



**BAM**

Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Susanne Steinborn

**Analyse von Verformung  
und Rißbildung bei  
Straßenbelägen durch  
Finite-Elemente-Methoden**

**218**

**Forschungsbericht**





Die Aufgaben der BAM stehen unter der Leitlinie:

## ***Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik***

Die BAM hat gemäß ihrem Gründungserlaß die Zweckbestimmung, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern. Sie ist im Aufgabenverbund „Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich;
- Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten;
- Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie;
- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und -verfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik;
- Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung bzw. -vermeidung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

### **Die Tätigkeitsbereiche**

Das Tätigkeitsspektrum der BAM umfaßt die sich ergänzenden und aufeinander bezogenen Tätigkeiten:

- > Forschung und Entwicklung
- > Prüfung, Analyse und Zulassung
- > Beratung und Information.

### **Die nationale und internationale Zusammenarbeit**

Die Aufgaben der BAM für Technik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die Bundesanstalt mit Technologieinstitutionen des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstitutionen, eng zusammen. Sie berät Bundesministerien, Wirtschaftsverbände, Industrieunternehmen sowie Verbraucherorganisationen und unterstützt mit Fachgutachten Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Daneben ist sie in die internationale technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich „Meßwesen – Normung – Prüftechnik – Qualitätssicherung“ (MN PQ) als nationale Institution für die Prüftechnik zuständig. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik in nationalen und supranationalen Einrichtungen.

### **Der Status**

Die BAM ist als technisch-wissenschaftliche Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft Nachfolgeinstitution des 1870 gegründeten Staatlichen Materialprüfungsamtes sowie der 1920 gebildeten Chemisch-Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie hat dementsprechend die Funktion einer materialtechnischen und chemisch-technischen Bundesanstalt. In ihr sind etwa 1700 Mitarbeiter, darunter mehr als 800 Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Stammgelände in Berlin-Lichterfelde sowie auf den Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und Berlin-Adlershof tätig.

Susanne Steinborn

**Analyse von Verformung  
und Rißbildung bei  
Straßenbelägen durch  
Finite-Elemente-Methoden**

**Projektdokumentation**

**Forschungsbericht 218**

Berlin, 1997

Herausgegeben von

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
Postanschrift: 12200 Berlin  
Telefon (030) 81 04-0  
Telefax (030) 811 20 29

Copyright © 1997 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Herstellung und Verlag:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Bürgermeister-Smidt-Str. 74 - 76,  
D-27568 Bremerhaven,  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon (0471) 9 45 44-0  
Telefax (0471) 9 45 44 77

Umschlaggestaltung: Lutz Mittenzwei

ISSN 0938-5533  
ISBN 3-89429-776-X



## **Zusammenfassung**

Im Zusammenhang mit praktischen Untersuchungen zur Schadensanalyse bei Fahrbahnbelägen werden FE-Rechnungen durchgeführt. Es werden Modellannahmen formuliert und das Modell einer Straße entwickelt. Verschiedene Modellvarianten werden erstellt und miteinander verglichen. Anhand dieser Ergebnisse kann das am besten geeignete Modell ausgewählt werden. Mit diesem Modell werden die Parameterstudien durchgeführt und der Einfluß der unterschiedlichen Parameter auf die Dehnungen und Spannungen untersucht. Das entwickelte Modell kann als Grundlage für weitergehende Untersuchungen genutzt werden.

## **Abstract**

Finite element studies are carried out in relation with practical investigations for analysing the causes of damages in road surfaces. Assumptions are formulated and a model of the road surface layers is developed. Many variants of the model are analysed numerically with the software package ANSYS and compared. The most useful model is chosen to carry out parameter studies and to investigate the influence of different parameters on strain and stress. The usefulness of the model as a basis for further investigations has been proved.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problemstellung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Modellannahmen</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Theoretische Betrachtungen</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Mathematische Modellbildung</b>	<b>8</b>
4.1	Modell 1 - Volumenelemente mit trilinearem Ansatz	8
4.2	Modell 2 - Volumenelemente mit quadratischem Ansatz	8
4.3	Modell 3 - Flächenelemente im radialsymmetrischen Modell	9
4.4	Modell 4 - Flächenelemente im radialsymmetrischen Modell mit quadratischem Ansatz	9
4.5	Modell 5 - Flächenelemente im radialsymmetrischen Modell mit verfeinertem Gitter	9
4.6	Modell 6 - Flächenelemente im radialsymmetrischen Modell mit quadratischem Ansatz und verfeinertem Gitter	9
<b>5</b>	<b>Randbedingungen</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>10</b>
6.1	Verwendung unterschiedlicher Elementtypen und Netze	10
6.2	Verifizierung der Simulationsergebnisse	10
<b>7</b>	<b>Genauigkeit der Ergebnisse</b>	<b>10</b>
<b>8</b>	<b>Parameterstudien</b>	<b>11</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>12</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>13</b>
	<b>Grafische Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>14</b>
	<b>ANSYS-Projektdateien</b>	<b>30</b>
	<b>C-Programm für Kontrollrechnungen</b>	<b>37</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>40</b>

*Ich danke ganz besonders Herrn Dipl.-Phys. Norbert Mayer, BAM, Laboratorium S.12, für die Anregung zu diesen Arbeiten, die Bereitstellung der Daten und für die fachlichen Diskussionen.*





# 1 Problemstellung

Defekte Straßenbeläge werden nicht nur von Autofahrern als störend empfunden, sondern sie belasten auch ganz erheblich die öffentlichen Kassen. Im Rahmen einer durch den Berliner Senat veranlaßten Untersuchung zur Schadensanalyse werden an der BAM sowohl praktische Untersuchungen als auch Berechnungen an Fahrbahnbelägen durchgeführt.

Verantwortlich für das Entstehen von Schäden in den Straßenbelägen sind in erster Linie Rißbildungen und das nachfolgende Eindringen von Feuchtigkeit. Die Rißbildungen werden verursacht durch Dehnungen und Spannungen, die aufgrund von Lasteinwirkungen in den einzelnen Schichten einer Straße auftreten. Um ein besseres Verständnis der Vorgänge zu erhalten, sind die Dehnungs- und Spannungsverteilungen in den einzelnen Schichten der Straße zu ermitteln.

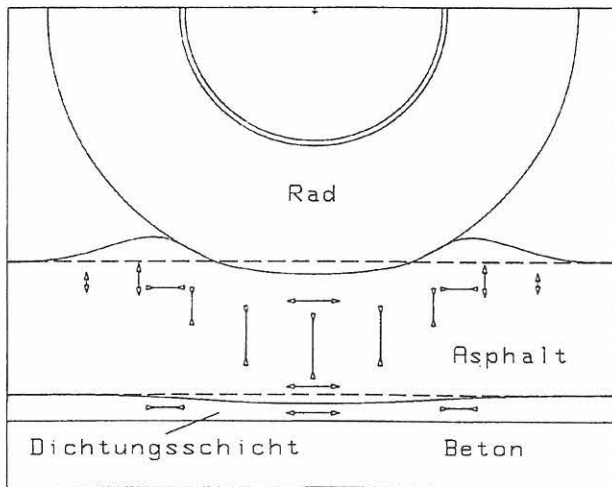


Abb. 1: Problemskizze  
(Ich danke Herrn N. Mayer für das Überlassen dieser Grafik)

Dazu wird eine Parameterstudie auf der Basis von FE-Analysen vorgestellt. Es wird das Modell einer Straße erstellt und für unterschiedliche Schichtdicken, sowohl von Asphalt als auch von Polyurethan, für verschiedene Lasten und für unterschiedliche Materialkennwerte berechnet. Die Berücksichtigung verschiedener Materialkennwerte ist notwendig, um das unterschiedliche Materialverhalten der beiden Schichten, insbesondere in Abhängigkeit von der Temperatur, zu modellieren.

Tabelle 1: Materialdaten, Abmessungen

	Asphalt	Polyurethan	
E-Modul	1000, 6000	25	MPa
Poisson-Zahl	0,35	0,45	
Dicke	70, 120	3, 5	mm

# 2 Modellannahme

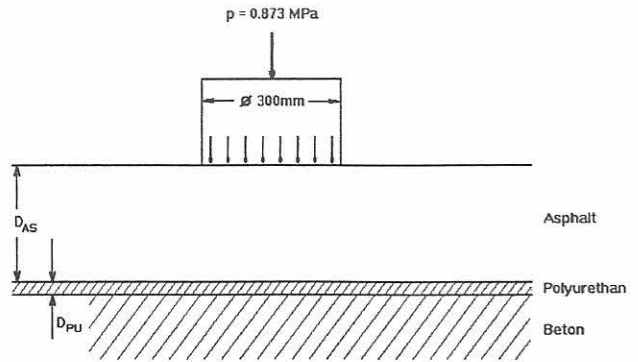


Abb. 2: Modellskizze

Die Straße besteht aus den Schichten

- Asphalt
- Haftvermittler
- Polyurethan
- Epoxidharz
- Beton.

Von diesen Schichten gehen in das gewählte Modell nur zwei direkt ein, Asphalt und Polyurethan. Da insbesondere die auftretenden Spannungen und Dehnungen untersucht werden sollen, die ja für eine Rißbildung verantwortlich sind, werden hier die Epoxidharzschicht und der Haftvermittler vernachlässigt. Sie sind so dünn, daß sie praktisch ohne Einfluß auf Verschiebungen sind.

Der Beton, als unterste Schicht, findet sich in den Randbedingungen wieder. Die Betonschicht wird als absolut fest angenommen und verhindert ein Durchbiegen der oberen Schichten.

Zur Modellierung der Belastung, die ein Reifen auf die Straße ausübt, wird ein Druck auf eine kreisförmige Fläche aufgebracht. Rechnungen, die von einer Punktlast ausgehen, bringen keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da der Druck an dieser Stelle dann unendlich groß wird. Die zwei in das Modell eingehenden Materialien Polyurethan und Asphalt werden als homogen (gleichmäßig zusammengesetzt) und isotrop (im Material ist keine Richtung ausgezeichnet) vorausgesetzt. Unterschiedliche Materialeigenschaften werden über Materialkennwerte (E-Modul, Poissonzahl) vorgegeben.

Walkeffekte, die sich durch das Abrollen ergeben, werden durch das Modell nicht berücksichtigt. Messungen haben gezeigt, daß solche Effekte bei größeren Geschwindigkeiten bedeutungslos sind.

Des weiteren wird ein rein elastisches Materialverhalten vorausgesetzt (lineare Elastizitätstheorie, vgl. [14], [20] und [26]). Eine Berücksichtigung des tatsächlich zugrundeliegenden elastisch-plastischen Materialverhaltens erfordert weitere Materialkenngrößen und erhöhten Aufwand, verspricht jedoch keine wesentliche Änderung der Ergebnisse.

### 3 Theoretische Betrachtungen

Das vorliegende Problem gehört zur Klasse der statischen elastomechanischen Probleme. In dieser Klasse von Aufgaben sind die Deformationen und insbesondere die dadurch verursachten Spannungen in Körpern oder Strukturen unter dem Einfluß von äußeren Belastungen gesucht.

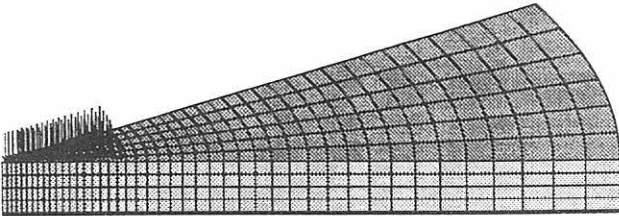


Abb. 3: Modellierung der Straße, 3-dimensionales Modell (Rotationssymmetrie ausgenutzt)

Zur Behandlung dieser Aufgaben bieten sich verschiedene Variationsprinzipien an, wobei hier vom Prinzip des Minimums der gesamten potentiellen Energie eines Systems ausgegangen wird, vgl. [2], [9] und [23]. Es wird ein zusammenhängender dreidimensionaler elastischer Körper betrachtet, welcher an einigen Stellen gelagert bzw. festgehalten wird. Dieser Körper ist bestimmten Belastungen unterworfen, einer räumlich verteilten Kräfteverteilung  $p$ , Oberflächenkräften  $q$  und  $m$  Einzelkräften  $F_i$ . Für einen allgemeinen dreidimensionalen isotropen Körper ist die totale potentielle Energie gegeben durch

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \sigma^T \varepsilon \, dV - \int_V p^T f \, dV - \int_S q^T f \, dS - \sum_{i=1}^m F_i^T f_i$$

wobei  $f$  den ortsabhängigen Verschiebungsvektor im Punkt  $P$  des Körpers bezeichnet und aus den drei Komponenten  $u$ ,  $v$  und  $w$  besteht:

$$f = (u \ v \ w)^T$$

$u$ ,  $v$  und  $w$  sind Funktionen der drei Ortsvariablen. Der Spannungsvektor wird mit  $\sigma$  bezeichnet, der Verzerungsvektor mit  $\varepsilon$ , das Volumen des Körpers mit  $V$ , seine Oberfläche mit  $S$ , die angreifenden Einzelkräfte mit  $F_i$  und die diskreten Verschiebungsvektoren in den Angriffspunkten der Einzelkräfte mit  $f_i$ . Mit dem o.g. Variationsprinzip erfolgt die Bestimmung eines Verschiebungszustandes eines Körpers unter einem Belastungszustand durch Minimierung der totalen potentiellen Energie unter Berücksichtigung der Randbedingungen. Zur praktischen Bestimmung einer Näherungslösung, welche ein gegebenes Funktional stationär macht, wird die Finite-Elemente-Methode benutzt. Dazu wird ein Modell des dreidimensionalen Gebietes erstellt und dieses in einfache Teilgebiete, die Elemente, zerlegt. In jedem der Elemente wird für die gesuchte Funktion ein problemgerechter Ansatz gewählt. Im allgemeinen finden dafür lineare, quadratische oder auch höhergradige

Polynome Verwendung. Die Ansatzfunktionen müssen beim Übergang von einem Element ins benachbarte bestimmte Stetigkeits- und Differenzierbarkeitsbedingungen erfüllen, vgl. [1], [7] und [21].

### 4 Mathematische Modellbildung

Aufgrund umfangreicher Rechnungen mit voneinander abweichenden Ergebnissen sollen hier mehrere Modelle vorgestellt und miteinander verglichen werden.

Zur Lösung des Problems wurde mit dem Softwarepaket ANSYS \*<sup>1</sup> gearbeitet, einem sehr umfangreichen und komfortablen System mit einem breiten Einsatzspektrum, vgl. [5] und [19]. Bei der Arbeit mit diesem System ist die explizite Formulierung des Variationsproblems nicht nötig. Diese Information ist enthalten in der Wahl der Elemente. Das System besitzt eine Elementebibliothek, aus der die dem Problem entsprechenden Elemente ausgewählt werden. Für das hier behandelte Problem werden verschiedene Modellansätze untersucht. Die ersten beiden Ansätze gehen von einem dreidimensionalen Modell aus, während beim dritten Ansatz das Problem auf zwei Dimensionen reduziert wurde.

