzes ihrer Fahrzeuge und Reifen. Es liegt auf der Hand, dass die Reifen oft einer langen bzw. einer zu langen Nutzung unterliegen. Wesentliche Mängel sind hierbei:

- Verlust an Profil
- Alterung

Der Profilverlust des Reifens äußert sich in verringerter Fahrsicherheit bei Nässe und Schnee. Durch die Alterung des Reifens wird die Gummimischung porös. Nach einigen Jahren wird das Material steif und ist nicht mehr in der Lage genügend Flexibilität bereitzustellen, um die herrschenden Kräfte zu übertragen.

Es wird weiters davon ausgegangen, dass ein idealer Reifenluftdruck in der Höhe von 690 kPa an den Reifen des Bemessungsfahrzeuges herrscht. Eine Abweichung des Luftdrucks – entweder zu geringer oder auch zu hoher Luftdruck – resultiert in einer veränderten Latschfläche und somit einer höheren Bodenpressung. Auf die Auswirkungen der Mehrbelastung durch falschen Reifeninnendruck wird in dieser Diplomarbeit nicht eingegangen. Näheres dazu im Kapitel 2.2.1 Lastabtragung Reifen-Straße und 2.4 Verbessertes Modell zur Lastabtragung.

2.2.3 Reifenarten

Der Reifen besteht aus der Karkasse, die als Festigkeitsträger um den Wulst geschlungen ist. Der Wulst besteht aus Stahldrähten und die Karkasse aus gummierten parallel liegenden Nylon-, Polyester- oder Stahlfäden. Die Lauffläche ist auf den äußersten Durchmesser aufgebracht, mit der sich der Reifen gegen die Straße abstützt und die ein entsprechendes Profil hat. Je nach Karkasse unterscheidet man folgende Reifenbauarten:

- Diagonalbauart (Diagonalreifen)
- Radial-Gürtelbauart (Radialreifen)

Heutzutage werden fast ausschließlich Radialreifen (auch Gürtelreifen) für PKW und LKWs hergestellt und eingesetzt. Diagonalreifen finden Anwendung bei Notreifen, Motorrädern und landwirtschaftlichen Fahrzeugen.

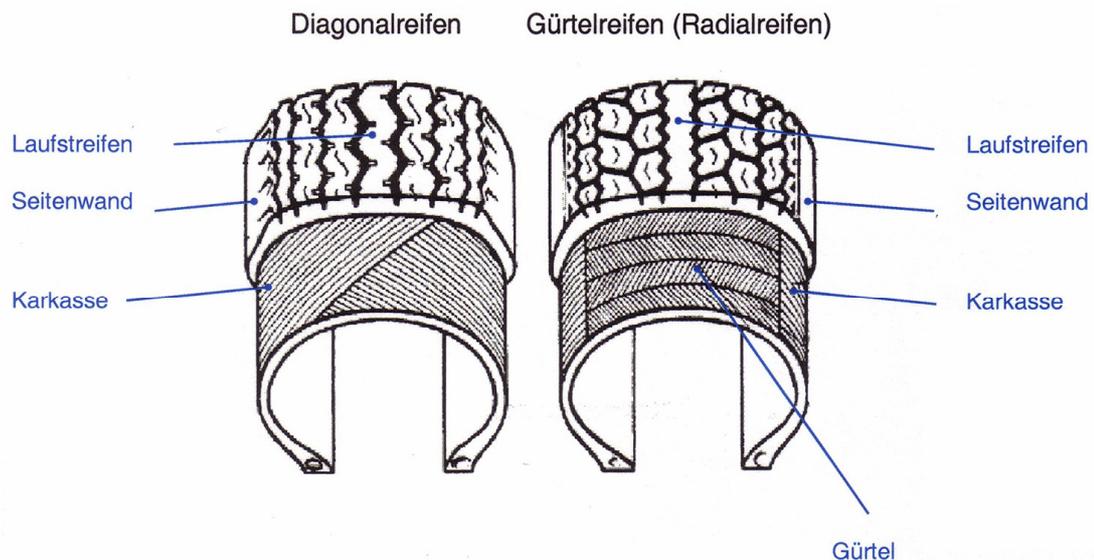


Abbildung 2 – Diagonal und Radialreifen (Hoepke, 2006)

Die Vorteile des Radialreifens gegenüber dem Diagonalreifen sind:

- Geringe Verformung der Lauffläche beim Abrollen, da der Gürtel umfangssteifer ist
- Gutes Aquaplaningverhalten auch bei breiten Reifen (durch den tragenden Gürtel sind Querrillen im Profil möglich)
- Besseres Ansprechverhalten und höhere übertragbare Kräfte (durch steifen Gürtel und geringere radiale Steifigkeit der Karkasse)

Die Nachteile des Radialreifens sind einerseits die Verletzbarkeit der Karkasse, da diese weicher gestaltet ist, und andererseits die Möglichkeit, dass Längsschwingungen und Dröhngeräuschen auf unebenen Fahrbahnen während der Fahrt entstehen (zurückführend auf den steifen Reifengürtel)

An einen Reifen werden heutzutage die folgenden Forderungen gestellt:

- Wie bereits erwähnt, stellt die Lauffläche bzw. der Reifen den einzigen Kontakt zwischen Fahrzeug und Fahrbahn her.
- Fahrkomfort (Federungskriterien, Geräuschkomfort, Laufruhe)
- Lenkverhalten (Lenkkraft und -präzision)
- Fahrstabilität (Geradeaus- und Kurvenstabilität)
- Fahrsicherheit (Reifensitz auf Felge, Kraftschluß)
- Haltbarkeit (Dauerhaltbarkeit, Geschwindigkeitstüchtigkeit, Durchschlagfestigkeit)
- Wirtschaftlichkeit (Lebenserwartung, Abrieb, Rollwiderstand)

Eine Nutzfahrzeugreifenbezeichnung enthält folgende Angaben, die nach DIN und ETRTO vorgeschrieben sind:

- Reifenbreite (z.B. 195) in mm oder Zoll
- Querschnittsverhältnis in % zur Breite (z.B. 65%)
- Symbol für Bauart Diagonal oder Radial

- Felgendurchmesser in Zoll (z.B. 15)
- Tragfähigkeitskennzahl (z.B. 91, aus dieser Ziffer kann die maximale Last pro Einzelreifen abgelesen werden – 91 = 615kg)
- Geschwindigkeitssymbol (z.B. T = 190 km/h)

Die Entwicklung von Nutzfahrzeugreifen für LKWs richtete sich nach den wirtschaftlichen Überlegungen der Reifenhersteller, nämlich der Maximierung der Laufleistung und den Interessen der Transportunternehmen: einem möglichst geringen Treibstoffverbrauch. Auf eine mögliche Schädigung bzw. ungünstige Belastung der Straße durch die Nutzfahrzeugreifenentwicklung stand, wurde keine Rücksicht genommen.

Aus einer Zählung an der Mautstelle Schönberg an der Brennerautobahn A 13 ist die Reifenwahl für Antriebsachsen, Sattelaufleger und konventionelle LKW-Anhänger bekannt (BMVIT, 2000 und Blab, 2001). Demnach sind an den Antriebsachsen zu 96,4% konventionelle Zwillingstreifen verbaut. Bei den Sattelauflegern sind zu 90% überbreite Einzelreifen, so genannte „Super-Singles“ verbaut und 7% besitzen Niederquerschnitts-Zwillingstreifen. Bei den konventionellen Lkw-Anhängern werden 62,7% überbreite Einzelreifen verwendet und zu 23,2 % Niederquerschnitts-Zwillingstreifen. Die Fahrzeug- und Anhängerbezeichnungen sind im Kapitel 2.3 Maßgebendes Bemessungsfahrzeug angeführt.

Zwillingstreifen

Goodyear 11R22,5
Breite 2x ca. 275mm

Überbreiter Einzelreifen

Goodyear 425/65 R22,5
Breite ca. 430mm



Abbildung 3 – Zwillingstreifen und überbreiter Einzelreifen

Für das komplette Berechnungsprogramm werden die zwei genannten Reifenarten angenommen. Es handelt sich um 2 verschiedene Nutzfahrzeugreifentypen: einen Radialreifen als Zwillingstreifen verbaut und einen überbreiten Einzelreifen (Super-Single).

Zurzeit lässt sich im Nutzfahrzeugsektor ein Trend erkennen, dass viele Fahrzeug- und Reifenhersteller verstärkt Super-Single Reifen (überbreiter Einzelreifen) anbieten/erzeugen (Blab, 2001). Der Hintergrund ist die Hoffnung der Fahrzeug- und Reifenindustrie, langlebigere Reifen und eine höhere Laufleistung zu erreichen. Der vermehrte Einsatz von überbreiten Einzelreifen auf Nutzfahrzeugen wird in der Fachliteratur als negativ für das Straßenbauwerk eingeschätzt. Auf eine nähere

Betrachtung des überbreiten Einzelreifens diesbezüglich im Zuge der Diplomarbeit nicht eingegangen.

2.2.4 Übertragbare Kräfte, Haftreibbeiwerte

Der Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn erfolgt über Reibung. Hierzu ist es erforderlich zwischen

- Kraftschluss in Umfangsrichtung / Längsrichtung und
- Kraftschluss quer zur Längsrichtung = Seitenrichtung

zu unterscheiden.

Das Kraftschlussverhalten zwischen Gummi und Fahrbahnoberfläche kann durch Adhäsion im Bereich von kleinen Gleitgeschwindigkeiten (kontrollierte Bremsung, ABS Systeme) oder durch Hysterese im Bereich von hohen Gleitgeschwindigkeiten (Blockierbremsung) beschrieben werden.

Neben dem Reifen des Fahrzeuges hat auch die Fahrbahnbeschaffenheit einen Einfluss auf die Lastableitung bzw. die Größe der zu erwartenden Spannungen. Die Fahrbahnoberfläche wird als trocken angenommen. Bei trockenen Fahrbahnverhältnissen lassen sich maximale Haftreibbeiwerte erreichen und somit sind hohe Spannungen/Dehnungen zu erwarten.

Bei der Betrachtung der auftretenden Radlasten werden nur statische Lasten betrachtet, demnach gehen wir bei den Verkehrsszenarien von einer ebenen Straße ohne Längs- und Querrillen aus. Dennoch besitzt die Verkehrsfläche eine Längs- und Querneigung, die der aktuell gültigen RVS entspricht. Die genauen Neigungen sind im Kapitel 2.5 Lastszenarien angegeben und wurden berücksichtigt.

2.2.4.1 Antrieb, Bremsen, Umfangkräfte

Die in Umfangsrichtung übertragbare Kraft hängt von Fahrbahnverhältnissen, Reifenart und -zustand sowie vom Schlupf ab.

Der Schlupf ist eine Größe der Kinematik. Beim Antrieb oder Bremsen entsteht zwischen Reifen und Fahrbahn eine Relativbewegung, d.h. die Umfangsgeschwindigkeit des Rades ist kleiner oder größer als die Fahrzeuggeschwindigkeit. Beim durchdrehenden Rad geht das Verhältnis der beiden Werte gegen unendlich und beim blockierenden Rad erreicht der Wert 0. Der Antriebs- oder Bremsschlupf wird in % angegeben. Auf den Unterschied zwischen Gleitschlupf und Formänderungsschlupf der Nutzfahrzeugtechnik wird hier nicht weiter eingegangen. Die übertragbare Kraft in Längsrichtung erreicht ihren Maximalwert zwischen ca. 10 und 20 % Schlupf (Hoepke, 2006).

Das Verhältnis aus übertragbarer Längskraft F_x und Normalkraft F_n wird als Haftreibungszahl μ_x zu bezeichnen. Der Haftreibbeiwert ergibt somit für ebene Fahrbahnen, guten Reifenzustand und trockene Zustände hohe Werte um 1,0 und für nasse, unebene bzw. Schneefahrbahnen Werte um 0,2.

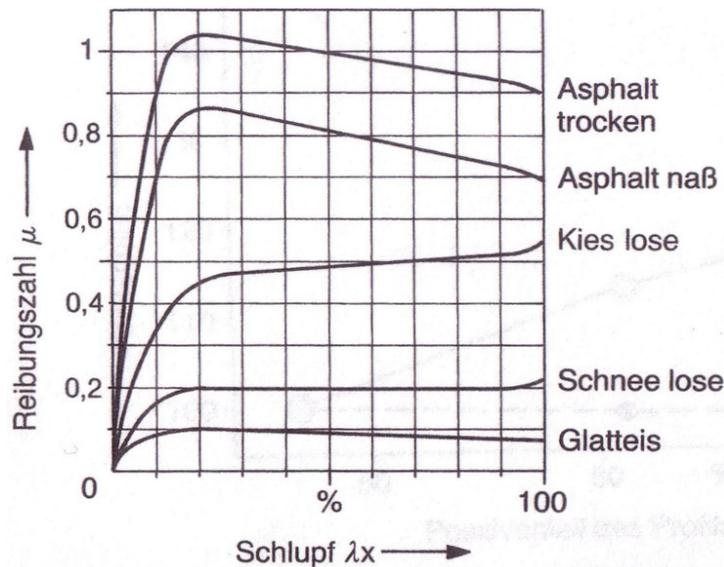


Abbildung 4 – Reibungszahl in Abhängigkeit vom Schlupf (Reimpell, 1988)

Um maximale Reaktionskräfte und Spannungen in der Asphaltkonstruktion zu erreichen, ist es zweckmäßig, möglichst hohe Haftbeiwerte anzusetzen.

Aus der Abbildung geht hervor, dass Reibungszahlen mit Werten $\mu > 1,0$ möglich sind. Da das Diagramm allerdings eine sehr verallgemeinerte Darstellung der Haftreibbeiwerte darstellt und nicht auf die speziellen Eigenschaften schwerer Nutzfahrzeuge eingeht, gilt es, die tatsächlich realistisch möglichen Reibbeiwerte einzugrenzen. Das Kraftfahrtechnische Handbuch, 22. Auflage (Bosch, 1995) legt dar, dass der maximal erreichbare Haftreibbeiwert in Längsrichtung neben dem Schlupf vor allem von der Geschwindigkeit abhängt.

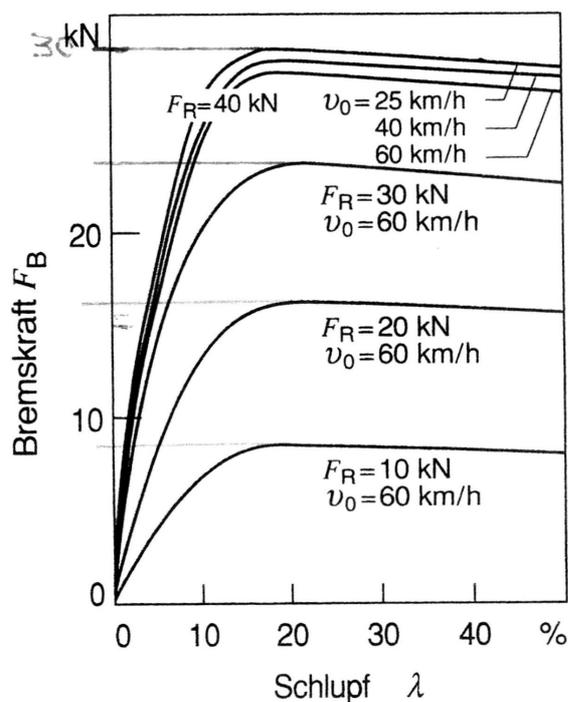


Abbildung 5 – Erreichbare Bremskräfte F_B in Abhängigkeit des Schlupfs λ (Bosch, 1995)

Aus Abbildung 5 lassen sich für einen bremsenden Nutzfahrzeugreifen auf trockener Fahrbahn mit unterschiedlichen Radlasten die erreichbaren (aus Messungen ermittelten) Bremskräfte ablesen, und daraus die Reibungszahl μ_x für die Bremsung bestimmen.

$$\mu_x = \frac{P_B}{F_R} \quad (1)$$

μ_x Haftreibungsbeiwert in Längsrichtung [-]

P_B Bremskraft [kN] (laut Abbildung 5)

F_R Radlast [kN] (laut Abbildung 5)

Somit ergeben sich Werte für $\mu_x = 0,75$ (40 kN Radlast), $0,89$ (30 kN Radlast) und $0,85$ (10 kN Radlast). Das nun gewählte realistische Maximum für μ_x liegt bei $0,90$.

2.2.4.2 Lenken, Fliehkräfte, Seitenführungskräfte

Analog zur Bestimmung des Haftreibbeiwertes in Längsrichtung, kann der Haftreibbeiwert in Querrichtung μ_y als Quotient aus maximal übertragbarer Kraft F_y und Normalkraft F_N bestimmt werden.

Die Größe der maximal übertragbaren Seitenkraft F_s hängt wiederum von fahrzeugtechnischen Größen ab. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei der Schräglaufwinkel (ist gleich dem Lenkwinkel α) des Rades, der zwischen 5 und 15° Maximalwerte für μ_y liefert. Auf die Kinematik der Rückstellmomente und Sturzwinkel der Nutzfahrzeugtechnik wird nicht eingegangen.

Aus dem Kraftfahrtechnische Handbuch (Bosch, 1995) lassen sich die möglichen Seitenkräfte ablesen. Ein typischer Nutzfahrzeugreifen Michelin XZA 11 R 22,5 hat folgende Reifenkennlinie (hinsichtlich Seitenkraft F_y).

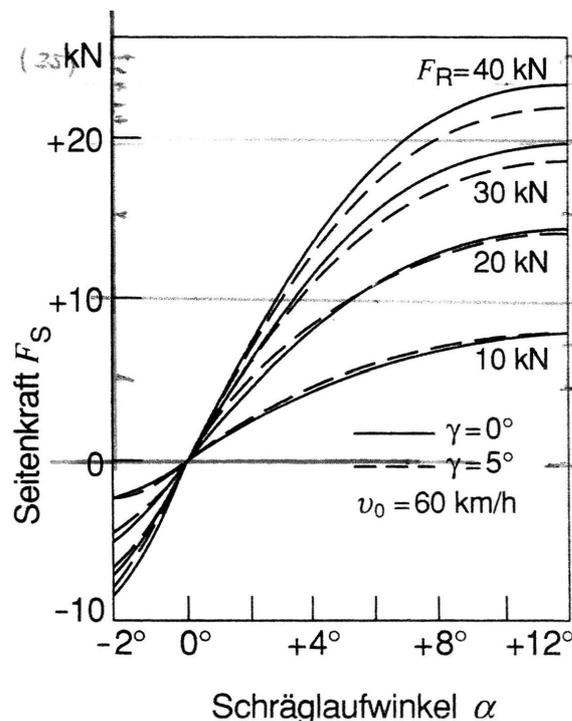


Abbildung 6 – Seitenkraft in Abhängigkeit von Schlupf und Radlast (Bosch, 1995)

Aus Abbildung 6 können die Werte für F_y und F_n abgelesen werden und der Reibbeiwert in transversaler Richtung μ_y kann berechnet werden.

$$\mu_y = \frac{F_s}{F_R} \quad (2)$$

μ_y Haftreibungsbeiwert in Querrichtung [-]

F_s Seitenkraft [kN] (laut Abbildung 6)

F_R Radlast [kN] (laut Abbildung 6)

Tabelle 1: Radlasten und mögliche Seitenkräfte

Radlast F_R [kN]	Seitenkraft F_s [kN]	Haftbeiwert μ_y [-]
40	23,1	0,58
30	21,1	0,71
20	14,0	0,70
10	8,0	0,80

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen vor allem Radlasten im Bereich von 50 kN und höher untersucht werden. Dadurch fiel die Wahl auf einen maximalen realistischen Reibbeiwert in Seitenrichtung (transversal) von $\mu_y = 0,67$.

2.2.4.3 Kombination aus Längs- und Querkräften

Bei gleichzeitigem Auftreten von Umfangskräften F_x und Seitenkräften F_y kann die Resultierende der beiden Einzelkräfte einen bestimmten Grenzwert, ähnlich dem Coulombschen Reibungskreis, nicht überschreiten. In der Fahrzeugtechnik wird der Grenzkreis nach Kamm „Kammscher Kreis“ genannt (Abbildung 7). Der Reifen kann sein maximales Kraftschlusspotential nur in eine Richtung zur Verfügung stellen.

Abweichend von der Kreisform ergeben sich, aus den Unterschieden zwischen μ_y und μ_x , Ellipsen als Hüllkurven. Die maximal erreichbaren Kräfte in Umfangsrichtung sind höher als jene in Seitenrichtung.

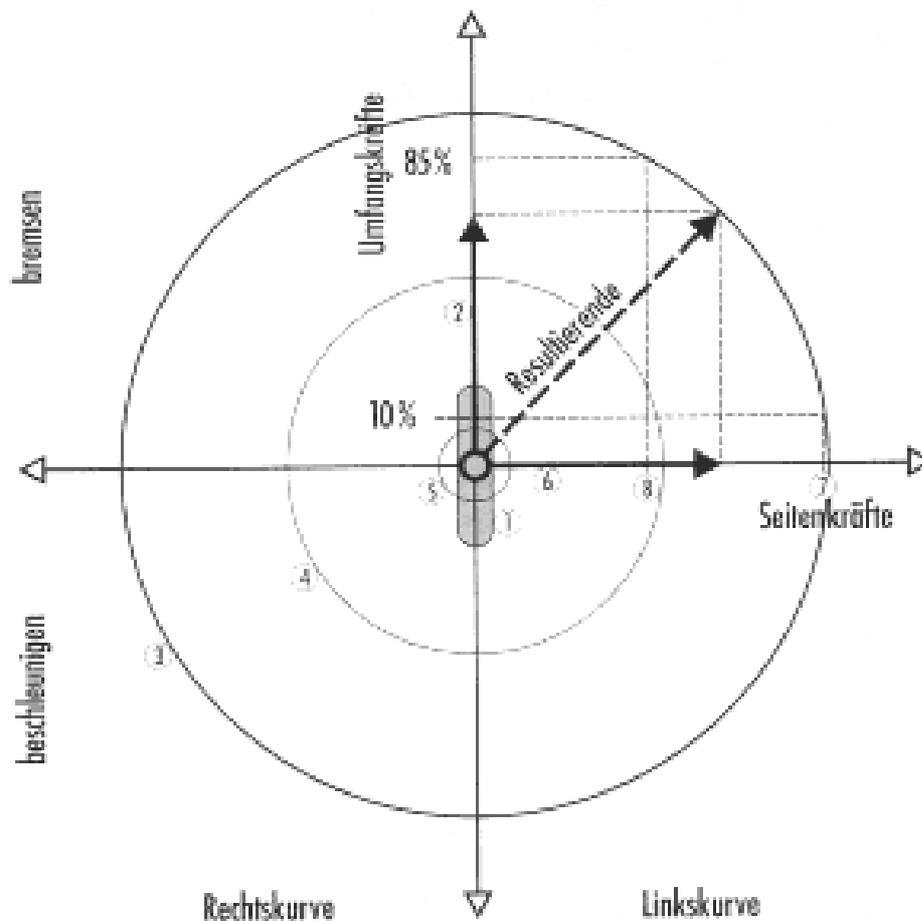


Abbildung 7 - Kammscher Kreis

Der äußere Radius entspricht der maximal zur Verfügung stehenden Gesamtkraft, die der Reifen übertragen kann.

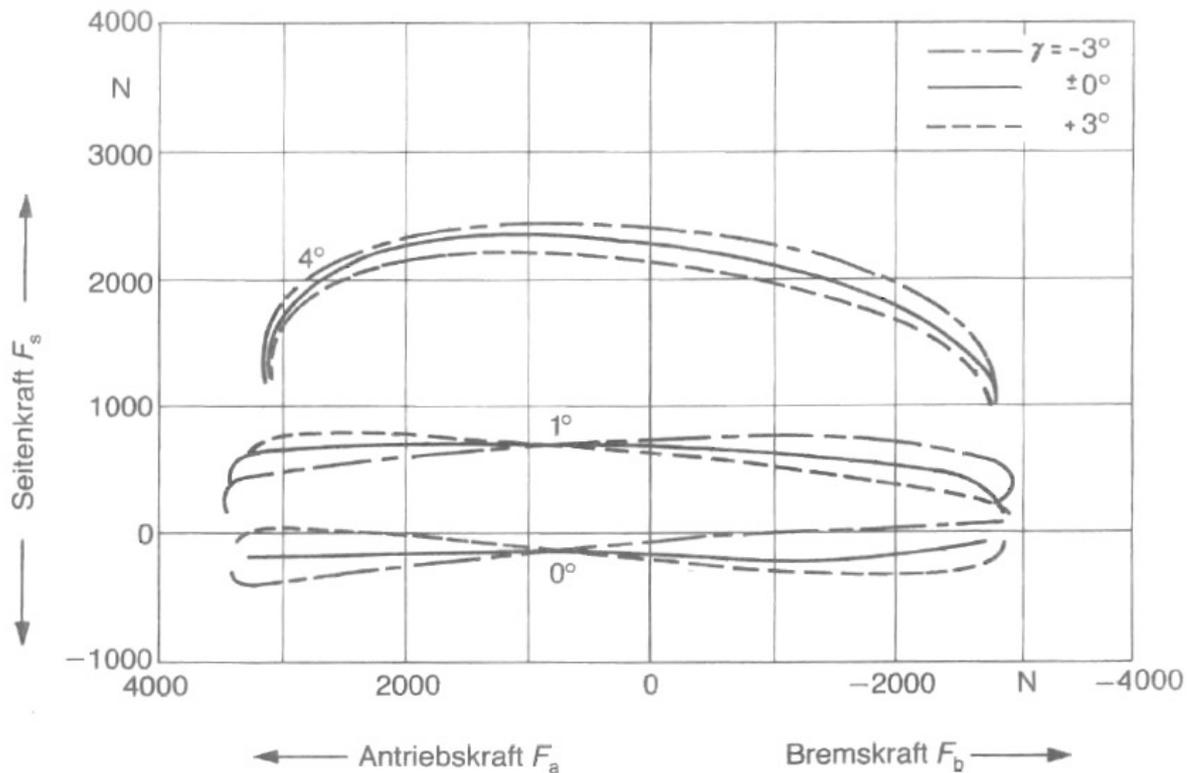


Abbildung 8 – Reifenkennfeld eines PKW Reifens 175/70 R 13 S 3 kN Radlast (Reimpell, 1988)

Für den Fall, dass die Reibbeiwerte μ_x und μ_y übereinstimmen, gilt gemäß dem Kammschen Kreis

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu_{\max} F_z \quad (3)$$

F_x, F_y, F_z Kraftkomponenten in Richtung x-, y- und z-Achse [kN]

μ_{\max} maximal erreichbarer Haftreibbeiwert [-]

Da nun schon der Kamm'sche Kreis gemäß Gleichung 3 die maximal übertragbare Kraft auf nur eine mögliche Richtung (sei es nun in Umlauf- oder Seitenrichtung) einschränkt, gelangt man zur Erkenntnis, dass die Kombination aus Umfangs- und Seitenkräften zur die Straßenoberbaukonstruktion keinen Einfluss hat. Das gewählte Koordinatensystem (x in Umfangsrichtung, longitudinal und y in Seitenrichtung, transversal) unterscheidet hier durchaus zwischen den beiden Kraftanteilen F_x und F_y , wohl ist aber die maßgebliche Gesamtlast und die daraus resultierende maßgebliche Bodenspannung stets in oder gegen die Hauptnormalspannungsrichtung orientiert (näheres dazu siehe im Kapitel 5.2.5 Ergebnisse, Auswertung und Interpretation).

2.3 Maßgebendes Bemessungsfahrzeug

Die zulässigen Achslasten auf österreichischen Straßen sind per Bundesgesetz geregelt. Die 15. Kraftfahrzeuggesetz-Novelle ändert das Kraftfahrzeuggesetz von 1967 auszugswise wie folgt:

§ 4 Abs. 8 lautet „(8) Die Achslast (§ 2 Z 34) darf 10 000 kg, die der Antriebsachse jedoch 11 500 kg, nicht überschreiten.“ Des Weiteren werden verschiedenste Fahrzeuggesamtlasten und Achslast-Summen (für Mehrfachachsen) vorgegeben.

Die höchstzulässigen Gesamtgewichte für Nutzfahrzeuge laut Richtlinie 96/53/EWG sind in der Abbildung dargestellt.

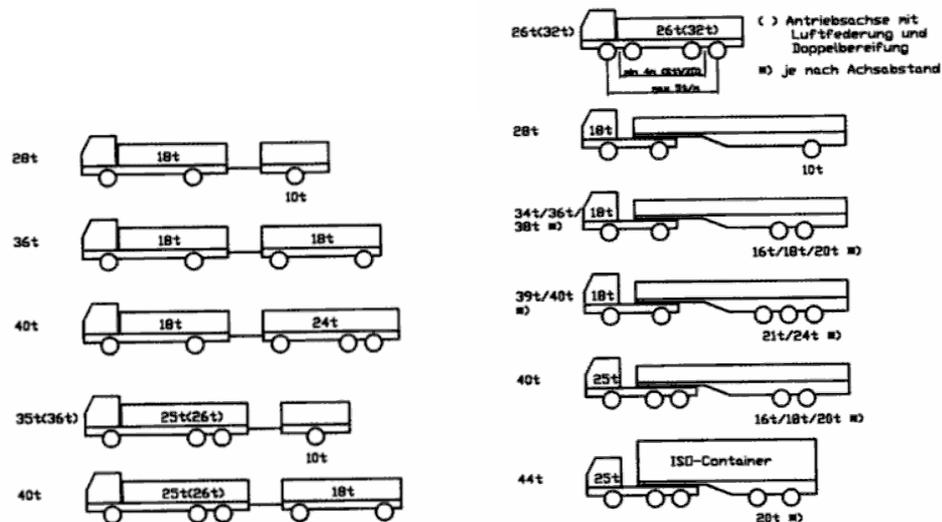


Abbildung 9 – Höchst zulässige Gesamtlasten laut Richtlinie 96/53/EWG

Als maßgebende Bemessungsfahrzeuge werden also jene Fahrzeuge erachtet, die sowohl maximale als auch zulässige Achslasten auf die Straßen übertragen. Laut Gesetz sind in Österreich und auch in den EU-Ländern keine Achslasten über 11,5 Tonnen erlaubt. Selbst die verschiedensten Fahrzeuggesamtlasten mit diversesten Lastverteilungen für Triebfahrzeug und Anhänger liefern keine höheren Achslasten als 11,5 Tonnen.

An dieser Stelle sei allerdings vermerkt, dass eine Vielzahl der Nutzfahrzeuge die maximale Achslast von 11,5 t beinahe erreicht. Meist erreichen die Antriebsachsen Werte um 11 t oder mehr. Somit ergibt sich für eine Halbachse eine vertikale Kraftkomponente $F_n = F_z = 57,5 \text{ kN}$. Eine Halbachse entspricht einem Super-Single Reifen oder einem Paar Zwillingreifen.

Beispielhaft sei als Bemessungsfahrzeug ein Linienbus der Wiener Linien angeführt. Der Niederflerbus mit der Bustype: NL243 M12 hat eine Bereifung mit 275/70 R22,5 und einen werksmäßigen Achsdruck vorne von 7245 kg. An der Antriebsachse werden die maximalen 11500 kg (Achsdruck hinten) ausgereizt.



Abbildung 10 – Wiener Linien Bus Typ NL243 M12 (www.fpdwl.at, 2008)

Als zweites Beispiel dient ein Reisebus der Firma MAN. Er besitzt eine Bereifung 295/80 R 22,5, die Modelltype ist „MAN Lions Coach“. Die Achslast vorne beträgt 7.100 kg und an der hinteren Achslast wird wieder das Maximum von 11.500 kg (Antriebsachse) angegeben.



Abbildung 11 – MAN Lions Coach (MAN AG, Nutzfahrzeuge, www.man-mn.com, 2008)

Ein Lastkraftwagen ist dazu ausgelegt, selbst Lasten zu tragen und zusätzlich eventuell einen konventionellen Anhänger zu ziehen. Ein Sattelkraftfahrzeug (gesetzliche Bezeichnung) bzw. Sattelzug besteht aus einem Gespann aus Sattelzugmaschine und dem Sattelauflieger.



Abbildung 12 – Lastkraftwagen mit konventionellem Anhänger (www.rueggerholz.ch, 2008)



Abbildung 13 - Sattelkraftfahrzeug: Zugmaschine und Auflieger (wikipedia.org, 2008)

2.4 Verbessertes Modell zur Lastabtragung

Aus der Vielzahl an Parametern wird nun ein verbessertes Modell zur Lastabtragung erstellt. Das Mehrschichtenberechnungsprogramm LEAP (Symplectic Engineering Corp., 1998) verwendet Topflasten, das sind Flächenlasten mit konstanter Lastverteilung und einer kreisrunden Latschfläche (Details dazu in Kapitel 5.2.1).

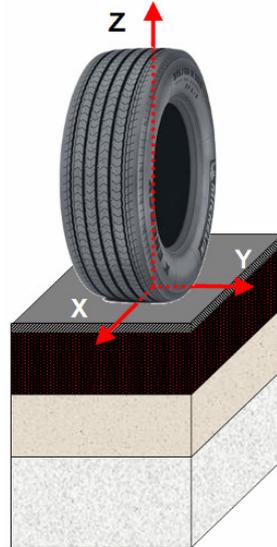


Abbildung 14 – Schematische Darstellung Einzelreifen auf Mehrschichtsystem

Die Abbildung 14 zeigt das gewählte Koordinatensystem in der Straßenebene für die Berechnungen der Spannungen und Dehnungen der Asphaltkonstruktion. Die Längsrichtung (Antrieb, Bremsen, longitudinal) wird als x-Achse bezeichnet. Quer zur Längsrichtung (Fliehkräfte, transversal) befindet sich die y-Achse, und senkrecht auf die Fahrbahn wird die z-Achse definiert (Lasten).

Die am Fahrzeug herrschenden Kräfte werden bestimmt und es werden maßgebende Lastszenarien erstellt. Über die maximal möglichen Haftbeiwerte werden mit Hilfe des Mehrschichtenprogramms LEAP Spannungen, Dehnungen, Verformungen im Straßenkörper berechnet.

2.5 Lastszenarien

Aus der Vielzahl an möglichen Fahrmanövern eines Nutzlastfahrzeuges wurde die Wahl auf 2 maßgebliche Szenarien eingeschränkt. Zur Berechnung der Kenngrößen im Straßenkörper werden folgende Szenarien herangezogen:

1. Busbucht
2. Kreisverkehr

Das Szenario Busbucht zeichnet sich dadurch aus, dass keinerlei Seitenführungskräfte auf den Reifen wirken und somit das gesamte Kraftschlusspotential in Längsrichtung für Antrieb oder Bremsen zur Verfügung steht (maßgeblich ist hierbei der Bremsvorgang).

Das Szenario Kreisverkehr liefert Maximalwerte für Spannungen und Dehnungen unter Rücksichtnahme auf Fliehkräfte und Antriebs- bzw. Bremskräfte.

Ausgangspunkt für die Berechnungen ist die maximale Halbachslast von 57,5 kN. Beim Busbuchtszenario wird keine Querneigung angenommen, um jeglichen Einfluss auf Seitenkräfte und daraus resultierende zusätzliche Spannungen quer zur Fahrtrichtung auszuschließen. Hingegen wird bei den Kreisverkehrsszenarien die maximale Schrägneigung laut RVS angewandt. Diese beträgt 4% (FVS, RVS 03.05.14, 2001). Durch eine hohe Schrägneigung werden die Reaktionskräfte in Straßenebene quer zur Fahrtrichtung erhöht.

Von den nun ermittelten maximal auftretenden Kräften am Reifen wird eine Abminderung über die Haftreibbeiwerte durchgeführt. Bei realistischer Betrachtung erhält man für Längsrichtungen Haftreibbeiwerte μ_x von 0,90 und für Querrichtung μ_y von 0,67. Wie in Kapitel 2.3.4. bereits erläutert, kann aber nur in eine Richtung das maximale Kraftschlusspotential genutzt werden.

Bei der Berechnung der Szenarien erfolgen 2 Unterscheidungen:

- verwendete Reifenart:
 - überbreiter Einzelreifen
 - Zwillingsreifen

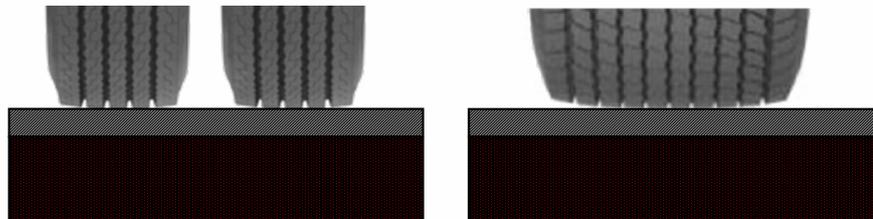


Abbildung 15 – Zwillingsreifen und überbreiter Einzelreifen

- Straßenaufbauten:
 - Splittmastixaufbauten 1a, 2a und 3a
 - Asphaltbetonaufbauten 1b, 2b und 3b

Näheres dazu in Tabelle 2 – Oberbauvarianten für SMA und AC Aufbauten

Die Bezeichnung der einzelnen Ergebnisse und Interpretation erfolgt mit folgenden Abkürzungen:

KV1 Kreisverkehrsszenario 1

KV2 Kreisverkehrsszenario 2

BB Busbuchtszenario

KV1_U Kreisverkehrsszenario 1 mit überbreitem Einzelreifen

KV1_Zw Kreisverkehrsszenario 1 mit Zwillingsreifen

KV1_U_1a Kreisverkehrsszenario 1 mit überbreitem Einzelreifen und Oberbaukonstruktion 1a

2.5.1 Busbucht

Das Szenario erfolgt ohne Rücksichtnahme auf Seitenführungskräfte. Das gesamte Kraftschlusspotential kann in Längsrichtung zum Beschleunigen oder Bremsen des Fahrzeuges verwendet werden.

Da keine Querneigung angenommen wird, kann das ganze Kraftschlusspotential des Reifens in Umfangsrichtung F_x ausgereizt werden.

$$\mu_{x, \max} = 0,90$$

$$F_z = 57,50 \text{ kN}$$

$$F_{x, \max} = \mu_{x, \max} F_z$$

$$F_{x, \max} = 51,75 \text{ kN}$$

$$F_y = 0 \text{ kN}$$

Oben angeführte Kräfte F_x , F_y und F_z sind die direkten Kräfte, welche die Straße in der Ebene $z = \pm 0$ (direkt an der Oberfläche) belasten – dies sind die direkten Eingabewerte für die LEAP-Berechnung, siehe auch Kapitel 2.5 Mehrschichtenprogramm „LEAP“.

2.5.2 Kreisverkehr

Vom Szenario Kreisverkehr wird eine hohe Belastung quer zur Fahrtrichtung, also transversal bzw. y-Achse erwartet. Es wurden 2 maßgebliche Kreisverkehrsszenarien ermittelt. Sie unterscheiden sich im Kreisverkehrsradius und in der Fahrgeschwindigkeit. Beide Größen sind Einflussparameter für die Fliehkraft.

$$F_R = \frac{mv^2}{R} \quad (4)$$

F_R Fliehkraft [N]

m rotierende Masse [kg]

v Geschwindigkeit [m/s]

r Radius [m]

Gleichung 4 dient zur Ermittlung der Fliehkraft F_R in [N]. Der sensible Parameter bei der Ermittlung von realistischen Fliehkräften während der Kurvenfahrt des Nutzfahrzeuges ist offensichtlich die Geschwindigkeit v .

Der Radius wird durch die in Österreich verbauten Kreisverkehrsanlagen nach RVS 03.05.14 (FSV, RVS 03.05.14, 2001) eingegrenzt. Demnach ist der Kreisverkehrsdurchmesser $25 \leq D_A \leq 40\text{m}$.

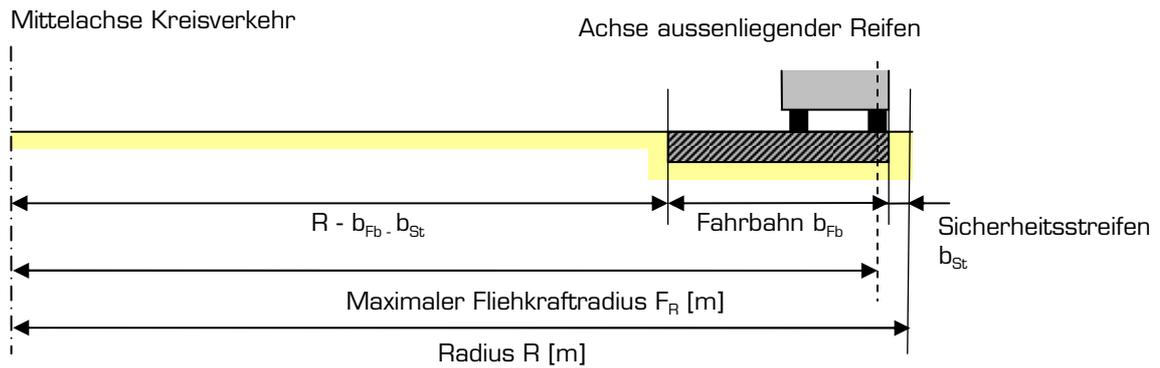


Abbildung 16 – Prinzipsdarstellung der Kreisverkehr- und Fliehkräftabmessungen

Abbildung 16 zeigt die Abmessungen im Querschnitt. Es wurde eine vereinfachte Berechnung der Fliehkräfte vorgenommen – davon ausgehend, dass die halbe Achslast am außen liegenden Reifen angreift. Für eine exakte Ermittlung der Seitenführungskräfte (und das Verhältnis der Verteilung auf Innen- und Außenrad) müsste der Fahrzeugschwerpunkt als rotierende Masse herangezogen werden. Für das in dieser Diplomarbeit verwendete Modell ergibt sich der maximale Radius zur Ermittlung der Fliehkraft wie folgt:

$$R_{Fr,max} = \frac{D_A}{2} - b_{St} - \frac{b_R}{2} = \frac{40}{2} - 0,50 - \frac{0,295}{2} = 19,35 \text{ m} \quad (5)$$

$R_{Fr,max}$ Maximal erreichbarer Radius [m]

D_A Kreisverkehrsdurchmesser nach RVS [m]

b_{St} Breite Sicherheitsstreifen = 0,50 m

b_R Breite des Reifens = 0,295 m

Analog dazu lässt sich ein minimaler Radius ermitteln, wobei hier die Untergrenze für $D_A = 25 \text{ m}$ maßgebend ist.

$$R_{Fr,min} = \frac{D_A}{2} - b_{St} - b_{Fzg} + \frac{b_R}{2} = \frac{25}{2} - 0,50 - 2,50 + \frac{0,295}{2} = 9,65 \text{ m} \quad (6)$$

b_{Fzg} Breite des Fahrzeugs = 2,50 m

Weiters gilt es, neben dem Radius auch die Fahrgeschwindigkeit einzugrenzen. Hierzu ist es sinnvoll, zuerst die aus verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten v resultierenden Fliehkräfte bei den bereits eingegrenzten Radien zu ermitteln.

Fliehkräfte/Lasten

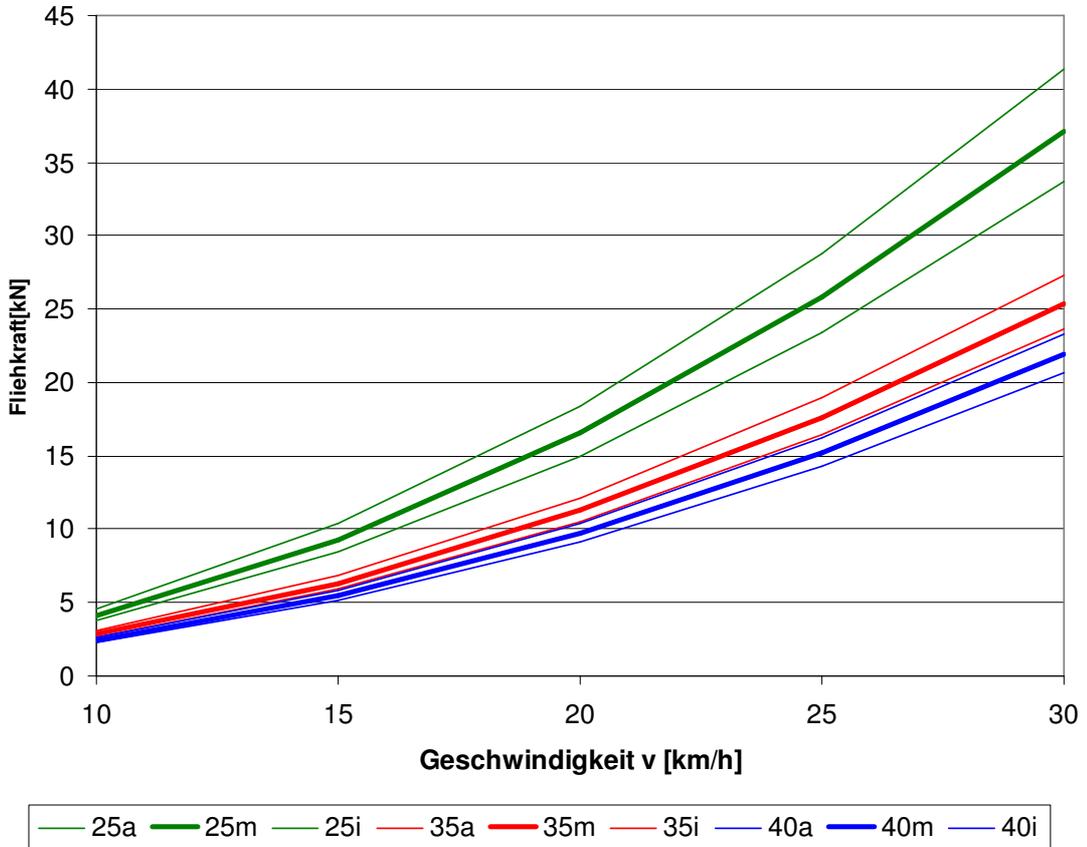


Abbildung 17 – Fliehkräfte F_R bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Radien

Die Abbildung 17 zeigt für die Kreisverkehrsdurchmesser D_A von 25 m (grün), 35 m (rot) und 40 m (blau) die resultierenden Fliehkräfte für 3 Fahrzeugpositionen. Dabei werden das innen liegende Rad (i), das außen liegende Rad (a) und die Fahrzeugmittelachse (m) dargestellt. Eine realistische Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeug und somit auch des Rades ist 25 km/h. Daraus ergibt sich eine Fliehkraft $F_R = 28,74$ kN für das Kreisverkehrsszenario KV1.

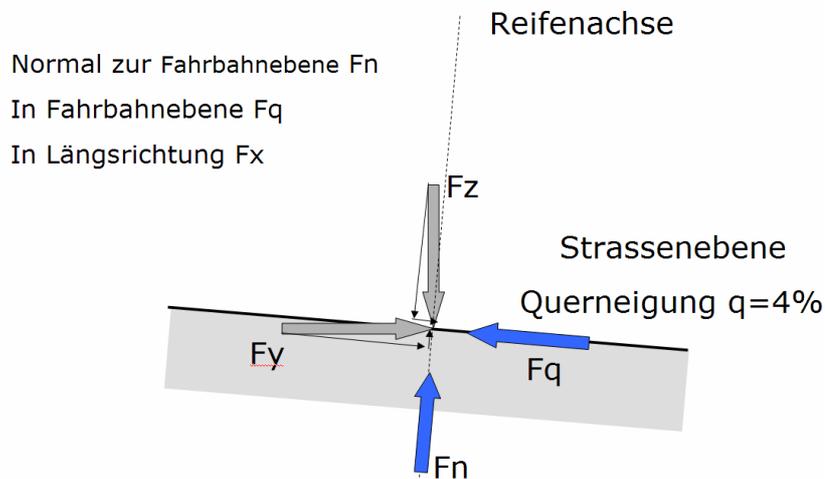


Abbildung 18 – Schematische Darstellung der Kräfteverhältnisse in Straßenebene

Die am Fahrzeug wirkenden Kräfte müssen durch Umrechnung der Querneigung (Kapitel 2.4) von 4% auf Kräfte in Straßenebene umgerechnet werden:

Gemäß der Abbildung 18 gelten folgende Beziehung zur Einhaltung des Gleichgewichtszustandes $\Sigma H = 0$ und $\Sigma V = 0$.

$$F_q = F_z \sin(\alpha) + F_y \cos(\alpha) \quad (7)$$

$$F_n = F_z \cos(\alpha) - F_y \sin(\alpha) \quad (8)$$

F_q, F_n Kräfte in Straßenebene [kN]

F_y, F_z Kräfte am Reifen [kN]

α Querneigung der Fahrbahn [°]

Die Querneigung von 4 % entspricht einem Neigungswinkel von $\alpha = 2,2906^\circ$. Aus der Umrechnung ergeben sich für Kreisverkehrsszenario 1 folgende Kräfte in Straßenebene:

$$\text{KV1: } F_z = 56,305 \text{ kN}$$

$$F_y = 31,015 \text{ kN}$$

Die Längskraft wird nun als „Restpotential“ des Reifens ermittelt – nach Kammschen Kreis, siehe Kapitel 2.2.4.3. Der Reifen muss bereits in seitlicher Richtung $F_y = 31,015$ kN übertragen und es bleibt somit ein gesuchtes Restpotential für F_x Längsrichtung, um nicht das Gesamtpotential laut Kammschen Kreis zu überschreiten.

$$\sqrt{(F_x^2 + F_y^2)} = F_z \mu_{G,\max} \quad (9)$$

$$\text{folgt zu } F_x = \sqrt{(F_z \mu_{G,\max})^2 - F_y^2} \quad (10)$$

Mit den bereits bekannten Werten $F_z = 56,305$ kN, $F_y = 31,015$ kN und $\mu_{G,\max} = 0,90$ ist nun

$$F_x = 43,142 \text{ kN}$$

Für Kreisverkehrsszenario 2 ergeben sich durch die Änderung des Fliehkradradius auf 19,35 m (Durchmesser $D_A = 40,0$ m) und der Geschwindigkeit auf 20 km/h die folgenden Werte. Die Berechnung erfolgt analog zu den Daten aus KV1.

$$\text{KV2: } F_z = 57,088 \text{ kN}$$

$$F_y = 11,461 \text{ kN}$$

$$F_x = 50,431 \text{ kN}$$

Zusammengefasst in Abbildung 19 bilden die drei Lastszenarien eine repräsentativen Belastungsauswahl von maximal möglichen und gleichzeitig realistischen Fliehkräften (Seitenkräften, Kreisverkehr 1 und 2) und reinen Umfangskräften (Busbucht).

Kräfte in Strassenebene

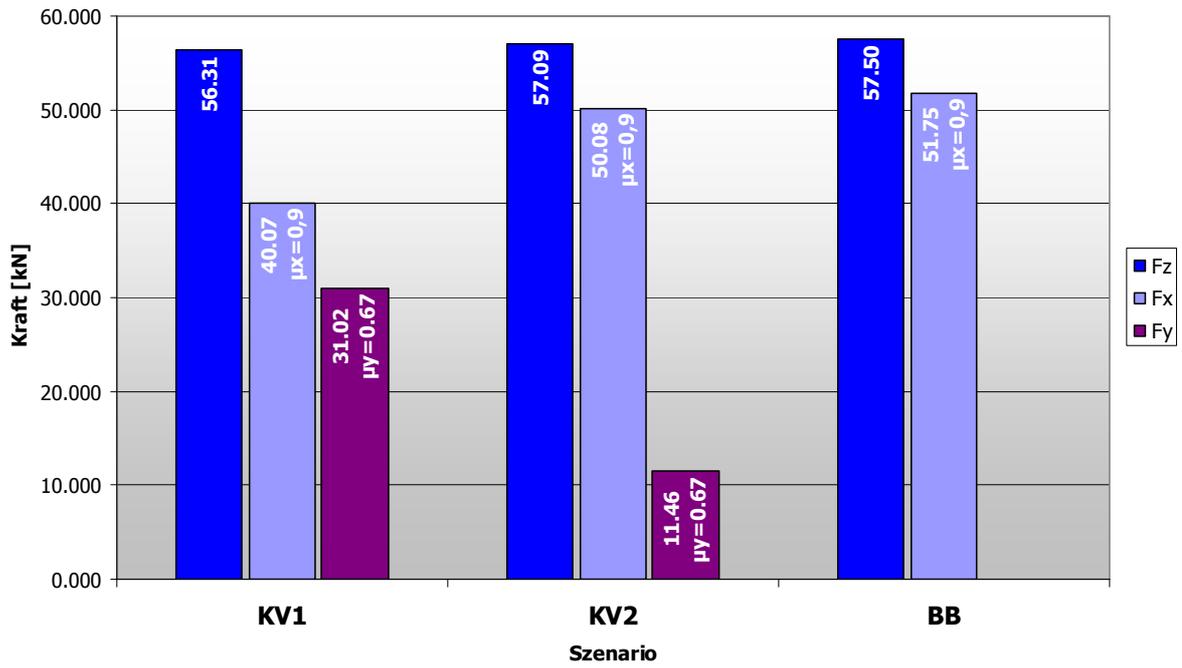


Abbildung 19 – Kräfte in der Straßenebene nach Lastszenarien BB, KV1 und KV2

3. KLIMA UND TEMPERATUR

3.1 Maßgebliche Lufttemperaturen

Grundlage für die Abschätzung von maximalen Fahrbahntemperaturen sind die aus meteorologischen Langzeitbeobachtungen abgeleiteten mittleren Stundenwerte der Lufttemperatur. Die maßgebliche Temperaturganglinie eines heißen Sommertages wird aus der Normalverteilung der Stundenwerte der Ganglinien jener Tage bestimmt, an denen jeweils die maximale Lufttemperatur des Jahres beobachtet wurde. Zur Festlegung der maßgeblichen Temperaturgrenzwerte werden Vertrauensniveaus (Zuverlässigkeiten) definiert, bei welchen die ermittelten Temperaturgrenzen nicht über- bzw. unterschritten werden.

Die Normalverteilung der Stundenwerte der Lufttemperatur für einen heißen Sommertag wurden auf Grundlage der von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) übermittelten Stundenwerte der Lufttemperatur für die Wetterstation in Wien-Hohe Warte (Stat.Nr. 5904, Seehöhe 202 m ü.A., Länge 16.352°, Breite 48.236°) für den Beobachtungszeitraum zwischen 1.1.1996 bis 31.5.2005 abgeleitet. Die Tagesganglinien der normalverteilten Stundenwerte sind für verschiedene Vertrauensniveaus in Abbildung 20 dargestellt.

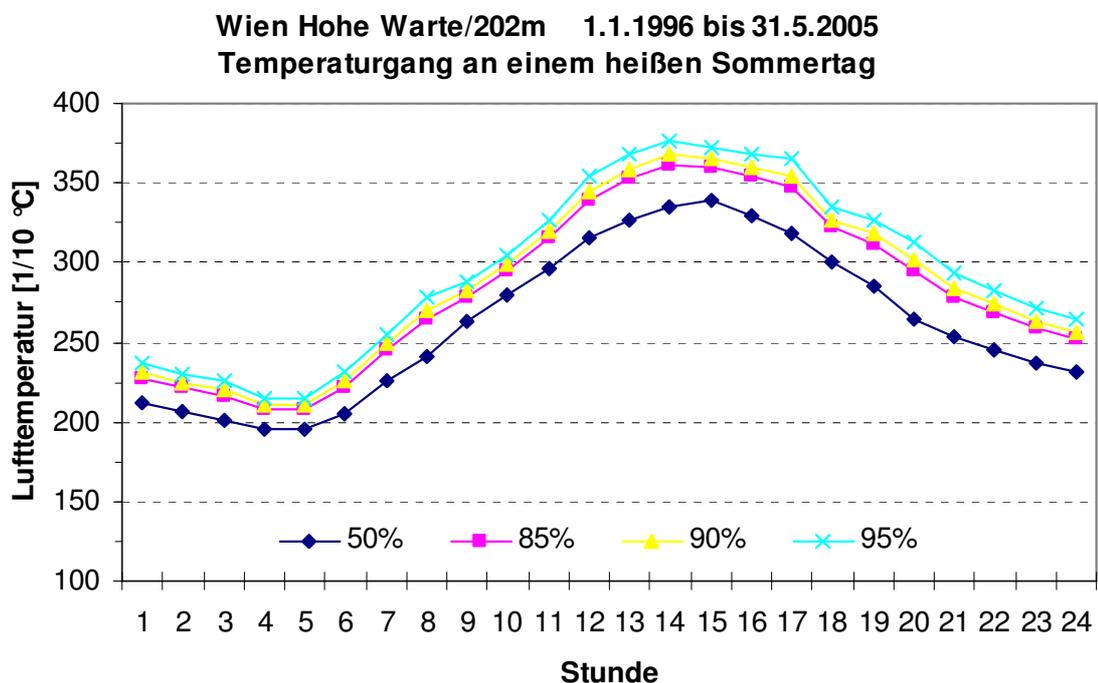


Abbildung 20 - Maßgebliche Tagesganglinien der normalverteilten Stundenwerte der Lufttemperatur für einen heißen Sommertag

3.2 Temperaturverteilung im bituminösen Oberbau

Da die Asphaltstichtemperaturen und nicht die Lufttemperaturen für das temperaturabhängige Verhalten des Straßenoberbaus entscheidend sind, müssen bei

hohen Lufttemperaturen die Asphalttemperaturen als maßgebliche Bemessungstemperaturen ermittelt werden.

Mit Hilfe des Energiebilanzansatzes kann zunächst aus der Ganglinie der Lufttemperatur die zugehörige Ganglinie der Oberflächentemperatur ermittelt werden. Anschließend wird auf der Grundlage der Fourier'schen Wärmeleitung die Temperaturverteilung im Straßenaufbau bestimmt (Wistuba, 2003).

Die auf diese Weise aus den Tagesganglinien der Lufttemperatur an einem heißen Sommertag (Vertrauensgrenze 95%) abgeleiteten räumlichen und zeitlichen (stündlichen) Temperaturverteilungen im bituminösen Straßenkörper sind in Abbildung 2 dargestellt.

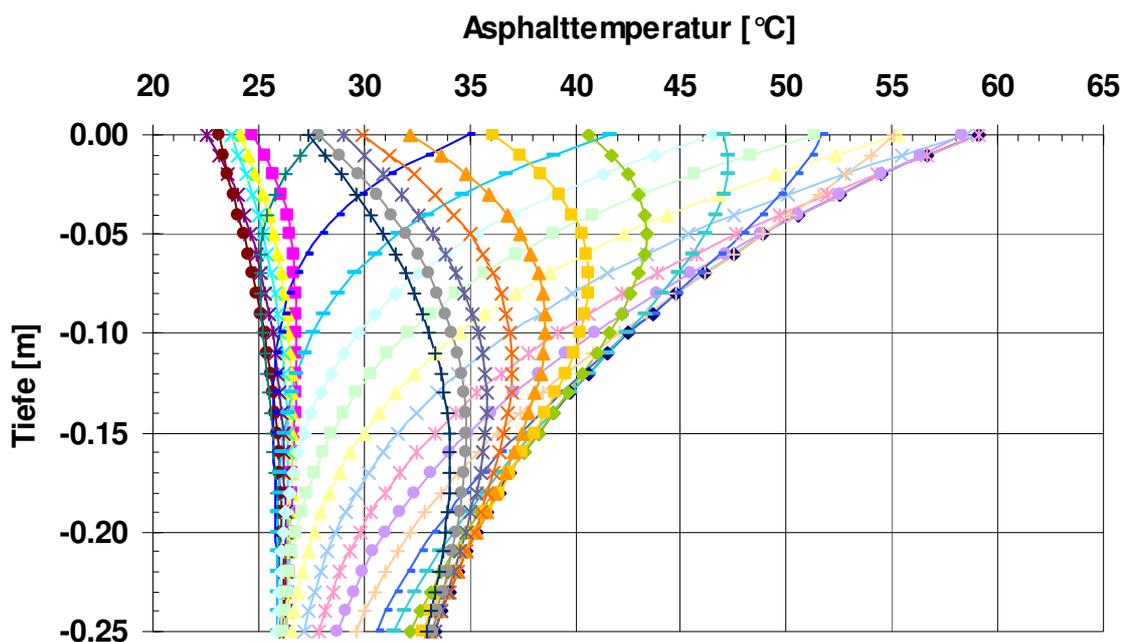


Abbildung 21 - Simulierte stündliche Temperaturprofile im Asphaltpaket für den Temperaturfall „heißer Sommertag“ (Vertrauensgrenze 95%).

3.3 Einschränkungen

Wie eben dargelegt, stellen besonders die Einflüsse aus der Temperatur - neben den klimatischen Einflüssen wie Niederschlag, Wasser, Tau und Frost - eine der größten Belastungen dar. Insbesondere die Bestimmung der maximalen Oberflächentemperaturen und der Temperaturverteilung im gesamten Straßenkörper ist von Bedeutung.

Die hohen Temperaturen haben einen negativen Einfluss auf die Steifigkeit und Widerstandsfähigkeit des Bitumens. Bei steigenden Temperaturen verliert das Bindemittel (Bitumen) an Steifigkeit und das Materialverhalten ändert sich von elastischem zu viskosem Verhalten.

Aus dem Zusammenhang Elastizitätsmodul und Temperatur der maßgeblichen Deck- und Tragschichtmaterialien ist erkennbar, dass bei hohen Temperaturen ungünstigere Spannungszustände erreicht werden, als bei vergleichsweise niedrigen. Für diese Arbeit wird ein heißer Sommertag angenommen, an dem maximale Temperaturen in den Deck- und Binderschichten der Asphaltkonstruktion herrschen. Die Elastizitätsmoduli erreichen somit minimale Werte, wodurch große Verformungen möglich werden.

4. MISCHGUTOPTIMIERUNG

4.1 Einleitung

Mischgüter für Asphalttragschichten bestehen aus Gestein und Bitumen als Bindemittel. Der Massenanteil des Gesteins liegt in der Regel zwischen 93 und 96 %, der verbleibende Masseanteil von 4 bis 7 % wird von Bitumen beansprucht. Weiters gibt es noch einen von Luftporen gefüllten Hohlraumgehalt, welcher stark variieren kann.

Asphalte reagieren auf Temperaturen und länger andauernde Belastungen nicht elastisch, sondern viskos. Zur Beschreibung der Eigenschaften von Asphaltsschichten wird ein rheologisches Modell vorgeschlagen. Dies dient nicht nur zur optimalen analytischen und numerischen Lösung von Rechenmodellen, sondern auch als Ansatz für die Optimierung von Mischgutrezepturen.

Eine übersichtliche Darstellung der Einflussparameter für mechanische Eigenschaften von Asphalten findet sich in Blab, 2001:

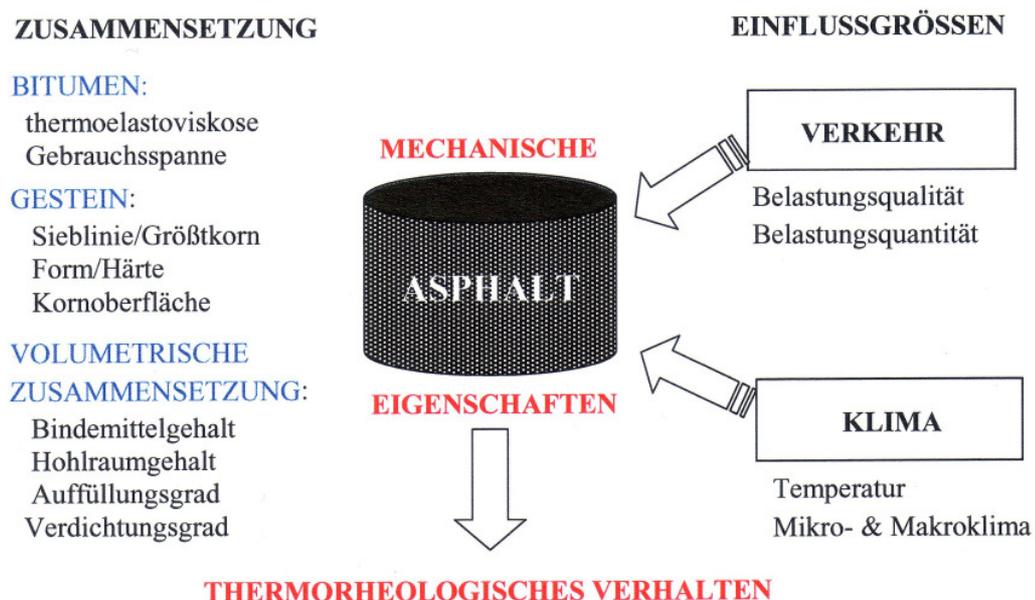


Abbildung 22 – Einflussgrößen für mechanische Eigenschaften von technischen Asphalten (Blab, 2001)

Für das Vorhaben der Optimierung des Asphaltmischgutes für hochbelastete Verkehrsflächen gilt es vor allem das Verhalten im Hochtemperaturbereich, bei niedrigen Frequenzen sowie grundsätzlich unter hohen Lasten zu untersuchen. Im folgenden Kapitel wird gezeigt, dass durch die Anwendung von gebrauchsvorhaltensorientierten Prüfmethode und ebensolchen Mischgutoptimierungen eine widerstandsfähigere Asphaltkonstruktion dimensioniert wird. Es wird einerseits die Mischgutoptimierung nach dem empirischen Ansatz und andererseits nach dem fundamentalen Ansatz gezeigt.

Gebrauchsverhaltenorientierte Prüfmethode zeichnen sich durch so genannte in situ – ähnliche Rahmenbedingungen aus. Es wird angestrebt, den realistischen, im eingebauten befindlichen Zustand an der Prüfmethode zu simulieren. Es wird besonders auf eine bestmögliche Anpassung der Temperaturen und Feuchtigkeitszustände eingegangen. Zu gebrauchungsverhaltenorientierten Versuchen Prüfungen zählen beispielsweise der Spurbildungstester oder triaxiale Belastungsversuche.

Die konventionellen Methoden wie die Hohlraumbestimmung nach Marshall oder die zahlreichen Bitumenprüfmethode Ring-Kugel, Brechpunkt, Penetration etc. werden unter genormten Versuchsbedingungen durchgeführt. Um Prüfbedingungen zu schaffen, welche der Realität nahe liegen, werden gebrauchungsverhaltenorientierte Prüfmethode angewandt. Im Zuge dieser Arbeit wird sich zeigen, dass vor allem für besonders belastete Asphaltkonstruktionen, die fundamentalen Prüfmethode und Optimierungsansätze heranzuziehen sind.

4.2 Allgemeines über Asphalt

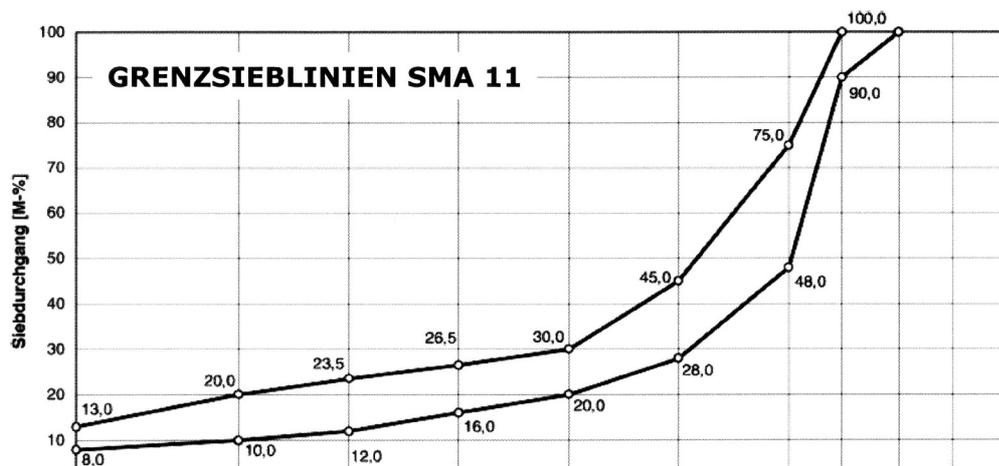
Die unterschiedlichen Schichten des Straßenoberbaus haben definierte Aufgaben zu erfüllen. Die Aufgabe der Deckschicht ist primär die Lastaufnahme und Lastverteilung auf die unterliegende Trag- oder Binderschicht. Weiters schützt die Deckschicht die Tragschicht. Die Trag- oder Binderschicht hat die Aufgabe die Verkehrslasten aufzunehmen und unzulässigen Verformungen entgegen zu wirken. Auch der Einsatz von Tragdeckschichten ist möglich, welche die Eigenschaften und Aufgabenbereiche beider Schichten vereinen. Je nach Schicht und Materialwahl geben die unterschiedlichen RVS die Einbaubedingungen vor.

Bei den im Zuge dieser Diplomarbeiten untersuchten Deckschichtarten handelt es sich um Splittmastix- SMA und die Asphaltbetondeckschichten AC. Bei näherer Betrachtung der Bestandteile der Asphaltarten werden die Einflussfaktoren offensichtlich: Gestein und Bitumen haben den größten Einfluss auf die Eigenschaften des Produkts. Sie werden durch Angaben der Gesteinseigenschaften, den Sieblinien sowie der Angabe des verwendeten Bindemittels ausgedrückt.

4.2.1 Splittmastixasphalt

Splittmastixasphalt besteht aus einer diskontinuierlichen Sieblinie. Er wird bevorzugt für hoch belastete Straßen verwendet. Durch den hohen Füller und Splittanteil entsteht ein sehr dichter Asphalt. Die EN 13108-5 wird in der ÖNORM B 3584 national umgesetzt. Die Anforderungen an Splittmastixasphalt für Straßen, Flugflächen und sonstige Verkehrsflächen werden darin aufgeführt.

SPLITTMASTIXASPHALT



SPLITTMASTIXASPHALT

Abbildung 23 – Grenzsieblinie für SMA11 nach empirischem Ansatz (ÖNORM B 3584)

Die Abbildung 23 zeigt die Grenzsieblinie für SMA 11. Die Kornverteilung ist diskontinuierlich, man spricht von einer Ausfallskörnung. Das gebrochene mit Mörtel umhüllte Gesteinsmaterial hat Mindest- und Maximalhohlraumgehalte im verdichteten Zustand zu erfüllen. Die Kennzeichnung erfolgt nach dem verwendeten Höchstkorndurchmesser als SMA 8 oder SMA 11.

Das Gesteinsgerüst besitzt eine Ausfallskörnung im Gegensatz zum Betonprinzip. Durch den hohen Füller- und Grobsplittanteil bildet sich die so genannte Mastix. Es dürfen für die Splittgesteinskörnung nur Kornklassen EBK verwendet werden. Edelbrechkörnungen müssen einen Massenanteil von mindestens 90 % Brechkorn aufweisen. Brechkorn wiederum bedeutet, dass nach der Unterscheidung in Brech-, Rund-, und Kantkorn, die Oberfläche allseitig gebrochen ist.

4.2.2 Asphaltbetonschichten

Asphaltbetone werden nach dem Betonprinzip als hohlraumarm und mit stetiger Sieblinie gestalteter Baustoff hergestellt. In die Gruppe der Asphaltbetone fallen:

- Bituminöse Tragschichten AC trag
- Bituminöse Tragschichten für hochstandfeste Verkehrsflächen AC binder
- Bituminöse Deckschichten aus Asphaltbeton AC deck
- Dünnschichtdecken DDH

Alle genannten Varianten sind auch mit Verwendung von polymermodifizierten Bitumen herstellbar und tragen so die Bezeichnung „pm“, beispielsweise pmAC 8 für eine Asphaltbetondecksicht mit Größtkorn 8 mm und polymermodifizierten Bitumen. Die Abbildung zeigt die kontinuierliche Kornverteilung des AC 8.

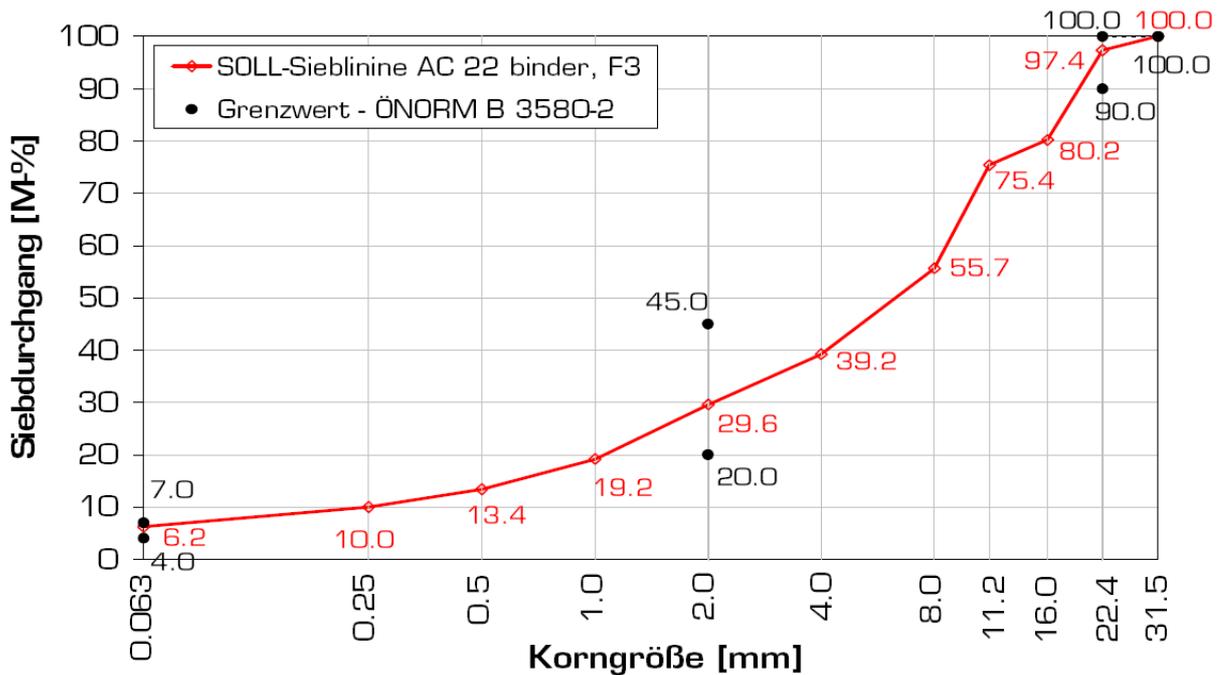


Abbildung 24 – Sieblinie für AC 22 binder und Darstellung der Grenzsiebdurchgänge nach fundamentalem Ansatz (ÖNORM B 3580-2)

4.3 Materialien, Mischgüter und Oberbauvarianten

Für die Herstellung der Asphalte im Labor wurden folgende Materialien herangezogen:

Materialien:

Mineralstoffe:

- Füller (Kalksteinmehl, Teerag Asdag)
- LD - Schlacke EBK 0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22 (Fa. Lisag, Linz)
- Serpentin EBK 0/2, 11/16; BK 0/11 (Fa. Klöcher Basaltwerke, Rumpersdorf)
- Kersantit EBK 0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16 (Fa. Loja, Persenbeug)
- Kies EBK 0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22, 22/32 (Hofmann/Redlham)

Bindemittel:

- PmB 45/80-65 (OMV)
- PmB 25/55-65 (OMV)

Zusatzstoffe:

- Viatop Premium
- Sasobit

Mischgüter:

SMA 11:

Bindemittelgehalt: 5,1 – 5,3 – 5,5 [M-%]

Bindemittel: PmB 45/80-65

Zusatzstoffe: Viatop Premium (0,2 M-%), Sasobit (3 %)

Mineralstoffe: Füller, LD - Schlacke (0/2, 2/4, 4/8, 8/11)

AC 22 binder – Mischung 1:

Bindemittelgehalt: 4,2 – 4,5 – 4,8 – 5,1 [M-%]

Bindemittel: PmB 25/55-65

Zusatzstoff: Sasobit (3 %)

Mineralstoffe: Füller, LD - Schlacke (0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22),
Serpentinit (0/2, 0/11, 11/16)

AC 22 binder – Mischung 2:

Bindemittelgehalt: 4,2 – 4,5 – 4,8 [M-%]

Bindemittel: PmB 25/55-65

Zusatzstoff: Sasobit (3 %)

Mineralstoffe: Füller, LD - Schlacke (0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22),
Kersantit (0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16)

AC 22 binder – Mischung 3:

Bindemittelgehalt: 4,0 - 4,2 – 4,5 – 4,8 [M-%]

Bindemittel: PmB 25/55-65

Zusatzstoff: Sasobit (3 %)

Mineralstoffe: Füller, LD - Schlacke (0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22)

Zusätzlich wurden mit den nachfolgenden Mischungen Vergleichsberechnungen und Untersuchungen durchgeführt, um Oberbauvarianten miteinander vergleichen zu können.