\*<sup>1</sup> ANSYS wird vertrieben von der Gesellschaft für computerunterstützte Konstruktion und Berechnung mbH CADFEM, siehe auch [5] und [19]

#### 4.1 Modell 1 - Volumenelemente mit trilinearem Ansatz

Es werden Volumenelemente gewählt, die geeignet sind zur Modellierung von dreidimensionalen Festkörpern. Eines dieser Volumenelemente (solid45) besitzt 8 Knoten mit drei Freiheitsgraden an jedem Knoten, der Verschiebung in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung. Für jedes Element wird der Ansatz gewählt.

$$u(\xi, \eta, \zeta) = c_1 + c_2 \xi + c_3 \eta + c_4 \zeta + c_5 \xi \eta + c_6 \xi \zeta + c_7 \eta \zeta + c_8 \xi \eta \zeta$$

Die acht Parameter  $c_i$  sind durch die Werte der Funktion  $u$  in den acht Eckpunkten eindeutig bestimmt, wenn das Element nicht entartet ist (singuläre Matrix).

#### 4.2 Modell 2 - Volumenelemente mit quadratischem Ansatz

Für die Erstellung des Modells wurden Volumenelemente gewählt, die auf jeder Kante des Elementes einen Zwischenknoten besitzen (solid95). Elemente mit Zwischenknoten erlauben Ansatzfunktionen höherer Ordnung und damit



höhere Genauigkeiten in kritischen Bereichen. Sie sind geeignet zur Modellierung von gekrümmten Formen. Die hier genutzten Volumenelemente besitzen 20 Knoten mit je drei Freiheitsgraden, der Verschiebung in x-, y- und z-Richtung. Neben den 8 Eckknoten nimmt man jeweils die Kantenmittelpunkte hinzu und wählt folgenden Ansatz:

$$u(\xi, \eta, \zeta) = c_1 + c_2\xi + c_3\eta + c_4\zeta + c_5\xi^2 + c_6\xi\eta + c_7\xi\zeta + c_8\eta^2 + c_9\eta\zeta + c_{10}\zeta^2 + c_{11}\zeta^2\eta + c_{12}\xi^2\zeta + c_{13}\xi\eta^2 + c_{14}\xi\eta\zeta + c_{15}\xi\zeta^2 + c_{16}\eta^2\zeta + c_{17}\eta\zeta^2 + c_{18}\xi^2\eta\zeta + c_{19}\xi\eta^2\zeta + c_{20}\xi\eta\zeta^2$$

### 4.3 Modell 3 - Flächenelemente im radialsymmetrischen Modell

Da in Umfangsrichtung keine Verschiebungen auftreten, kann unter Nutzung von rotationsymmetrischen Flächenelementen (plane42) ein zweidimensionales Modell der Straße erstellt werden. Die verwendeten Elemente besitzen zwei Freiheitsgrade an jedem der vier Knoten, die Verschiebungen in der Elementebene. Zur Berechnung der Verschiebungen werden bilineare Ansatzfunktionen (analog zu 4.1) gewählt. Aufgrund der oben gemachten Annahme (keine Verschiebungen in Umfangsrichtung) können Dehnungs- und Spannungszustand in drei Koordinatenrichtungen bestimmt werden.

### 4.4 Modell 4 - Flächenelemente im radialsymmetrischen Modell mit quadratischem Ansatz

Eine Verbesserung der Simulationsergebnisse ist sowohl durch eine Verfeinerung des Gitters als auch durch die Wahl höherer Ansatzfunktionen zu erreichen.

Zur Modellbildung werden zweidimensionale rotationsymmetrische Elemente mit quadratischen Ansatzfunktionen (plane82) genutzt. Diese Elemente besitzen 8 Knoten mit jeweils 2 Freiheitsgraden und stellen eine Erweiterung der o.g. Elemente (plane42) dar.

### 4.5 Modell 5 - Flächenelemente im radialsymmetrischen Modell mit verfeinertem Gitter

Das Modell 5 unterscheidet sich vom Modell 3 in der Anzahl der Elemente. Es wird eine wesentlich feinere Elemententeilung gewählt und die Anzahl der Elemente verdoppelt.

## 4.6 Modell 6 - Flächenelemente im radialsymmetrischen Modell mit quadratischem Ansatz und verfeinertem Gitter

Das Modell 6 entsteht aus dem Modell 4 durch Verdopplung der Elementzahl (analog zu Modell 5).

## 5 Randbedingungen

Mit Hilfe der beschriebenen Elemente wird die Gitterzerlegung der Straße erzeugt. Da es sich hier um ein rotationssymmetrisches Problem handelt, ist es nicht notwendig, ein Modell der ganzen Straße zu erstellen, vgl. [3], [6], [10] und [15]. Bei entsprechender Definition der Randbedingungen ist es ausreichend, einen Ausschnitt der Straße zu betrachten (*Abbildung 4*). Das spart ganz wesentlich Speicherkapazität und Rechenzeit. Besondere Aufmerksamkeit wird der Elemententeilung geschenkt. Zum Erreichen einer hohen Genauigkeit ist es notwendig, ein regelmäßiges Netz zu erstellen, das enger an den Stellen ist, an denen eine hohe Genauigkeit gefordert ist und gröber ist in weniger relevanten Bereichen. Deshalb wird eine Elemententeilung gewählt, die im Bereich der aufgetragenen Belastung feinere und im Randbereich gröbere Elemente besitzt.

Die Belastung wird modelliert als Druck auf eine Fläche. Der Druck ist hier (*Abbildung 4*) dargestellt durch Pfeile, die sowohl Größe als auch Richtung des Drucks repräsentieren. Es wird ein Druck von einem Megapascal auf eine kreisförmige Fläche mit einem Radius  $r_1 = 130$  mm aufgebracht.

$$p = p_0 = 1 \text{ MPa} \quad \forall r \in [0, r_1]$$

Da durch das Aufbringen eines konstanten Drucks auf eine Fläche am Rand dieser Fläche Spannungsspitzen entstehen, die den tatsächlichen Gegebenheiten nicht entsprechen, ist ein zum Rand der belasteten Fläche hin abnehmender Druck zu erzeugen. Deshalb wird eine lineare Druckabnahme im Bereich von 130 mm bis 150 mm realisiert, und auf die Knoten der äußeren Elemente werden abnehmende Werte für den Druck aufgebracht.

$$p(r) = p_0 \quad \forall r \in [0, r_1]$$

$$p(r) = p_0 + a(r - r_1) \quad \forall r \in [r_1, r_a]$$

$$\text{mit } a = -0.05, p_0 = 1 \text{ MPa}, r_1 = 130 \text{ mm}, r_a = 150 \text{ mm}$$

$$\text{und } p = 0 \quad \forall r > r_a$$

Die Betonschicht wird als absolut fest angenommen und verhindert ein Durchbiegen der oberen Schichten. Das wird realisiert über die Festlegung der Randbedingungen

$$\delta f / \delta z = 0 \quad \forall z = 0.$$

Außerdem soll die Polyurethanschicht mit der Betonschicht fest verbunden sein.

$$\delta f / \delta x = 0 \quad \forall z = 0 \text{ und}$$

$$\delta f / \delta y = 0 \quad \forall z = 0.$$

Für die dreidimensionalen Modellansätze gilt außerdem: Da auf Grund der Symmetrie nur ein Ausschnitt der Straße berechnet zu werden braucht, müssen sogenannte Symmetrierandbedingungen berücksichtigt werden. Es gilt (in Zylinderkoordinaten)  $\delta f / \delta \phi = 0$  für alle Knoten auf den Schnittflächen, d.h. für alle Punkte  $(r, \phi, z)$  mit  $\phi = 0^\circ$ ,  $\phi = 30^\circ$ .

Der Ausschnitt aus der Straße wird so groß gewählt, daß die Lage des äußeren Randes keinen Einfluß auf die Ergebnisse hat. Nach anfänglichen Testrechnungen wird für den äußeren Radius  $R = 750$  mm gewählt.

## 6 Diskussion der Ergebnisse

Das direkte Ergebnis der Berechnung sind die Verschiebungen in x-, y- und z-Richtung. Aus diesen Verschiebungen lassen sich Spannungen, Dehnungen und Zugspannungen berechnen, aus deren Analyse sich dann Schlußfolgerungen über die tatsächliche Belastung des Materials ableiten lassen.

Grafische Darstellungen der Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen und Schubspannungen in verschiedenen Ebenen der Straße sind im Anhang enthalten. Von besonderem Interesse sind die Vorgänge in der Grenzschicht zwischen Polyurethan und Asphalt.

### 6.1 Verwendung unterschiedlicher Elementtypen und Netze

Unterschiedliche Elementtypen und Netze haben entscheidenden Einfluß auf die Genauigkeit des Ergebnisses. So entstehen bei Modell 1 (Volumenelemente mit 8 Knoten und trilinearem Ansatz) bei der Zerlegung des Grundgebietes degenerierte Elemente mit dreieckiger Grundfläche. Es zeigte sich, daß diese Elemente zu numerischen Schwierigkeiten führen. Durch Verwendung von Volumenelementen mit quadratischem Ansatz (Modell 2) lassen sich diese Schwierigkeiten umgehen.

### 6.2 Verifizierung der Simulationsergebnisse

Bei der praktischen Untersuchung der Straßenbeläge wird zur Kalibrierung der Meßgeräte folgender physikalischer Zusammenhang genutzt:

Die Gesamtlast muß in jeder Ebene des untersuchten Materials den gleichen Wert besitzen, d.h. die Integration der vertikalen Spannungswerte  $G_z$  über eine Ebene muß dem Wert der aufgebracht Last entsprechen. Für die Gesamtlast gilt

$$F_G = F_1 + F_2 \quad \text{mit}$$

$$F_1 = p_0 \pi r_i^2 \quad \text{und}$$

$$F_2 = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{r=r_i}^{r_a} (p_0 + a(r - r_i)) \text{ drd}\phi$$

$$= \pi/3 (3p_0 r_a^2 + 2a r_a^3 - 3a r_a^2 r_i - 3p_0 r_i^2 + a r_i^3)$$

$$F_G = 61680 \text{ N}$$

Zur Kontrolle der Simulationsergebnisse wird ein C-Programm erstellt, das die mit dem System ANSYS ermittelten Werte verwendet und eine numerische Integration der Spannungswerte  $\sigma_z$  über eine (fast-)horizontale Ebene durchführt.

Während bei den ersten Modellversuchen die Kontrollrechnung eine große Abweichung vom exakten Wert ergibt, liegt die Abweichung der Simulationsergebnisse bei den hier aufgeführten Modellen bei 2% für die dreidimensionalen Modelle und bei 0,5% für die zweidimensionalen Modelle. Dieser Unterschied ergibt sich daraus, daß bei der Verwendung zweidimensionaler Modelle eine höhere Genauigkeit zu erreichen ist. In das zweidimensionale Modell geht mehr physikalisch exakte Information ein, und die Zahl der Freiheitsgrade ist geringer. Außerdem treten bei Flächenelementen im allgemeinen geringere Diskretisierungsfehler auf als bei Volumenelementen (vgl. [6] und [19]).

## 7 Genauigkeit der Ergebnisse

Die Güte der Ergebnisse wird bei einer FE-Rechnung sowohl vom Idealisierungsfehler als auch vom Diskretisierungsfehler beeinflusst. Der Idealisierungsfehler basiert auf vereinfachten Modellannahmen, die bei der Erstellung der Modells getroffen werden (Abschnitt 2).

Der Diskretisierungsfehler entsteht durch die Zerlegung des dreidimensionalen Raums in Volumenelemente. Zur Abschätzung dieses Fehlers kann zum Beispiel die Fehlernorm nach Zienkiewicz und Zhu [29] herangezogen werden. Diese Abschätzung basiert darauf, daß bei verschiebungsbasierten Ansätzen für den Funktionsverlauf in einem Element das berechnete Verschiebungsfeld stetig ist, aber das Spannungsfeld Unstetigkeiten aufweisen kann. Bei einer groben Netzeinteilung ist die Differenz in den Spannungsniveaus benachbarter Elemente im selben Knoten groß. Mit einer Verfeinerung der Netzeinteilung verringert sich diese Differenz und geht gegen Null. Sie verschwindet für den kontinuierlichen Fall.

Diese Differenzen können als Maß für den Diskretisierungsfehler herangezogen werden. Zur Ermittlung des Spannungsniveaus in einem Element werden alle Knotenspannungen des Elements gemittelt

$$\Delta\sigma_n^i = \sigma_n^i - \sigma_n^a$$

mit

$\Delta\sigma_n^i$  der Spannungsfehlervektor am Knoten n des Elementes i

$\sigma_n^a$  der gemittelte Spannungsvektor am Knoten n

$$\sigma_n^a = \left( \sum_{i=1}^{N_e^n} \sigma_n^i \right) / N_e^n$$

$N_e^n$  Anzahl der Elemente am Knoten n

$\sigma_n^i$  Spannungsvektor des Knotens n im Element i .

Dann läßt sich der Energiefehler  $\Delta\Pi_i$  für jedes Element i berechnen als

$$\Delta\Pi_i = 1/2 \int_{V_{e_i}} \Delta\sigma^T D^{-1} \Delta\sigma \, dV_{e_i}$$

mit  $V_{e_i}$  das Volumen des Elements i  
 $D$  Werkstoffmatrix  
 $\Delta\sigma$  Spannungsfehlervektor an den benötigten Punkten (ermittelt aus allen  $\Delta\sigma_n^i$  dieses Elements).

Der Energiefehler über das gesamte Modell ist

$$\Delta\Pi = \sum_{i=1}^{N_r} \Delta\Pi_i$$

mit  $N_r$  der Anzahl von Elementen im Modell.

Der prozentuale Fehler in der Energienorm wird berechnet durch Normalisierung des Energiefehlers gegen die Dehnungsenergie zu

$$\Delta\Pi_r = 100 \sqrt{(\Delta\Pi / (U + \Delta\Pi))}$$

mit  $U$  der Dehnungsenergie über das gesamte Modell

$$U = \sum_{i=1}^{N_r} E_{ei}^{po}$$

und der Dehnungsenergie  $E_{ei}^{po}$  von Element i.

Der Vergleich der einzelnen Modelle hinsichtlich der prozentualen Fehler zeigt die Überlegenheit zweidimensionaler Modelle gegenüber dreidimensionalen (vgl. 6.2). Eine deutliche Verringerung des Fehlers ergibt sich auch bei Verwendung höherdimensionaler Ansatzfunktionen, vgl. [16] und [28]. Das Modell 4 weist eine deutlich höhere Genauigkeit als die Modelle 1, 2, 3 und 5 auf. Gegenüber den Modellen 1, 2, 5, und 6 zeichnet es sich durch wesentlich geringere Rechenzeit aus.

## 8 Parameterstudien

Unter Berücksichtigung des Rechenaufwandes und der erzielten Genauigkeit wird das Modell 4 für weitere Untersuchungen ausgewählt. Es werden Rechnungen durchgeführt für verschiedene Parameterkombinationen der Schichtdicken von Asphalt und Polyurethan und geänderten E-Modul von Asphalt (vgl. *Tabelle 1*).

*Tabelle 2: Versuchsplan*

Variante Nr.	$D_{AS}$ [mm]	$D_{PU}$ [mm]	$E_{AS}$ [MPa]
1	70	3	1000
2	70	3	6000
3	70	5	1000
4	70	5	6000
5	120	3	1000
6	120	3	6000
7	120	5	1000
8	120	5	6000

Bezeichnung	Charakterisierung des Modells	prozentualer Fehler	
		im Asphalt	im Polyurethan
Modell 1	3-dimensionales Modell linearer Ansatz	9.75	5.73
Modell 2	3-dimensionales Modell quadratischer Ansatz	2.48	0.03
Modell 3	2-dimensionales Modell axialsymmetrisch linearer Ansatz	3.67	2.41
Modell 4	2-dimensionales Modell axialsymmetrisch quadratischer Ansatz	0.29	0.38
Modell 5	2-dimensionales Modell axialsymmetrisch linearer Ansatz verfeinertes Netz	1.99	2.53
Modell 6	2-dimensionales Modell axialsymmetrisch quadratischer Ansatz verfeinertes Netz	0.08	0.63

*Vergleich der Energiefelder für verschiedene Modellansätze*



Die folgenden Tabellen zeigen die Werte der Ergebnisgrößen für den Mittelpunkt der Belastung an der Grenze zwischen den Schichten Asphalt und Polyurethan ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=DPU$ ).

Tabelle 3: Dehnungen für ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=DPU$ )

Variante Nr.	$\epsilon_x$	$\epsilon_z$ (Asphalt)	$\epsilon_z$ (PU)
1	2.1e-04	-8.82e-04	-1.14e-02
2	1.0e-04	-2.11e-04	-1.08e-02
3	2.9e-04	-9.73e-04	-1.17e-02
4	1.4e-04	-2.44e-04	-1.03e-02
5	2.7e-04	-8.64e-04	-1.02e-02
6	0.9e-04	-1.79e-04	-0.80e-02
7	3.5e-04	-9.29e-04	-1.00e-02
8	1.2e-04	-1.94e-04	-0.72e-02

Tabelle 4: Spannungen für ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=DPU$ ) und maximale Schubspannung  $\max(\tau_{xz})$  für  $y=0$ ,  $z=DPU$   
 $0 \leq x \leq 750 \text{ mm}$

Variante Nr.	$\sigma_x$ (Asphalt) [MPa]	$\sigma_x$ (PU) [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\max(\tau_{xz})$ [MPa]
1	-0.25	-0.85	-1.05	6.8e-02
2	0.38	-0.82	-1.01	2.3e-02
3	-0.13	-0.86	-1.07	4.5e-02
4	0.73	-0.77	-0.95	1.4e-02
5	-0.07	-0.74	-0.92	6.7e-02
6	0.47	-0.61	-0.75	2.2e-02
7	0.05	-0.72	-0.90	4.7e-02
8	0.71	-0.54	-0.66	1.4e-02

Die betragsmäßig größten bzw. kleinsten Werte der Dehnungen und Spannungen werden für folgende Varianten berechnet ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=DPU$ ):

Tabelle 5: Größte bzw. kleinste Werte von Dehnungen und Spannungen

	Variante	betragsmäßig größter Wert	Variante	betragsmäßig kleinster Wert
$\epsilon_x$	7	3.5e-04	6	0.9e-04
$\epsilon_z$ (Asphalt)	3	-9.73e-04	6	-1.79e-04
$\epsilon_z$ (PU)	3	-1.17e-02	8	-0.72e-02
$\sigma_x$ (Asphalt)	4	0.73MPa	7	0.05MPa
$\sigma_x$ (PU)	3	-0.86MPa	8	-0.54MPa
$\sigma_z$	3	-1.07MPa	8	-0.66MPa
$\max(\tau_{xz})$	1	6.8e-02MPa	4, 8	1.4e-02MPa

Der E-Modul von Asphalt ist ein Parameter, der sichtbaren Einfluß auf die Ergebniswerte hat. Bei einem E-Modul von 1000MPa (Variante 1, 3, 5, 7) sind die Dehnungen in x-Richtung deutlich größer als bei einem E-Modul von 6000MPa.  $\epsilon_z$  (Asphalt),  $\epsilon_z$  (PU) und  $\sigma_x$  (PU) nehmen betragsmäßig größere Werte an als für  $E_{AS} = 6000\text{MPa}$ .

$\sigma_x$  (Asphalt) ist für  $E_{AS} = 1000\text{MPa}$  negativ bzw. sehr klein, für  $E_{AS} = 6000\text{MPa}$  positiv. Für  $E_{AS} = 1000\text{MPa}$  ergeben sich deutlich größere Schubspannungen.

Die Schichtdicke von Asphalt hat Einfluß auf die Spannungen, die in der Polyurethanschicht auftreten. Bei einer Schichtdicke des Asphalt von 70 mm sind die Spannungen  $\sigma_x$  (PU) und  $\sigma_z$  betragsmäßig größer als bei  $D_{AS} = 120 \text{ mm}$ . Das gleiche gilt auch für die Dehnungen in z-Richtung  $\epsilon_z$  (PU).

Die Schubspannungen sind unabhängig von der Dicke des Asphalts. Für  $D_{PU} = 3 \text{ mm}$  ergeben sich für die Schubspannungen größere Maximalwerte als für  $D_{PU} = 5 \text{ mm}$ .

Ein Einfluß der Schichtdicke von Polyurethan auf die Ergebniswerte ist nur für  $\epsilon_z$  (Asphalt) sichtbar. Dort treten im Asphalt für  $D_{PU} = 3 \text{ mm}$  betragsmäßig kleinere Dehnungswerte für die z-Richtung auf.

Die folgende Tabelle zeigt die Spannungsdifferenzen an der Grenze zwischen Asphalt und Polyurethan.

Tabelle 6: Spannungsdifferenzen für ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=DPU$ )

Variante Nr.	$\sigma_x(\text{PU}) - \sigma_x(\text{As})$
1	-0.6
2	-1.2
3	-0.73
4	-1.5
5	-0.67
6	-1.08
7	-0.77
8	-1.25

Diese Differenzen an der Grenze zwischen zwei Materialien geben Auskunft über die Auswirkungen der unterschiedlichen Materialeigenschaften auf das System Straße. In den Varianten 2, 4, 6, 8 für  $E_{AS} = 6000\text{MPa}$  treten deutlich größere Spannungsdifferenzen in der Grenzschicht auf.

## 9 Zusammenfassung

Es wird das Modell einer Straße entwickelt. Dazu ist es notwendig, bestimmte Modellannahmen zu formulieren (Abschnitt 2). Verschiedene Modellvarianten werden erstellt und miteinander verglichen. Anhand dieser Ergebnisse kann das Modell 4 als am besten geeignet ausgewählt werden. Mit diesem Modell werden die Parameterstudien durchgeführt und der Einfluß der unterschiedlichen Parameter auf die Dehnungen und Spannungen untersucht. Das entwickelte Modell kann als Grundlage für weitergehende Untersuchungen genutzt werden.

# 10 Anhang

## Grafische Darstellung der Ergebnisse

Beispielhaft für alle Berechnungen werden anhand von Modell 4 Variante 8 ( $D_{AS} = 120$  mm,  $D_{PU} = 5$  mm,  $E_{AS} = 6000$ MPa) die Ergebnisse grafisch dargestellt.

### Konturdarstellung für die xz-Ebene

- A1. Verschiebung in x-Richtung
- A2. Verschiebung in z-Richtung
- A3. Dehnung in x-Richtung
- A4. Dehnung in y-Richtung
- A5. Dehnung in z-Richtung
- A6. Spannung in x-Richtung
- A7. Spannung in y-Richtung
- A8. Spannung in z-Richtung
- A9. Schubspannung  $\tau_{xz}$

### Liniplot für $z=DPU$ , $y=0$

- A10. Verschiebung in x-Richtung
- A11. Verschiebung in z-Richtung
- A12. Dehnung in x-Richtung
- A13. Dehnung in y-Richtung
- A14. Dehnung in z-Richtung im Asphalt
- A15. Dehnung in z-Richtung im Polyurethan
- A16. Spannung in x-Richtung
- A17. Spannung in y-Richtung
- A18. Spannung in z-Richtung
- A19. Schubspannung  $\tau_{xz}$

### Für $x=0$ , $y=0$

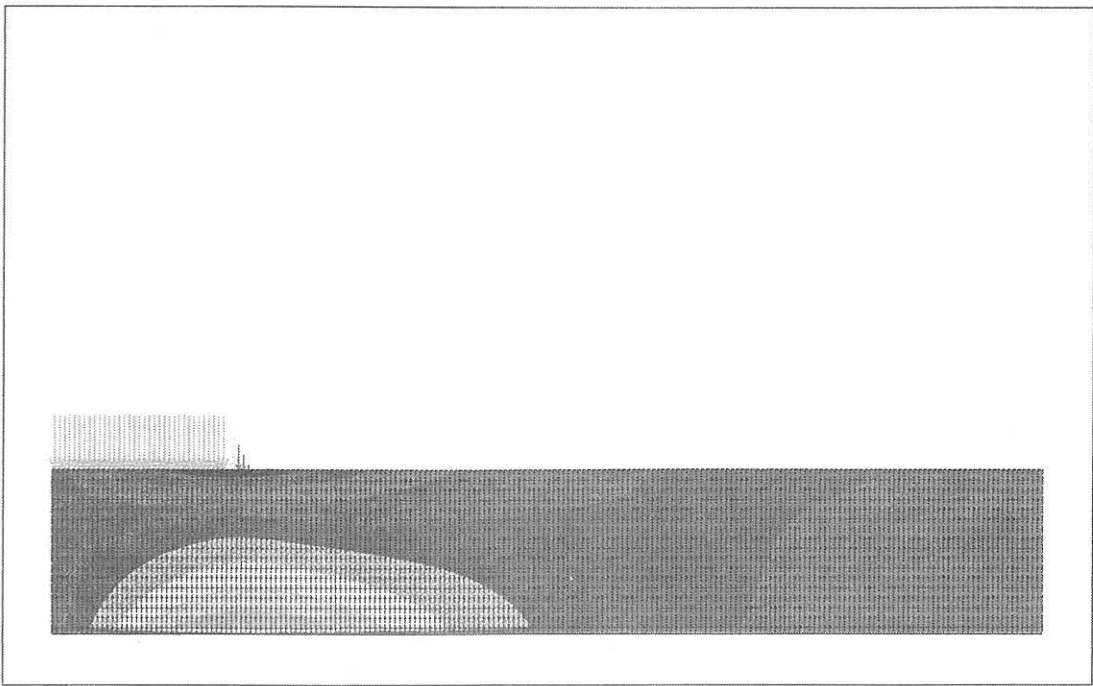
- A20. Spannung  $\sigma_z$  über der Höhe

ANSYS Projektdatei für 3-dimensionales Modell

ANSYS-Projektdatei für 2-dimensionales Modell

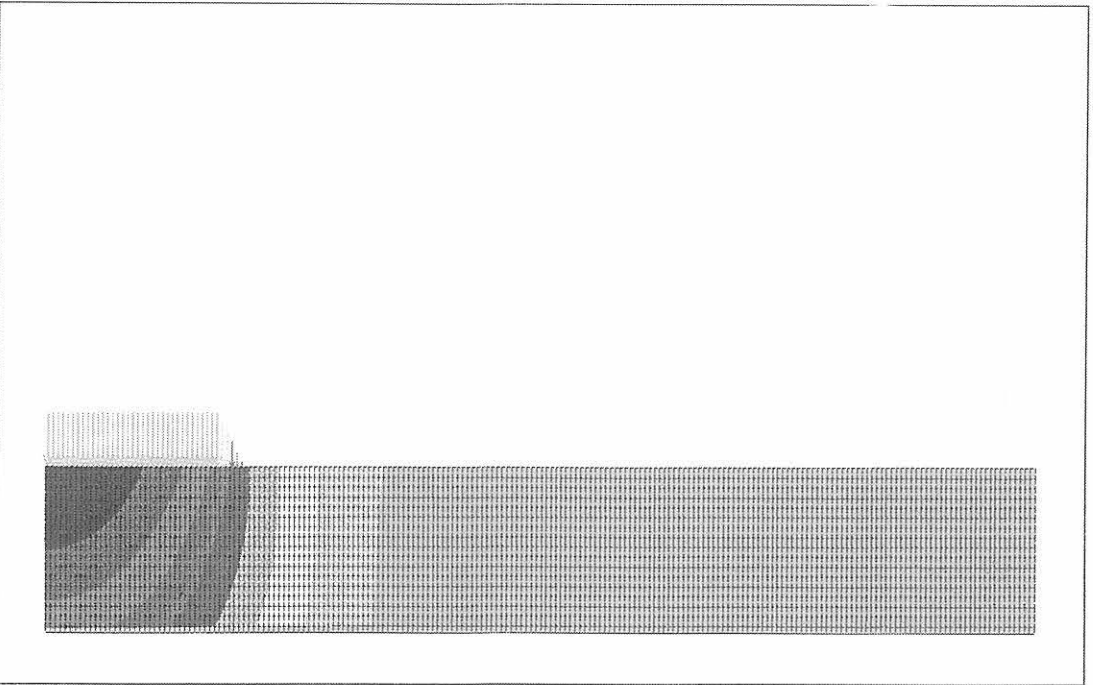
C-Programm für Kontrollrechnungen

Literaturverzeichnis



ANSYS 5.1  
 JUN 4 1996  
 12:18:16  
 PLOT NO. 1  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 UX  
 RSYS=0  
 DMX =0.049893  
 SEPC=69.55  
 SMN =-0.00662  
 SMX =0.011166  
 PRES  
 -0.00662  
 -0.004644  
 -0.002668  
 -0.692E-03  
 0.001285  
 0.003261  
 0.005237  
 0.007213  
 0.009189  
 0.011166