AC 11 deck:

Bindemittelgehalt: 5,1 [M-%]

Bindemittel: PmB 45/80-65

Mineralstoffe: Füller, LD - Schlacke (0/2, 2/4, 4/8, 8/11)

AC 32 binder:

Bindemittelgehalt: 4,3 [M-%]

Bindemittel: PmB 25/55-65

Mineralstoffe: Füller, Kies (0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22, 22/32)

AC 32 trag:

Bindemittelgehalt: 4,3 [M-%]

Bindemittel: B 50/70

Mineralstoffe: Füller, Kalkstein (0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22, 22/32)

Im Rahmen der erweiterten Eignungsprüfung und mit Hilfe der numerischen Prognosemethoden werden folgende Aufbauvarianten untersucht (siehe Tabelle 2 – Oberbauvarianten für SMA und AC Aufbauten):

Variante I:

3,5 cm SMA 11 - PmB45/80-65 bzw. 3,5 cm AC 11 deck - PmB45/80-65

21 cm AC 22 binder - PmB25/55-65 (3 Lagen a 7 cm)

Variante II:

3,5 cm SMA 11 - PmB45/80-65 bzw. 3,5 cm AC 11 deck - PmB45/80-65

9 cm AC 22 binder - PmB25/55-65

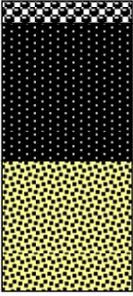
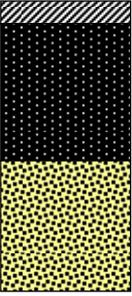
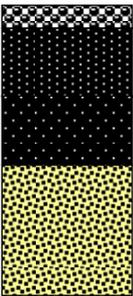
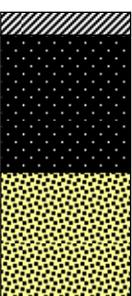
12 cm AC 32 trag - B50/70

Variante III:

3,5 cm SMA 11 - PmB45/80-65 bzw. 3,5 cm AC 11 deck - PmB45/80-65

21 cm AC 32 binder - PmB25/55-65 (1. Lage 10 cm, 2. Lage 11cm)

Tabelle 2 – Oberbauvarianten für SMA und AC Aufbauten

Binderschicht	Splittmastixaufbau (a)	Asphaltbetonaufbau (b)
AC22 (I)	 <p>3,5 cm SMA 11 PmB45/80-65</p> <p>3 Lagen á 7 cm AC 22 binder PmB25/55-65</p> <p>20 cm ungebundene obere TS (Kantkörnung KK)</p>	 <p>3,5 cm AC 11 deck PmB45/80-65</p> <p>3 Lagen á 7 cm AC 22 binder PmB25/55-65</p> <p>20 cm ungebundene obere TS (Kantkörnung KK)</p>
AC22 und AC32 (II)	 <p>3,5 cm SMA 11 PmB45/80-65</p> <p>9 cm AC 22 binder PmB25/55-65</p> <p>12 cm AC 32 trag B50/70</p> <p>20 cm ungebundene obere TS (Kantkörnung KK)</p>	 <p>3,5 cm AC 11 deck PmB45/80-65</p> <p>9 cm AC 22 binder PmB25/55-65</p> <p>12 cm AC 32 trag B50/70</p> <p>20 cm ungebundene obere TS (Kantkörnung KK)</p>
AC32 (III)	 <p>3,5 cm SMA 11 PmB45/80-65</p> <p>10 cm AC 32 binder PmB25/55-65</p> <p>11 cm AC 32 binder PmB25/55-65</p> <p>20 cm ungebundene obere TS (Kantkörnung KK)</p>	 <p>3,5 cm AC 11 deck PmB45/80-65</p> <p>10 cm AC 32 binder PmB25/55-65</p> <p>11 cm AC 32 binder PmB25/55-65</p> <p>20 cm ungebundene obere TS (Kantkörnung KK)</p>

4.4 Materialtechnologische Untersuchungen und Ergebnisse

4.4.1 Übersicht

Gemäß den Einsatzbereichen der unterschiedlichen gebrauchsvorhaltenorientierten und konventionellen Prüfmethode werden hier die spezifischen Prüfbedingungen für die Einzelversuche angeführt. In Tabelle 3 - Prüfprogrammübersicht findet sich ein Überblick über alle am CD-Labor durchgeführten Versuche.

Tabelle 3 - Prüfprogrammübersicht

Mischgut	Bindemittel	Bindemittelanteil [M.-%]	Gestein	Zusatz	Konventionelle Asphaltprüfungen	GVO Asphaltprüfungen
SMA 11	PmB 45/80-65	5.1	LD-Schlacke	VIATOP Premium Sasobit (3%)	Raumdichte am Marshallkörper, Spurbildungstest WTT	Abkühlversuche (TSRST), Triaxialversuche (TCCT), Steifigkeitsversuche (STF-4PB)
		5.3	LD-Schlacke			
		5.5	LD-Schlacke			
AC 11 deck	PmB 45/80-65	5.1	LD-Schlacke	-	-	Abkühlversuche (TSRST), Triaxialversuche (TCCT), Steifigkeitsversuche (STF-4PB)
AC 22 binder	PmB 25/55-65	4.2	LD-Schlacke + Serpentin	Sasobit (3%)	Raumdichte am Marshallkörper, Spurbildungstest WTT	Abkühlversuche (TSRST), Triaxialversuche (TCCT)
		4.5 (Optimum)				
		4.8				
		5.1	LD-Schlacke + Kersanit	Sasobit (3%)	-	Triaxialversuche (TCCT)
		4.2				
		4.5				
		4.8				
		4.42 (Optimum)	LD-Schlacke	Sasobit (3%)	-	Abkühlversuche (TSRST), Triaxialversuche (TCCT), Steifigkeitsversuche (STF-4PB)
		4.2				
		4.5				
4.8						
4.03 (Optimum)						
AC 32 binder	PmB 25/55-65	4.3	Kies	-	-	Abkühlversuche (TSRST), Triaxialversuche (TCCT), Steifigkeitsversuche (STF-4PB)
AC 32 trag	B 50/70	4.3	Kalkstein	-	-	Abkühlversuche (TSRST), Triaxialversuche (TCCT), Steifigkeitsversuche (STF-4PB)

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden zur Optimierung des Asphaltmischgutes für die Deckschicht und die obere Tragschicht folgende Prüfungen durchgeführt:

- Konventionelle Eignungsprüfung nach dem empirischen Ansatz gemäß ÖNORM B 3580-1
 - Marshall Verdichtungsverfahren
 - Durchführung von Spurrinentests
- Gebrauchsvorhaltenorientierte Eignungsprüfung nach dem fundamentalen Ansatz gemäß ÖNORM B 3580-2
 - Triaxialversuche (TCCT)
 - Abkühlversuche (TSRST)
 - Steifigkeitsversuche (STF-4PB)

4.4.2 Konventionelle Prüfmethode

Die empirischen Prüfmethode haben den Vorteil einer vergleichsweise einfachen Handhabung. Zu den konventionellen Versuchen zählen im Bereich der Mischgutuntersuchung das Marshallverdichtungsverfahren und der Spurbildungstester. Da diese genormten Versuche unter Prüfbedingungen nicht der realen Bedingungen des Straßenkörpers im Einbauzustand entsprechen, muss die Versuchsreihe zur Beurteilung um die GVO-Prüfmethode erweitert werden.

4.4.2.1 Marshallverdichtungsverfahren

Zur Optimierung des Bindemittelgehalts eines Asphaltmischgutes wird das Marshallverdichtungsverfahren gemäß EN 12697-30 an drei verschiedenen Bindemittelgehalten durchgeführt. Dabei werden für jeden Bindemittelgehalt jeweils 4 Marshallprobekörper bei definierter Verdichtungstemperatur hergestellt.

Für die Herstellung der zylindrischen Marshallprobekörper wird das heiße Mischgut lose in die Formen eingebaut. Die Verdichtung erfolgt mit dem Marshallverdichtungsgerät, das unter genormten Bedingungen arbeitet (siehe Abbildung 25). Durch 50 Schläge mit einem vorgeheizten Fallhammer innerhalb von 55 bis 60 Sekunden wird der Probekörper hergestellt. Dann wird der Formzylinder umgedreht und mit weiteren 50 Schlägen verdichtet.

Die Verdichtungstemperatur hängt vom verwendeten Bindemittel ab und wurde beim SMA 11 PmB45/80-65 bei 135 °C bzw. beim AC 22 PmB25/55-65 bei 155 °C festgelegt.

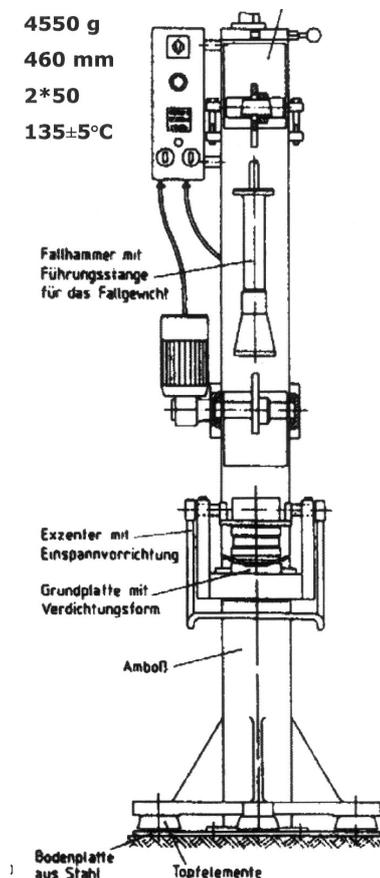


Abbildung 25 – Marshallverdichter zur Herstellung der Probekörper für Raumdichtebestimmung ρ_A

Anhand dieser Marshallprobekörper wird die mittlere Raumdichte des Asphaltmischgute bestimmt. Die Raumdichtebestimmung erfolgt dabei gemäß EN 12697-6 nach dem SSD (saturated surface dry) Verfahren. Dabei ist zunächst die Trockenmasse m_1 des Prüfkörpers zu bestimmen. Weiters sind die Marshallprobekörper im Wasserbad bei +25 °C für 30 Minuten zu lagern. Die so temperierten Probekörper sind unter Wasser (Masse m_2) und anschließend über Wasser (Masse m_3) zu wägen.

In Abbildung 26 sind die drei verschiedenen mittleren Raumdichten bezogen auf den Bindemittelgehalt für beide Asphaltmischgüter dargestellt. Durch Regression der drei mittleren Raumdichten je Asphaltmischgut ergibt sich der optimale Bindemittelgehalt an der Stelle der größten Raumdichte.

$$\rho_A = \frac{m_1}{V_A} \quad (11)$$

$$V_A = \frac{m_3 - m_2}{\rho_{\text{wasser}}} \quad (12)$$

- ρ_A Raumdichte des Probekörpers [kg/m³]
- m_1 Trockenmasse [kg]
- m_2 Masse unter Wasser, bei +25 °C [kg]
- m_3 Masse des feuchten Probekörpers über Wasser [kg]
- V_A Volumen des verdichteten Asphalts [m³]
- ρ_w Dichte des Wassers bei +25 °C. $\rho_w = 997,1 \text{ kg/m}^3$.

Die Rohdichten der untersuchten SMA-Mischgüter mit den unterschiedlichen Bindemittelgehalten liegen zwischen 3.000 und 3.100 kg/m³. Das Optimum liegt bei einem Bindemittelgehalt von 5,3 Massenprozent.

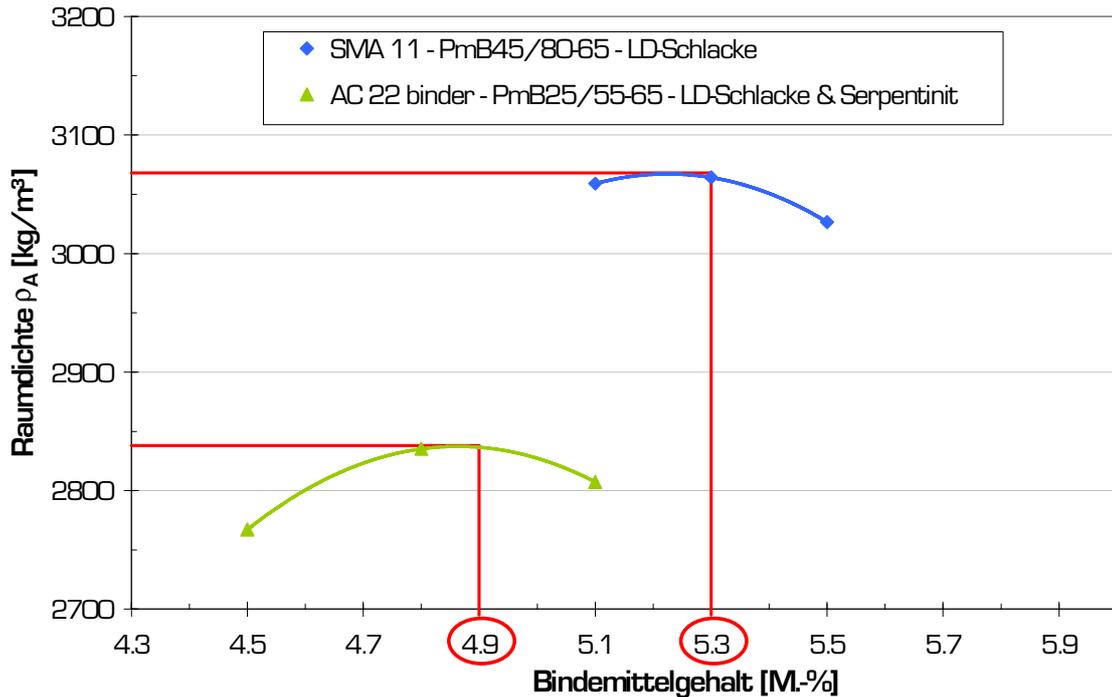


Abbildung 26 – Ergebnisse der Marshallverdichtungen und optimaler Bindemittelgehalt für SMA11 und AC22

4.4.2.2 Spurbildungstester

Die Beständigkeit gegen bleibende Verformungen wird anhand einer Spurrinne geprüft, die durch wiederholte Übergänge eines belasteten Rades (700 ± 10 N) bei konstanter Temperatur von $+60$ °C erzeugt wird.

Die Bestimmung der Verformungsanfälligkeit der beiden Mischgüter (SMA 11 und AC 22 binder) erfolgt durch Prüfungen am Spurbildungstester gemäß EN 12697-22, Verfahren B, an der Luft. Das Rad wird mit definierter Geschwindigkeit und Last auf der der Oberfläche der bituminös gebundenen Schicht vor und zurück bewegt. Nach einer vorgegebenen Anzahl an Überrollvorgängen können die bleibenden Verformungen gemessen werden.

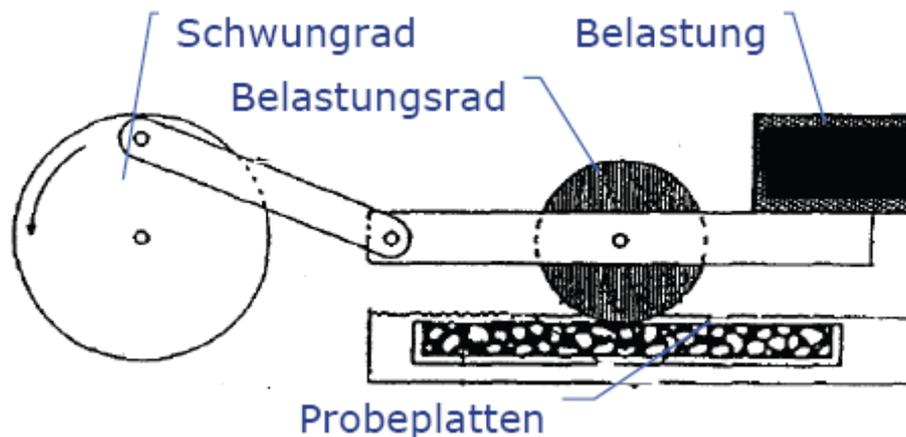


Abbildung 27 - Systemskizze eines Spurbildungstesters

Die Kurzbezeichnung lautet WTT-SS „Wheel Tracking Tester – Small Size Device“. Die Probeplatten haben rechteckige Grundrisse und werden durch ein Stahl-Gummi-Rad belastet. Es ist nahe liegend, dass die Art der Lastaufbringung durch das Vor- und Zurückbewegen des Rades eher der Realität entspricht, als die Marshalltests.

Die Maschinenkenndaten:

- Radlast: 700 ± 10 N
- Überrollfrequenz: 0,88 Hz pro Übergang
0,44 Hz pro Zyklus (vor und zurück)
- Probeplattenabmessungen:
260 x 300 x 40 mm Deckschicht
260 x 300 x 40 mm Tragschicht
- Prüftemperatur: +60 °C nach EN 13108-20
- Radkontaktfläche ca. 1900 mm²

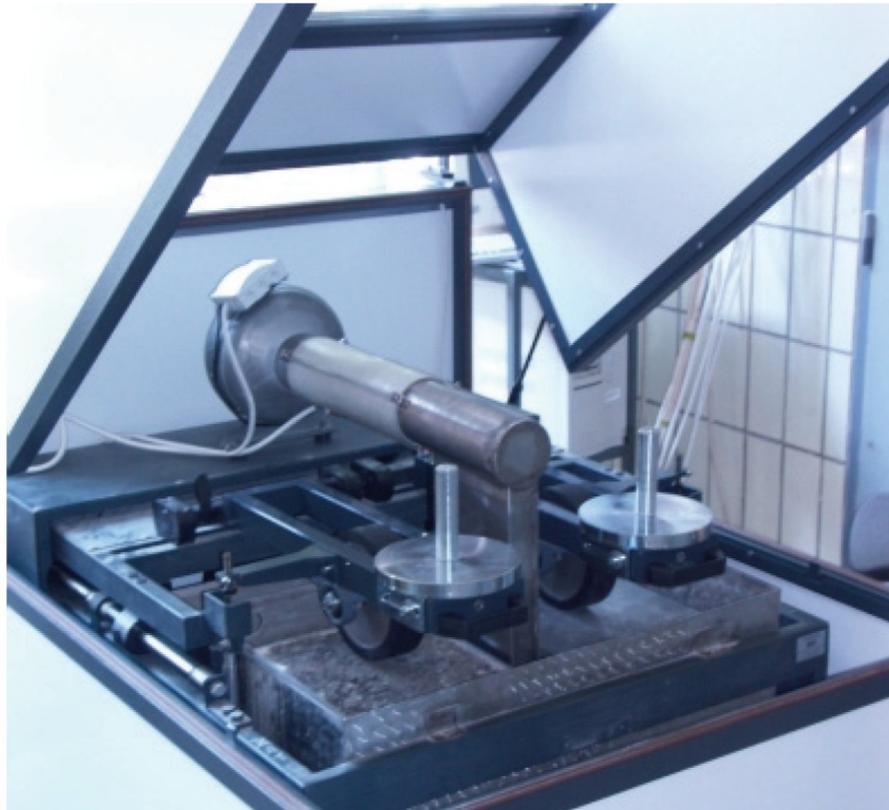


Abbildung 28 - Spurbildungstestgerät des CD-Labors

Das Versuchsergebnis sind die Kriechkurve bzw. Kriechrate des Materials sowie die proportionale Spurrinnentiefe PRD.

Das Ergebnis des Spurbildungstesters ist die mittlere proportionale Spurrinnentiefe PRD_{Luft} nach 10.000 Belastungszyklen, die sich aus dem Mittelwert von zwei geprüften Asphaltprobeplatten ergibt (siehe Abbildung 29).

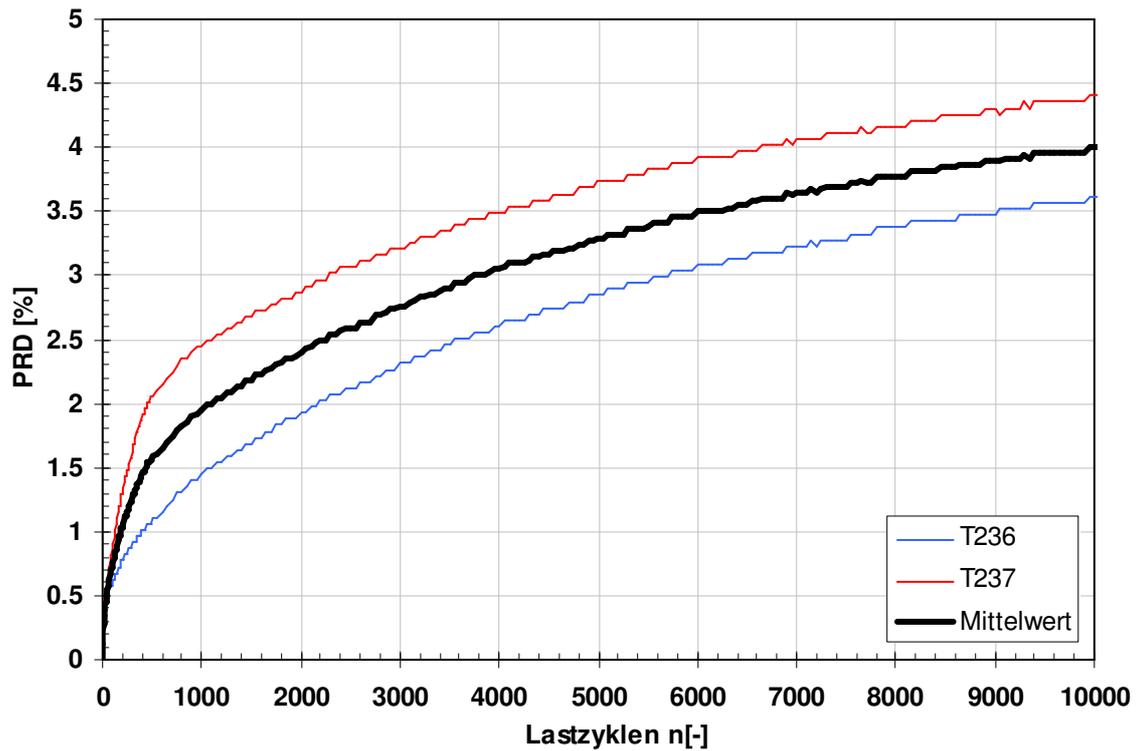


Abbildung 29 – Proportionale Spurrinnentiefe PRD nach 10000 Überrollungen SMA 11 PmB 45/80-65 bei 60 °C

Der PRD-Wert wird direkt vom Gerät übermittelt und lediglich durch spätere Auswertung beider Spurrinnenmessungen gemittelt. In Abbildung 29 erkennt man den anfänglichen Nachverdichtungseffekt und die Konsolidierung nach den ersten Überrollvorgängen.

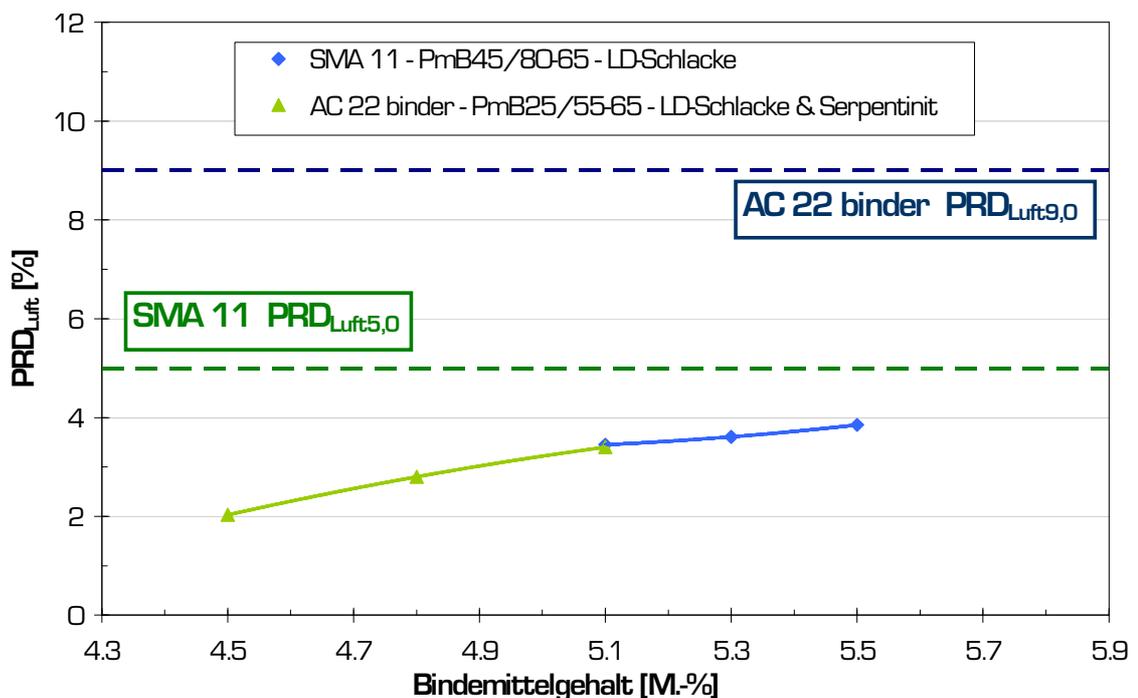


Abbildung 30 – Ergebnisse des Spurbildungstest für SMA11 und AC22

Die Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse für die Deckschicht SMA 11 und die Binderschicht AC 22 binder. Analog zur Prüfung mit dem Marshallverdichtungsverfahren, wurden auch hier die jeweils drei unterschiedlichen Bindemittelgehalte untersucht. Das Ergebnis ist eine steigende Spurrinnentiefe mit steigendem Bindemittelgehalt, sowohl für Deck- als auch für die Binderschicht. Die in Abbildung 30 dargestellten Strichlinien geben die laut ÖNORM B 3580-1 zulässigen Grenzwerte für die proportionale Spurrinnentiefe an (5,0 % für AC 22 binder - 9,0 % für SMA 11).

4.4.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode

Zur Optimierung des Gebrauchsverhaltens der Deckschicht SMA 11 und der oberen Tragschicht AC 22 binder wurde der optimale Bindemittelgehalt hinsichtlich Verformungsstabilität bei hohen Temperaturen mit Hilfe des Triaxialversuches optimiert. Auf Grund der Verwendung von harten Bitumen wurden zusätzlich Abkühlversuche durchgeführt, um das Verhalten bei tiefen Temperaturen zu charakterisieren. Der Weiteren wurden aus Steifigkeitsversuchen die asphaltmechanischen Kenngrößen abgeleitet.

4.4.3.1 Triaxialversuche

Der Triaxialversuch dient zur Bestimmung der Verformungsbeständigkeit. Dabei werden die kumulierten, axialen Dehnungen $\varepsilon_{\text{axial}}$ in [%] und die Kriechrate f_c in [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{Belastungszyklus}$] bestimmt.

Als Probekörper dienen zylindrische Bohrkern, die aus Straßen oder aus im Labor hergestellten Probeplatten entnommen werden. Die Asphaltprobekörper werden, nachdem sie auf Prüftemperatur gebracht worden sind, zwischen zwei planparallelen Lastplatten einer Triaxialzelle gespannt und anschließend einem konstanten Stützdruck σ_3 ausgesetzt, bevor zyklische (sinusförmige) Axiallasten σ_1 aufgebracht werden.

Der exakte Prüfablauf und die Prüfbedingungen waren:

- Konstanter Stützdruck σ_3 :
50 kPa bei Tragschichten und 150 kPa bei Deckschichten
- Sinusförmige Druckschwellenbeanspruchung σ_1 bei einer Frequenz von 3 Hz:
Amplitude der Belastung 200 kPa bei Tragschichten und 300 kPa bei Deckschichten
- Temperatur T konstant bei:
40 °C für Tragschichten und 50 °C für Deckschichten

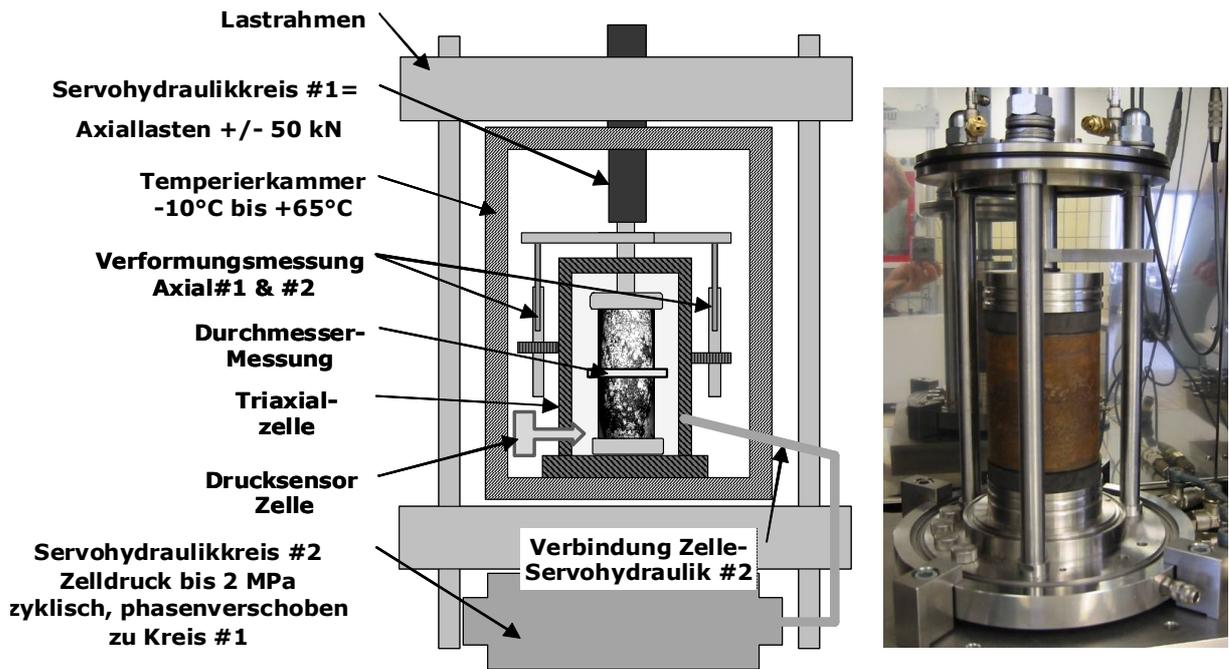


Abbildung 31 - Prinzipskizze eines Triaxialprüfgeräts mit wesentlichen Bestandteilen

Im Zuge des Triaxialversuches werden die axialen Dehnungen ϵ_{axial} aufgezeichnet, summiert und über die Prüfdauer als Kriechimpulskurve aufgetragen (siehe Abbildung 32). Aus der Darstellung des zeitlichen Verlaufs der kumulierten axialen Dehnungen wird die Kriechrate f_c als Steigung des Graphs bestimmt.

Die Versuche wurden mehrmals für die 3 verschiedenen Bindemittelgehalte durchgeführt, um das Optimum zu ermitteln. Die Abbildung 32 zeigt beispielhaft die Kriechkurve für das Mischgut AC 22 binder PmB45/80-65 mit LD-Schlacke und Serpentinit.

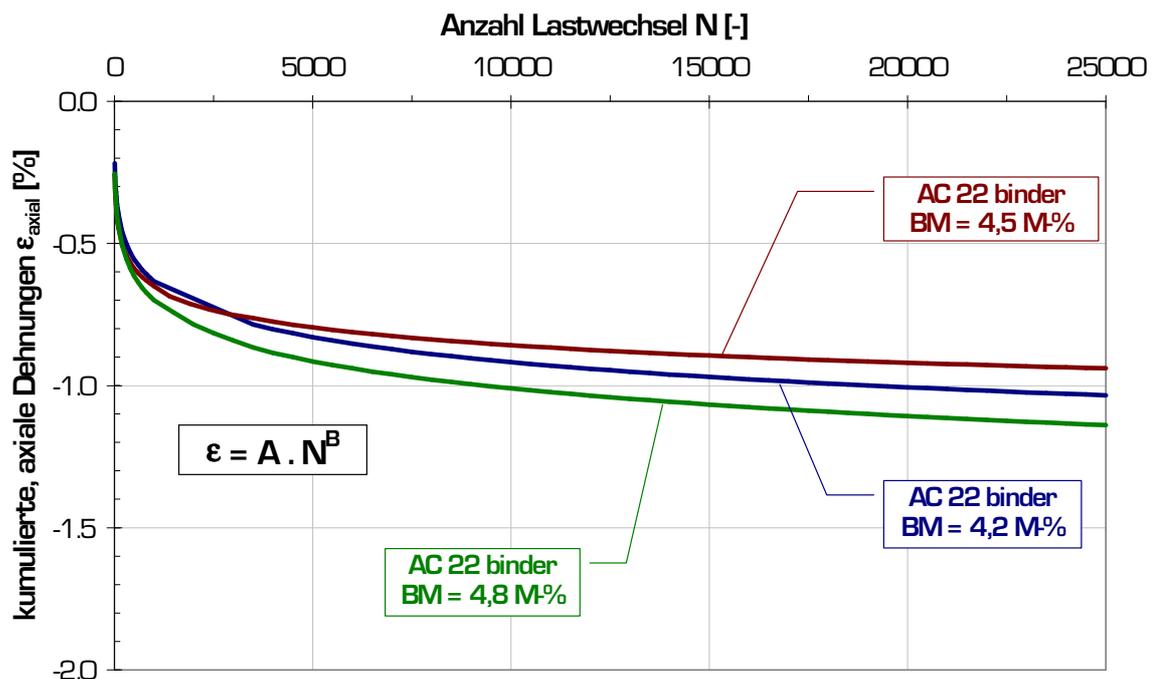


Abbildung 32 – Kriechimpulskurven für AC 22 binder mit PmB45/80-65 bei drei unterschiedlichen Bindemittelgehalten

Die Kriechimpulskurve bildet sich aus den aufsummierten axialen Dehnungen ϵ_{axial} in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N . Bei der Auswertung muss beachtet werden, dass sich ähnlich zum Marshallversuch zu Beginn eine Konsolidierungsphase ausbildet. Die Bestimmung der Steigung B des quasi-linearen Bereichs hat in einem angemessenen Bereich nach der anfänglichen Verdichtung zu erfolgen.

Das Ergebnis ist die Kriechrate $f_c = 1000 B$ [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{Belastungszyklus}$].