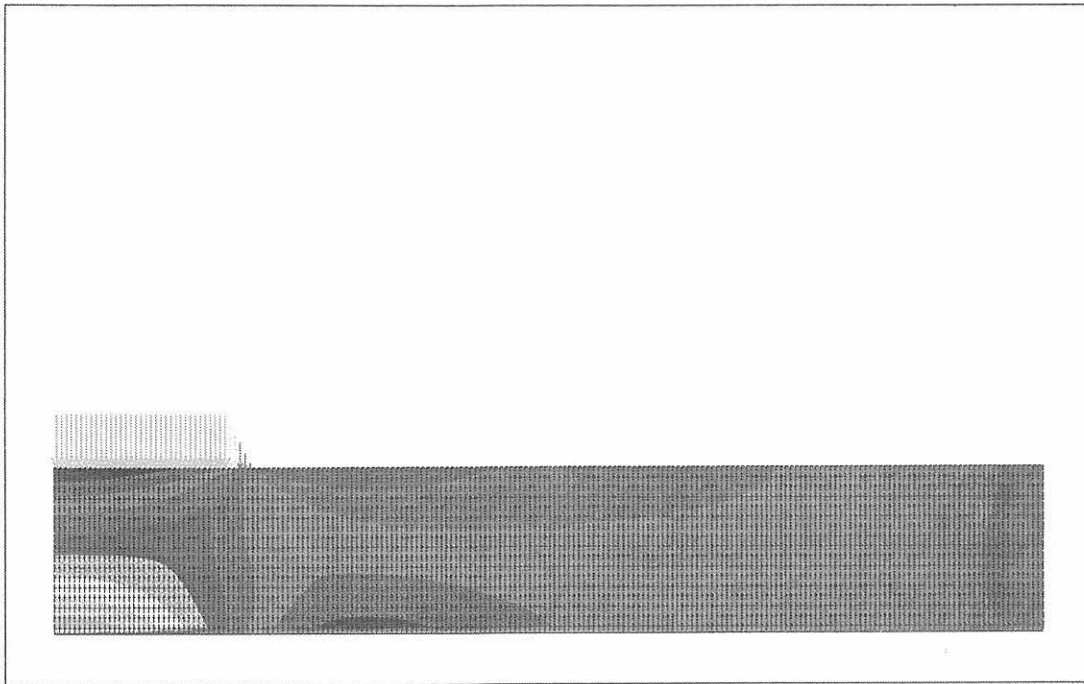
A1: Verschiebung in x-Richtung



ANSYS 5.1  
 JUN 4 1996  
 12:18:31  
 PLOT NO. 2  
 NODAL SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 UY  
 RSYS=0  
 DMX =0.049893  
 SEPC=69.55  
 SMN =-0.049893  
 SMX =0.573E-03  
 PRES  
 -0.049893  
 -0.044286  
 -0.038679  
 -0.033071  
 -0.027464  
 -0.021857  
 -0.016249  
 -0.010642  
 -0.005035  
 0.573E-03

A2: Verschiebung in z-Richtung

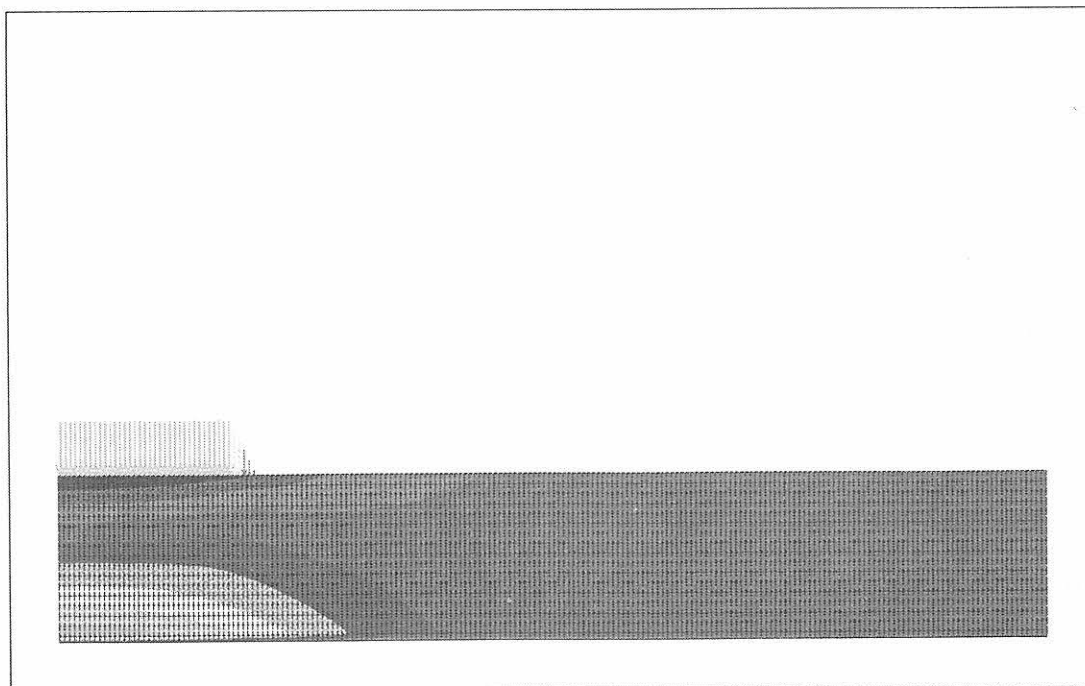




ANSYS 5.1  
 JUN 4 1996  
 12:19:16  
 PLOT NO. 3  
 ELEMENT SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 EPTOX (NOAVG)  
 RSYS=0  
 DMX =0.049893  
 SMN =-0.627E-04  
 SMX =0.124E-03  
 PRES

■	-0.627E-04
■	-0.420E-04
■	-0.213E-04
■	-0.641E-06
■	0.200E-04
■	0.407E-04
■	0.614E-04
■	0.821E-04
■	0.103E-03
■	0.124E-03

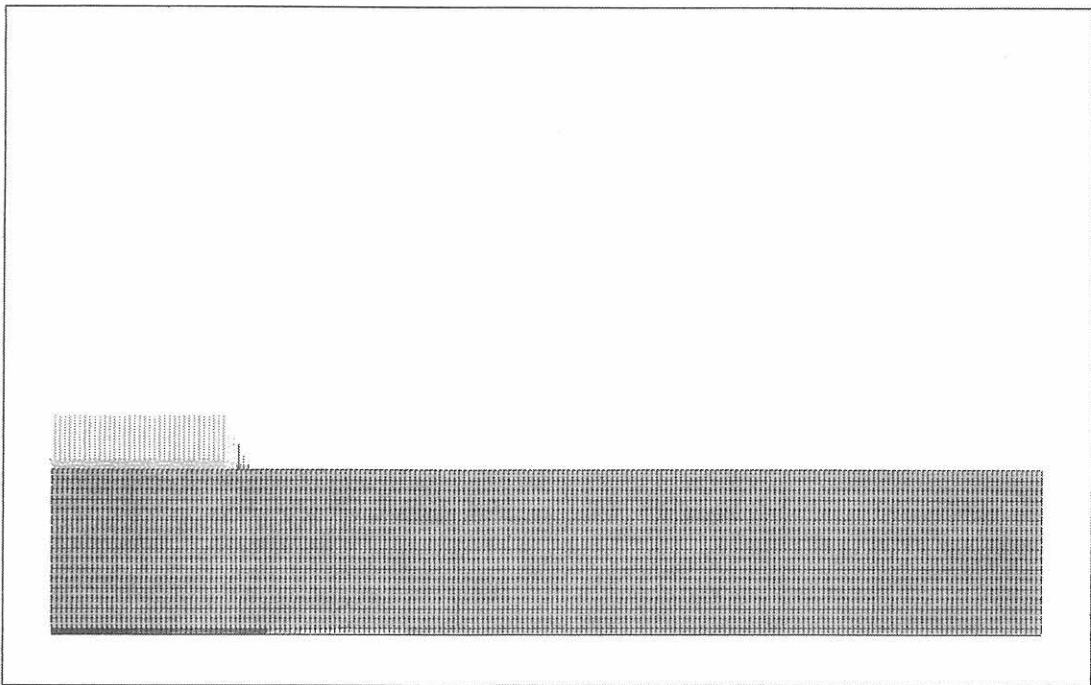
A3: Dehnung in x-Richtung



ANSYS 5.1  
 JUN 4 1996  
 12:19:42  
 PLOT NO. 5  
 ELEMENT SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 EPTOZ (NOAVG)  
 RSYS=0  
 DMX =0.049893  
 SMN =-0.627E-04  
 SMX =0.123E-03  
 PRES

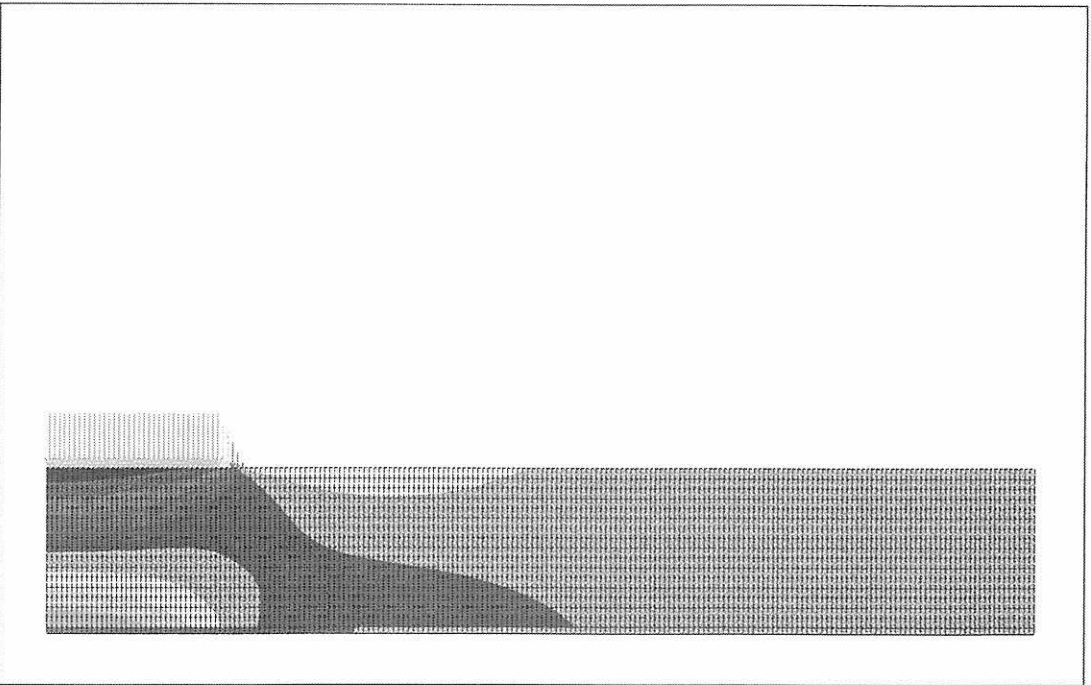
■	-0.627E-04
■	-0.420E-04
■	-0.213E-04
■	-0.632E-06
■	0.201E-04
■	0.407E-04
■	0.614E-04
■	0.821E-04
■	0.103E-03
■	0.123E-03

A4: Dehnung in y-Richtung



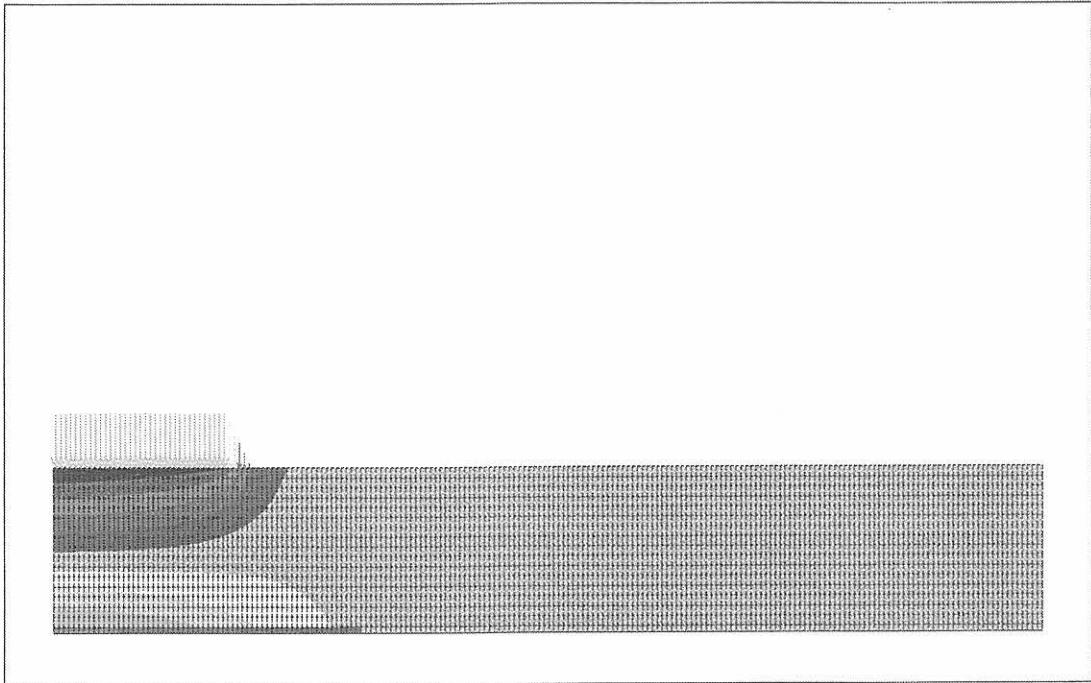
ANSYS 5.1  
 JUN 4 1996  
 12:19:28  
 PLOT NO. 4  
 ELEMENT SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 EPTOY (NOAVG)  
 RSYS=0  
 DMX =0.049893  
 SMN =-0.007184  
 SMX =0.868E-04  
 PRES  
 -0.007184  
 -0.006376  
 -0.005568  
 -0.004761  
 -0.003953  
 -0.003145  
 -0.002337  
 -0.001529  
 -0.721E-03  
 0.868E-04

A5: Dehnung in z-Richtung

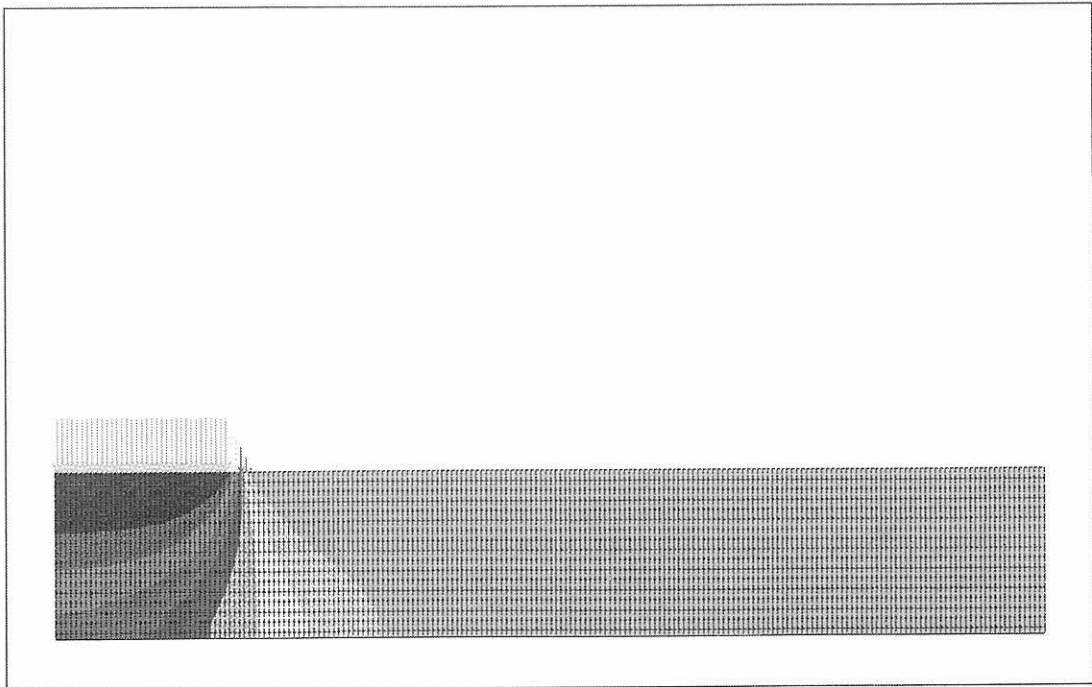


ANSYS 5.1  
 JUN 4 1996  
 12:20:21  
 PLOT NO. 6  
 ELEMENT SOLUTION  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 SX (NOAVG)  
 RSYS=0  
 DMX =0.049893  
 SMN =-1.118  
 SMNB=-1.165  
 SMX =0.71383  
 SMXB=1.339  
 PRES  
 -1.118  
 -0.914043  
 -0.710559  
 -0.507075  
 -0.303591  
 -0.100106  
 0.103378  
 0.306862  
 0.510346  
 0.71383

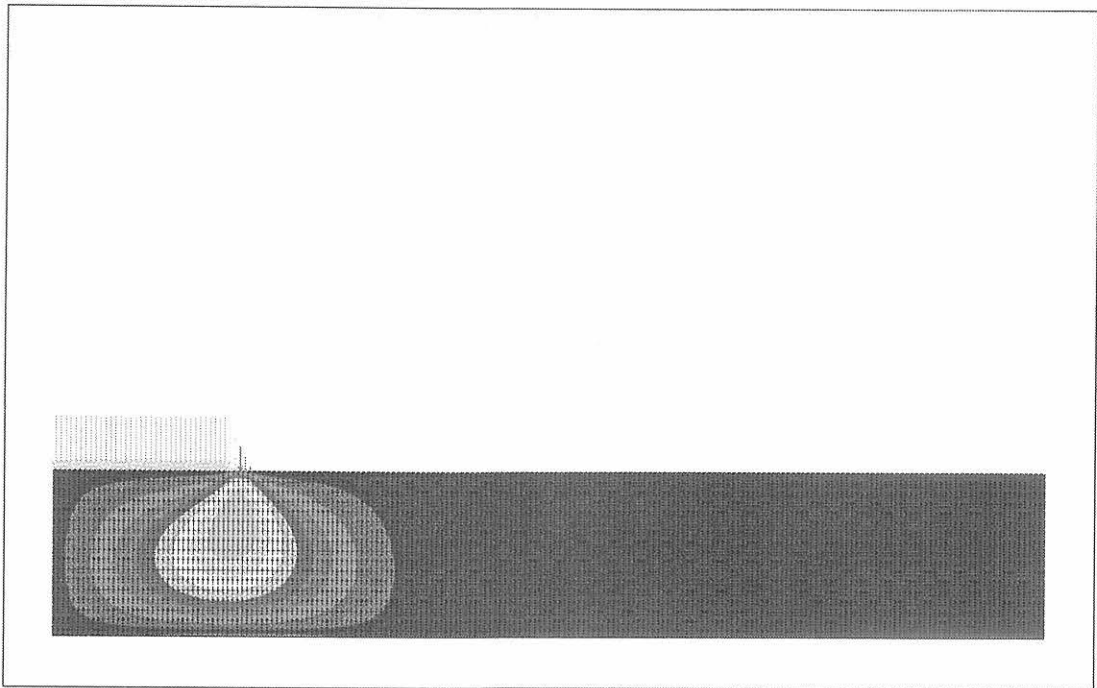
A6: Spannung in x-Richtung



A7: Spannung in y-Richtung



A8: Spannung in z-Richtung



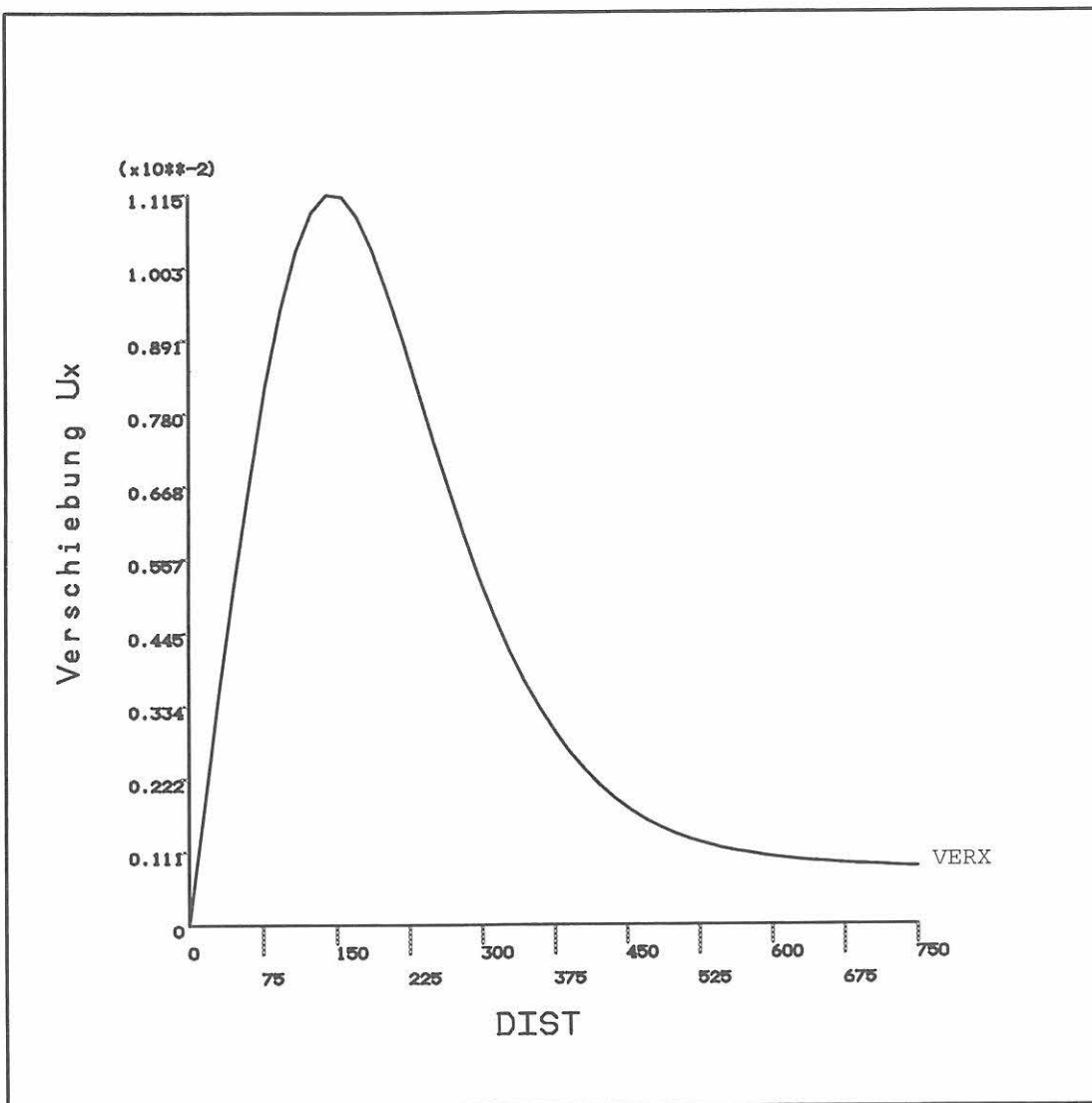
```

ANSYS 5.1
JUN  4 1996
12:21:33
PLOT NO.    9
ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB  =1
TIME=1
SXY          (NOAVG)
RSYS=0
DMX  =0.049893
SMN  =-0.023426
SMNB=-0.624965
SMX  =0.36566
SMXB=0.626751
PRES
-0.023426
0.019806
0.063037
0.106269
0.149501
0.192733
0.235965
0.279197
0.322429
0.36566

```

A9: Schubspannung  $\tau_{xz}$

ANSYS 5.1  
JUN 6 1996  
12:56:56  
PLOT NO. 11  
POST1  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
PATH PLOT  
NOD1=84  
NOD2=524  
  
ZV =1  
DIST=0.75  
XF =0.5  
YF =0.5  
ZF =0.5  
CENTROID HIDDEN

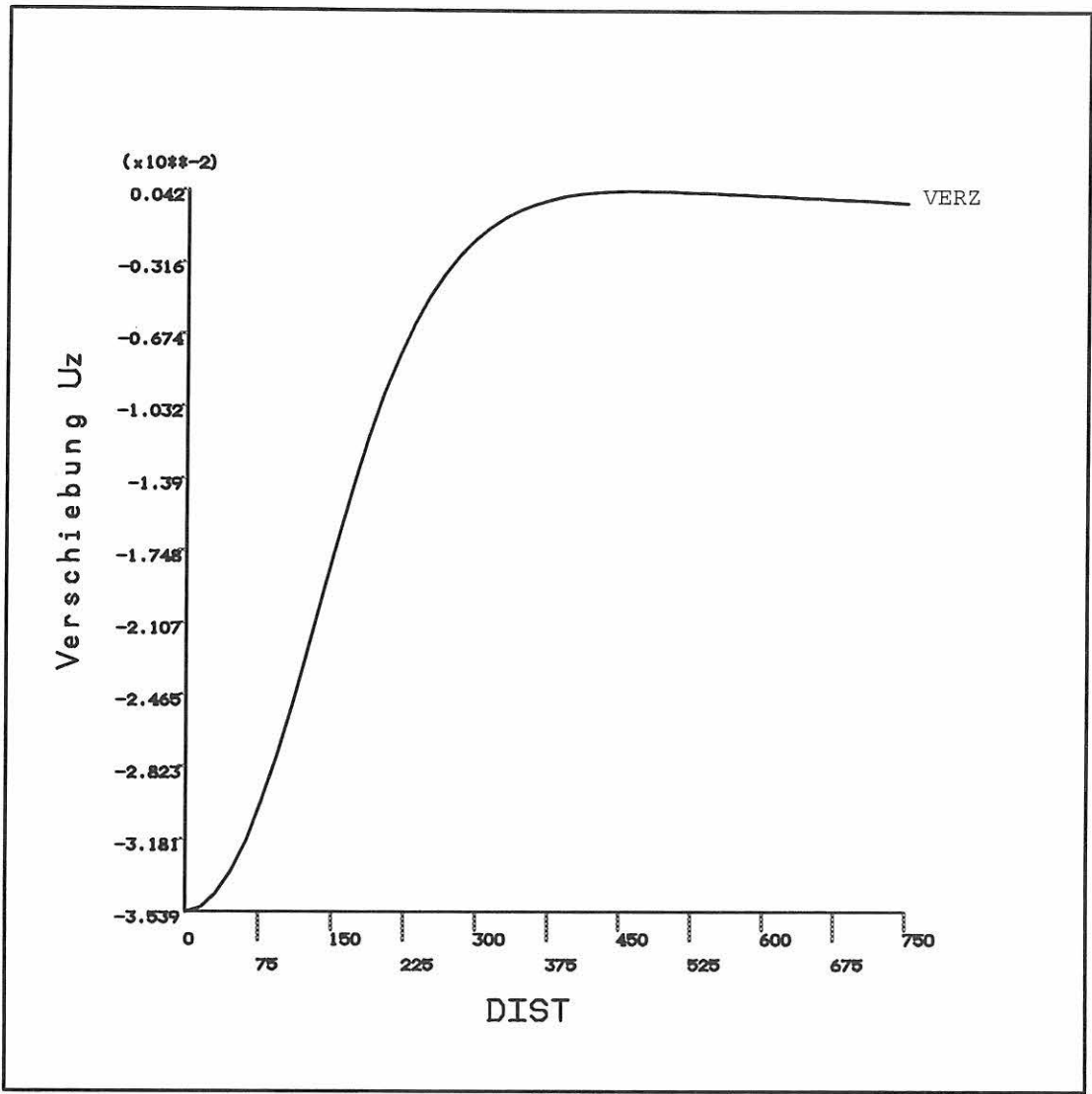


A10: Verschiebung in x-Richtung



ANSYS 5.1  
JUN 10 1996  
12:12:58  
PLOT NO. 12  
POST1  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
PATH PLOT  
NOD1=84  
NOD2=524