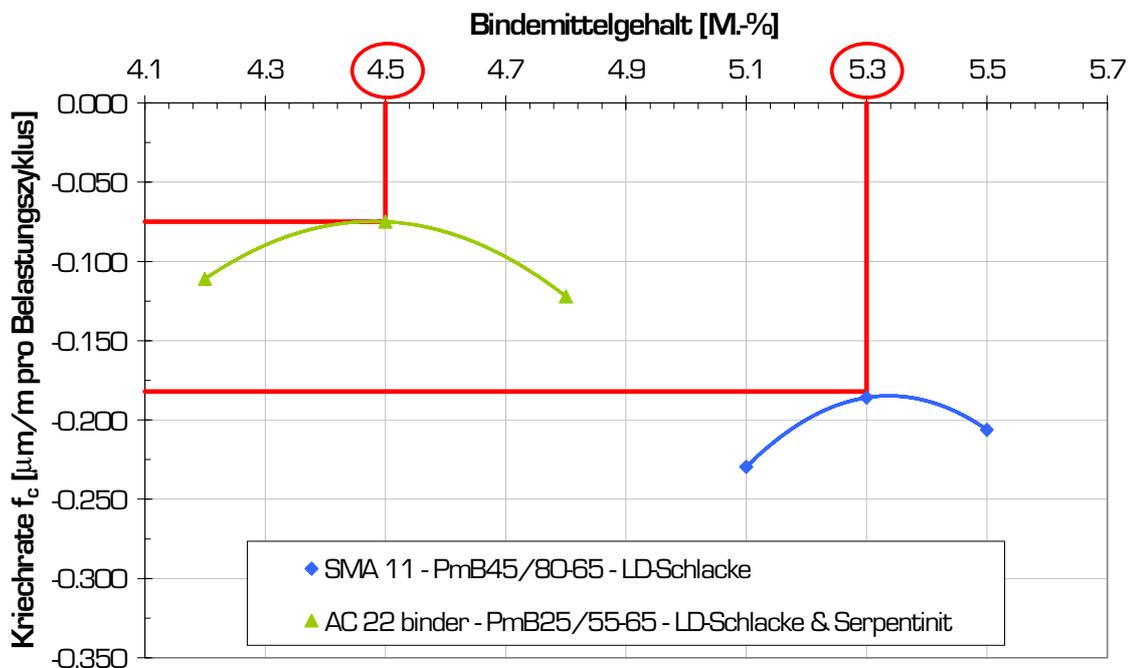


Abbildung 33 – Kriechraten für AC 22 binder und SMA 11 bei unterschiedlichen Bindemittelgehalten

Die Gegenüberstellung der erreichten Kriechraten $f_{c,i}$ zeigt, dass das beim AC22 binder das Optimum bei 4,5 M-% und beim SMA11 deck bei 5,3 M-% liegt. Eine niedrige Kriechrate ist wünschenswert und stellt einen guten Widerstand gegen Verformungen dar. Der Grenzwert für AC 22 binder Schichten nach ÖNORM B 3580-2 (fundamentaler Ansatz) liegt bei $f_c = 0,2 \mu\text{m}/\text{m}/\text{Belastungszyklus}$.

Die Optimierung des Mischgutes durch Bestimmung des bestmöglichen Bindemittelgehaltes kann nun auch für verschiedene Gesteinskombinationen nach Kapitel 4.3 Materialien, Mischgüter und Oberbauvarianten erfolgen. Es wurden 3 verschiedene Mischgüter der Tragschicht AC 22 binder hergestellt. Die grüne Linie entspricht den Ergebnissen der reinen LD-Schlacke-Gesteismischungen. Weiters wurden Probekörper aus LD-Schlacke + Kersantit (blaue Linie, Bezeichnung „LD-KL“) und LD-Schlacke + Serpentin (braune Linie, Bezeichnung „LD-LO“) hergestellt und getestet. Es ist aus dem Diagramm ersichtlich, dass für jede Gesteismischung ein anderer optimaler Bindemittelgehalt an der Triaxialprüfmaschine ermittelt wird. Da alle geprüften Materialien aus dem gleichen Bindemittel und dem gleichen Bindemittelzusatz bestehen, kann der Einfluss der Gesteinswahl abgelesen werden. Laut Abbildung 34 ergibt sich für reine LD-Schlacke-Mischungen ein geringerer optimaler Bindemittelgehalt (etwa 4,3 M-%) also für LD-Schlacke+Serpentin sowie LD-Schlacke+Kersantit Kombination (jeweils ca. 4,5 bzw. 4,6 M-%).

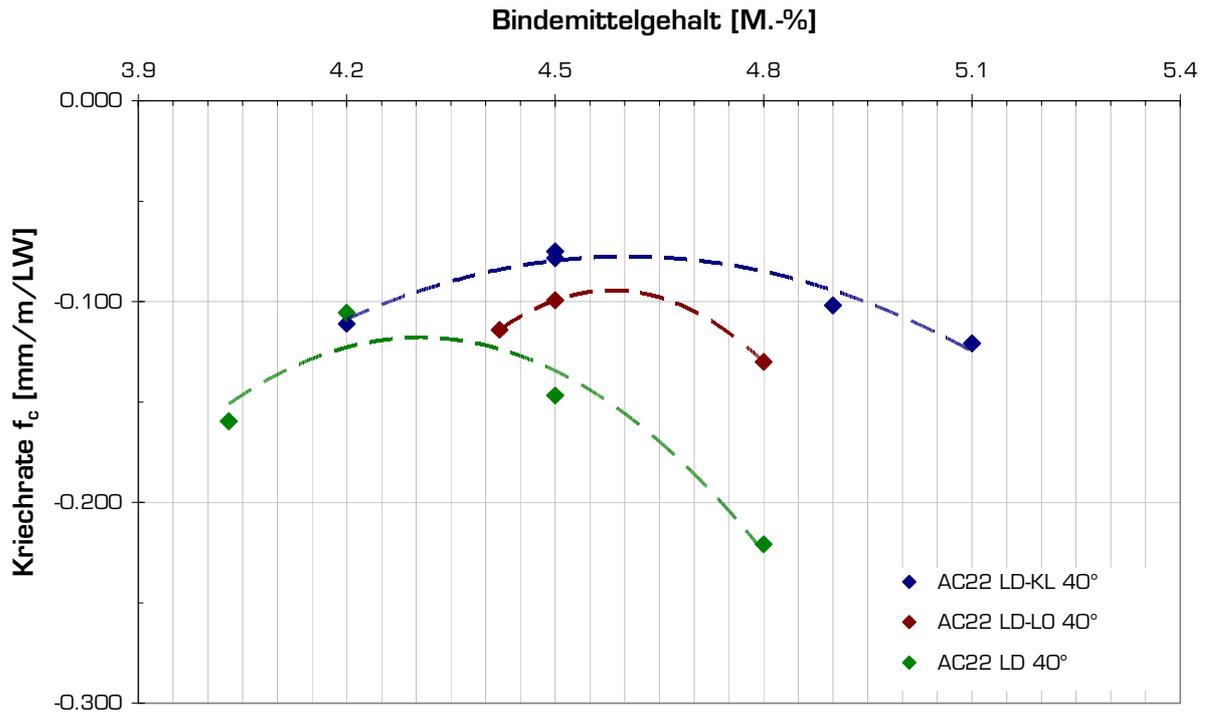


Abbildung 34 – Kriechraten f_c für AC22 Binderschichten mit verschiedenen Gesteinskombinationen

4.4.3.2 Tieftemperaturverhalten

Die Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens erfolgt anhand von Abkühlversuchen an prismatischen Asphaltprobekörper gemäß ÖNORM B 3590. Dabei wird das witterungsbedingte Abkühlen der Straße und das damit einhergehende Schrumpfen und Anwachsen der temperaturbedingten, so genannten kryogenen Zugspannungen simuliert.

Im Laborversuch wird der Probekörper bei $+10^\circ\text{C}$ unter konstant gehaltener Probekörperlänge durch eine gleichmäßige Abkühlrate von -10 K/h bis zum Bruchversagen abgekühlt. Durch die Aufzeichnung der anwachsenden Kraft am Probekörper kann bei bekanntem Querschnitt ein Verlauf der kryogenen Spannungen dargestellt werden. Das Ergebnis des Versuchs ist die Bruchspannung σ_{crack} [N/mm^2] und die zugehörige Bruchtemperatur T_c [$^\circ\text{C}$].

Abbildung 35 zeigt die verwendete Prüfeinrichtung des CD-Labors, bestehend aus einem biegesteifen Rahmen und einer Kontrolleinrichtung zur Messung der Kraft und/oder der Verschiebung. Beim Probeneinbau ist auf eine einaxiale und momentenfreie Fixierung zu achten.

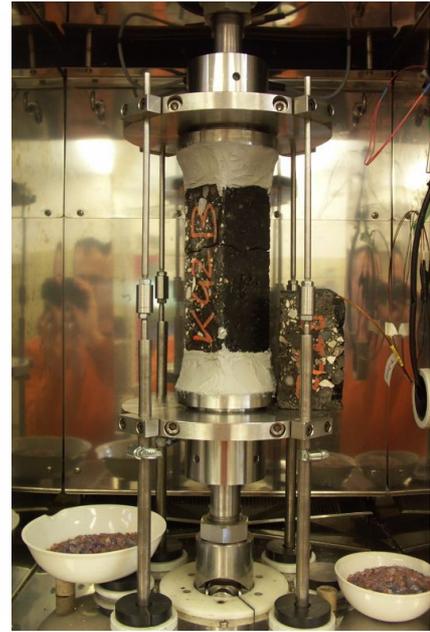
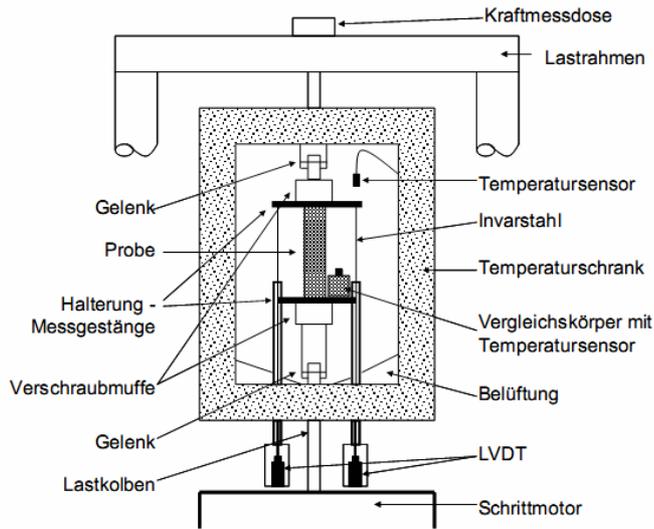


Abbildung 36 - Abkühlversuchseinrichtung, schematische Darstellung

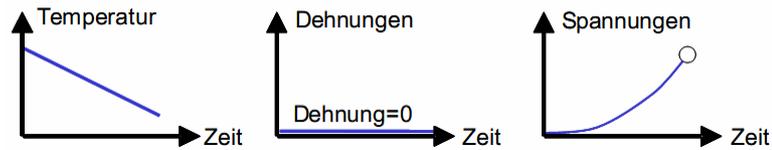


Abbildung 37 - Prüfablauf des Abkühlversuchs TSRST (Spiegel, 2007)

Die Ergebnisse der Abkühlversuche an den geprüften Mischgutsorten sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Angegeben sind der jeweilige Bindemittelgehalt H_{bit} [M-%], die mittlere Bruchtemperatur T_c [°C], die Standardabweichung STABW Bruchtemp. [K] von der mittleren Bruchtemperatur, die mittlere Bruchspannung σ_{ky} [N/mm²] und die Standardabweichung STABW Bruchsp. [N/mm²] von der mittleren Bruchspannung.

Tabelle 4: Ergebnisse der Abkühlversuche für die untersuchten Mischgüter

Mischgutsorte	BM Gehalt	Bruch- temperatur	STABW Bruchtemp.	Bruch- spannung	STABW Bruchsp.
	H _{bit} [M.-%]	T _c [°C]	[K]	σ _{kry} [N/mm ²]	[N/mm ²]
SMA 11 PmB 45/80-65 LD-Schlacke	5.1	-33.5	1.3	6.6	0.28
	5.3	-33.3	1.8	6.2	0.04
	5.5	-29.7	0.2	5.73	0.05
AC 11 deck PmB 45/80-65 LD-Schlacke	5.1	-35.3	0.9	6.27	0.32
AC 22 binder PmB 25/55-65 LD-Schlacke + Serpentin	4.5 (Opt.)	-27.2	0.5	3.61	0.27
	4.8	-31.4	0.8	4.65	0.55
	5.1	-30.5	0.3	6.01	0.27
AC 22 binder PmB 25/55-65 LD-Schlacke	4.2	-22.2	1.5	5.26	0.71
	4.5	-26.4	2.6	5.37	0.44
	4.8	-24.9	1.1	5.45	0.36
AC 32 binder PmB 25/55-65 Kies	4.3	-25.9	3.3	2.33	0.60
AC 32 trag B 50/70 Kalkstein	4.3	-26.5	2.6	3.61	1.02

Die Ergebnisse der Abkühlversuche in grafischer Darstellung in Abbildung 38 und Abbildung 39 müssen gemeinsam betrachtet werden, um den Einfluss des Bindemittelgehaltes auf das Tieftemperaturverhalten zu beschreiben. Es ist abhängig von der betrachteten Gesteinsart oder -kombination ein Einfluss der Wärmedehnung des Gesteins erkennbar. Das Mischgut AC 22 binder aus reiner LD-Schlacke (türkise Linie) zeigt geringen Einfluss des Tieftemperaturverhaltens bei variierendem Bindemittelgehalt. Während das Deckschichtmischgut SMA 11 (auch aus reiner LD-Schlacke, laue Linie) eine mittlere Beeinflussbarkeit über den Bindemittelgehalt zeigt, ist beim AC 22 binder aus LD-Schlacke und Serpentin (hellgrüne Linie) ein hoher Einfluss erkennbar.

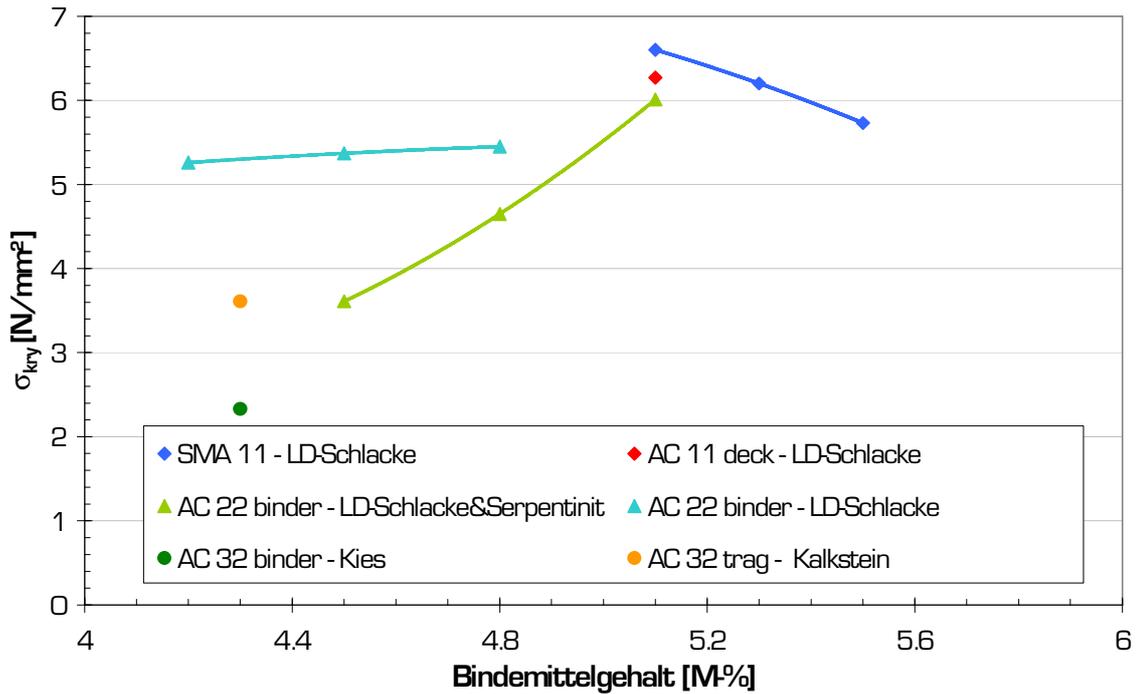


Abbildung 38 – Ergebnisse des Abkühlversuchs: Bruchspannung σ_{cy} in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt für die Deck-, Binder- und Tragschichten

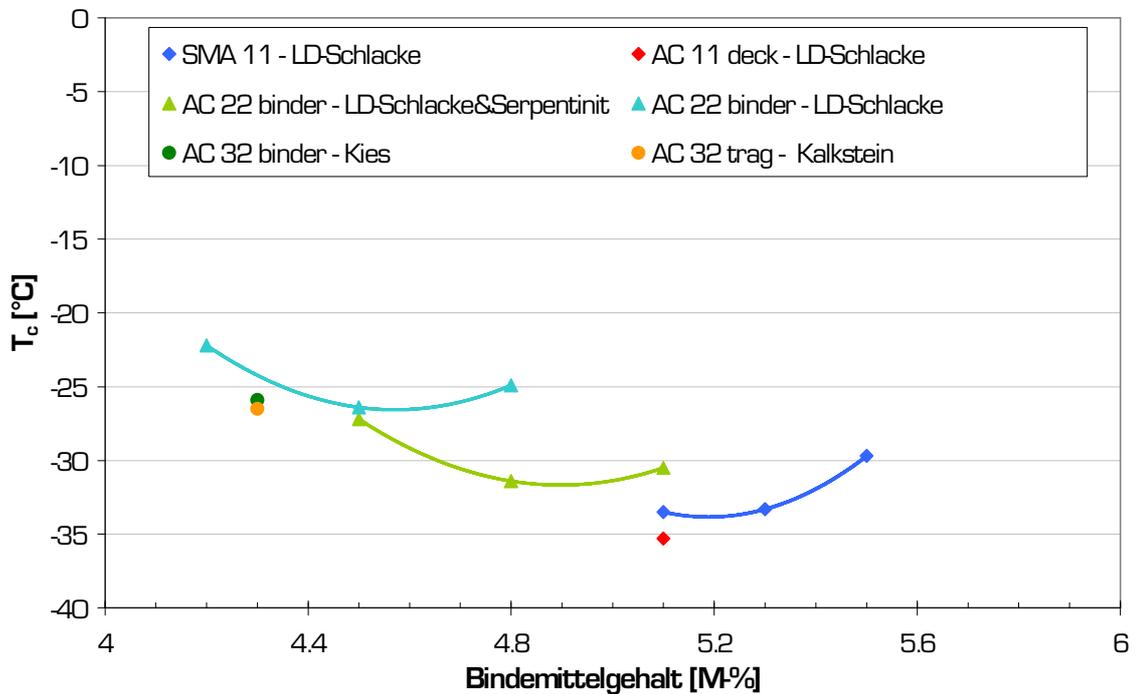


Abbildung 39 – Ergebnisse des Abkühlversuchs: Bruchtemperatur T_c [°C] in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt für die Deck-, Binder- und Tragschichten

4.4.3.3 Steifigkeitsverhalten

Die Beurteilung des Steifigkeitsverhaltens erfolgt anhand der Ergebnisse aus dem Steifigkeitsversuch am 4-Punkt Biegebalken gemäß EN 12697-26, Anhang B.

Dabei wird ein prismatischer Probekörper bei konstanter Temperatur einer sinusförmigen Biegeprüfung unterzogen. Der Probekörper hat für Deckschichten die Abmessungen 50x50x450 mm³ bzw. für Tragschichten 60x60x500 mm³. Die Biegung wird durch die Bewegung der beiden mittigen Lastpunkte in vertikaler Richtung senkrecht zur Längsachse des Probekörpers erreicht. Der Versuch erfolgt weggesteuert mit einer konstanten Dehnungsamplitude von $\varepsilon = 50 \mu\text{m}/\text{m}$. Diese wird über den Weg des Lastkolbens auf den Prüfkörper aufgebracht. Dabei werden während des Versuchs einerseits das Kraftsignal $\sigma(t)$, das erforderlich ist, um eine konstante Verschiebungsamplitude zu erhalten und andererseits die an der mittigen Unterseite des Prüfkörpers erhaltenen Durchbiegungen $\varepsilon(t)$ gemessen und aufgezeichnet.

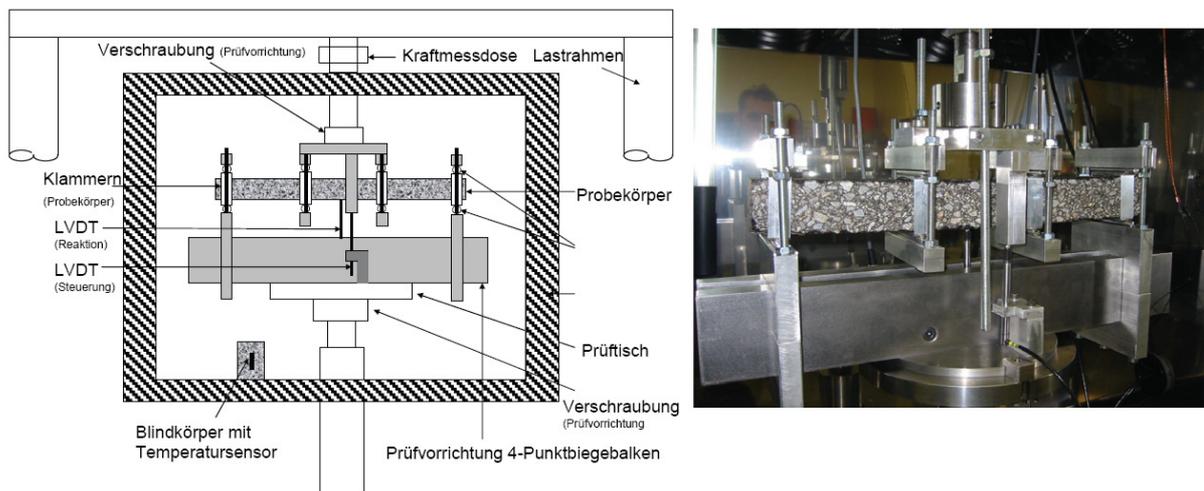


Abbildung 40 - Prinzipdarstellung und Foto des Vierpunktbiegebalkens

Der Versuch wird bei mehreren Temperaturen und einem Frequenz-sweep durchgeführt. Abbildung 41 zeigt die Isochronendarstellung für das Mischgut AC 22 binder PmB25/55-65.

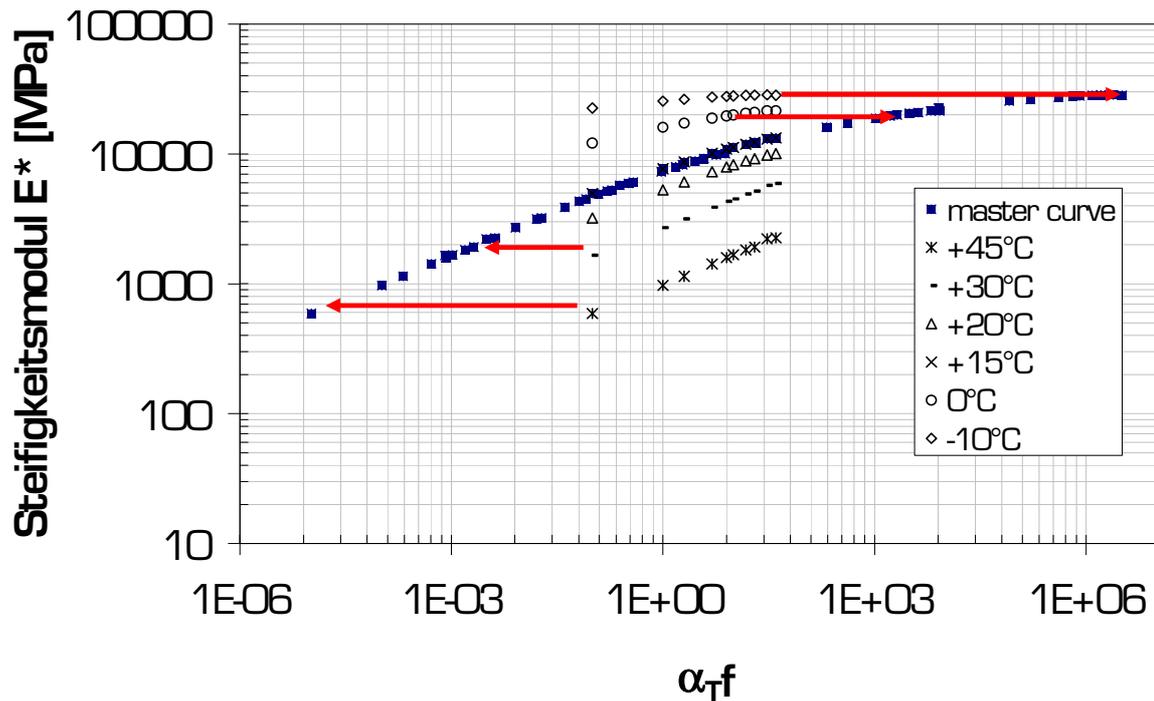


Abbildung 41 – Isochronendarstellung für das Mischgut AC 22 binder PmB25/55-65

Aus den ermittelten Ergebnissen werden unter Anwendung des Zeit-Temperatur Superpositionsprinzips die Mastercurves der einzelnen Mischungen abgeleitet (Abbildung 42). Daraus können für beliebige Frequenz- und Temperaturbereiche die komplexen E-Moduli E^* der Asphaltmischgüter bestimmt werden.

Die exakten Prüfbedingungen am 4-Punkt Biegebalken waren:

- Abmessungen:
Deckschichten $50 \times 50 \times 450 \text{ mm}^3$ und für Tragschichten $60 \times 60 \times 500 \text{ mm}^3$
- Temperaturen:
-10, 0, +10, +20, +30 und +45 °C
- Frequenzen:
0, 1, 2, 5, 8, 10, 15, 20, 30 und 40 Hz
- Dehnungsamplitude:
50 $\mu\text{m}/\text{m}$

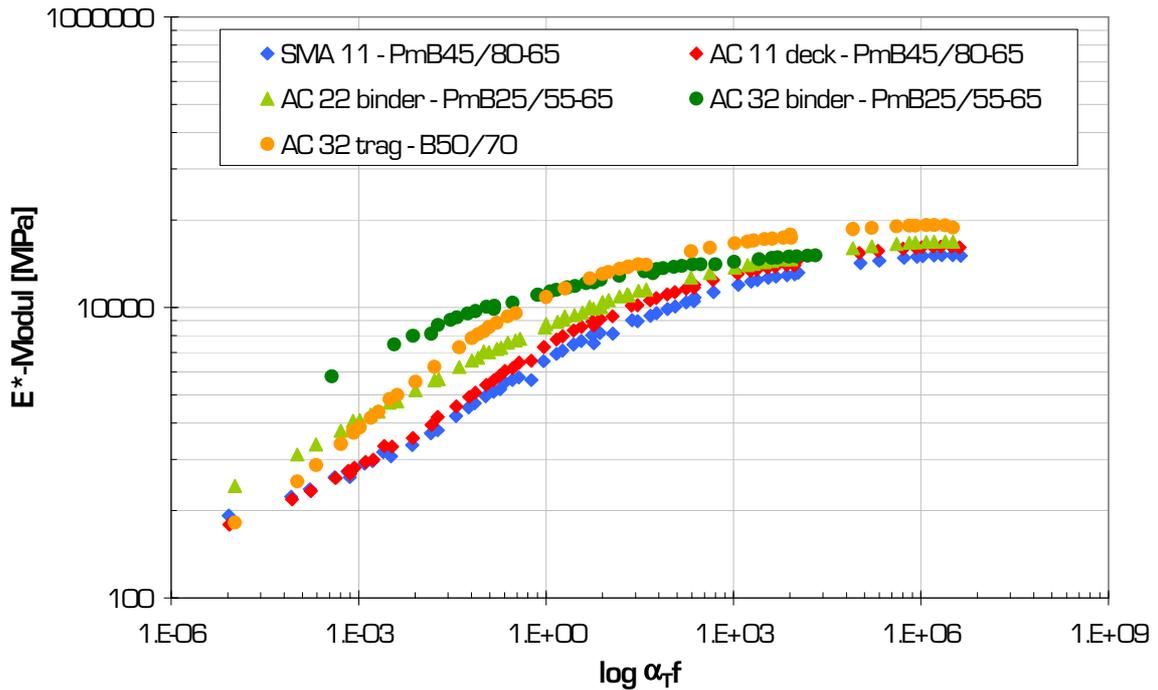


Abbildung 42 – Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen am 4-Punkt Biegebalken für die Deck-, Binder- und Tragschichten (master curve)

Abbildung 42 zeigt die aus den Mastercurves abgeleiteten temperaturabhängigen Asphaltsteifigkeiten bei einer Belastungsfrequenz von 3 Hz, die in weitere Folge den Spurrinnenberechnungen zugrunde gelegt wurden.

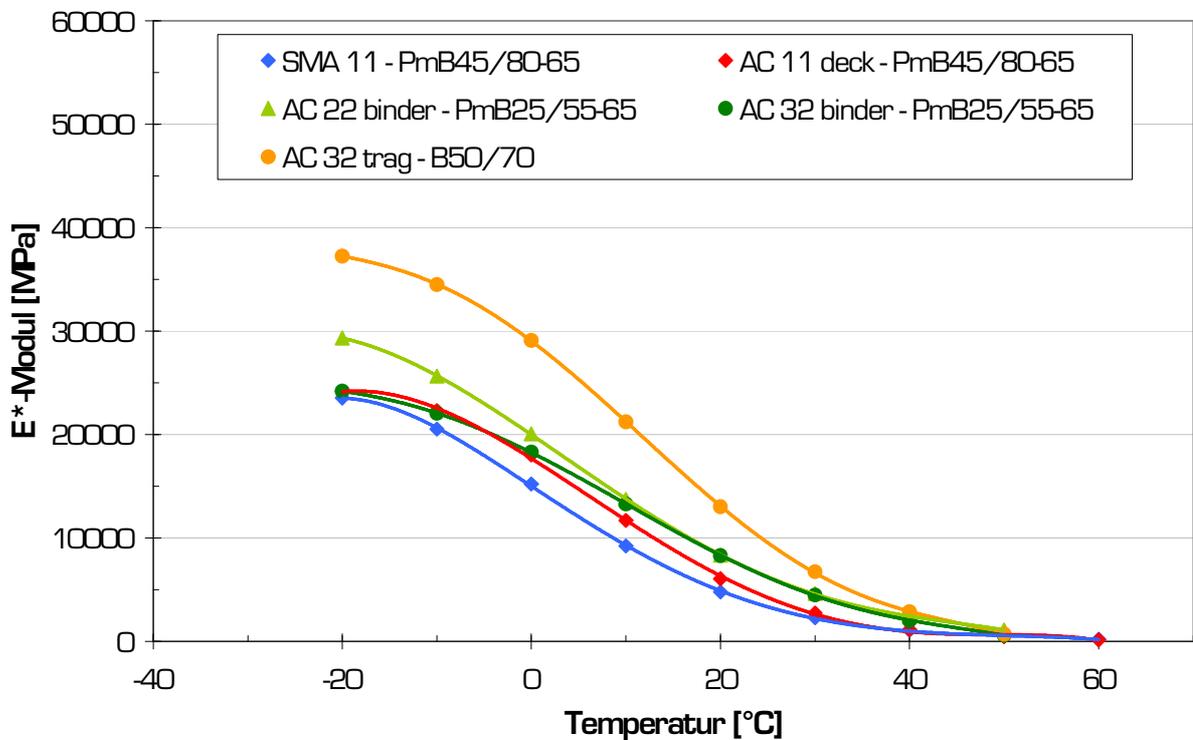


Abbildung 43 – komplexer E-Modul E^* für Deck und Binderschichten in Abhängigkeit der Temperatur T

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Gegenüberstellung von empirischen und fundamentalen Ansätzen zur Mischgutoptimierung über den Bindemittelgehalt wird in Tabelle 5 zusammengefasst und in Abbildung 44 grafisch dargestellt. Die konventionellen Prüfmethode liefern die Daten für die empirische Optimierung, welche nicht zwangsläufig mit den GVO-Prüfmethode und den fundamentalen Ansätzen übereinstimmen. Es zeigt sich deutlich, dass für die Optimierung der Deckschicht SMA11 beide Ansätze den gleichen optimalen Bindemittelmassenanteil von 5,3 M-% liefern.

Das Mischgut der Binderschicht AC 22 binder allerdings wird unterschiedlich bewertet. Nach konventioneller Methode ergibt sich durch das Marshallverdichtungsverfahren ein optimaler Gehalt von 4,9 M-% – jedoch liegt der GVO-optimierte Bindemittelanteil bei 4,5 M-%.

Tabelle 5 – Zusammenfassung der Ergebnisse

	SMA11 PmB45/80-65		AC22 PmB25/55-65 LD-Schlacke & Serpentinit	
	Kenngroße	Bindemittel- geh. [M-%]	Kenngroße	Bindemittel- geh. [M-%]
Marshallversuch				
Raumdicke ρ_A [kg/m ³]	3064,1	5,3	2836,7	4,9
Spurbildungstester (WTT)				
Proportionale Spurrinnentiefe PRD _{Luft} [%]	2,03	5,1	3,45 %	4,5
Triaxialversuch (TCCT)				
Kriechrate f_c [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{Lastwechsel}$]	-0,186	5,3	-0,075	4,5
Abkühlversuch (TSRST)				
Bruchtemperatur T_{crack} [°C]	-33,5	5,1	-31,4	4,8
Bruchspannung σ_{crack} [N/mm ²]	6,60	5,1	4,65	4,8
Steifigkeitsversuch (4PBB)				
E*-Modul [MPa]	Siehe Abbildung 43		Siehe Abbildung 43	

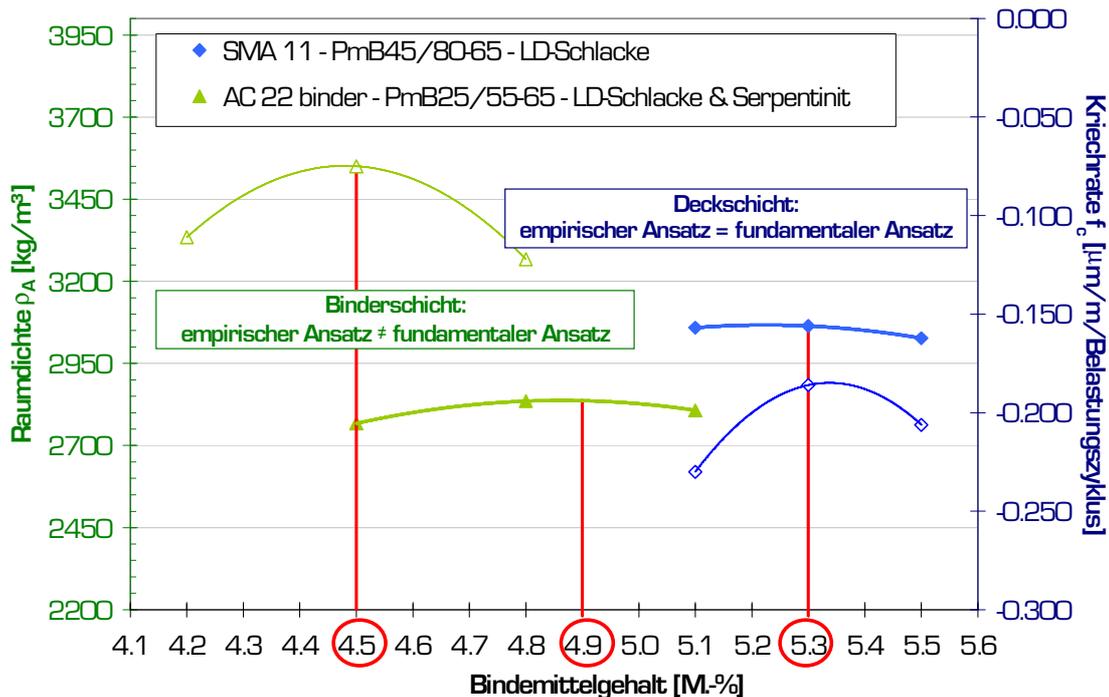


Abbildung 44 – Gegenüberstellung empirischer und fundamentaler Ansatz der Mischgutoptimierung (Bindemittelgehalt)

4.6 Anforderungen an Mischgüter

Die Anforderung an das Mischgut für hochbelastete Verkehrsflächen ist der hohe Widerstand gegen plastische Verformungen (Spurrinnenbildung). Die Spurrinnen entstehen in verstärktem Maß im Bereich der Deckschicht, da diese meist auch einen höheren Bindemittelgehalt, als die darunter liegende Trag- oder Binderschicht aufweist.

Die Literatur nennt folgende Eigenschaften/Einflussbereiche für die Standfestigkeit der Straßenkonstruktion:

- Bitumen:

Das verwendete Bitumen sollte Hafteigenschaften besitzen und ausreichend Relaxationsvermögen bei Kälte aufweisen (polymermodifiziertes Bindemittel).

Grundsätzlich ist die Verwendung von möglichst harten Bitumen anzustreben.
- Gestein:

Es sollten gebrochene Mineralstoffe mit hoher innerer Reibung verwendet werden. Betreffend die Sieblinie ist der charakteristische Splittmastixaufbau zu empfehlen.

Weiters wird die Verwendung von vollständig gebrochenem Splitt mit hoher Schlagfestigkeit und Aufhellung empfohlen, um eine Aufheizung im Sommer durch Sonneneinstrahlung zu verringern.

5. ANALYTISCHES SPURRINNENPROGNOSEMODELL

5.1 Grundlagen der Berechnung

Mit den ermittelten Lasten in der Straßenebene können mit geeigneten analytischen und numerischen Verfahren die Spannungen und Verformungen im Straßenkörper bestimmt werden. Es gibt verschiedene Berechnungsmodelle und -ansätze mit unterschiedlichen Einsatzbereichen. Analytische Modelle sind rechnerisch einfach und genau, allerdings reichen sie nicht aus, um das komplexe nicht linear-elastische Materialverhalten von Asphalten zu beschreiben. Bitumen besitzt ein sehr komplexes temperatur- und belastungsabhängiges Verhalten. Um dieses Verhalten in Modellen beschreiben zu können werden rheologische Modelle herangezogen.

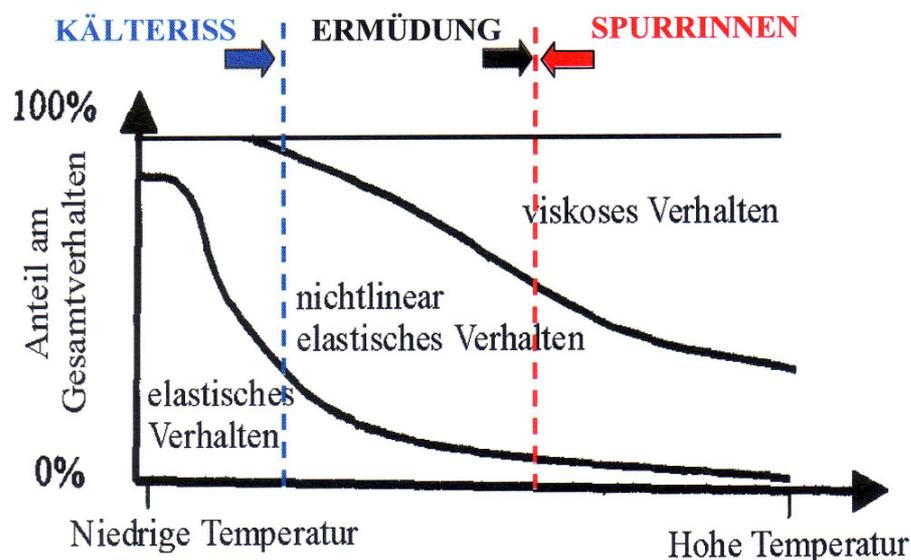


Abbildung 45 – Temperaturabhängiges Verhalten von bituminösen Fahrbahnbefestigungen (Blab, 2001)

In den folgenden Kapiteln werden kurz die Grundlagen der Spannungstheorie und danach die Berechnungsmodelle erläutert. Weiters folgt eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Mehrschichtenprogramms LEAP, sowie der Ergebnisse der Belastungssimulationen. Abschließend werden die Ergebnisse interpretiert und auf Plausibilität untersucht.

Die analytischen und numerischen Berechnungsmodelle können nun einer detaillierten Unterscheidung unterzogen werden. Nur um einen Überblick über die Möglichkeiten zu geben, sind hier einige Modelle angeführt:

- Linear elastische Modelle (lineare Mehrschichtentheorie)
- Viskoelastische Modelle (z.B. Maxwell Modell)
- Finite Elemente Modelle

5.1.1 Linear elastische Modelle

Die linear elastischen Modelle und linear elastischen Mehrschichtentheorien bauen grundsätzlich auf dem Hook'schen Gesetz.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (13)$$

σ_{ij} Spannung [N/mm²]
 C_{ijkl} Tensor zur Beschreibung der Elastizitätseigenschaften [N/mm²]
 ε_{kl} Verzerrung [-]

Der Tensor C_{ijkl} stellt die Stoffkonstante dar, welche die Elastizitätseigenschaften des Materials ausdrückt. Streng genommen besteht er aus $3^4 = 81$ Komponenten, er kann jedoch auf maximal 36 voneinander unabhängige vereinfacht werden.

Es gibt verschiedene linear elastische Mehrschichtentheorien:

- Halbraumtheorie nach Boussinesq
- Ersatzdickenmethode nach Odemark
- Mehrschichtentheorie nach Burminster

nach (Blab, 2001)

Zur numerischen Lösung der Modelle gibt es am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung zwei Computerprogramme, die sich der Theorien bedienen, um linear elastische Mehrschichtenmodelle zu lösen: Programm LEAP „Layered elastic analysis Program“, Symplectic Corp., 1998 und BISAR „Bitumen Stress Analysis in Roads“, Shell, 1988.

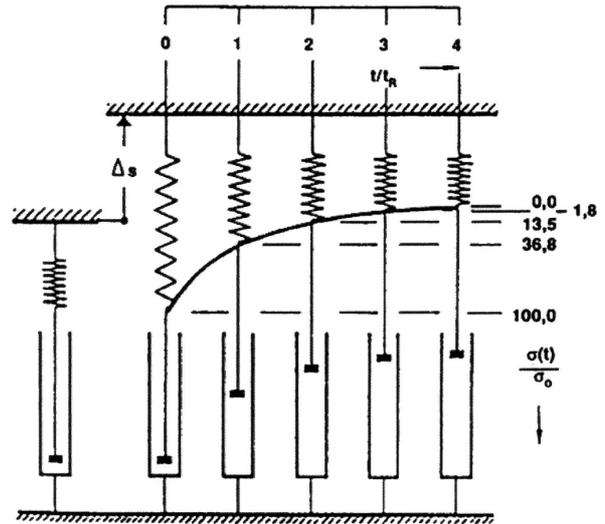
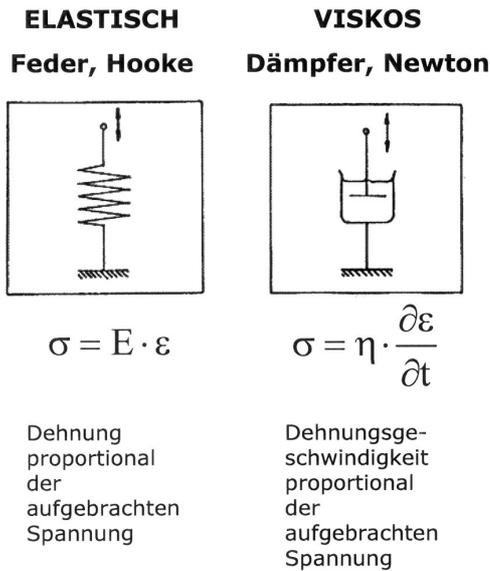
Für die Auswertung der Spannungen und Dehnungen im Rahmen dieser Diplomarbeit werden die Berechnung der Lastszenarien mit dem Mehrschichtenprogramm LEAP und einer Tabellenkalkulation durchgeführt. Weiters wird für eine qualitativ hochwertige Darstellung der Ergebnisse das Programm SigmaPlot Version 10 verwendet.

5.1.2 Viskoelastische Modelle

An dieser Stelle werden zusammengefasst die Grundzüge des verallgemeinerten Maxwell-Modells erklärt (siehe Abbildung 46). Wie bereits in Kapitel 5.1.1 erklärt, beschreiben zuvor genannte Modelle nur den linear elastischen Bereich und gehen nicht auf zeit- und temperaturabhängiges Materialverhalten ein.

Das Maxwell-Modell verwendet zwei Teilgebiete der Rheologie: Die Elastizitätstheorie und die Strömungslehre (Nicht-Newtonscher Flüssigkeiten) nach (wikipedia.org, 2008). Je nach Belastungssituation und Zeitskala bzw. auch Temperatur reagiert der untersuchte Körper nach den Eigenschaften eines Festkörpers (elastisch) oder einer Flüssigkeit (viskos).

Das Berechnungsmodell verwendet ein mechanisches System aus einer Feder mit einem in Serie geschalteten Dämpfer (Blab, 2001).



2 Prinzip der Relaxation, erläutert am Maxwell-Modell [1]. Erkennbar ist der Spannungsabfall in dem auf konstante Länge gedehnten Körper.

Abbildung 46 – Prinzipdarstellung des Maxwell-Modells zur Beschreibung von komplexem Materialverhalten durch Feder-Dämpfer-Schaltung (ISTU, 2006)

5.2 Ermittlung der Spannungen

5.2.1 Mehrschichtenprogramm LEAP

Mit Hilfe des Mehrschichtenprogramms LEAP „Layered elastic analysis program“ werden Spannungen, Dehnungen, Verzerrungen, Hauptspannungen, und Hauptdehnungen von Mehrschichtensystemen ermittelt. Das Programm zeichnet sich aus durch:

- Unendliche Anzahl an Schichten
- Unendliche Anzahl an Lasteinleitungspunkten (an der Oberfläche)
- Unendliche Anzahl an Ausgabepunkten
- Beliebige Grenzbedingungen zwischen den Schichten (völliger Verbund bis lose)
- So genannter „batch“-Modus

Tatsächlich ist der angeführte „batch“-Modus sehr hilfreich bei der Auswertung mehrerer gleichartiger oder ähnlicher Systeme.

5.2.1.1 Durchführung der Simulation

LEAP benötigt ein „Input-File“, üblicherweise eine Textdatei wie etwa „in.txt“. Die Informationen dieser Datei werden eingelesen und die Ausgabedatei „out.txt“ wird nach erfolgreicher Simulation und Berechnung erstellt.

Das Inputfile enthält folgende Informationen:

- Schichtenaufbau: Alle Schichten werden mit einer Bezeichnung, dem Elastizitätsmodul E [MPa], der Querdehnungszahl ν [1], der Dicke d [m], und der Grenzbedingung [-] angeben.

- Lasten: Jede einwirkende Last wird als Toplast mit konstanter kreisrunder Flächenpressung gerechnet. Lasten müssen mit deren Lage (Koordinaten x und y in [m]), einer Bezeichnung der Last, dem Radius der Toplast [m] und den Lastkomponenten F_x , F_y und F_z [MN] angegeben werden.

Der Topflastradius r_{TL} ermittelt sich unter Berücksichtigung des Reifeninnenluftdrucks von 690 kPa = 0,690 N/mm² zu:

$$r_{TL} = \sqrt{\frac{F_z}{\pi \cdot p}} = \sqrt{\frac{F_z}{\pi \cdot 0,690}} \quad [14]$$

r_{TL} Topflastradius [mm]

F_z Toplast (vertikale Kraftkomponente) [N]

p Reifenkontaktndruck = Reifeninnendruck [N/mm²]

Somit stellt sich unter der kreisrunden Aufstandsfläche mit der Vertikallast F_z die Spannung von 0,69 N/mm² ein, der eben dem Reifeninnendruck entspricht.

- Die Ausgabepunkte können entweder in Listenform mit Einzelkoordinaten angegeben werden oder als Koordinatenraster. Das Rasterystem eignet sich gut für eine spätere Darstellung von Spannungszuständen in einer gewählten Referenzebene (z.B. ein Schnitt durch die x-z-Achse des Systems, $y = 0$). Das Rastermaß kann frei gewählt werden und die Anzahl der Ausgabepunkte ist theoretisch unendlich. Dennoch sind die Rechnerkapazitäten und die Speichermedien begrenzt. Es ist sinnvoll den Raster nahe der Lasten zu verfeinern und es ist weiters zu empfehlen bei allen Schichtwechsel mehrerer Ausgabepunkte anzusetzen.

```

IN - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
struct
add AB1 175.02 0.35 0.01 0 0
add AB2 215.43 0.35 0.01 0 0
add AB3 257.41 0.35 0.01 0 0
add BT1 864.81 0.35 0.05 0 0
add BT2 1487.10 0.35 0.05 0 0
add BT3 2379.00 0.35 0.06 0 0
add BT4 3258.00 0.35 0.06 0 0
add UGUTS1 532.00 0.35 0.20 0 0
add UGUTSFK1 280.00 0.35 0.30 0 0
add UG1 140.00 0.35 0.00 0 0

load
add kn1 0 0 0.161166212 0.040075 0.031015 0.056305

outGroup
p 47 1 77
-1.3 -1.1 -1 -0.9 -0.8 -0.7 -0.6 -0.5 -0.4 -0.35 -0.325 -0.3 -0
0
0 0.01 0.015 0.02 0.025 0.02999 0.030001 0.04 0.05 0.06 0.07 0

```

Abbildung 47 – In.txt ein typisches LEAP Inputfile

Das Inputfile muss im Batch-Mode angegeben werden und die Simulation bzw. Berechnung erfolgt automatisch.

Wie bereits in Kapitel 4.4 erklärt ist das materialtechnische Verhalten von Asphaltkonstruktionen vor allem auf Grund des Bitumeneinsatzes stark temperaturabhängig. Die Fokussierung des Projektes auf hohe Temperaturen erfordert nun eine genaue Anpassung der in der Kalkulation verwendeten E-Moduli an

die tatsächlich im Straßenkörper herrschenden Temperaturen. (Näheres dazu im Kapitel 3 Klima und Temperatur).

Mit zunehmender Temperatur sinkt der E-Modul von bituminösen Deck- und Binderschichten ab. Für zwei der verwendeten Materialien ist der Verlauf des E-Moduls in Abhängigkeit der Temperatur in Abbildung 48 dargestellt.

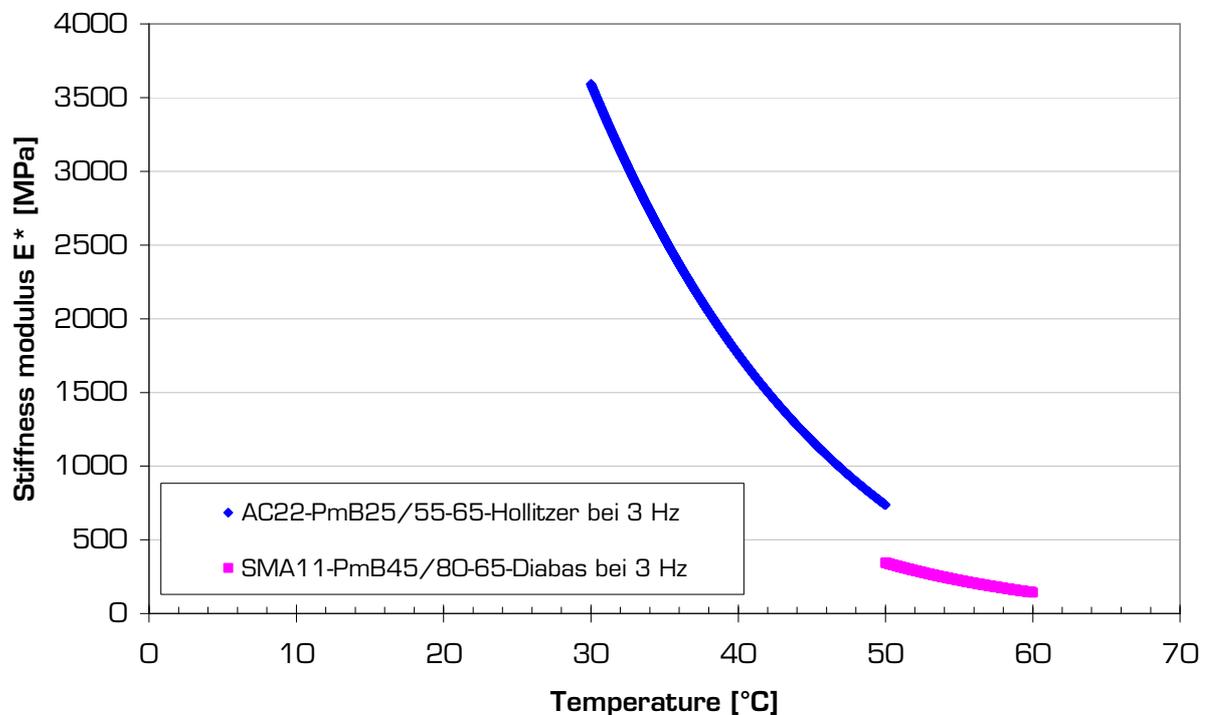


Abbildung 48 – E-Modul als Funktion der Temperatur (AC 22 binder und SMA11)

Die Daten für die Darstellung stammen aus Berechnungen von zur Verfügung gestellten Projektdaten des CD-Labors. Der E-Modul einer Asphalttschicht ist auch von der Belastungsfrequenz abhängig. Näheres dazu im Kapitel 4.4.3.

Aus dem dargelegten Zusammenhang aus E-Modul und herrschender Temperatur ist es nun zweckmäßig den Schichtaufbau des LEAP-Inputfiles auch innerhalb der Deck- und Tragschichten in möglichst viele dünne Schichten zu unterteilen. Es wurden für die 3 cm starke Deckschicht 3 Schichten zu je 1 cm Stärke gewählt, für welche die unterschiedlichen E-Moduli angegeben werden konnten. Die 22 cm dicke Tragschicht wurde in 4 Schichten unterteilt.

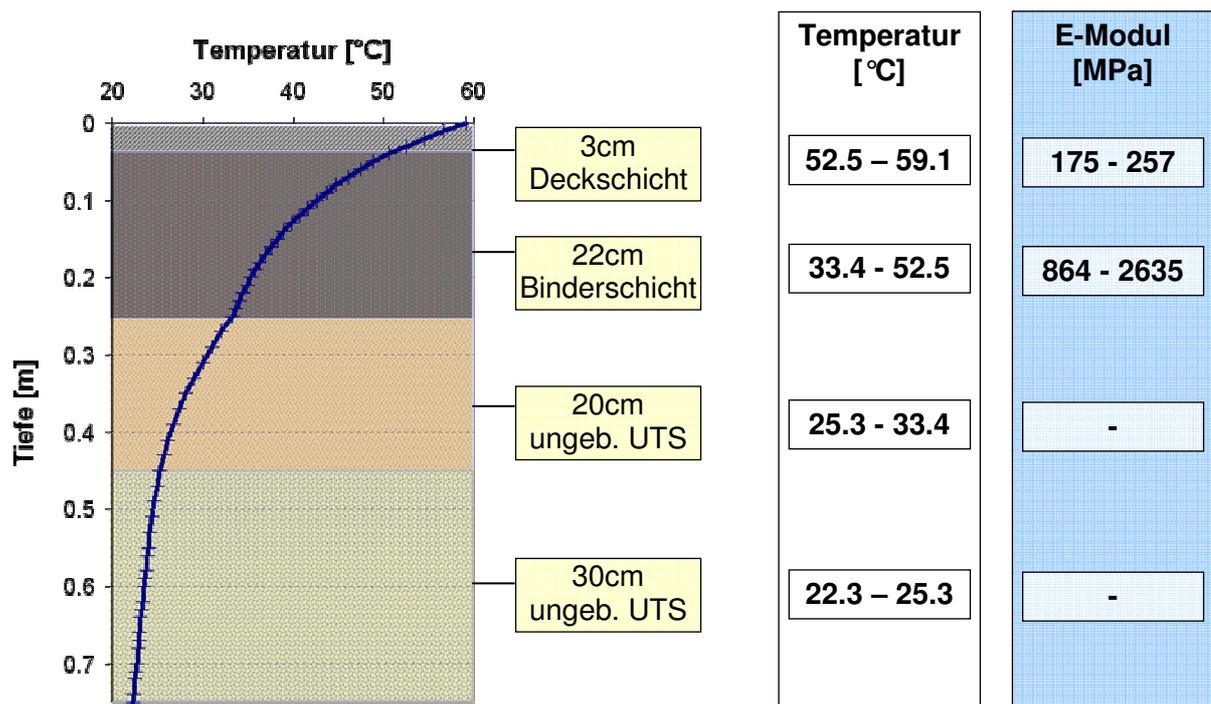


Abbildung 49 – Darstellung der Temperaturen und E-Moduli im Straßenkörper

Die Abbildung 49 zeigt den Temperaturverlauf in der Deckschicht, Binderschicht und den ungebundenen Tragschichten. Auf Details zur Ermittlung der klimatischen Einflüsse wird in Kapitel 3 „Klima und Temperatur“ eingegangen. In der Deckschicht werden Maximalwerte von bis zu 59,1° C erreicht (Wistuba, 2007), wodurch sich der rechnerische E-Modul der Deckschicht in der Tiefe 0 bis 1 cm zu $E = 175 \text{ N/mm}^2$ bestimmen lässt.

Nach Ablauf der erfolgreichen Simulation verlangt das Programm nach einem Speicherort für das Output-File „Out.txt“. In dieser Text-Datei sind alle Ergebnisse der Berechnung wie Spannungen, Dehnungen, etc. angeführt. Die Datei ist im Text-Format nicht für eine weitere Bearbeitung geeignet und sollte daher zweckmäßig in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert werden.

Das Output-File enthält:

- Schichtangaben (Angaben des Input-Files)
- Auflisten der Lasten
- Alle registrierten Ausgabepunkte mit Koordinaten X, Y und Z
- Alle Ausgabepunkte und eine Angabe, in welcher Schicht sich der Punkt befindet
- Verschiebungen aller Ausgabepunkte
- Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{xz} und σ_{yz} aller Ausgabepunkte
- Hauptspannungen σ_1 , σ_2 , σ_3 und die Hauptschubspannungen τ_1 , τ_2 und τ_3 aller Ausgabepunkte
- Dehnungen ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} , ϵ_{xy} , ϵ_{xz} und ϵ_{yz} aller Ausgabepunkte
- Dehnungen in Hauptspannungsrichtung ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3
- Die Berechnungsdauer der Simulation in Sekunden

5.2.1.2 Spannungsdarstellung

Die Tabellenkalkulation ermöglicht nun jede beliebige weitere Verarbeitung der Daten. Eine aussagekräftige Darstellung der Daten ist der Verlauf der Spannungen an einer gewählten Koordinate (x, y) über die Tiefe z .



Abbildung 50 – Beispieldarstellung für einen errechneten Spannungsverlauf im Straßenkörper

Abbildung 50 zeigt die Spannungsverläufe von σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zx} und σ_{yz} im Straßenkörper bis 0,40 m Tiefe, die Lagekoordinate entspricht 0,0 – direkt unter der Topflast. Die Eingabedaten des Mehrschichtenmodells, mit welchen die oben gezeigten Spannungen ermittelt wurden, sind:

- Schichtenaufbau:
 - Deckschicht $E = 22855 \text{ N/mm}^2$, $d = 3 \text{ cm}$, $\nu = 0,35$
 - Binderschicht $E = 21468 \text{ N/mm}^2$, $d = 20 \text{ cm}$, $\nu = 0,35$
 - Alle unteren Schichten besitzen $E = 560 \text{ N/mm}^2$ und $\nu = 0,35$
- Last:
 - $F_x = 40,20 \text{ kN}$
 - $F_y = 37,27 \text{ kN}$
 - $F_z = 56,05 \text{ kN}$
 - $r_{TL} = 0,1608 \text{ m}$
 - Angriffspunkt: Koordinate 0,0,0 (x, y, z)
- Ausgabepunkte
 - Koordinatengruppe von 0,0,0 bis 0,0,0.73 – in Schritten von 0,005 m (also von Straßenoberfläche bis in eine Tiefe von 73 cm)

Die rote Linie zeigt den Verlauf der Spannungen in vertikaler Richtung, $\sigma_z(z)$. Es ist zu erkennen, dass diese mit zunehmender Tiefe abnimmt und in der Tiefe $z = 0$ das Maximum von $\sigma_{z,max} = 0,69 \text{ kN/cm}^2$ erreicht (entspricht dem Reifeninnendruck). Die Spannung in Längsrichtung σ_x stammt von der herrschenden Längskraft F_x und liegt wertmäßig in Oberflächennähe weit über den Spannungen σ_z . An der Grenze zwischen Deck- und Binderschicht stellt sich auf Grund der leicht unterschiedlichen Elastizitätsmoduli ein Knick im Verlauf ein (Tiefe $z = 0,03 \text{ m}$). Der Verlauf von $\sigma_x(z)$ erfährt weiters einen Sprung in der Tiefe $z = 0,23 \text{ m}$, in dieser Tiefe ist die Grenze zwischen Binderschicht und ungebundener Tragschicht erreicht.

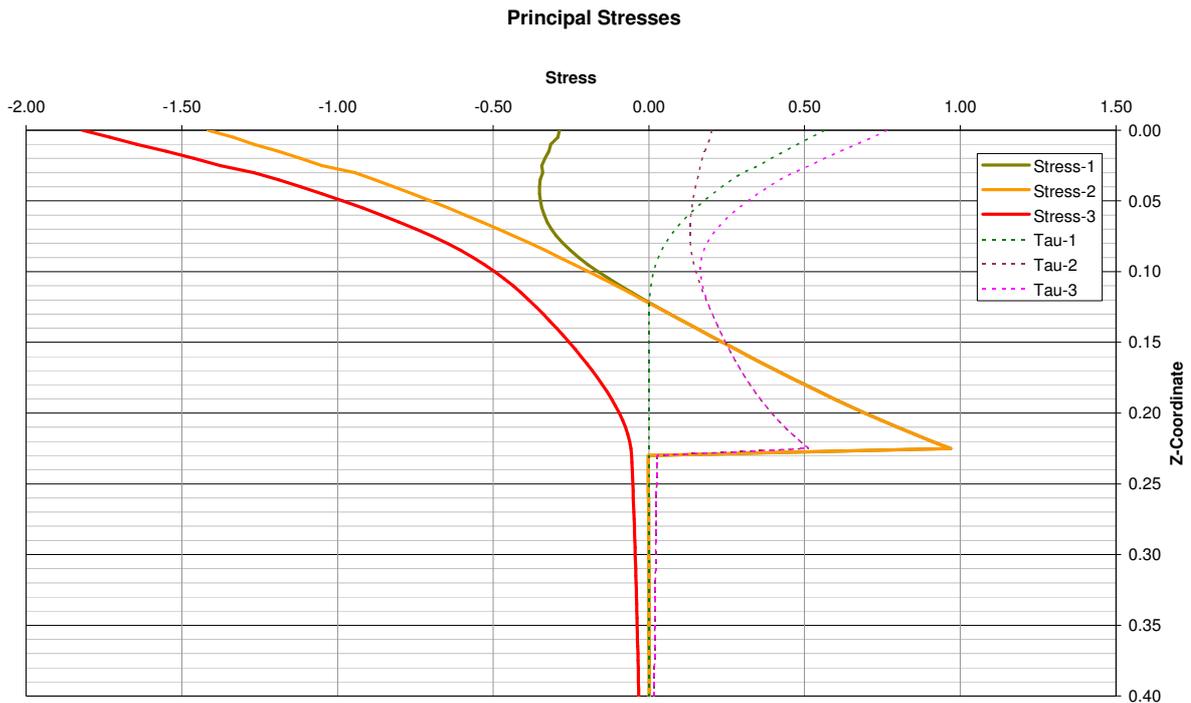


Abbildung 51 – Beispieldarstellung für errechnete Hauptspannungen und Hauptschubspannungen im Straßenkörper

Aus Abbildung 51 gehen nun die Hauptspannungen σ_1 , σ_2 , σ_3 und die Hauptschubspannungen τ_1 , τ_2 und τ_3 hervor. Die Quelldaten des Diagramms sind identisch mit jener aus Abbildung 50. Diese Art der Darstellung eignet sich sehr gut zur Einschätzung der maximalen und minimalen Spannungen in einer beliebigen Tiefe z . Signifikant sind die sehr hohen Spannungen in Lastangriffsnähe $z = 0$ von $\sigma_3 = -1,77 \text{ kN/cm}^2$ und wieder der Sprung in Tiefe $z = 0,23$ an der Schichtgrenze zur ungebundenen Tragschicht.

5.2.2 Validierung der Spannungsberechnungen

Die im vorangehenden Kapitel dargelegten Ergebnisse der Mehrschichtenberechnung müssen auf Plausibilität untersucht werden.

Eine erste Bestätigung der Ergebnisse kann durch die Eingrenzung der ermittelten Spannungen erfolgen. So liegen die Spannungen in den Koordinatenrichtungen σ_x , σ_y und σ_z , wie auch in den Hauptspannungsrichtungen σ_1 , σ_2 und σ_3 innerhalb der Grenzen von $-0,8 \text{ N/mm}^2$ bis $+0,8 \text{ N/mm}^2$. Weiter ist die Bildung der Zugzone in den unteren Bereichen der Binderschicht und die qualitative Form der Druckzwiebel nachvollziehbar. Die Druckzwiebeln und die lokalen Spannungsmaxima liegen unter den Toplasten, was zu erwarten war.

Um einen Vergleich mit Untersuchungen anderer Institute anzustellen, wurde folgendes LEAP-Modell erstellt:

Eingangsparameter:

$F_x = 51,75 \text{ kN}$

$F_y = 0 \text{ kN}$

$F_z = 57,5 \text{ kN}$

Schichtenaufbau:

Deckschicht	3 cm	4014 MPa	$\mu = 0,35$
Bit.Tragschicht	20 cm	10793 MPa	$\mu = 0.35$
Ung.Tragschicht	20 cm	560 MPa	$\mu = 0,35$
darunterliegende Schichten		560 MPa	$\mu = 0.35$

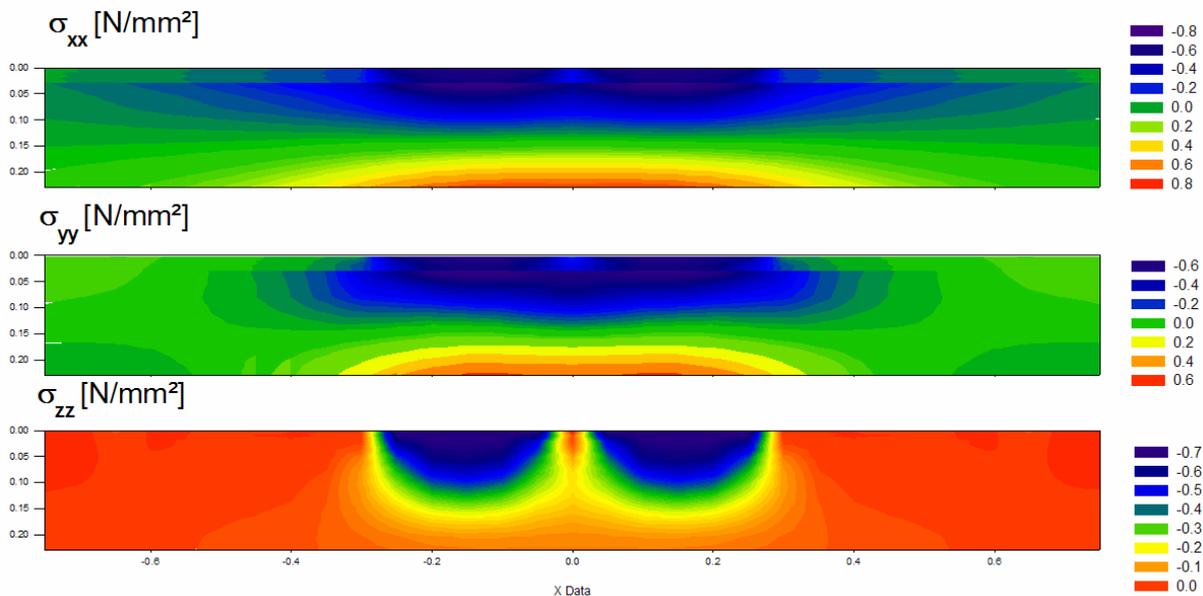


Abbildung 52 - Darstellung der Spannungen für das Referenzszenario

Vergleich 1:

Ein Vergleich mit errechneten Spannungen aus Blab und Harvey, 2002 bestätigt die Größenordnung der Spannungen. Die Principal Stresses (Comparison between FE and LEAP Model) liegen bei Werten zwischen 0,49 und -1,5 N/mm² für σ_{11}

Aus dem Bericht geht weiters hervor, dass die Spannungsberechnung im Oberflächennahen Bereich mit LEAP nicht exakt erfolgt. Im Bereich $z = 0$ bis 20 mm sind realistische Ergebnisse nur mit FE Modellen erzielbar!

Eingangsparameter für Vergleich 1:

AC Layer	20cm	7000MPa	0,35
AB Base Layer	20cm	250MPa	0,35
ASB Subbase Layer	30cm	150MPa	0,35
Subgrade	-	110MPa	0,40

Last: 56kN radial Tire with 690kPa

Vergleich 2:

Als zweiter Vergleich bietet sich die Dissertation von Dipl.-Ing. Ralf Numrich an (Numrich, 2003). Die Arbeit zeigt Ergebnis aus der Modellierung des nichtlinear-elastischen Verformungsverhaltens von ungebundenen Tragschichten. Er ermittelte die Spannungen in den Tiefen $z = 10$ cm und $z = 30$ cm sowohl in vertikaler, als auch in horizontaler Richtung. Die ermittelten Spannungen bestätigen die LEAP-Ergebnisse dieser Arbeit.

Spannungen: [N/mm²]

$$\sigma_v = -0,404 \text{ (} z = 10\text{cm)}$$

$$\sigma_h = -0,197 \text{ (} z = 10\text{cm)}$$

$$\sigma_v = -0,161 \text{ (} z = 30\text{cm)}$$

$$\sigma_h = -0,016 \text{ (} z = 30\text{cm)}$$

Eingangsparameter:

Flächenpressung = Luftdruck des Reifens = $0,81 \text{ N/mm}^2 = 810 \text{ kPa}$

Radlast = $F_z = 5,75 \text{ t}$

Belastungsfrequenz 10 Hz (= ca. 60km/h)

Asphalttemperatur $47,5^\circ\text{C}$

Schichtaufbau für Vergleich 2:

Asphaltdeckschicht	10 cm	ca. 1300MPa
Ungeb. Tragschicht	20 cm	130MPa
Frostschuttsch.	35 cm	154MPa

5.2.3 Elastische Verformungen

Eine weitere Möglichkeit einer Visualisierung der Ergebnisse ist die Darstellung der Verschiebungen in Z-Richtung.

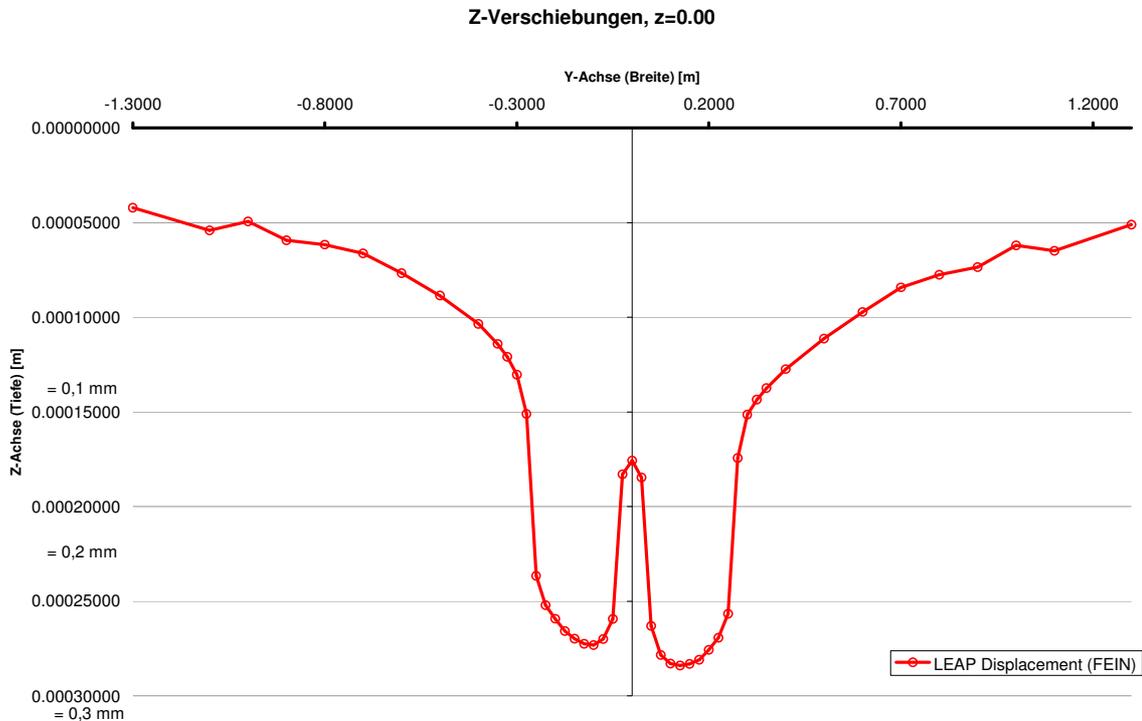


Abbildung 53 – vertikale elastische Verschiebungen unter Zwillingssreifen (KV1)

Die Abbildung 53 zeigt die elastischen Verschiebungen unter einer Zwillingssreifenbelastung aus 2 Toplasten zu je $F_{z,i} = 28,15$ kN. Das angewandte Szenario ist KV1. Es herrschen also auch Fliehkräfte und Bremskräfte in der Höhe von jeweils $F_{x,i} = 21,57$ kN und $F_{y,i} = 15,51$ kN. Die 2 Toplastmittelpunkte liegen beide in einem Abstand von 15,25 cm von der Mittelachse ($y = 0$) entfernt. Der Abstand der beiden Lastangriffspunkte entspricht somit 30,50 cm, einem gängigen Maß eines Zwillingssreifen-Rades eines Lastkraftfahrzeuges (Goodyear, 2007).

Es ist zu beachten, dass LEAP ein linear elastisches Mehrschichtenmodell ist und die Darstellung bzw. Rechenmethode nur elastische Dehnungen und Verschiebungen zeigt.

5.2.4 Deviatorspannungen und plastische Verformungen

Aus der Vielzahl an Ergebnissen und Darstellungsmöglichkeiten sind folgende drei Darstellungen bzw. Zusammenhänge für die späteren Untersuchungen von Bedeutung:

- Maßgebende Deviatorspannung σ_D [N/mm²]
- Plastische Deformation ϵ_p [%] nach definierter Lastwechselanzahl N [-]

5.2.4.1 Deviatorspannung

Wie es unendlich viele Spannung σ_i (für jede gewählte Orientierung) gibt, so gibt es ebenso unendlich viele zugehörige Deviatorspannungen $\sigma_{D,i}$. Der Deviator bildet sich

stets als Differenz der herrschenden Spannung σ_i zum hydrostatischen Druck σ_{hyd} , welcher sich aus dem Mittelwert der drei Hauptspannungen bildet.