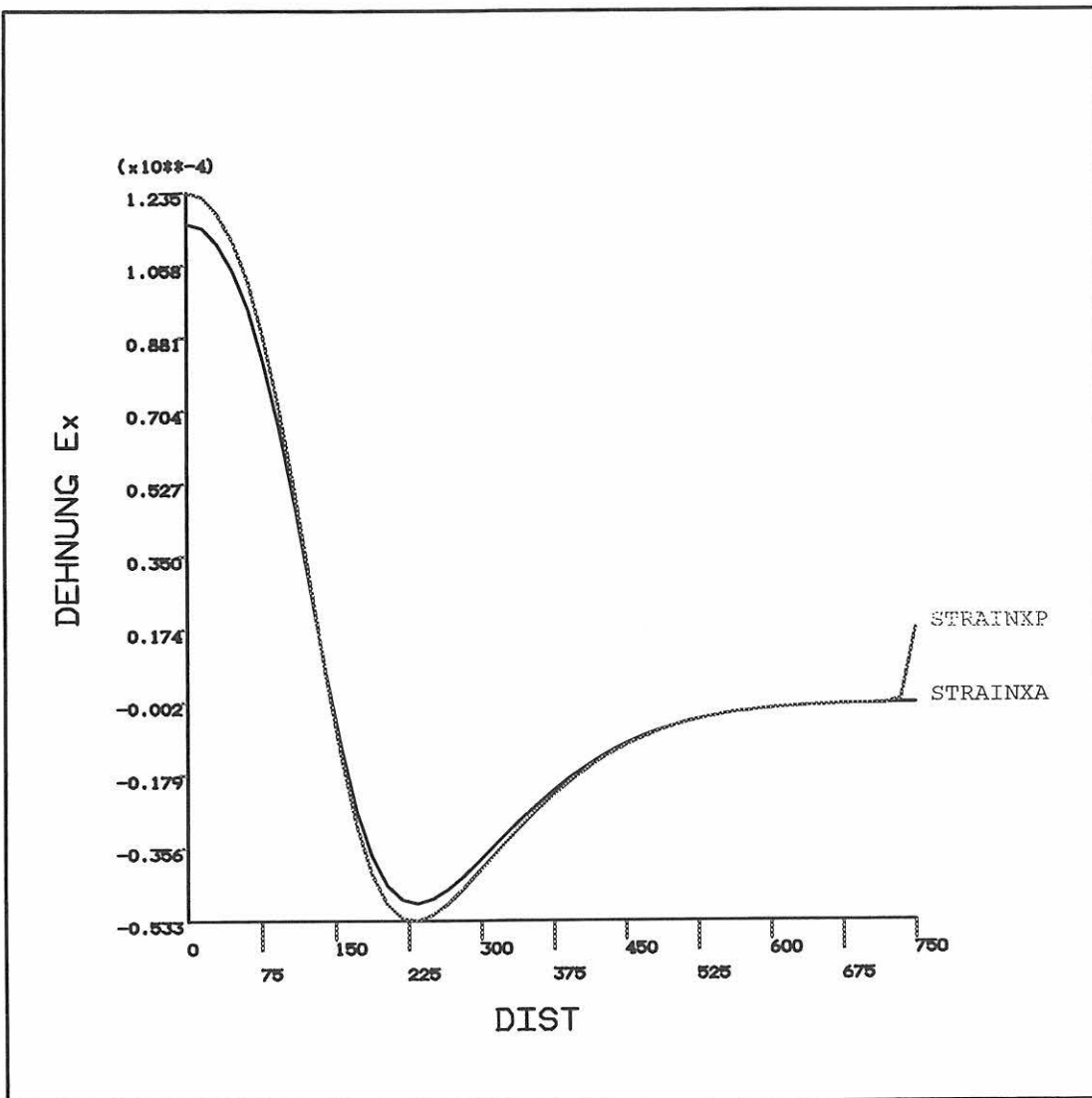
ZV =1  
DIST=0.75  
XF =0.5  
YF =0.5  
ZF =0.5  
CENTROID HIDDEN



A11: Verschiebung in z-Richtung

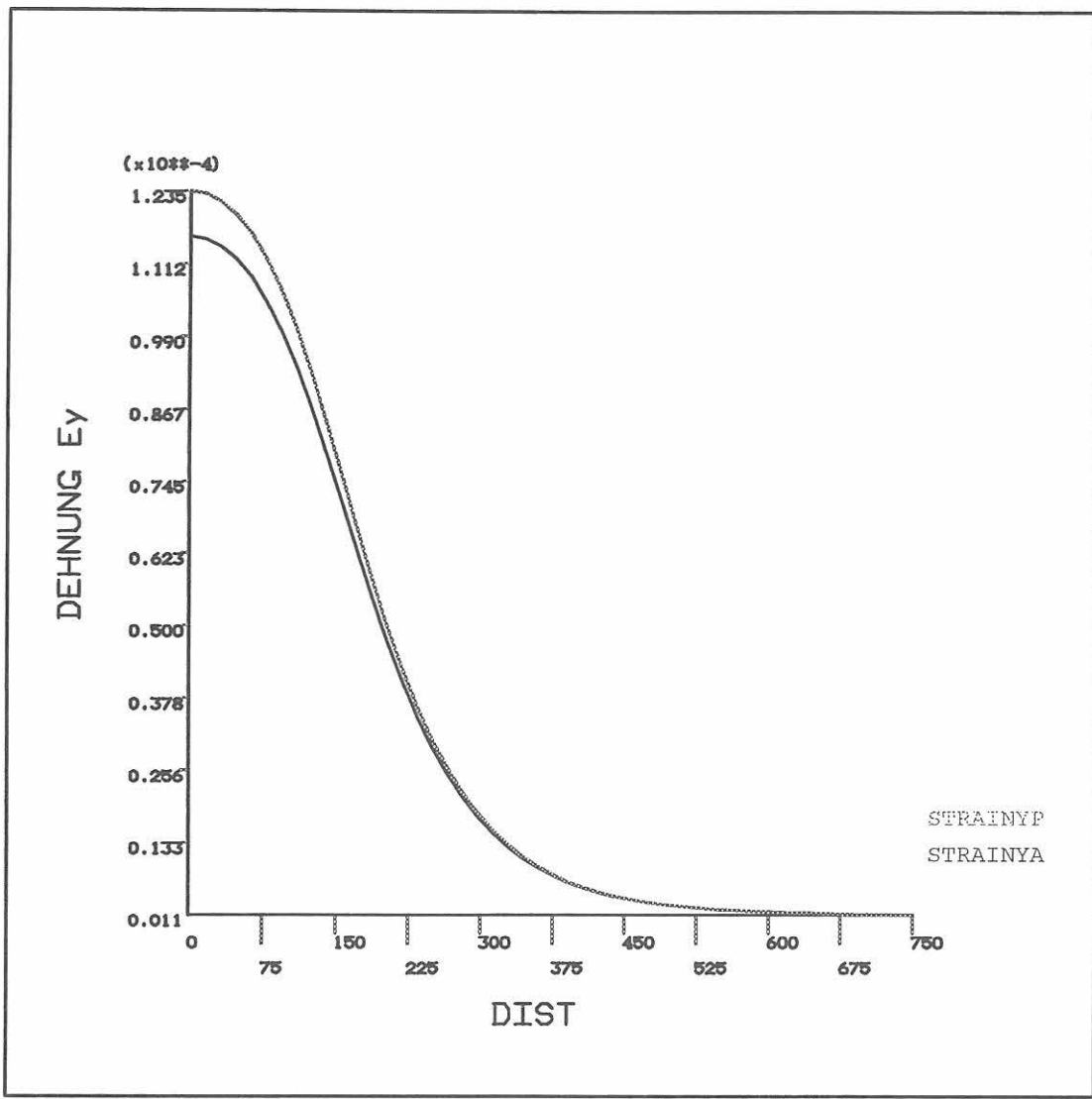
ANSYS 5.1  
JUN 6 1996  
12:56:56  
PLOT NO. 13  
POST1  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
PATH PLOT  
NOD1=84  
NOD2=524

ZV =1  
DIST=0.75  
XF =0.5  
YF =0.5  
ZF =0.5  
CENTROID HIDDEN

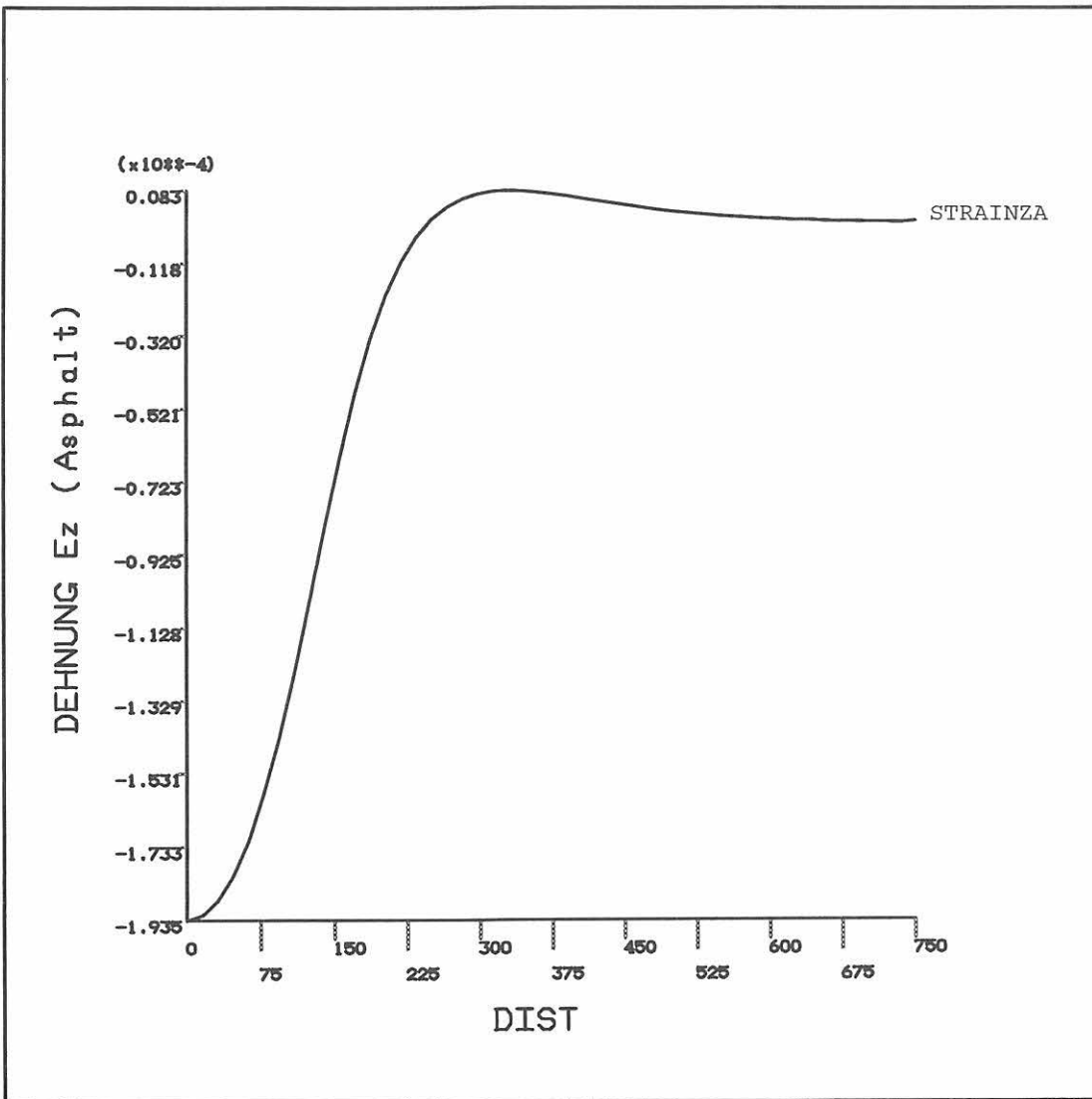


A12: Dehnung in x-Richtung

ANSYS 5.1  
JUN 6 1996  
12:56:56  
PLOT NO. 14  
POST1  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
PATH PLOT  
NOD1=84  
NOD2=524  
  
ZV =1  
DIST=0.75  
XF =0.5  
YF =0.5  
ZF =0.5  
CENTROID HIDDEN



A13: Dehnung in y-Richtung

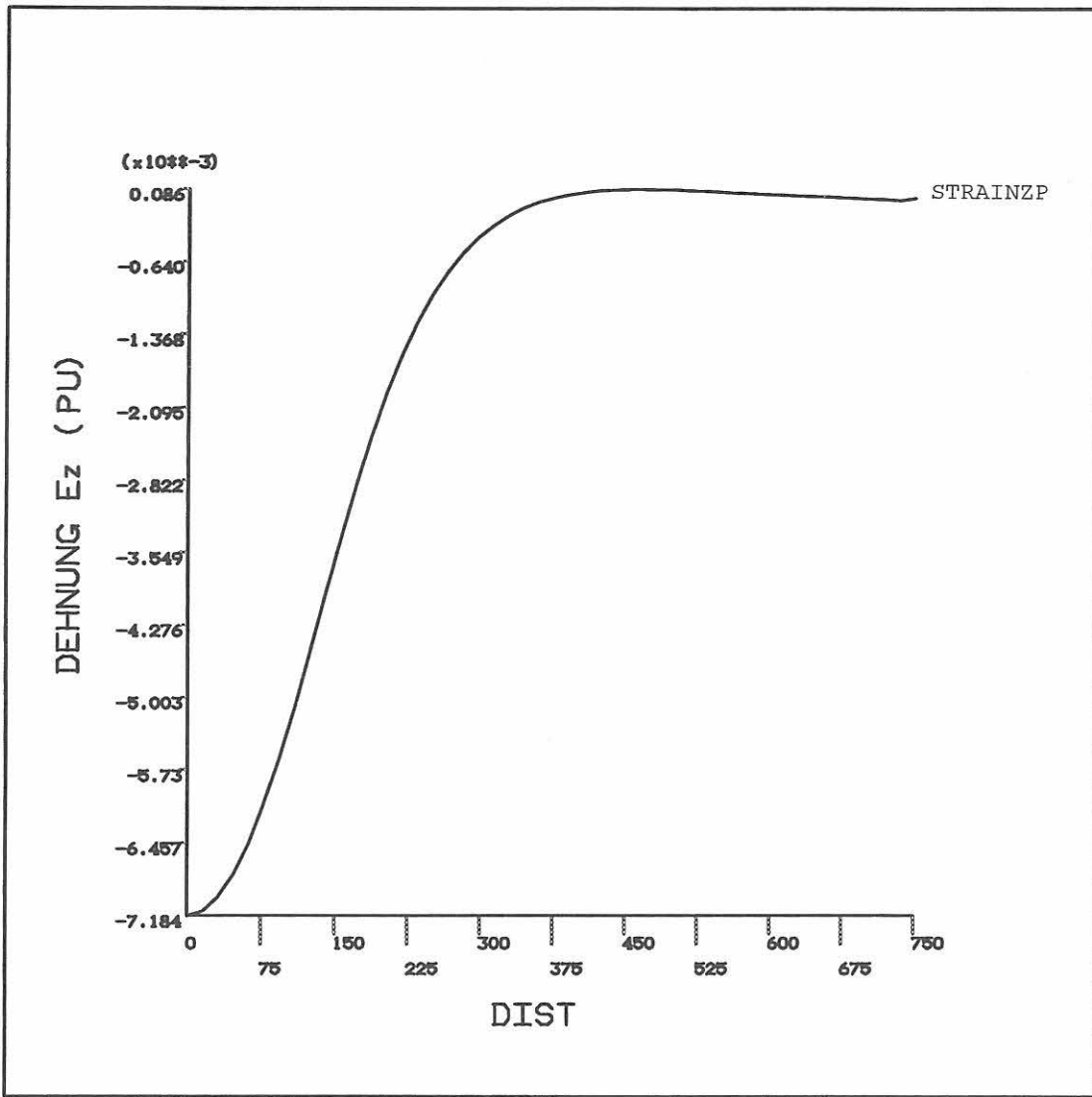


ANSYS 5.1  
 JUN 6 1996  
 12:56:56  
 PLOT NO. 15  
 POST1  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 PATH PLOT  
 NOD1=84  
 NOD2=524  
  