Es werden drei Deviatorspannungen $\sigma_{D,x}$, $\sigma_{D,y}$ und $\sigma_{D,z}$ gebildet. Maßgeblich für die plastische Dehnung des Volumselements ist nun der Betrag der drei Deviatoren s_i .

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_{D,x}^2 + \sigma_{D,y}^2 + \sigma_{D,z}^2} \text{ für positive Werte } \sigma_{D,z} \quad (15)$$

$$\sigma_D = -\sqrt{\sigma_{D,x}^2 + \sigma_{D,y}^2 + \sigma_{D,z}^2} \text{ für negative Werte } \sigma_{D,z} \quad (16)$$

σ_D maßgebliche Deviatorspannung [N/mm²]

$\sigma_{D,i}$ Deviatorspannung, Orientierung i [N/mm²]

Hierbei ist allerdings die Orientierung von $\sigma_{D,z}$ zu beachten. s_i drückt die absolute Deviatorspannung (den Betrag) aus, die sich aus den Differenzen der Spannungen zum hydrostatischen Druck bildet.

5.2.4.2 Plastische Deformation

Wie bereits erwähnt muss für das rein linear elastische Modell von LEAP ein Ansatz gewählt werden, um auch plastische Verformungen abschätzen zu können. Dies gelingt über die Einbeziehung der Deviatorspannungen und das Verformungsmodell von Francken und Clauwaert (Francken, Clauwaert, 1987).

$$\varepsilon_p = \mu N^\alpha = \frac{\sigma_D}{2 |E^*| f(H_{bit})} N^\alpha \quad (17)$$

Die Formel ermöglicht die Ermittlung der plastischen Dehnungen in Abhängigkeit von:

$ E^* $	dynamischer E – Modul des Asphalts
α	Anstieg der Kriechkurve (Kriechrate f_c) aus den triaxialen Druckschwellversuchen
σ_D	maßgeblicher Spannungsdeviator
$f(H_{bit})$	$= 2,716 \cdot 10^{-3} + 1,432 \cdot 10^{-3} \cdot H_{bit}$
H_{bit}	Hohlraumgehalt [Volums-%]

Die plastischen Dehnungen ε_p können nun für jeden Volumselement berechnet werden. Aus den Laborversuchen erhält man die Anstiegsrate α (aus der Kriechkurve f_c), die für jede Schichte, je nach Mischgut, variiert. Da keine einzige der Variablen zur Berechnung von ε_p konstant ist, müssen sie alle für jedes Volumselement bestimmt werden.

E-Moduli:

Der E-Modul ist temperaturabhängig pro Asphaltsschicht zu bestimmen. Die Werte stammen aus den Steifigkeitsversuchen (siehe 4.4.3.3).

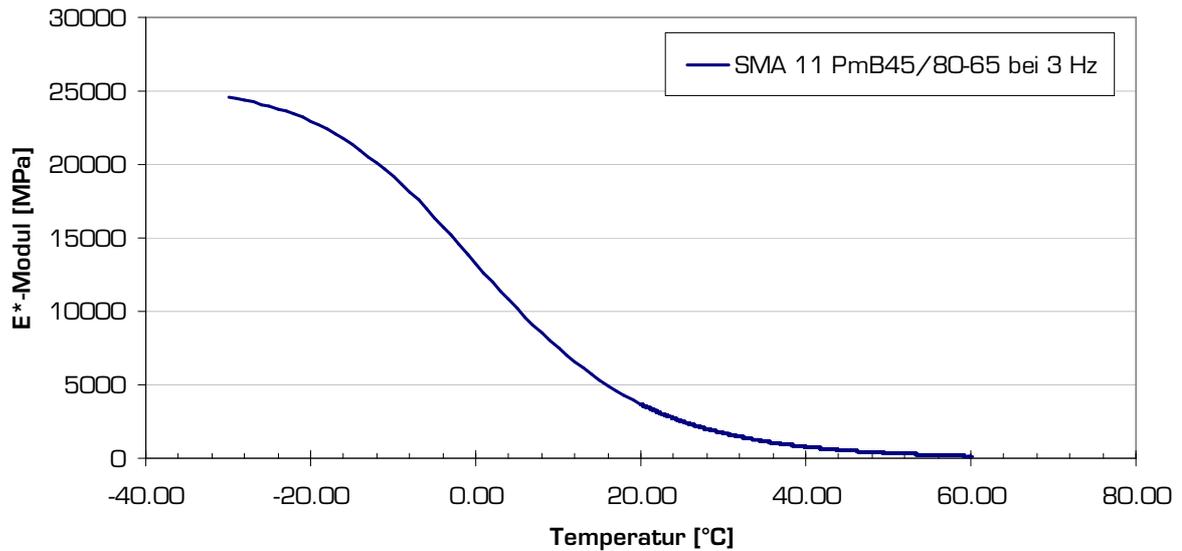


Abbildung 54 – E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur für SMA 11 pmB45/80-65

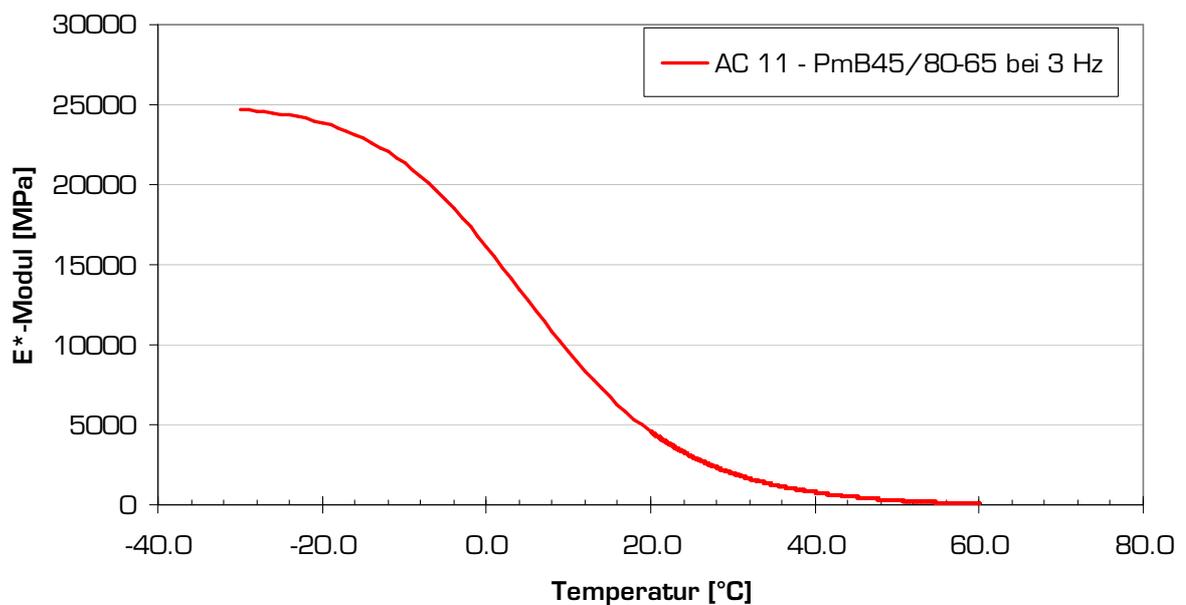


Abbildung 55 – E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur für AC 11 pmB45/80-65

Die beiden Darstellungen geben die zugehörigen E-Moduli der Decksichten SMA 11 pmB 45/80-65 und AC 11 Pm 45/80-65 bei einer Frequenz von 3 Hz an. Die Belastungsfrequenz von 3 Hz entspricht der Fahrgeschwindigkeit von langsam fahrenden Nutzfahrzeugen im Geschwindigkeitsbereich von ca. 10 bis 30 km/h.

Die Deckschichten sind bei den untersuchten Modellen zwischen 3 und 3,5 cm dick. Für die Eingabe in das LEAP-Modell müssen 3 Temperaturen und 3 gemittelte E-Moduli für jede Deckschicht bestimmt werden.

Tabelle 6 : E-Moduli der Deckschichten SMA 11 und AC 11 bei 3 Hz

Schicht- bezeichnung	Dicke d [cm]	Maßgebende Tiefe z [m]	Maßgebende Temperatur T [°C]	SMA11	AC11
				zugehöriger E-Modul [N/mm ²]	zugehöriger E-Modul [N/mm ²]
1	1,0	0,005	57,9	175	93
2	1,0	0,015	55,6	215	136
3	1,0	0,025	53,5	257	183

Tabelle 7 : E-Moduli der Binderschichten AC22 PmB25/55-65, AC32 B50/70 und AC32 PmB25/55-65

Schicht- bezeichnung	Dicke d [cm]	Maßgebende Tiefe z [m]	Maßgebende Temperatur T [°C]	Aufbau Nr.	1a 1b	2a 2b	3a 3b
					AC22_pmB 25/55-65 zugehöriger E-Modul [N/mm ²]	Kombiniert AC22+AC32 zugehöriger E-Modul [N/mm ²]	AC32_pmB 25/55-65 Zugehöriger E-Modul [N/mm ²]
1	5	0,055	48,8		865	865	296
2	5	0,105	42,5		1487	1487	1000
3	6	0,160	37,5		2099	2379	1774
4	6	0,220	34,5		2635	3258	2355

Kriechrate f_c :

Dieser Kennwert wird mittels triaxialen Druckschwellenversuchen bestimmt (mehr dazu unter 4.4.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode. f_c [$\mu\text{m}/\text{m}/\text{LW}$] ermittelt sich aus den Kriechkurven, also den Zeit-Dehnungskurven, der untersuchten Materialien. Die Haupteinflussfaktoren sind neben dem gewählten Probekörpermaterial die Prüftemperatur von 40° C oder 50° C die Frequenz der axialen und radialen Belastung von 3 Hz.

Die Ergebnisse der Prüfungen an den Mischgütern sind dem Kapitel 4.4.3.1 zu entnehmen.

Spannungsdeviator σ_D :

Der maßgebliche Spannungsdeviator bzw. der maßgebliche Spannungsdeviator σ_D ist gemäß Kapitel 5.2.4.1 Deviatorspannung zu ermitteln und in die Gleichung einzusetzen. Der allgemeine Ansatz muss nun noch um die Frequenz f [Hz] und die Lastwechselanzahl NLW erweitert werden. Gleichung 18 zeigt den Ansatz zur Berechnung der plastischen Verformungen (Francken und Clauwaert, 1987).

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_D}{2 \cdot E(0,002716 + 0,001432 \cdot H_{bit})} \left(\frac{NLW}{1000 \cdot f} \right)^{f_c} \quad [18]$$

An jedem gewünschten Volumselement kann somit die plastische Dehnung ε_p ermittelt werden. Um aus den einzelnen Dehnungen eine Darstellung der Spurrinne bzw. der Spurrinnenbildung zu erstellen, ist es notwendig diese Einzeldehnungen $\varepsilon_{p,i}$ mit der Volumselementhöhe h_i zu multiplizieren und die Ergebnisse pro Lagekoordinate ($x, y = \text{const}$) aufzusummieren.

$$w = \sum_i \varepsilon_{p,i} \cdot h_i \quad [19]$$

w Aufsummierte plastische Dehnung [mm]

$\varepsilon_{p,i}$ plastische Einzeldehnung eines Volumselements [-]

h_i Höhe des Volumselements [mm]

5.2.5 Ergebnisse, Auswertung und Interpretation

Anhand des Szenarios KV1 mit einem Zwillingsreifen auf dem Straßenaufbau 1a werden die Ergebnisse der Berechnungen abschließend ausführlich erklärt und die Zusammenhänge dargestellt.

Zwillingsreifen:

Eingangsgrößen:

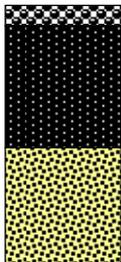
KV1: $F_{z,\text{ges}} = 56,305 \text{ kN}$

$F_{y,\text{ges}} = 31,015 \text{ kN}$

$F_{x,\text{ges}} = 43,142 \text{ kN}$

Zwillingsreifen: 2 Topflasten, Radius jeweils $r_{TL,i} = 0,1140 \text{ m}$

Straßenaufbau 1a:



3 cm SMA 11 PmB45/80-65

2 Lagen á 11 cm AC 22 binder PmB25/55-65

20 cm ungebundene obere TS (Kantkörnung KK)

Mit angegebenen ersten Daten lassen bereits die Spannungszustände im Straßenkörper berechnen und darstellen. Die folgenden Grafiken stellen immer einen Schnitt durch den Straßenkörper unter dem Lastzentrum quer zur Fahrtrichtung dar (also ein Schnitt in der YZ-Ebene).

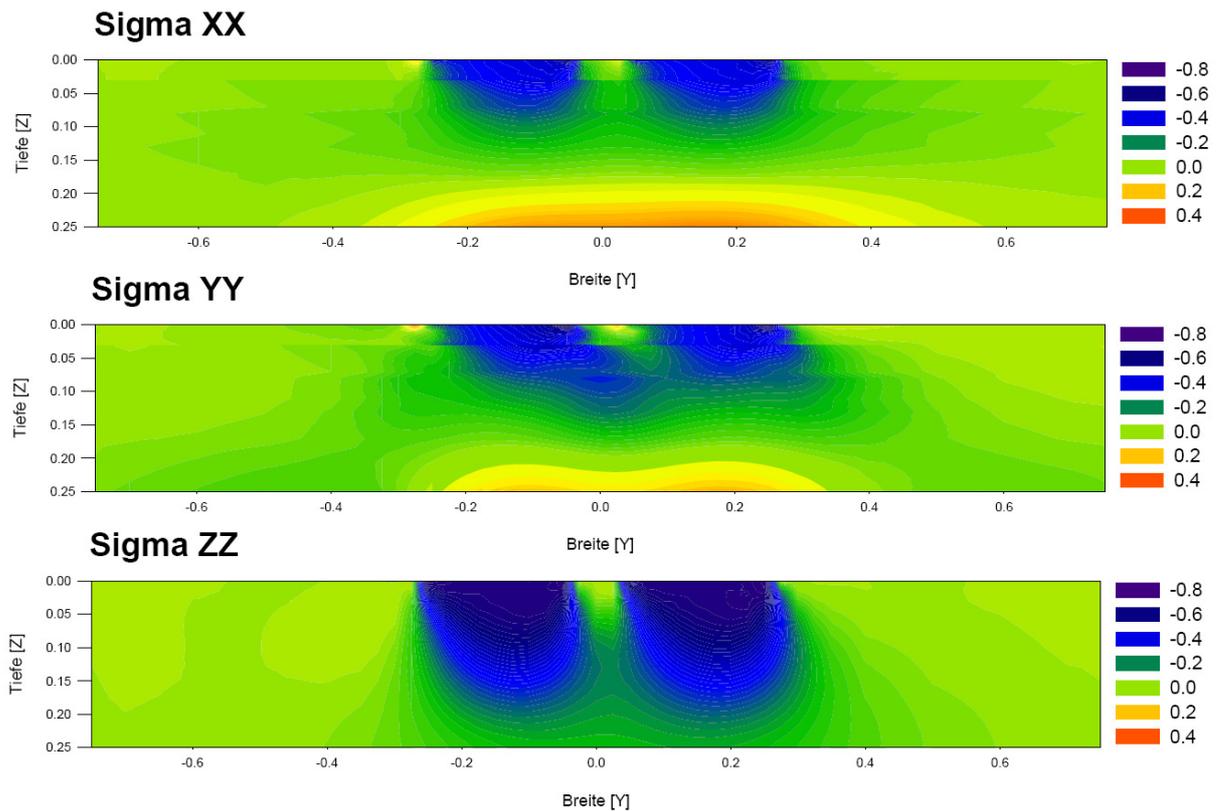


Abbildung 56 – Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz} für KV1_Zw_1a

Da alle Spannungszustände bekannt sind, kann auch der hydrostatische Druck als Mittelwert der drei Hauptnormalspannungen dargestellt werden. Die Spannungen werden in $[N/mm^2]$ dargestellt. Der Ausschnitt der betrachteten Spannungen hat die Abmessungen $1,50\text{ m} \times 0,25\text{ m}$. Bei einer Breite von $\pm 0,75\text{ m}$ und der Tiefe von 25 cm werden die maßgeblichen Deck- und Binderschichten erfasst.

Hydrostatischer Druck

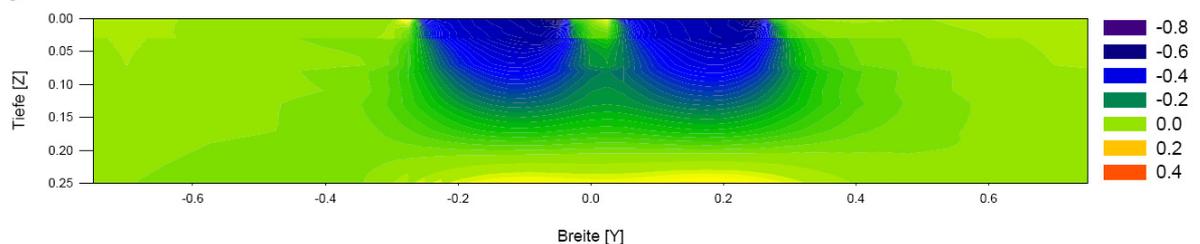
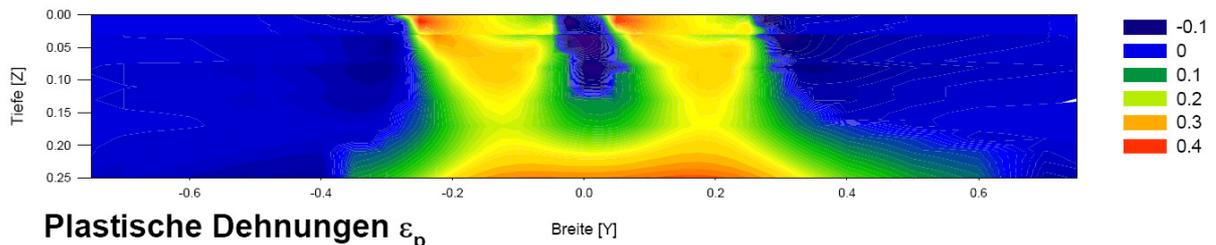


Abbildung 57 – Hydrostatischer Druck σ_{hyd} für KV1_Zw_1a

Es bilden sich zwei Druckzwiebeln direkt unter den beiden gleich großen Topflasten der Zwillingsreifen. An der Unterseite der bituminösen Binderschicht aus AC22 in der Tiefe $z = 0,25\text{ m}$ bildet sich im Bereich der Last eine Zugzone aus, analog zur Spannungsdarstellung in 5.2.1.2 Spannungsdarstellung. Bei gewählter Darstellung sind die einwirkenden Lasten $F_{y,i}$ nach rechts orientiert, wodurch die Asymmetrie der Druckzwiebeln erklärt wird. Weiters ist bereits erkennbar, dass sich an der Reifenflanke in Kurvenaußenseite hohe Spannungen ergeben werden (violetter Bereich, ca. $-0,80\text{ N/mm}^2$). Andererseits bildet sich auf der Innenseite der Reifenflanke ein Zugbereich aus.

Die Spannungsdeviatoren stellen den nächsten Schritt der Berechnung dar.

maßgebliche Deviatorspannungen s_i



Plastische Dehnungen ε_p

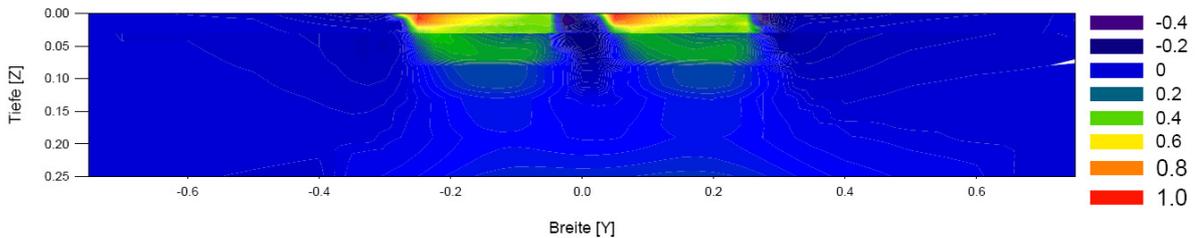


Abbildung 58 – Spannungsdeviatoren und plastische Dehnungen für KV1_Zw_1a

Der Spannungsdeviator ist der größte Einflussfaktor zur Berechnung der plastischen Dehnungen. Diese hängen aber auch von der Kriechrate f_c , dem Hohlraumgehalt H_{bit} und dem E-Modul ab. All diese Kennwerte unterscheiden sich bei den betrachteten Deck- und Binderschichten, wodurch der Unterschied der beiden Darstellungen erklärt wird.

Die maßgebliche Deviatorspannung ist etwa an der Untergrenze der bituminösen Binderschicht ähnlich groß, wie im Deckschichtbereich (Reifenflansch, rote Bereiche ca. $0,4 \text{ N/mm}^2$), dennoch verursachen sie in der Tiefenlage der Binderschicht ($z = \text{ca. } 0,20 \text{ m}$) nur sehr geringe plastische Verformungen. Vor allem der E-Modul der Binderschicht ist wesentlich höher, als jener in den höher gelegenen Deckschichtbereichen.

An der Kurveninnenseite des Reifenflansches sind hohe plastische Dehnungen im Bereich von $+1,0 = 100 \%$ erkennbar. Eine positive Dehnung um 100% bedeutet, dass sich dieser Bereich unter Zug befindet und eine Längenänderung auf die doppelte Ursprungslänge des Elements wäre zu erwarten.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (20)$$

- ε plastische Dehnung [-]
- l Aktuelle Länge des Volumselements [mm]
- l_0 Ausgangslänge des unverformten Volumselements [mm]
- Δl Längenänderung [mm]

Da $\varepsilon = 1,0$ ist offensichtlich $\Delta l = l$, also die Längenänderung gleich groß der Ursprungslänge l_0 .

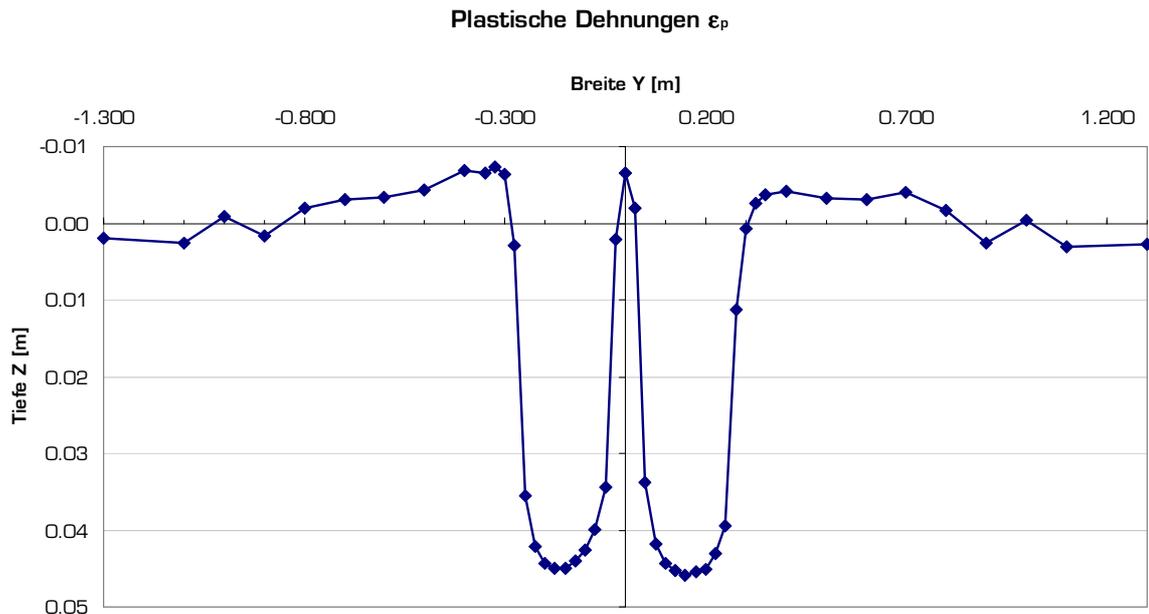


Abbildung 59 - plastische Dehnungen für KV1_ZW_1a im Querschnitt YZ

Die Darstellung in Abbildung 59 zeigt die aufsummierten plastische Einzeldehnungen, also die tatsächliche Erscheinung als Spurrinne. Der Zwillingstreifenabdruck ist erkennbar und es bilden sich nach 10 Millionen Überrollvorgängen theoretisch Spurrinnen bis in die Tiefe von 0,045 m, also 4,5 cm. Interessant ist auch die Ausbildung von Erhöhungen an den Reifenflanken, welche durchaus plausibel scheinen.

Überbreiter Einzelreifen:

Zur direkten Vergleichbarkeit kann man etwa die Ergebnisse der LEAP-Berechnung für das Szenario KV1 mit dem überbreiten Einzelreifen heranziehen.

Eingangsgrößen:

$$\text{KV1: } F_{z,\text{ges}} = 56,305 \text{ kN}$$

$$F_{y,\text{ges}} = 31,015 \text{ kN}$$

$$F_{x,\text{ges}} = 43,142 \text{ kN}$$

Überbreiter Einzelreifen: 1 Toplast, Radius $r_{TL} = 0,1612 \text{ m}$

Der Straßenaufbau entspricht wieder dem Modell 1a.

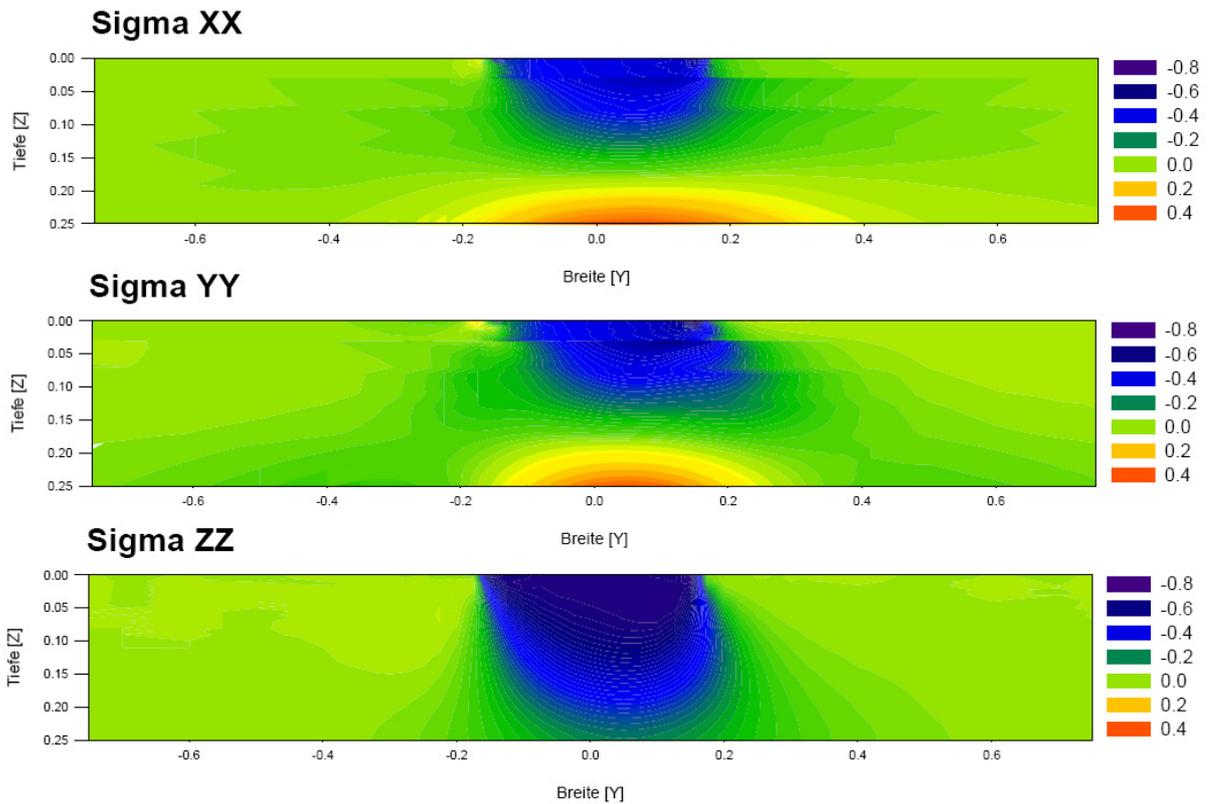


Abbildung 60 – Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz} für KV1_U_1a

Analog zu den Berechnungen mit dem Zwillingstreifen bilden sich Druckzwiebeln bis in die Tiefe der Binderschicht ($z = 0,25 \text{ m}$) aus. Die Asymmetrie der Zwiebeln resultiert wieder aus der Seitenführungskraft F_y . Die Spannungsspitzen für σ_x und σ_y in den Reifenflanshbereichen sind bezeichnend für die zu erwartenden plastischen Verformungen.

Hydrostatischer Druck

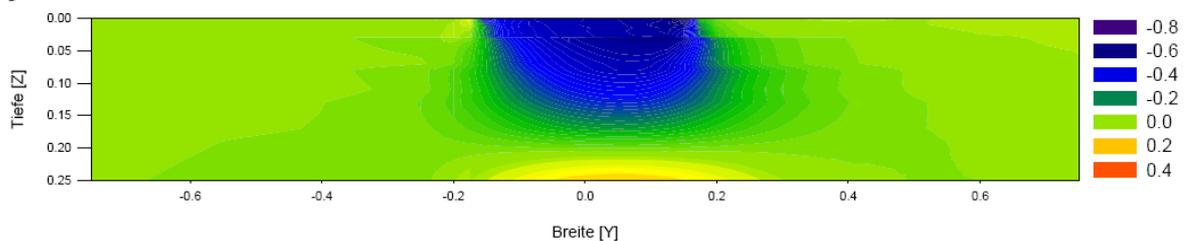
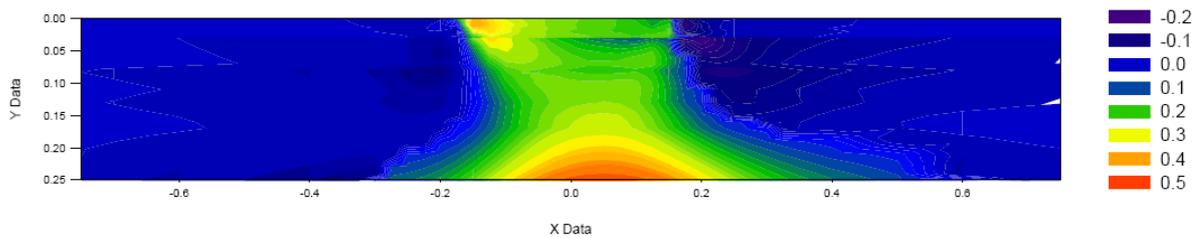


Abbildung 61 – Hydrostatischer Druck p_{hyd} für KV1_U_1a

Die Zugzone an der Grenze zwischen Binderschicht und ungebundener Tragschicht bildet sich aus. Der maßgebliche Spannungsdeviator s_i ist bekanntlich der größte Einflussfaktor für die plastischen Dehnungen.

maßgeblicher Spannungsdeviator s_i



Plastische Dehnungen ϵ_p

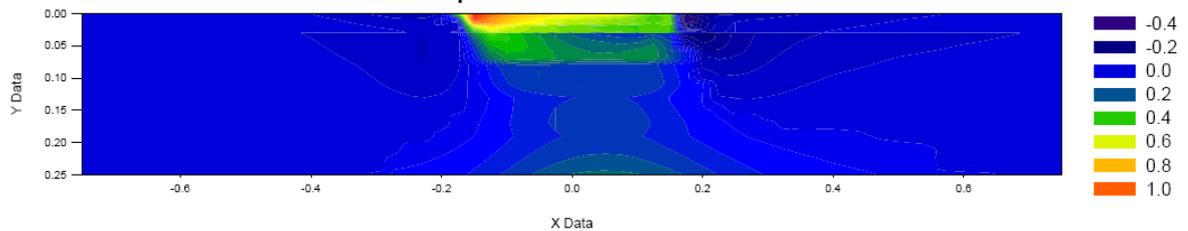


Abbildung 62 – Spannungsdeviatoren und plastische Dehnungen für KV1_U_1a

Erwartungsgemäß bilden sich direkt an der Stelle der Lasteinbringung – des Reifens – die maximalen Dehnungen aus. Wieder werden an der Kurveninnenseite des Reifenflansches hohe plastische Dehnungen im Bereich von +1,0 = 100 % erreicht.

Plastische Dehnungen ϵ_p

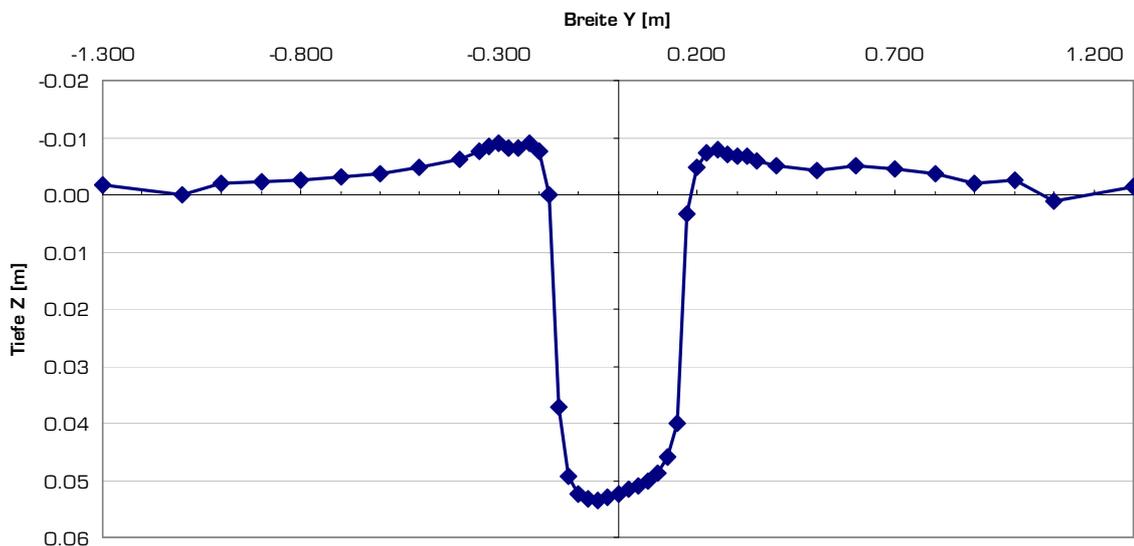


Abbildung 63 - plastische Dehnungen für KV1_U_1a im Querschnitt YZ

Die Darstellung in Abbildung 63 zeigt wieder die aufsummierten plastischen Einzeldehnungen. Analog zur Darstellung des Zwillingstreifens bilden sich auch beim überbreiten Einzelreifen nach 10 Mio. Lastwechseln mit einer 11,5 to-Achse sehr tiefe Spurrinnen von bis zu 0,053 m Tiefe, also 5,3 cm. Es bilden sich ebenfalls Erhöhungen in geringem Ausmaß an den Reifenflanken aus.

Betrachtung der plastischen Dehnungen als Funktion der Lastwechselanzahl:

Für die 6 untersuchten Oberbaukonstruktionen 1a bis 3b können nun die maximal erreichten Spurrinntiefen als Funktion der Lastwechselzahl dargestellt werden. Die maximale Spurrinntiefe [m] lässt sich aus dem Maximum der aufsummierten Einzeldehnungen ermitteln.

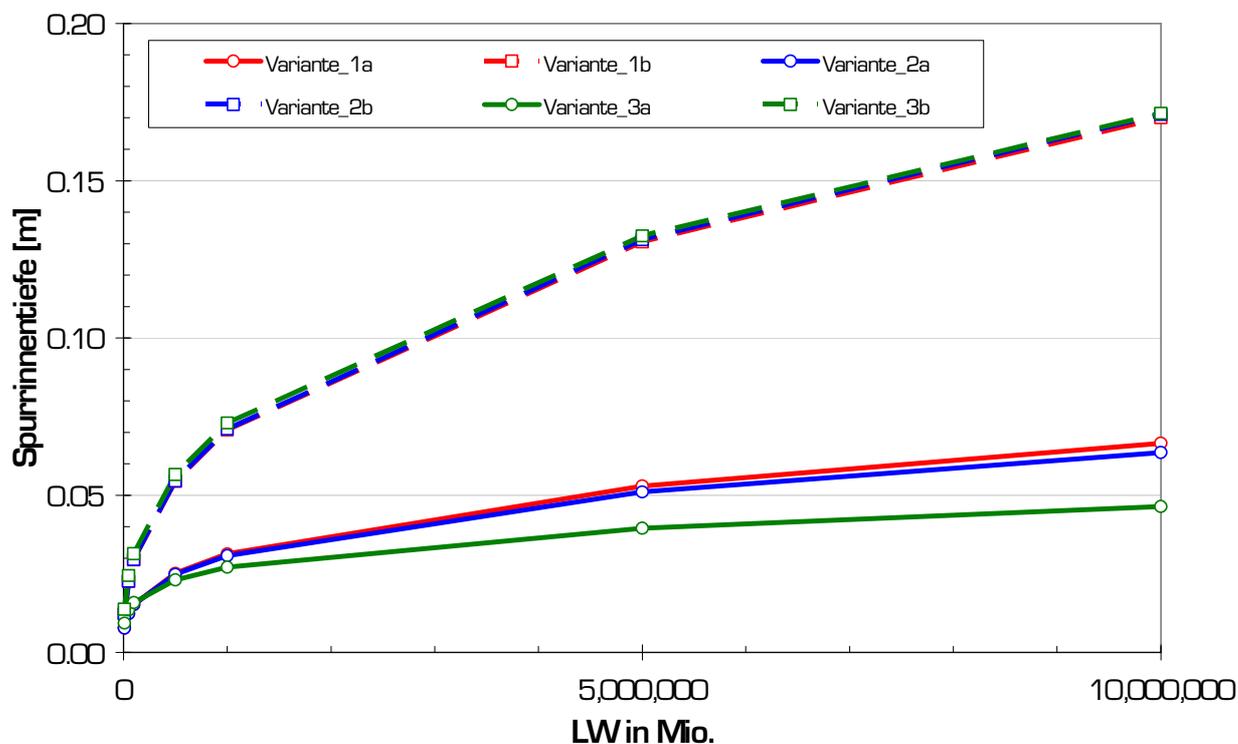


Abbildung 64 – Rechnerische Spurrinntiefe [m] als Funktion der Lastwechsel bei 3 Hz

Die Varianten „b“ sind als Strichlinie dargestellt und entsprechen dem Asphaltbetonaufbau AC 11 in Kombination mit den AC 22 und/oder AC 32 Binderschichten. Laut Abbildung 64 hat die Wahl der Binderschicht bei einer AB 11 Deckschicht keinen günstigeren Einfluss auf die Größe der bleibenden Verformungen.

Im direkten Vergleich schneiden die Splittmastix-Aufbauten „a“ mit den durchgezogenen Graphen viel besser ab. Die Verformungen liegen fast um das dreifache unter jenen der Asphaltbetonkonstruktion. Weiters ist auch ein Einfluss der Binderschicht erkennbar. Variante 3a besteht aus zwei AC 32 Binderschichten. Das Größtkorn von 32 mm ist der Grund für die höhere Widerstandsfähigkeit der AC 32 Konstruktion gegenüber AC 22. Obwohl Konstruktionsaufbau 2a zu 50 % aus AC 32 besteht, liegen die Ergebnisse nahe an der Variante 1a. Der Grund liegt darin, dass der widerstandsfähigere AC 32 in den tieferen Lagen der Schicht eingebaut wird, wo die Spannungen bereits geringer sind.

5.3 Empfohlene Aufbauten für hochbelastete Verkehrsflächen

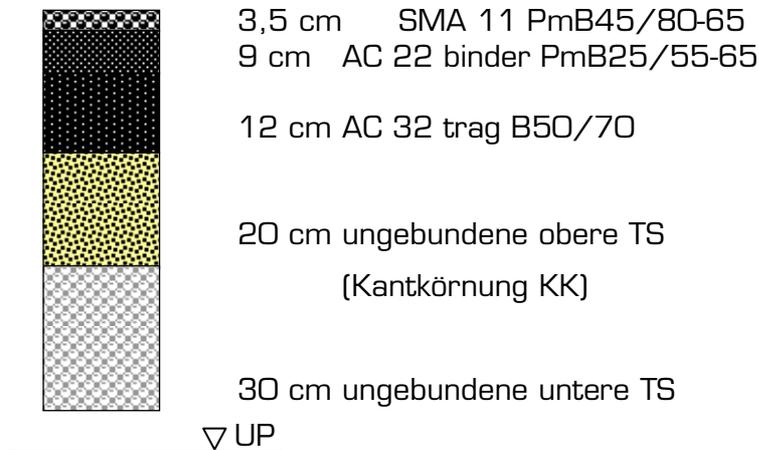
Gemäß den Untersuchungen und Erkenntnissen aus Kapitel 5.2 können folgende Aufbauten für den Einsatz als hochbelastete Verkehrsflächen empfohlen werden:

Die 6 untersuchten Aufbauten nach Tabelle 2 stellen den Ausgangspunkt der Untersuchung dar. Abbildung 64 stellt eindeutig dar, dass der Widerstand gegen bleibende Verformungen bei den Aufbauvarianten (b) unzureichend ist. Hierbei handelt es sich um die Deckschichtvariante AC 11.

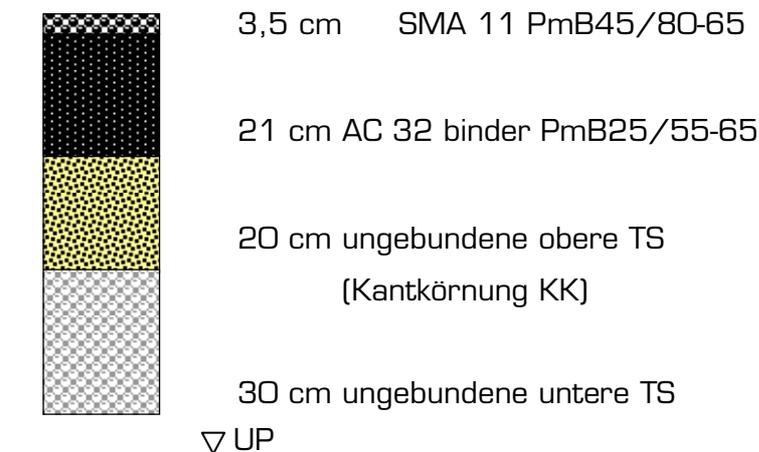
Die drei SMA 11 – Aufbauten stellten ein wesentlich besseres Verhalten dar (Abbildung 64). Die Varianten 2a und 3a können empfohlen werden.

Gemäß RVS 03.08.63 Oberbaubemessung können folgende Aufbauten für die Lastklassen S und I (Bautype 1) vorgeschlagen werden:

Lastklasse S, Bautype 1



Lastklasse I, Bautype 1



6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

6.1 Zusammenfassung

Im Zuge der Arbeit wurden bituminöse Mischgüter untersucht und für hoch belastete Bedingungen optimiert. Weiters erfolgte eine Ausarbeitung der konstruktiven Ausbildung für solche Verkehrsflächen.

Die Belastung des Straßenkörpers wurde durch die Einschränkung auf hohe Achslasten, niedrige Geschwindigkeiten und hohe Temperaturen festgelegt. Das Ziel der Mischgutoptimierung wurde durch die Anwendung bzw. Erweiterung der konventionellen Mischgutoptimierung mit den fundamentalen Ansätzen der gebrauchungsverhaltensorientierten Prüfmethode erreicht. Die GVO-Eignungsprüfungen eignen sich sehr gut, um die Anforderungen an das Mischgut formulieren und untersuchen zu können. Das umfassende Prüfprogramm (siehe dazu Tabelle 2) wurde an Triaxial-, Abkühl- und Steifigkeitsversuchen getestet. Weiters wurden nach konv. Methode die Raumdichte am Marshallkörper bestimmt und Versuche am Spurbildungstester durchgeführt. Die Berechnung der Spannungen und Verformungen wurden durch ein validiertes Mehrschichtenberechnungsmodell und einen Ansatz zur Abschätzung der plastischen Verformungen realisiert.

Die Belastungsgrößen wurden im ersten Schritt der Arbeit definiert und berechnet (Siehe Kapitel 2). Das Ergebnis der Mischgutoptimierung ist die Erkenntnis, dass zumindest bei der Optimierung der Binderschicht AC 22 binder der empirische (konventionelle) Ansatz nicht mit dem fundamentalen (GVO) Ansatz übereinstimmt. Im Bereich der Deckschicht erreichen beide Ansätze ähnliche Ergebnisse. Weiters zeigt sich, dass die Wahl des Gesteins bzw. der Gesteinskombination auf die Standfestigkeit des Mischgutes einen Einfluss hat. So variieren die Kriechraten und die optimalen Bindemittelgehalte der AC 22 binder Schicht, je nach Gesteinskombination (siehe Abbildung 34). Das Gestein hat weiters einen Einfluss auf das Tieftemperaturverhalten (siehe Abbildungen 38 und 39). Schließlich gilt es, durch die Spurrinnenprognosemodelle konstruktive Ausbildungsmöglichkeiten vorzuschlagen (Kapitel 5.3).

6.2 Ausblick

Im Zuge des laufenden Forschungsprojektes am CD-Labor sind mehrere Versuchsstrecken geplant. Die Industriepartner des Labors werden an ausgewählten, hoch belasteten Verkehrsstandorten Asphaltmischgute einbauen, welche auf Grund der durchgeführten Mischgutuntersuchungen optimiert sind.

Es kann sich dabei um Kreisverkehrsanlagen, Kreuzungsbereiche oder Busbuchten handeln. Jedenfalls soll der Standort vom Schwerverkehr stark frequentiert sein und die höchsten Belastungen vorherrschen (durch langsame Geschwindigkeiten, Stehzeiten, viele Anfahr- und Bremsvorgänge, hohe Temperaturen etc.)

Analog zu den gegenständlichen Schichtaufbau-Varianten mit Walzasphalten gilt es, die ausgewählten Konstruktionen mit Gussasphalten zu untersuchen.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- Blab, Ronald: Analytische Methoden zur Modellierung der Verformungseigenschaften flexibler Fahrbahnaufbauten, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien – Mitteilung Nr. 11, 2001
- Blab, Ronald und Eberhardsteiner, Josef: Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen, Tätigkeitsbericht des CD-Labors 2006 bis 2007 (Mitteilung 18), Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Wien 2007
- Blab, Ronald und Harvey, John T.: Modelling Measured 3D Tire Contact Stresses in a Viscoelastic FE Pavement Model, 2002
- Bosch, Robert: Kraftfahrtechnisches Handbuch, 22. Auflage 1995, Herausgeber: Bauer, Horst
- Francken, L. und Clauwaert, C.: Characterization and structural assessment of bound materials for flexible road structures. Proc. 6th Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, 1987.
- Goodyear GmbH & Co. KG: Reifenkatalog 2007, Produktdatenblätter www.goodyear.com
- Hauser, E.: Stiffness and fatigue behavior of asphalt mixtures used for flexible road pavements. Diplomarbeit am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, Wien, 2006.
- Hoepke, Erich: Nutzfahrzeugtechnik : Grundlagen, Systeme, Komponenten, 4. Auflage, 2006
- Kappl K.: Bewertung und Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten auf Grundlage von zyklisch dynamischen Triaxialprüfungen. Dissertation am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien, 2007.
- Numrich, Ralf: Modellierung des nichtlinear-elastischen Verformungsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel, Dissertation an der TU Dresden, 2003
- ÖNORM B 3580-1: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton - Empirischer Ansatz - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1, Österreichisches Normungsinstitut, 01.12.2006
- ÖNORM B 3580-2: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen Asphaltbeton – Fundamentaler Ansatz. Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1, Österreichisches Normungsinstitut, 01.12.2006
- ÖNORM B 3584 Splittmastixasphalt – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108- 5, Österreichisches Normungsinstitut, 01.12.2006
- ÖNORM B 3590: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt – Tieftemperaturverhalten, Österreichisches Normungsinstitut, 01.10.2007
- ÖNORM EN 13108-1: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton, Österreichisches Normungsinstitut, 01.08.2006
- ÖNORM EN 13108-5: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 5: Splittmastixasphalt, Österreichisches Normungsinstitut, 01.08.2006

- ÖNORM EN 12697-6: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern, Österreichisches Normungsinstitut, 01.12.2007
- ÖNORM EN 13108-20: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 20: Eindringversuch an Würfeln oder Marshall-Probekörpern, Österreichisches Normungsinstitut, 01.03.2004
- ÖNORM EN 12697-22: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 22: Spurbildungstest, Österreichisches Normungsinstitut, 01.12.2007
- ÖNORM EN 12697-24: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung, Österreichisches Normungsinstitut, 01.12.2007
- ÖNORM EN 12697-25: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 25: Druckschwellversuch, Österreichisches Normungsinstitut, 01.05.2006
- ÖNORM EN 12697-26: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit, Österreichisches Normungsinstitut, 01.10.2004
- ÖNORM EN 12697-30: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät, Österreichisches Normungsinstitut, 01.09.2004
- Reimpell, Jörnßen und Sponagel, Peter: Fahrwerktechnik – Reifen und Räder, 2. Auflage 1988
- RVS 03.05.14, RVS 3.44: FSV – Österreichische Forschungsgemeinschaft für Straße und Verkehr, Plangleiche Knoten – Kreisverkehr, 21.Mai 2001
- Spiegl, M.: Tieftemperaturverhalten von Asphalt – Prüftechnische Ansprache und numerische Simulation. Dissertation am Institut für Straßenbau- und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, Wien, 2007.
- Symplectic Engineering Corporation: LEAP Layered Elastic Linear Analysis Programm – Mehrschichtenberechnungsprogramm, 1998, <http://www.symplectic.com/>
- Wistuba, M. Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen: Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich. Dissertation, erschienen in Mitteilungen des Instituts für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Heft 15, Wien, 2003.

8. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

α	Anstieg der Kriechkurve (Kriechrate f_c) aus den triaxialen Druckschwellversuchen
Δl	Längenänderung [mm]
ϵ_{kl}	Verzerrung [-]
ϵ_p	Plastische Deformation [%]
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	Dehnungen in Hauptspannungsrichtung [-]
μ_x	Haftreibungsbeiwert in Längsrichtung [-]
μ_y	Haftreibungsbeiwert in Querrichtung [-]
μ_{max}	maximal erreichbarer Haftreibbeiwert [-]
ν	Querdehnungszahl [-]
ρ_A	Raumdicke des Marshall-Probekörpers [kg/m ³]
ρ_w	Dichte des Wassers bei +25 °C. $\rho_w = 997,1 \text{ kg/m}^3$.
σ_{ij}	Spannung [N/mm ²]
σ_D	Maßgebende Deviatorspannung [N/mm ²]
$\sigma_{D,i}$	Deviatorspannung, Orientierung i [N/mm ²]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen [N/mm ²]
τ_1, τ_2, τ_3	Hauptschubspannungen [N/mm ²]
AC deck	Asphaltbetondeckschicht
AC binder	hochbelastete Asphaltbetondeckschicht
AC trag	Asphaltbetontragschicht
b_{St}	Breite Sicherheitsstreifen [m]
b_R	Breite des Reifens [m]
b_{Fzg}	Breite des Fahrzeugs [m]
BB	Busbuchszenario
C_{ijkl}	Tensor zur Beschreibung der Elastizitätseigenschaften [N/mm ²]
CD-Labor	„Christian-Doppler-Labor für gebrauchungsverhaltenorientierte Optimierung flexibler Straßenbefestigungen“
D_A	Kreisverkehrsdurchmesser nach RVS [m]
DDH	Dünnschichtdecken aus Asphaltbeton
E^*	dynamischer E – Modul
F_R	Fliehkraft [N]
F_q, F_n	Kräfte in Straßenebene [kN]
F_y, F_z	Kräfte am Reifen [kN]
F_x, F_y, F_z	Kraftkomponenten in Richtung x-, y- und z-Achse [kN]
F_z	Topflast (=vertikale Kraftkomponente) [N]

GVO	Gebrauchsverhaltensorientiert
H_{bit}	Hohlraumgehalt [Volums-%]
KV1	Kreisverkehrszenario 1
l	Aktuelle Länge des Volumselements [mm]
l_0	Ausgangslänge des unverformten Volumselements [mm]
LD-Schlacke	Schlacke aus der Stahlherstellung nach dem Linz-Donawitz-Verfahren der VOEST-ALPINE STAHL AG
LD-KL	LD-Schlacke + „Klöcher“ (= Kersantit)
LD-LO	LD-Schlacke + „Loja“ (= Serpentin)
m	rotierende Masse [kg]
m_1	Trockenmasse [kg]
m_2	Masse unter Wasser, bei +25 °C [kg]
m_3	Masse des feuchten Probekörpers über Wasser [kg]
MA	Gussasphalt
M-%	Massenprozent
p	Reifenkontaktdruck = Reifeninnendruck [N/mm ²]
P_B	Bremskraft [kN]
PmB	Polymermodifiziertes Bindemittel
PRD _x	Proportionale Spurrinnentiefe [%]
r	Radius [m]
r_{TL}	Topflastradius [mm]
$R_{\text{Fr,max}}$	Maximal erreichbarer Radius [m]
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
SMA	Splittmastixasphalt
SSD	saturated surface dry
STF-4PB	Steifigkeitsversuch
TCCT	Triaxialprüfmaschine
TS	Tragschicht
TSRST	Tieftemperatur-Prüfgerät
U	Überbreiter Einzelreifen
v	Geschwindigkeit [m/s]
V_A	Volumen des verdichteten Asphalts [m ³]
WTT	Spurbildungstestgerät
ZW	Zwillingsreifen

9. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1 – AUFSTANDSFLÄCHE UND LASTKOMPONENTEN (HOEPKE, 2006)	6
ABBILDUNG 2 – DIAGONAL UND RADIALREIFEN (HOEPKE, 2006)	8
ABBILDUNG 3 – ZWILLINGSREIFEN UND ÜBERBREITER EINZELREIFEN	9
ABBILDUNG 4 – REIBUNGSZAHL IN ABHÄNGIGKEIT VOM SCHLUPF (REIMPELL, 1988).....	11
ABBILDUNG 5 – ERREICHBARE BREMSKRÄFTE F_B IN ABHÄNGIGKEIT DES SCHLUPFS λ (BOSCH, 1995).....	11
ABBILDUNG 6 – SEITENKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT VON SCHLUPF UND RADLAST (BOSCH, 1995)	12
ABBILDUNG 7 - KAMMSCHER KREIS.....	14
ABBILDUNG 8 – REIFENKENNFELD EINES PKW REIFENS 175/70 R 13 S 3 KN RADLAST (REIMPELL, 1988).....	15
ABBILDUNG 9 – HÖCHST ZULÄSSIGE GESAMTLASTEN LAUT RICHTLINIE 96/53/EWG.....	16
ABBILDUNG 10 – WIENER LINIEN BUS TYP NL243 M12 (WWW.FPDWL.AT, 2008)	16
ABBILDUNG 11 – MAN LIONS COACH (MAN AG, NUTZFAHRZEUGE, WWW.MAN-MN.COM, 2008)	17
ABBILDUNG 12 – LASTKRAFTWAGEN MIT KONVENTIONELLEM ANHÄNGER (WWW.RUEGGERHOLZ.CH, 2008).....	17
ABBILDUNG 13 - SATTELKRAFTFAHRZEUG: ZUGMASCHINE UND AUFLIEGER (WIKIPEDIA.ORG, 2008)	17
ABBILDUNG 14 – SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINZELREIFEN AUF MEHRSCICHTSYSTEM.....	18
ABBILDUNG 15 – ZWILLINGSREIFEN UND ÜBERBREITER EINZELREIFEN	19
ABBILDUNG 16 – PRINZIPDARSTELLUNG DER KREISVERKEHR- UND FLIEHKRAFTABMESSUNGEN	21
ABBILDUNG 17 – FLIEHKRÄFTE F_R BEI UNTERSCHIEDLICHEN GESCHWINDIGKEITEN UND RADIEN.....	22
ABBILDUNG 18 – SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KRÄFTEVERHÄLTNISSSE IN STRÄßENEBCNE	22
ABBILDUNG 19 – KRÄFTE IN DER STRÄßENEBCNE NACH LASTSZENARIEN BB, KV1 UND KV2	24
ABBILDUNG 20 - MAßGEBLICHE TAGESGANGLINIEN DER NORMALVERTEILTEN STUNDENWERTE DER LUFTTEMPERATUR FÜR EINEN HEIßEN SOMMERTAG	25
ABBILDUNG 21 - SIMULIERTE STÜNDLICHE TEMPERATURPROFILE IM ASPHALTPAKET FÜR DEN TEMPERATURFALL „HEIßER SOMMERTAG“ (VERTRAUENSGRENZE 95%).....	26
ABBILDUNG 22 – EINFLUSSGRÖßEN FÜR MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON TECHNISCHEM ASPHALTEN (BLAB, 2001).....	27
ABBILDUNG 23 – GRENZSIEBLINIE FÜR SMA11 NACH EMPIRISCHEM ANSATZ (ÖNORM B 3584)	29
ABBILDUNG 24 – SIEBLINIE FÜR AC 22 BINDER UND DARSTELLUNG DER GRENZSIEBDURCHGÄNGE NACH FUNDAMENTALEM ANSATZ (ÖNORM B 3580-2)	30
ABBILDUNG 25 – MARSHALLVERDICHTER ZUR HERSTELLUNG DER PROBEKÖRPER FÜR RAUMDICHTEBESIMMUNG ρ_A	35
ABBILDUNG 26 – ERGEBNISSE DER MARSHALLVERDICHTUNGEN UND OPTIMALER BINDEMITTELGEHALT FÜR SMA11 UND AC22	37
ABBILDUNG 27 - SYSTEMSKIZZE EINES SPURBILDUNGSTESTERS	37
ABBILDUNG 28 - SPURBILDUNGSTESTGERÄT DES CD-LABORS.....	38

ABBILDUNG 29 – PROPORTIONALE SPURRINNENTIEFE PRD NACH 10000 ÜBERROLLUNGEN SMA 11 PMB 45/80-65 BEI 60 °C.....	39
ABBILDUNG 30 – ERGEBNISSE DES SPURBILDUNGSTEST FÜR SMA11 UND AC22	39
ABBILDUNG 31 - PRINZIPIKIZZE EINES TRIAXIALPRÜFGERÄTS MIT WESENTLICHEN BESTANDTEILEN	41
ABBILDUNG 32 – KRIECHIMPULSKURVEN FÜR AC 22 BINDER MIT PMB45/80-65 BEI DREI UNTERSCHIEDLICHEN BINDEMittelGEHALTEN	41
ABBILDUNG 33 – KRIECHRATEN FÜR AC 22 BINDER UND SMA 11 BEI UNTERSCHIEDLICHEN BINDEMittelGEHALTEN.....	42
ABBILDUNG 34 – KRIECHRATEN F_c FÜR AC22 BINDERSCHICHTEN MIT VERSCHIEDENEN GESTEINSKOMBINATIONEN.....	43
ABBILDUNG 35 ZEIGT DIE VERWENDETE PRÜFEINRICHTUNG DES CD-LABORS, BESTEHEND AUS EINEM BIEGESTEIFEN RAHMEN UND EINER KONTROLLEINRICHTUNG ZUR MESSUNG DER KRAFT UND/ODER DER VERSCHIEBUNG. BEIM PROBENEINBAU IST AUF EINE EINAXIALE UND MOMENTENFREIE FIXIERUNG ZU ACHTEN.....	43
ABBILDUNG 36 - ABKÜHLVERSUCHSEINRICHTUNG, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	44
ABBILDUNG 37 - PRÜFABLAUF DES ABKÜHLVERSUCHS TSRST (SPIEGL, 2007).....	44
ABBILDUNG 38 – ERGEBNISSE DES ABKÜHLVERSUCHS: BRUCHSPANNUNG σ_{cy} IN ABHÄNGIGKEIT VOM BINDEMittelGEHALT FÜR DIE DECK-, BINDER- UND TRAGSCHICHTEN	46
ABBILDUNG 39 – ERGEBNISSE DES ABKÜHLVERSUCHS: BRUCHTEMPERATUR T_c [°C] IN ABHÄNGIGKEIT VOM BINDEMittelGEHALT FÜR DIE DECK-, BINDER- UND TRAGSCHICHTEN	46
ABBILDUNG 40 - PRINZIPDARSTELLUNG UND FOTO DES VIERPUNKTBIEGEBALKENS	47
ABBILDUNG 41 – ISOCHRONENDARSTELLUNG FÜR DAS MISCHGUT AC 22 BINDER PMB25/55-65.....	48
ABBILDUNG 42 – ERGEBNISSE DER STEIFIGKEITSUNTERSUCHUNGEN AM 4-PUNKT BIEGEBALKEN FÜR DIE DECK-, BINDER- UND TRAGSCHICHTEN (MASTER CURVE)	49
ABBILDUNG 43 – KOMPLEXER E-MODUL E^* FÜR DECK UND BINDERSCHICHTEN IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR T	49
ABBILDUNG 44 – GEGENÜBERSTELLUNG EMPIRISCHER UND FUNDAMENTALER ANSATZ DER MISCHGUTOPTIMIERUNG (BINDEMittelGEHALT).....	51
ABBILDUNG 45 – TEMPERATURABHÄNGIGES VERHALTEN VON BITUMINÖSEN FAHRBAHNBEFESTIGUNGEN (BLAB, 2001)	52
ABBILDUNG 46 – PRINZIPDARSTELLUNG DES MAXWELL-MODELLS ZUR BESCHREIBUNG VON KOMPLEXEM MATERIALVERHALTEN DURCH FEDER-DÄMPFER-SCHALTUNG (ISTU, 2006)	54
ABBILDUNG 47 – IN.TXT EIN TYPISCHES LEAP INPUTFILE.....	55
ABBILDUNG 48 – E-MODUL ALS FUNKTION DER TEMPERATUR (AC 22 BINDER UND SMA11).....	56
ABBILDUNG 49 – DARSTELLUNG DER TEMPERATUREN UND E-MODULI IM STRAßENKÖRPER	57
ABBILDUNG 51 – BEISPIELDARSTELLUNG FÜR EINEN ERRECHNETEN SPANNUNGSVERLAUF IM STRAßENKÖRPER	58
ABBILDUNG 52 – BEISPIELDARSTELLUNG FÜR ERRECHNETE HAUPTSPANNUNGEN UND HAUPTSCHUBSPANNUNGEN IM STRAßENKÖRPER.....	59
ABBILDUNG 65 - DARSTELLUNG DER SPANNUNGEN FÜR DAS REFERENZSZENARIO	60
ABBILDUNG 53 – VERTIKALE ELASTISCHE VERSCHIEBUNGEN UNTER ZWILLINGSREIFEN (KV1).....	62
ABBILDUNG 54 – E-MODUL IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR FÜR SMA 11 PMB45/80- 65	64
ABBILDUNG 55 – E-MODUL IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR FÜR AC 11 PMB45/80-65	64
ABBILDUNG 56 – SPANNUNGEN σ_{xx} , σ_{yy} UND σ_{zz} FÜR KV1_ZW_1A.....	67

ABBILDUNG 57 – HYDROSTATISCHER DRUCK σ_{HYD} FÜR KV1_ZW_1A.....	67
ABBILDUNG 58 – SPANNUNGSDEVIATOREN UND PLASTISCHE DEHNUNGEN FÜR KV1_ZW_1A	68
ABBILDUNG 59 - PLASTISCHE DEHNUNGEN FÜR KV1_ZW_1A IM QUERSCHNITT YZ.....	69
ABBILDUNG 60 – SPANNUNGEN σ_{xx} , σ_{yy} UND σ_{zz} FÜR KV1_U_1A.....	70
ABBILDUNG 61 – HYDROSTATISCHER DRUCK σ_{HYD} FÜR KV1_U_1A	70
ABBILDUNG 62 – SPANNUNGSDEVIATOREN UND PLASTISCHE DEHNUNGEN FÜR KV1_U_1A	71
ABBILDUNG 63 - PLASTISCHE DEHNUNGEN FÜR KV1_U_1A IM QUERSCHNITT YZ.....	71
ABBILDUNG 64 – RECHNERISCHE SPURRINNENTIEFE [M] ALS FUNKTION DER LASTWECHSEL BEI 3 HZ.....	72

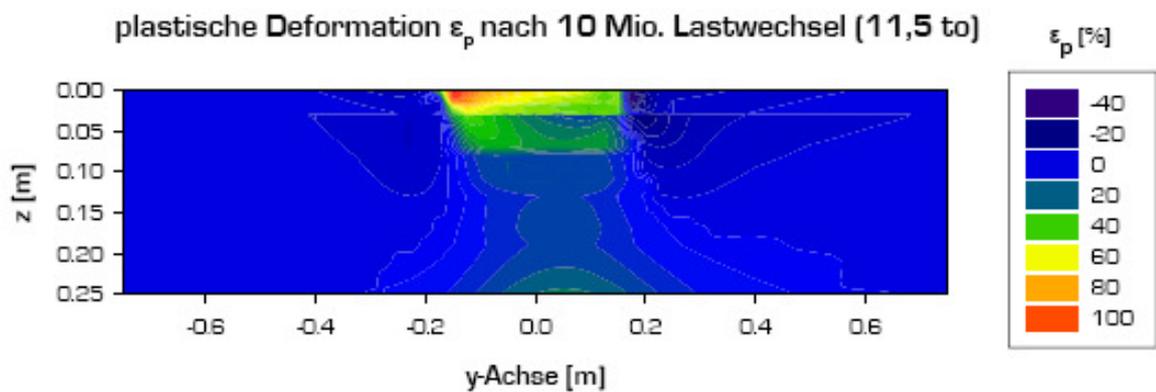
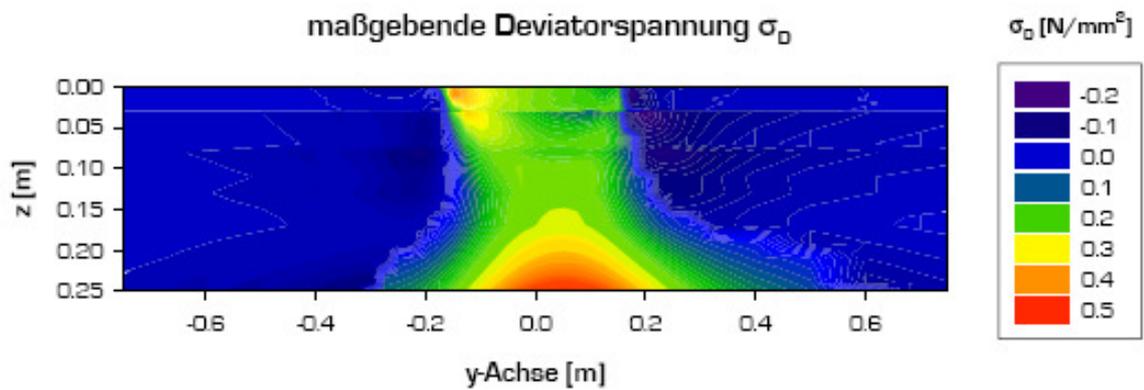
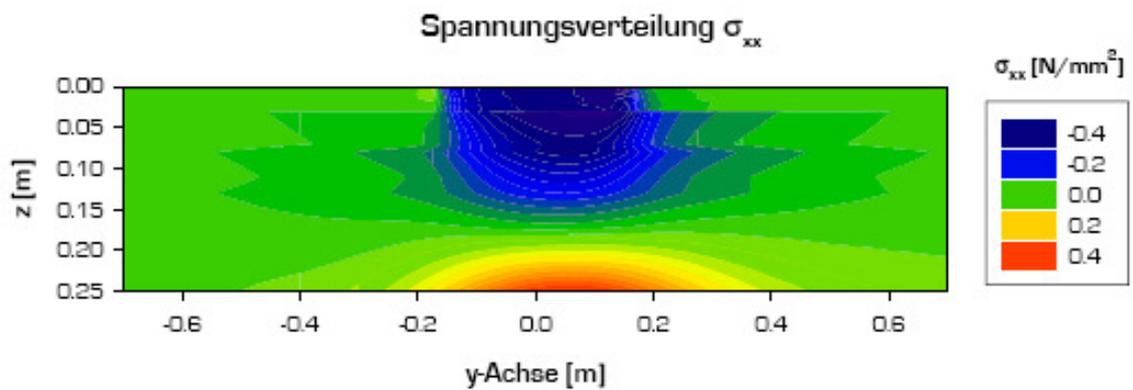
10. TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1: RADLASTEN UND MÖGLICHE SEITENKRÄFTE	13
TABELLE 2 – OBERBAUVARIANTEN FÜR SMA UND AC AUFBAUTEN.....	33
TABELLE 3 - PRÜFPROGRAMMÜBERSICHT	34
TABELLE 4: ERGEBNISSE DER ABKÜHLVERSUCHE FÜR DIE UNTERSUCHTEN MISCHGÜTER.....	45
TABELLE 5 – ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	50
TABELLE 6 : E-MODULI DER DECKSCHICHTEN SMA 11 UND AC 11 BEI 3 HZ.....	65
TABELLE 7 : E-MODULI DER BINDERSCHICHTEN AC22 PMB25/55-65, AC32 B50/70 UND AC32 PMB25/55-65.....	65

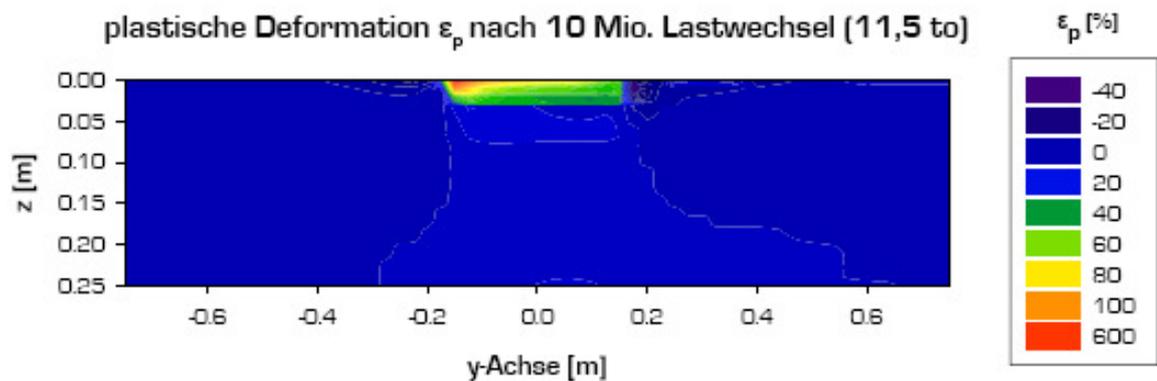
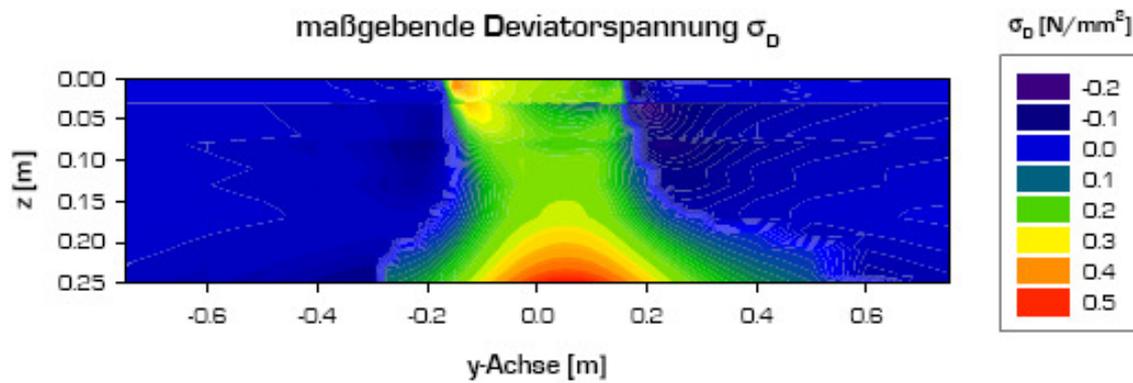
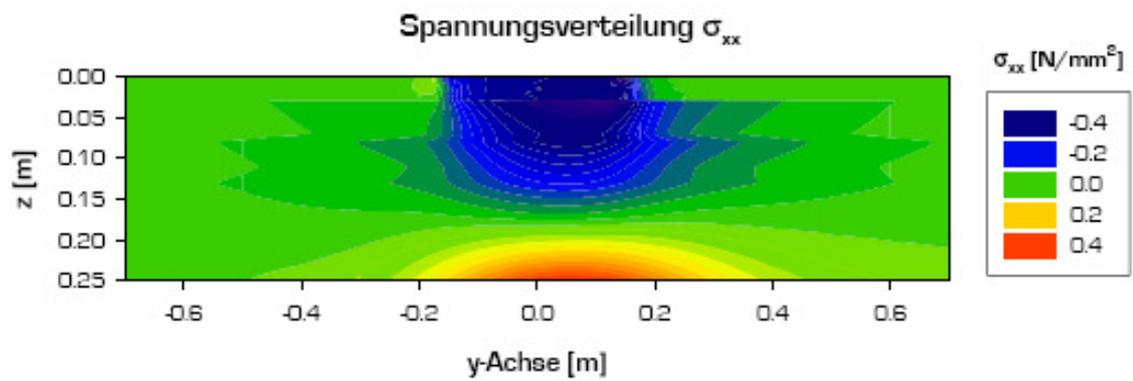
ANHANG