 ZV =1  
 DIST=0.75  
 XF =0.5  
 YF =0.5  
 ZF =0.5  
 CENTROID HIDDEN

A14: Dehnung in z-Richtung im Asphalt

ANSYS 5.1  
JUN 6 1996  
12:56:57  
PLOT NO. 16  
POST1  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
PATH PLOT  
NOD1=84  
NOD2=524

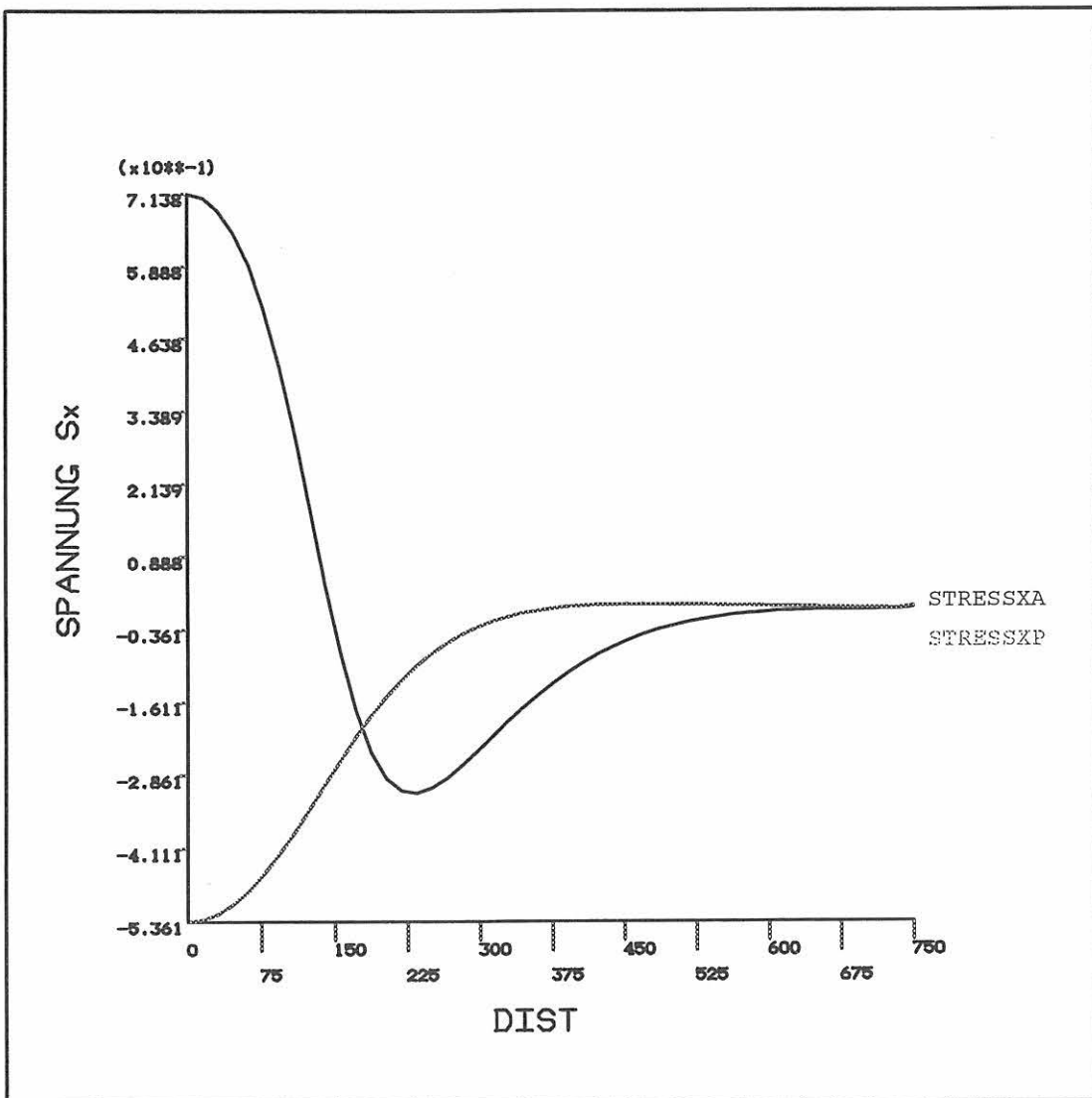
ZV =1  
DIST=0.75  
XF =0.5  
YF =0.5  
ZF =0.5  
CENTROID HIDDEN



A15: Dehnung in z-Richtung im Polyurethan

ANSYS 5.1  
JUN 6 1996  
12:56:57  
PLOT NO. 17  
POST1  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
PATH PLOT  
NOD1=84  
NOD2=524

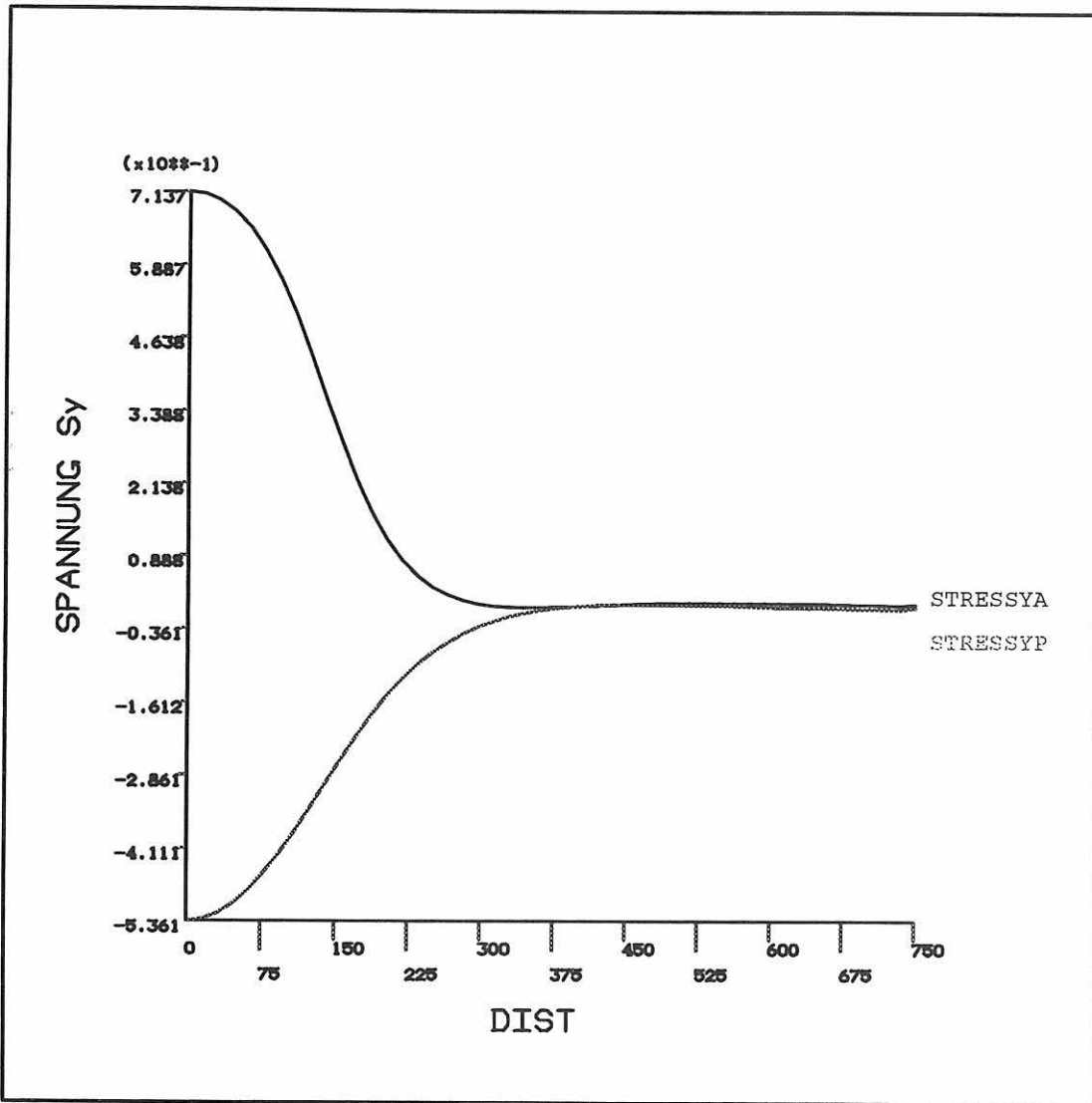
ZV =1  
DIST=0.75  
XF =0.5  
YF =0.5  
ZF =0.5  
CENTROID HIDDEN



A16: Spannung in x-Richtung



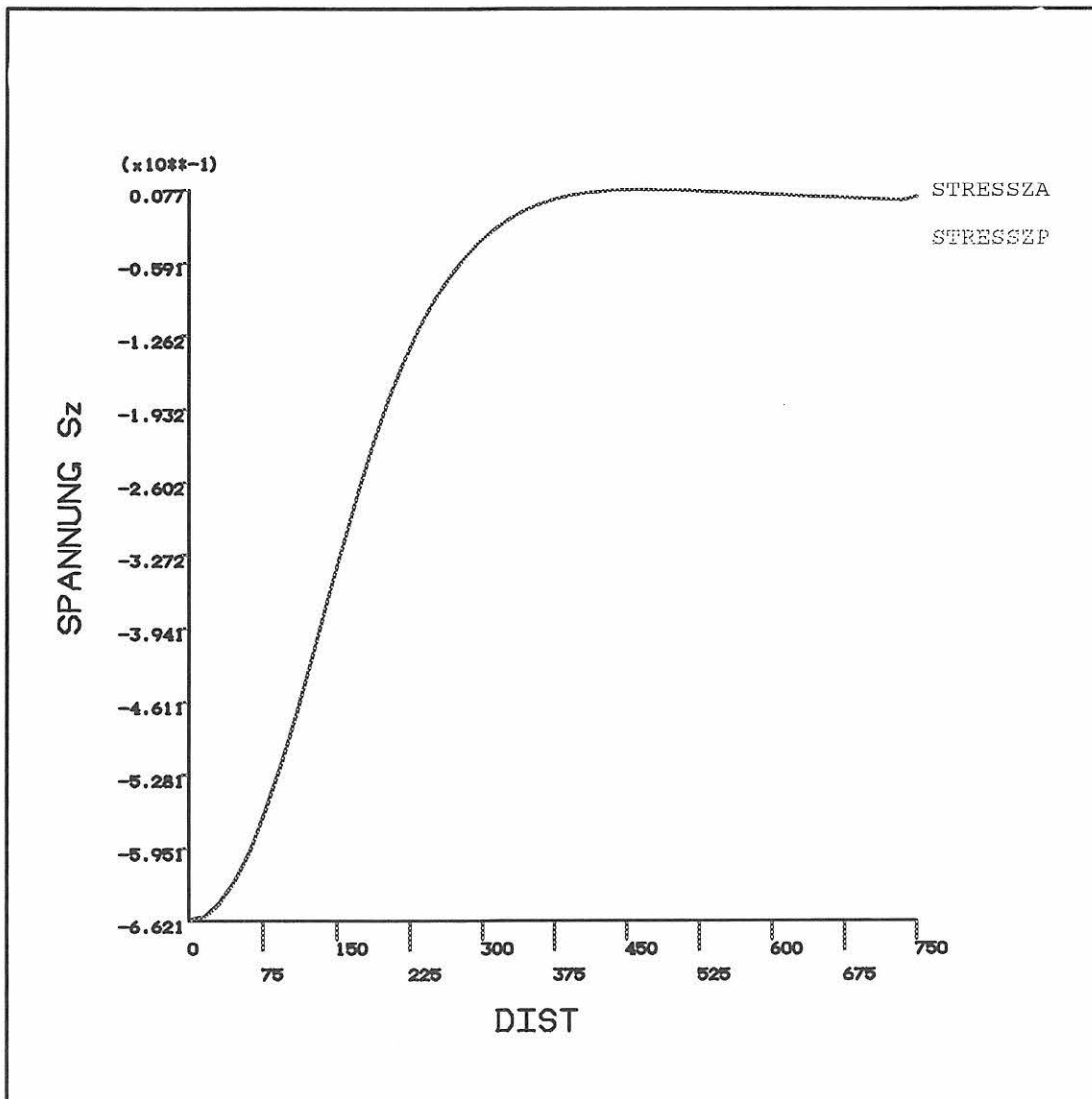
ANSYS 5.1  
 JUN 6 1996  
 12:56:57  
 PLOT NO. 18  
 POST1  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 PATH PLOT  
 NOD1=84  
 NOD2=524  
  
 ZV =1  
 DIST=0.75  
 XF =0.5  
 YF =0.5  
 ZF =0.5  
 CENTROID HIDDEN



A17: Spannung in y-Richtung

ANSYS 5.1  
JUN 6 1996  
12:56:57  
PLOT NO. 19  
POST1  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
PATH PLOT  
NOD1=84  
NOD2=524

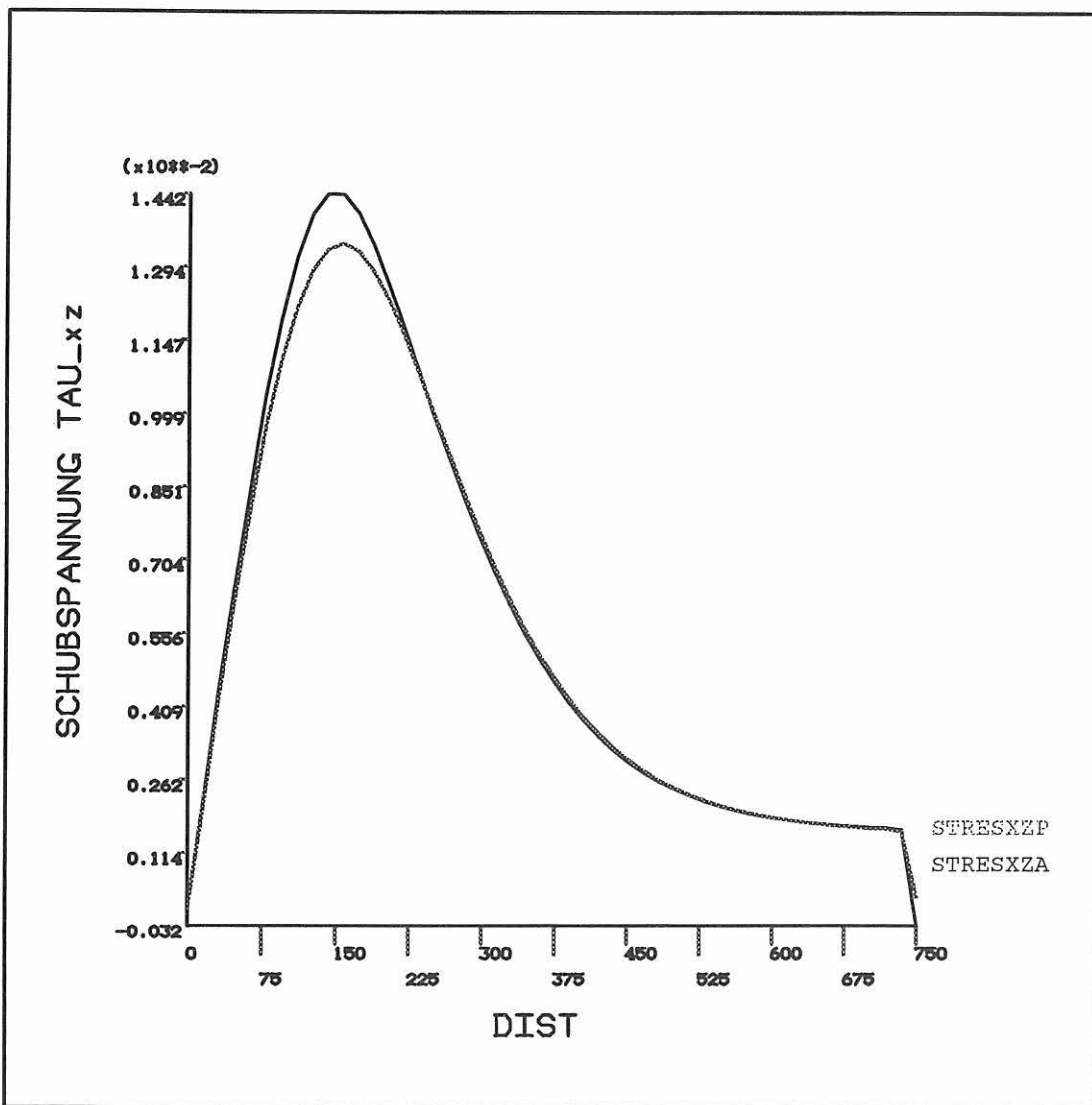
ZV =1  
DIST=0.75  
XF =0.5  
YF =0.5  
ZF =0.5  
CENTROID HIDDEN