ANHANG A: SPANNUNGEN UND DEFORMATIONEN

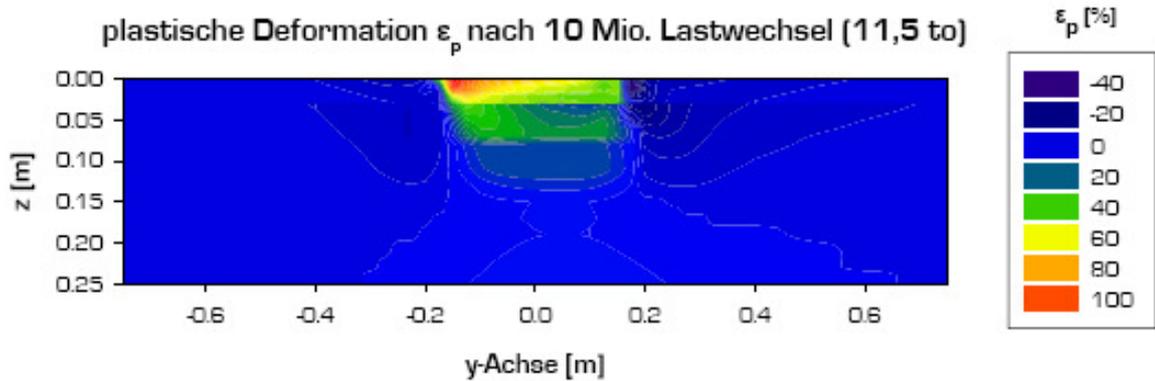
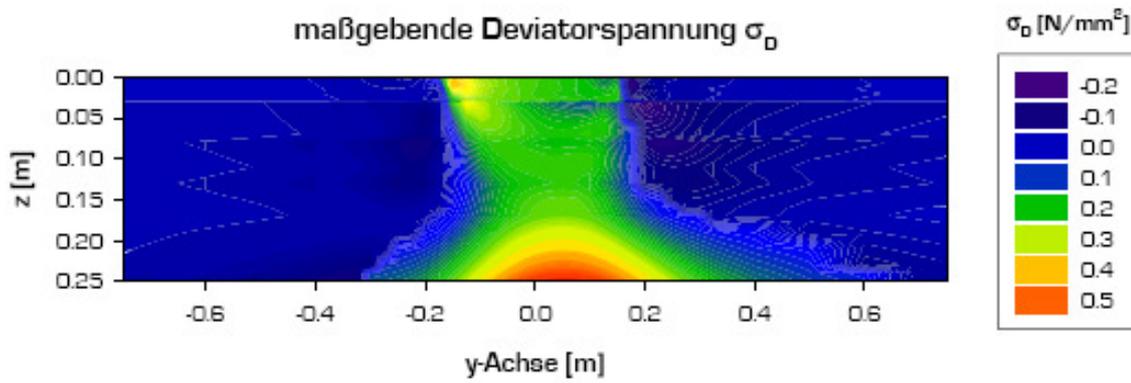
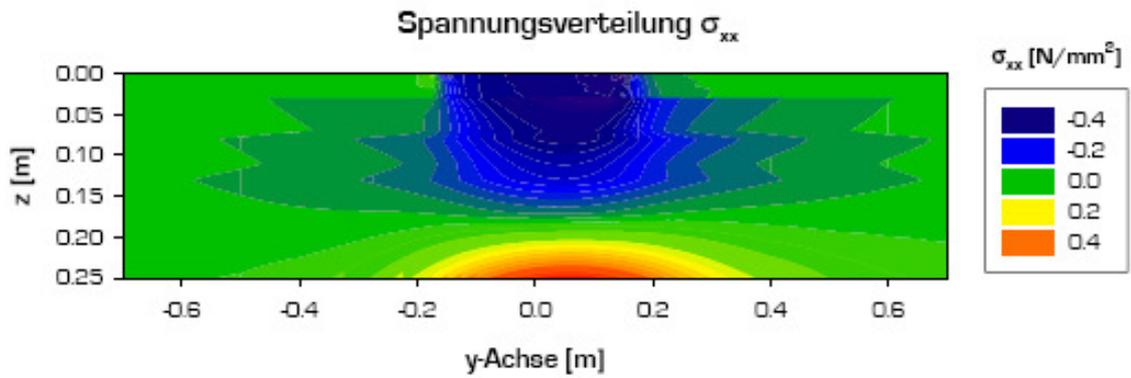
Variante 1a - Überbreiter Reifen



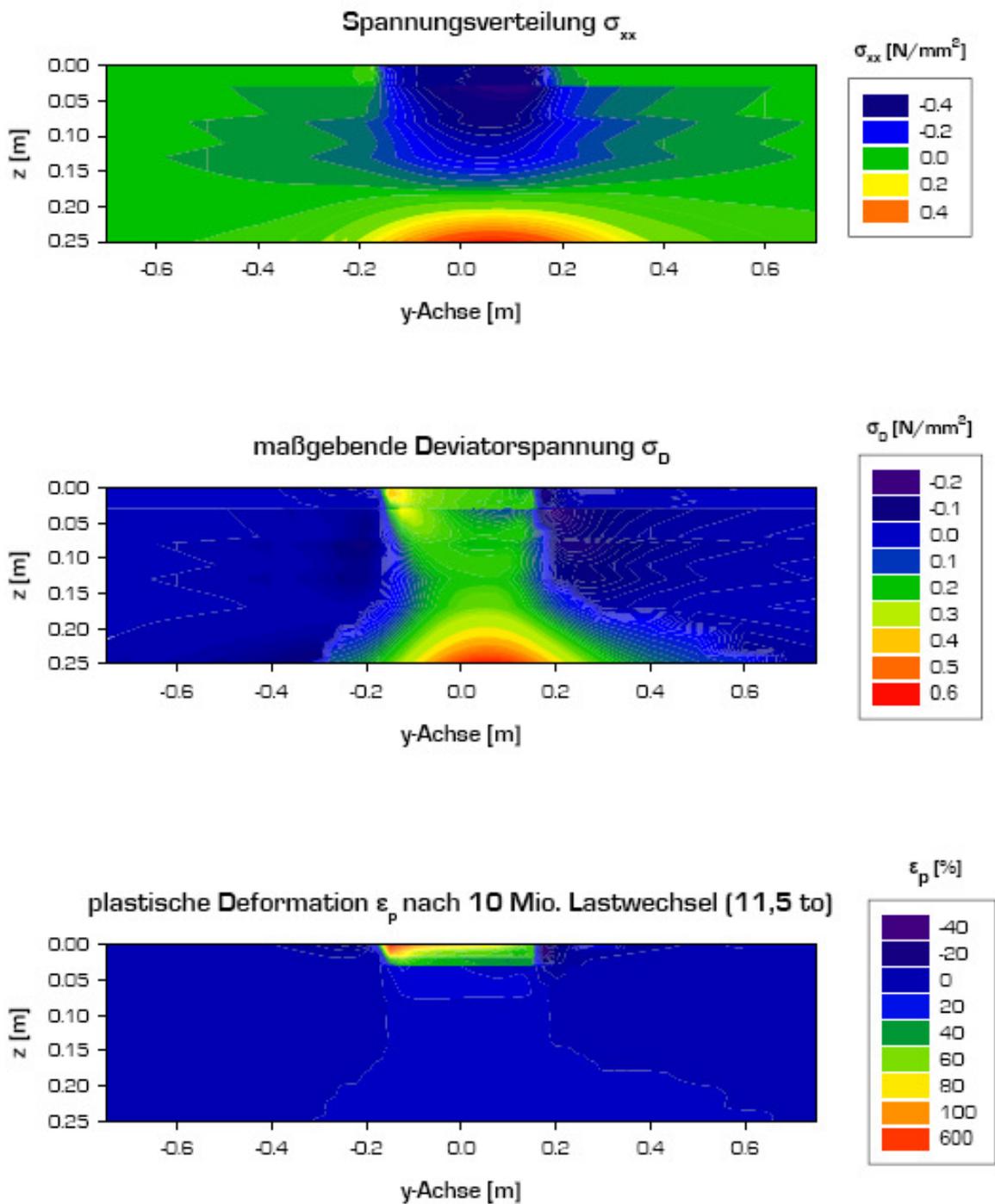
Variante 1b - Überbreiter Reifen



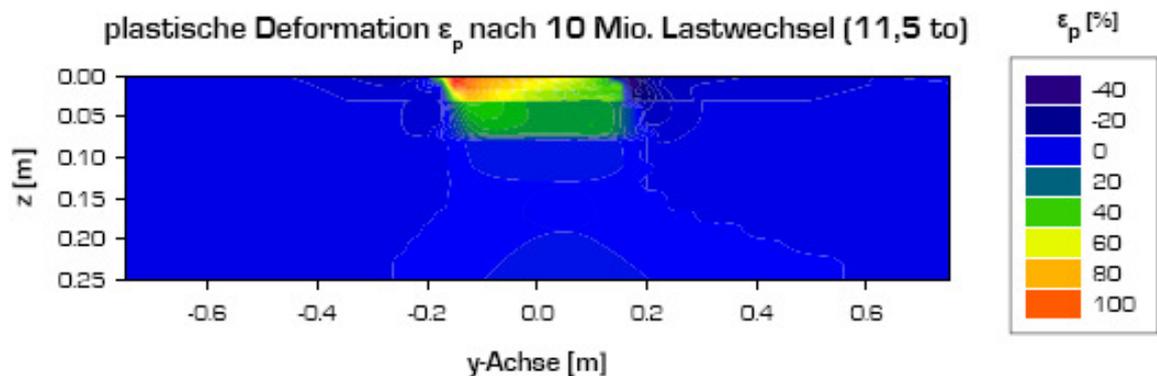
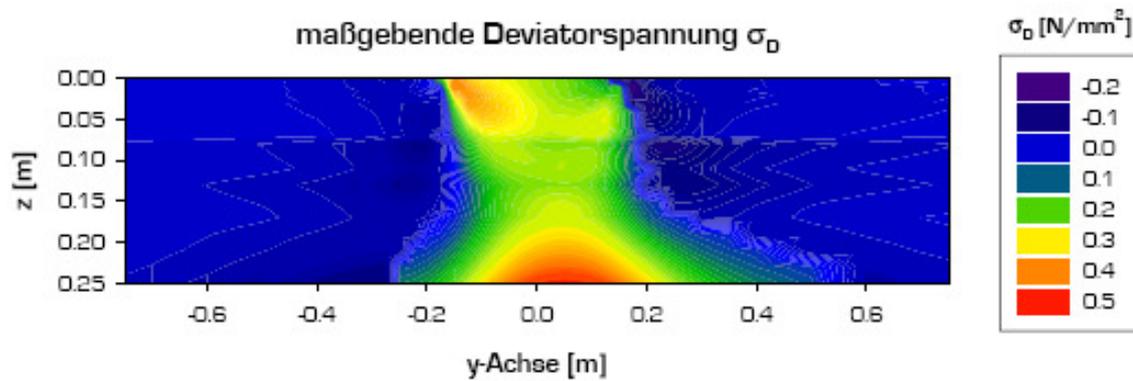
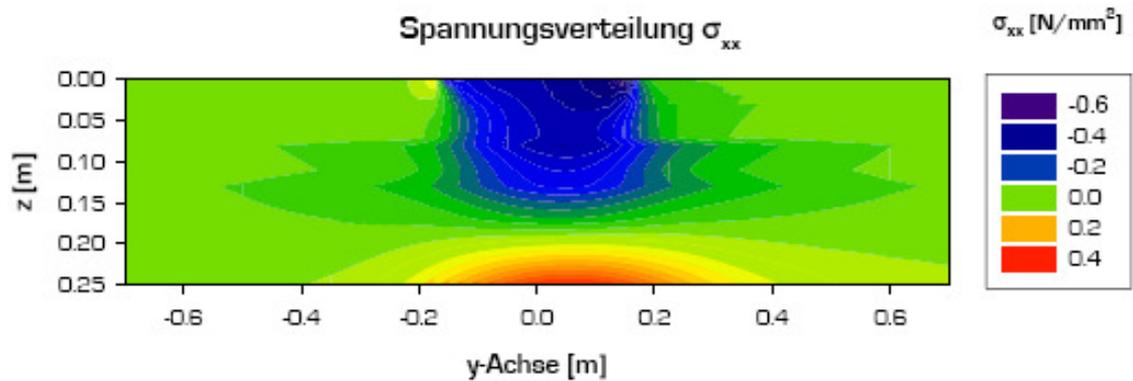
Variante 2a - Überbreiter Reifen



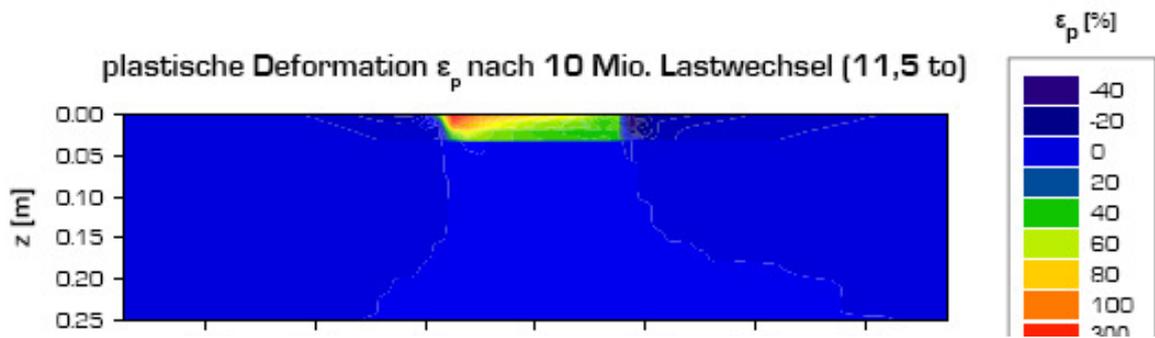
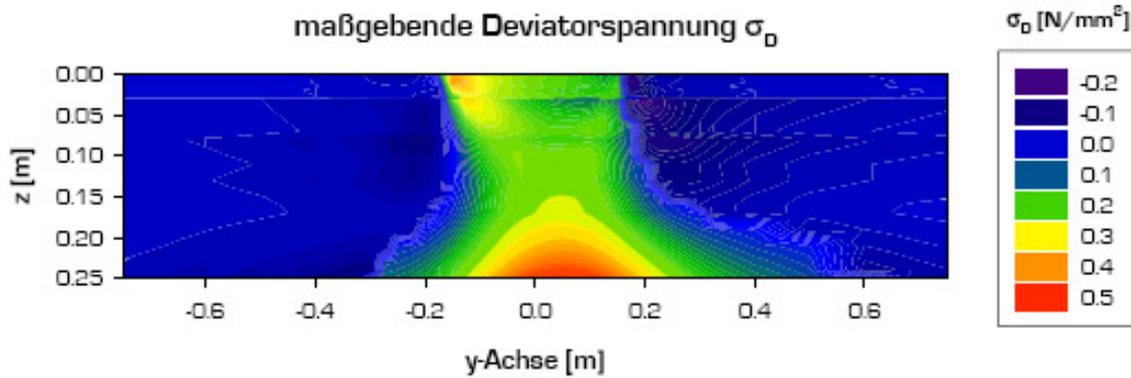
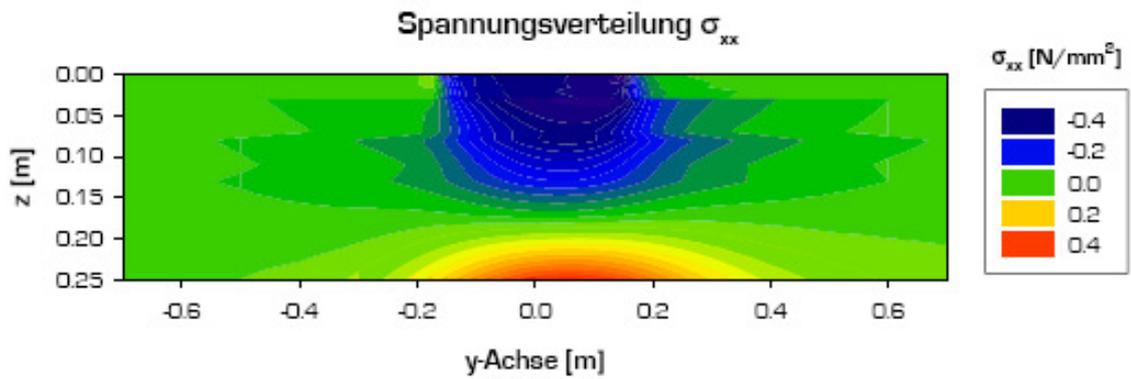
Variante 2b - Überbreiter Reifen



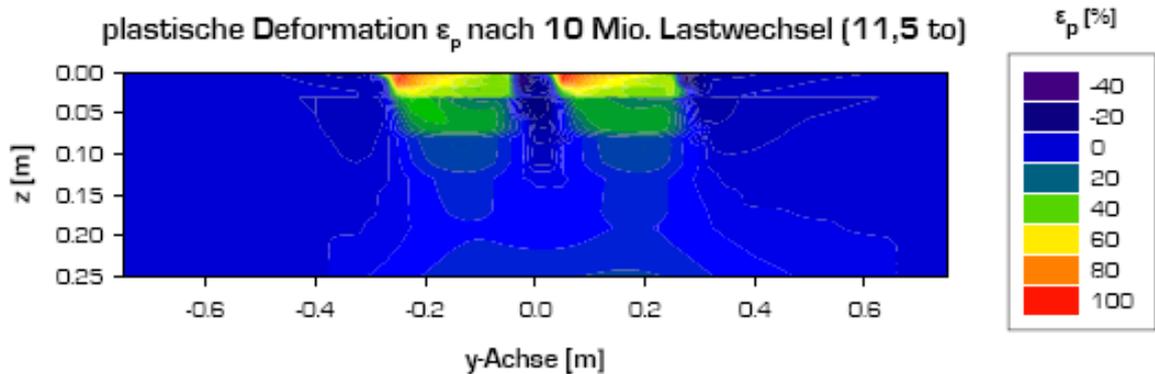
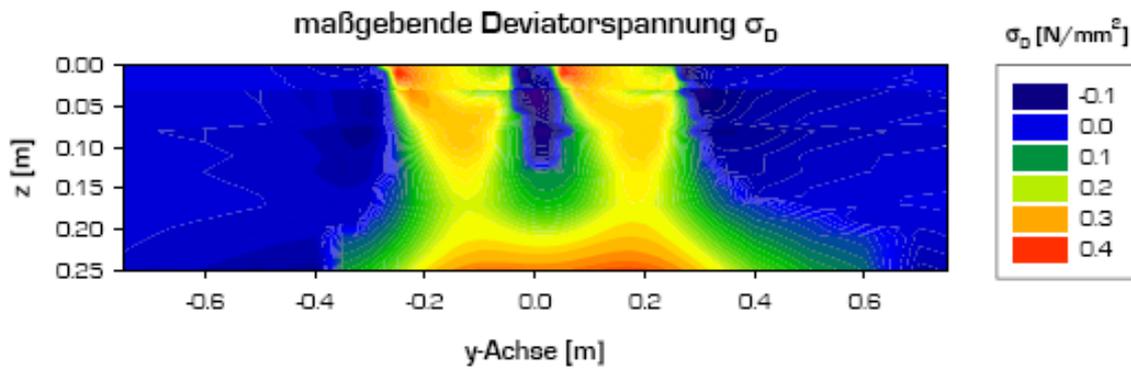
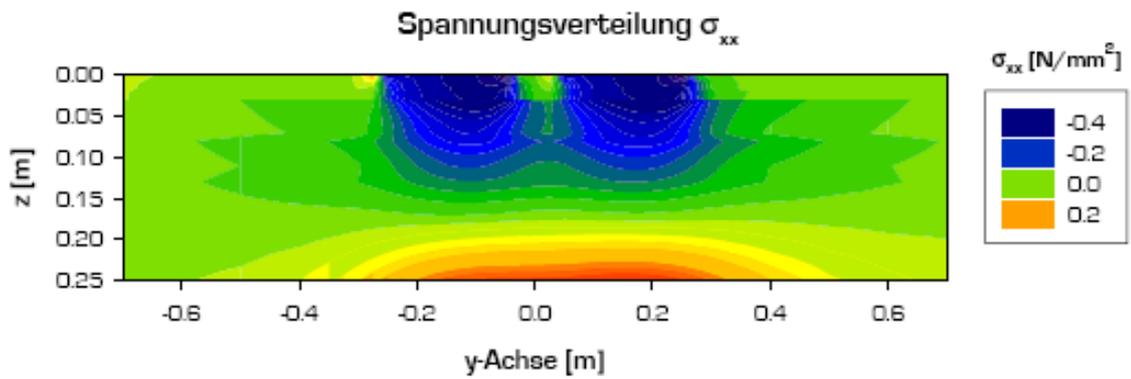
Variante 3a - Überbreiter Reifen



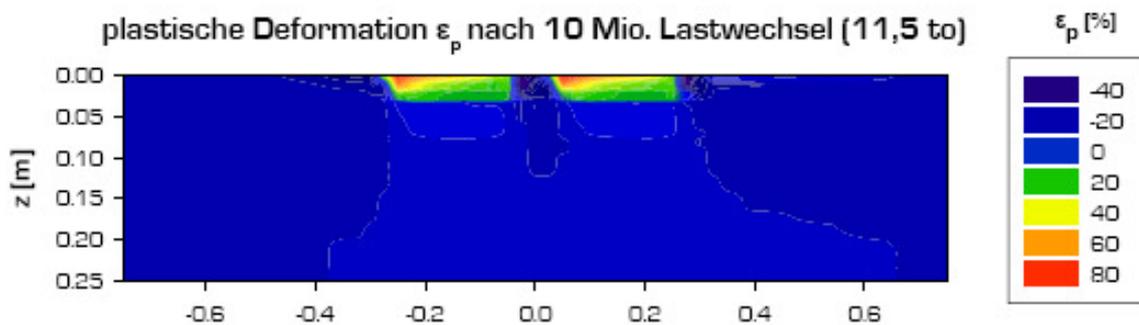
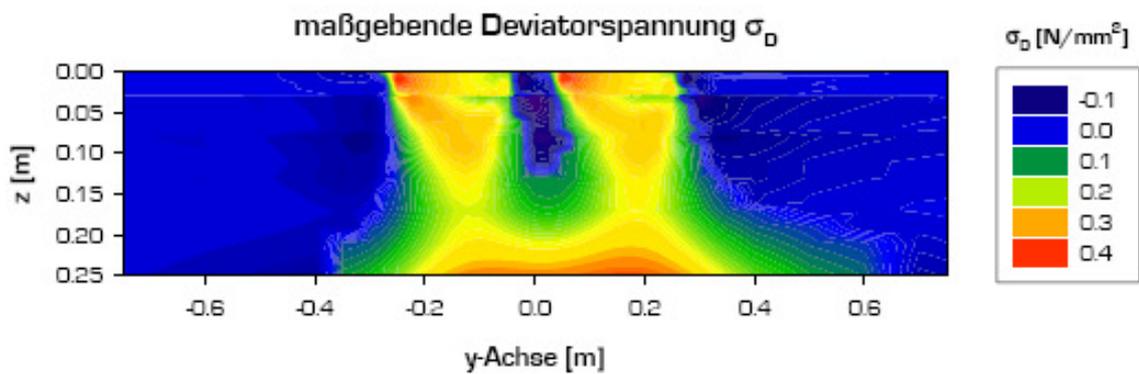
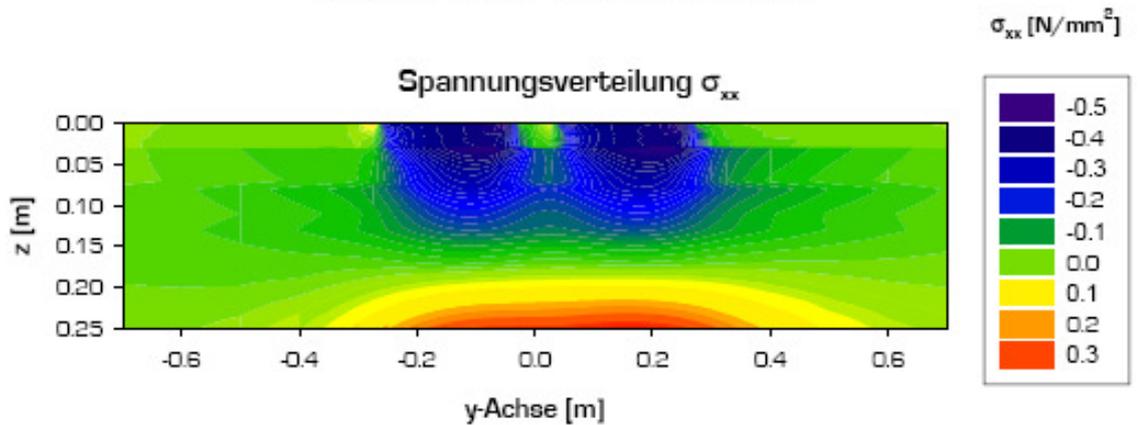
Variante 3b - Überbreiter Reifen



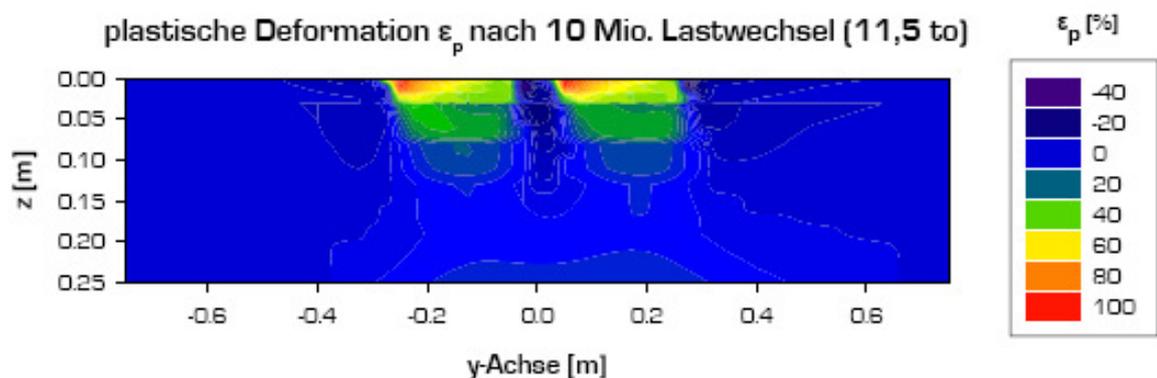
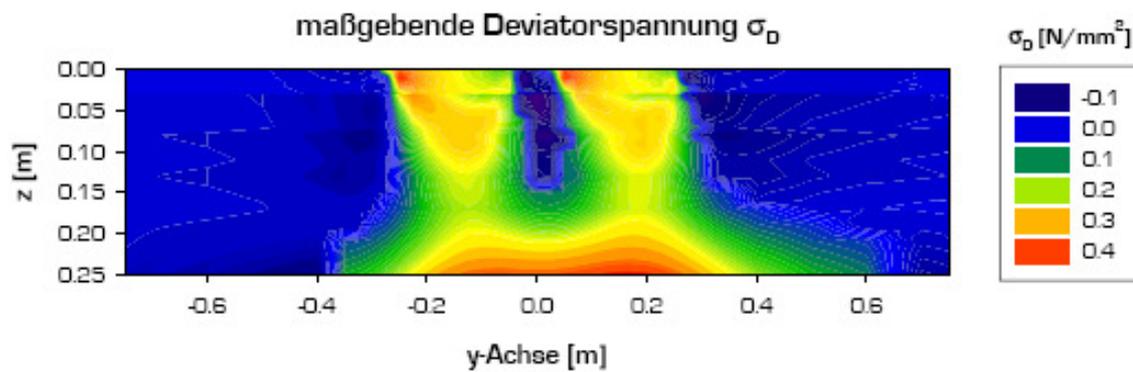
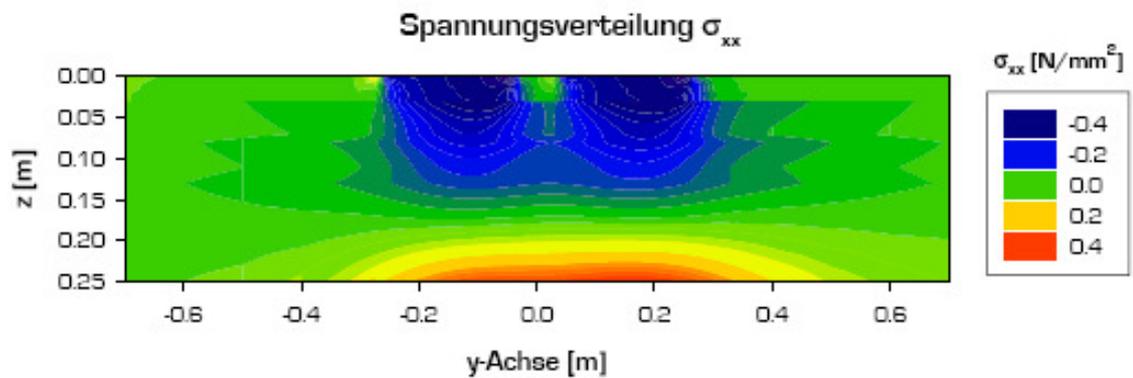
Variante 1a - Zwillingsreifen



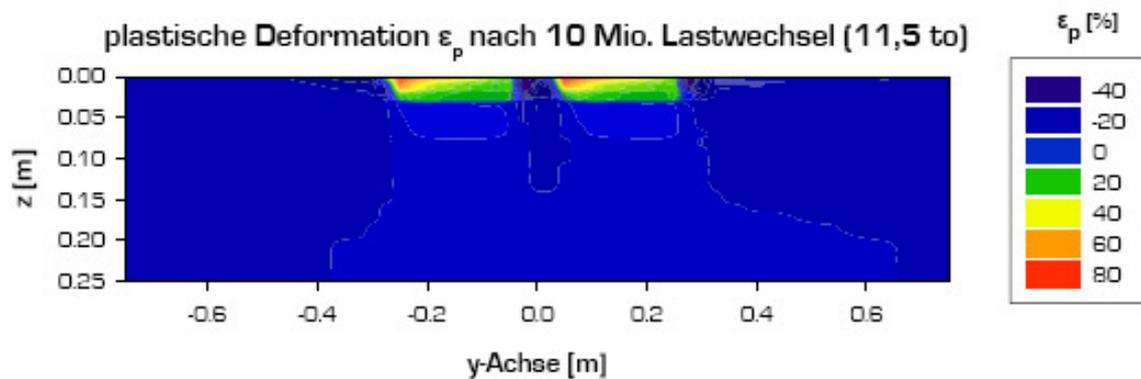
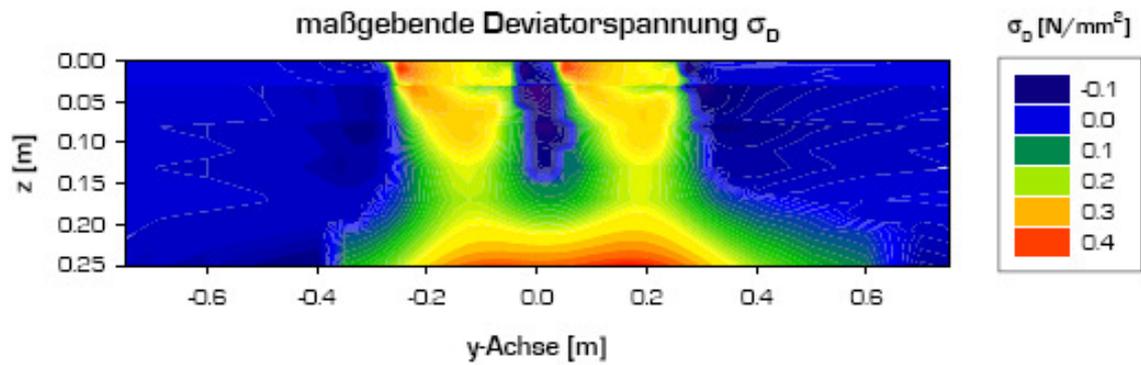
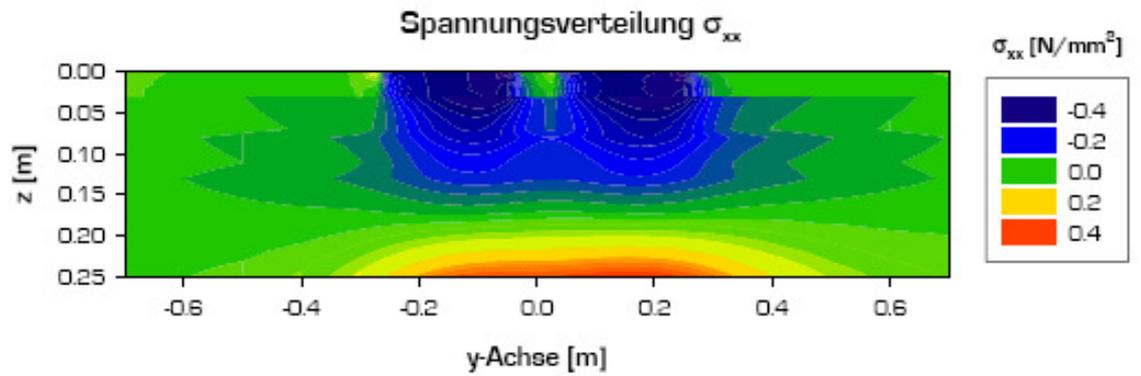
Variante 1b - Zwillingsreifen



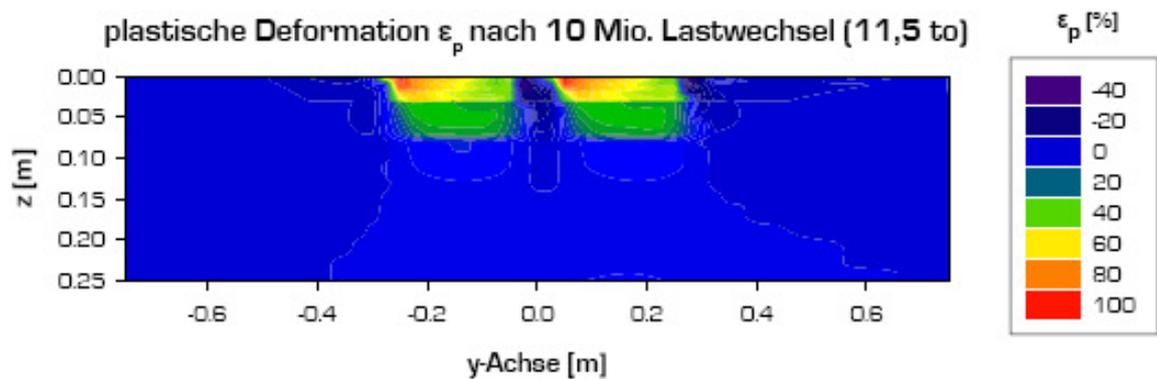
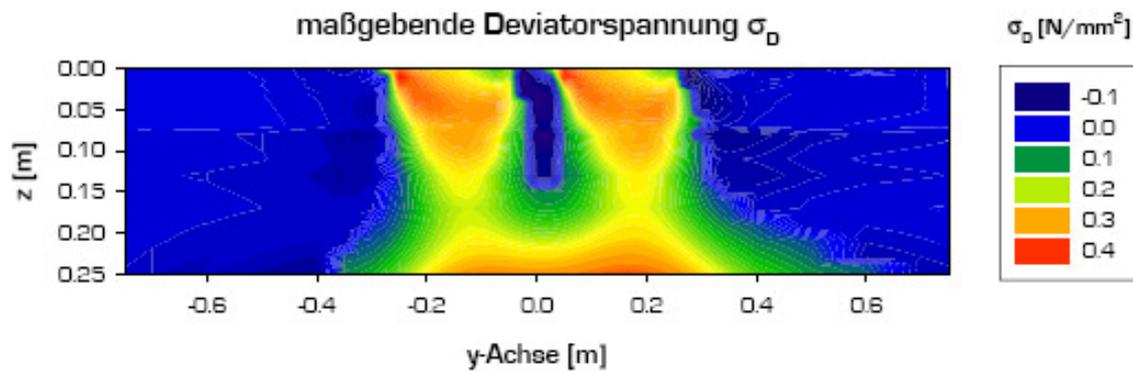
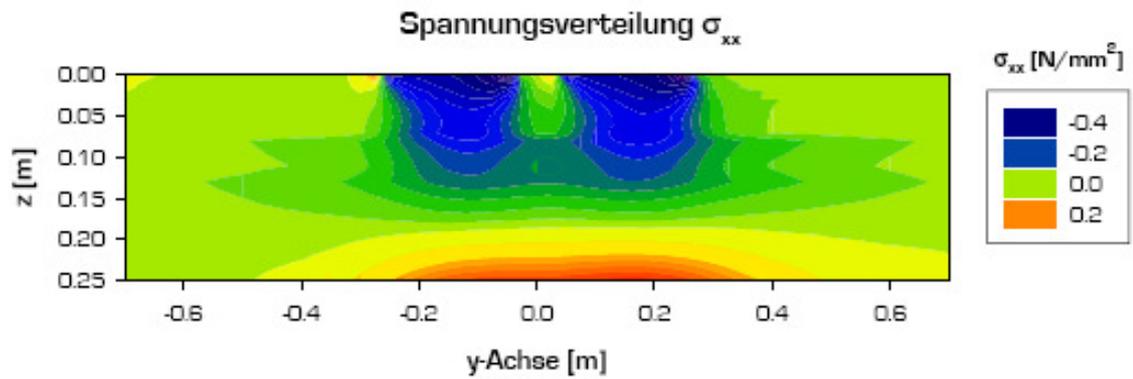
Variante 2a - Zwillingsreifen



Variante 2b - Zwillingsreifen



Variante 3a - Zwillingsreifen



Variante 3b - Zwillingsreifen