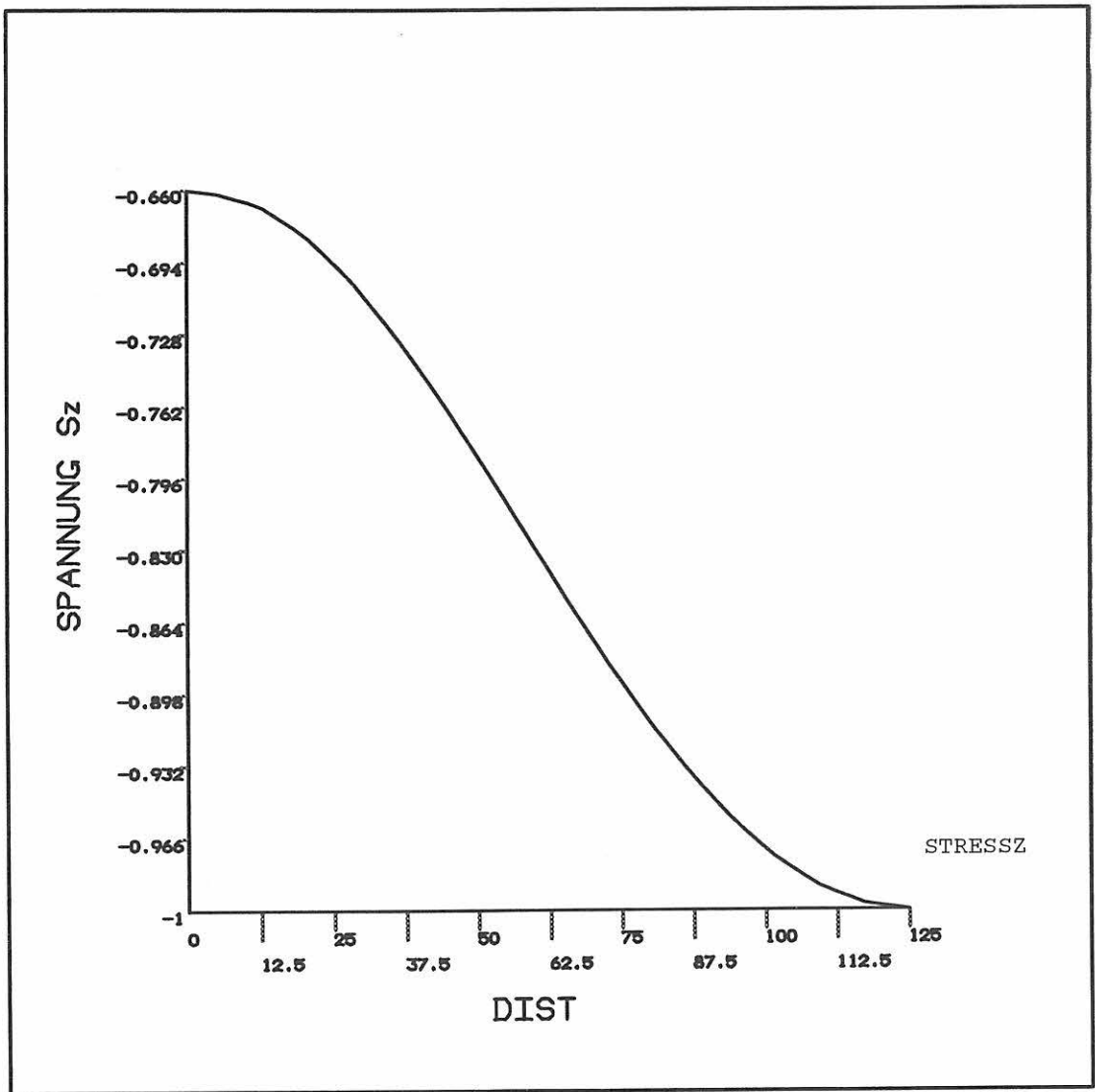
A18: Spannung in z-Richtung

ANSYS 5.1  
 JUN 6 1996  
 12:56:57  
 PLOT NO. 20  
 POST1  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 PATH PLOT  
 NOD1=84  
 NOD2=524

ZV =1  
 DIST=0.75  
 XF =0.5  
 YF =0.5  
 ZF =0.5  
 CENTROID HIDDEN



A19: Schubspannung  $\tau_{xz}$



ANSYS 5.1  
 JUN 6 1996  
 12:56:23  
 PLOT NO. 1  
 POST1  
 STEP=1  
 SUB =1  
 TIME=1  
 PATH PLOT  
 NOD1=1  
 NOD2=1036

ZV =1  
 DIST=0.75  
 XF =0.5  
 YF =0.5  
 ZF =0.5  
 CENTROID HIDDEN

A20: Spannung  $\sigma_z$  über der Höhe

# ANSYS Projektdatei für 3-dimensionales Modell

```

/BATCH
/TITLE,Untersuchung von Fahrbahnbelaeagen (E_AS=1000,D_AS=70, D_PU=3)

! Geometriedaten
rada=750      ! aeusserer Radius
radi=150      ! innerer Radius
eas=1000      ! E-Modul Asphalt
mas=0.35      ! Poissonzahl Asphalt
das=70        ! Dicke Asphalt
epu=25        ! E-Modul PU
mpu=0.45      ! Poissonzahl PU
dpu=3         ! Dicke PU
schnas=13     ! Schnitt im Asphalt

/PREP7

n,1,0,0,.5*DPU      ! Die Knoten sind noetig, um einen Pfad definieren
n,2,rada,0,.5*DPU   ! zu koennen zur Darstellung der Ergebnisse
n,3,0,0,dpu+schnas
n,4,rada,0,dpu+schnas

CSYS,1              ! Zylinderkoordinaten

ET,1,plane42        ! Elementtyp
ET,2,solid45
ET,3,plane82
ET,4,solid95

PCIRC,RADA, ,0,30,  ! 30 Grad Kreisausschnitt
PCIRC,RADI, ,0,30,

FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
AOVLAP,P51X

UIMP,1,EX, , ,EPU,      ! Material 1 : PU
UIMP,1,DENS, , , ,
UIMP,1,ALPX, , , ,
UIMP,1,REFT, , , ,
UIMP,1,NUXY, , ,MPU,
UIMP,1,GXY, , , ,
UIMP,1,MU, , , ,
UIMP,1,DAMP, , , ,
UIMP,1,KXX, , , ,
UIMP,1,C, , , ,
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,EMIS, , ,1,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,MURX, , , ,
UIMP,1,MGXX, , , ,
UIMP,1,RSVX, , , ,
UIMP,1,PERX, , , ,
UIMP,1,VISC, , , ,
UIMP,1,SONC, , , ,

UIMP,2,EX, , ,EAS,      ! Material 2 : Asphalt
UIMP,2,DENS, , , ,
UIMP,2,ALPX, , , ,
UIMP,2,REFT, , , ,
UIMP,2,NUXY, , ,MAS,
UIMP,2,GXY, , , ,
UIMP,2,MU, , , ,
UIMP,2,DAMP, , , ,
UIMP,2,KXX, , , ,
UIMP,2,C, , , ,
UIMP,2,ENTH, , , ,
UIMP,2,HF, , , ,
UIMP,2,EMIS, , ,1,
UIMP,2,QRATE, , , ,
UIMP,2,MURX, , , ,
UIMP,2,MGXX, , , ,
UIMP,2,RSVX, , , ,
UIMP,2,PERX, , , ,
UIMP,2,VISC, , , ,
UIMP,2,SONC, , , ,

```

```

TYPE,1,
MAT,1,
REAL,1,
ESYS,0,

FLST,2,2,4,ORDE,2           ! Erstellung der Geometrie
FITEM,2,9
FITEM,2,-10
LESIZE,P51X, , ,25,0.3,

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,4
LESIZE,P51X, ,5, ,1,

ASEL,S,LOC,X,RADI,RADA     ! aussen
AMESH,ALL

TYPE,2
ESIZE, ,1,
VEXT,ALL,,,0,0,DPU,

ASEL,S,LOC,Z,DPU
TYPE,1
AMESH,ALL

TYPE,2
MAT,2,

ESIZE, ,4,
VEXT,ALL,,,0,0,DAS

FLST,2,2,4,ORDE,2           ! innen
FITEM,2,7
FITEM,2,-8
LESIZE,P51X, , ,19,2

TYPE,1
MAT,1,
ASEL,S,LOC,Z,0
ASEL,R,LOC,X,0,RADI
AMESH,ALL

TYPE,2
ESIZE, ,1,
VEXT,ALL,,,0,0,DPU,

ASEL,S,LOC,Z,DPU
ASEL,R,LOC,X,0,RADI
TYPE,1
AMESH,ALL

TYPE,2
MAT,2,

ESIZE, ,4,
VEXT,ALL,,,0,0,DAS

ASEL,S,LOC,Z,0             ! FLAECHENELEMENTE LOESCHEN
ASEL,A,LOC,Z,DPU
ACLEAR,ALL

ASEL,ALL
NUMM,ALL

NSEL,S,LOC,X,0             ! FESTLEGUNG DER RANDBEDINGUNGEN
DSYM,SYMM,X,1

NSEL,S,LOC,Y,0
DSYM,SYMM,Y,1
NSEL,S,LOC,Y,30
DSYM,SYMM,Y,1

NSEL,S,LOC,Z,0             ! KEINE VERSCHIEBUNG IN Z-RICHTUNG
D,ALL, ,0, , , ,UZ
D,ALL, ,0, , , ,UX
D,ALL, ,0, , , ,UY
NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Z,DPU+DAS      ! DRUCK
NSEL,R,LOC,X,0,RADI

```



```

SF, ALL, PRES, 1,

SFGRAD, PRES, 1, X, RADI-20, -0.05      ! abnehmender Druck am Rand
NSEL, S, LOC, Z, DPU+DAS
NSEL, R, LOC, X, RADI-20, RADI
SF, ALL, PRES, 1,
NSEL, ALL

FINISH
/SOLU                                     ! LOESUNG
SOLVE
FINISH

/POST1                                    ! POSTPROCESSING
CSYS, 1
RSYS, 1

/RESET                                     ! GRAFIKAUSGABE IN FILE STRAUSGR
/GFILE, 800
/SHOW, STRAUSGR

/TITLE, UNTERSUCHUNG VON FAHRBAHNBELAEGEN (EAS=1000, DAS=70, DPU=3, X=Y=0)
N1=NODE(0,0,0)
N2=NODE(0,0,DPU+DAS)
LPATH, N1, N2
PDEF, SIGMAZ, S, Z
/AXLAB, Y, SPANNUNG SZ UEBER DER HOEHE
PLPA, SIGMAZ

esel, s, mat, , 2
/title, Untersuchung von Fahrbahnbelaeagen (EAS=1000, DAS=70, DPU=3, Z=DPU+DAS)
N4=NODE(RADA,0,DPU+DAS)
LPATH, N2, N4
PDEF, VERXPU, U, X
PDEF, VERYPU, U, Y
PDEF, VERZPU, U, Z
PDEF, STRESSXPU, S, X
PDEF, STRESSYPU, S, Y
PDEF, STRESSZPU, S, Z
PDEF, STRAINXPU, EPTO, X
PDEF, STRAINYPU, EPTO, Y
PDEF, STRAINZPU, EPTO, Z
PDEF, STRESXYP, S, XY
PDEF, STRESXZPU, S, XZ
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VX
PLPA, VERXPU
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VY
PLPA, VERYPU
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VZ
PLPA, VERZPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SX
PLPA, STRESSXPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SY
PLPA, STRESSYPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SZ
PLPA, STRESSZPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EX
PLPA, STRAINXPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EY
PLPA, STRAINYPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EZ
PLPA, STRAINZPU
/AXLAB, Y, SCHUBSPANNUNG TAU_XY
PLPA, STRESXYP
/AXLAB, Y, SCHUBSPANNUNG TAU_XZ
PLPA, STRESXZPU

/title, Untersuchung von Fahrbahnbelaeagen (EAS=1000, DAS=70, DPU=3, Z=DPU+13)
N5=NODE(0,0,DPU+SCHNAS)
N6=NODE(RADA,0,DPU+SCHNAS)
LPATH, N5, N6
PDEF, VERXPU, U, X
PDEF, VERYPU, U, Y
PDEF, VERZPU, U, Z
PDEF, STRESSXPU, S, X
PDEF, STRESSYPU, S, Y
PDEF, STRESSZPU, S, Z
PDEF, STRAINXPU, EPTO, X
PDEF, STRAINYPU, EPTO, Y
PDEF, STRAINZPU, EPTO, Z
PDEF, STRESXYP, S, XY

```

```

PDEF, STRESXZPU, S, XZ
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VX
PLPA, VERXPU
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VY
PLPA, VERYPU
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VZ
PLPA, VERZPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SX
PLPA, STRESSXPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SY
PLPA, STRESSYPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SZ
PLPA, STRESSZPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EX
PLPA, STRAINXPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EY
PLPA, STRAINYPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EZ
PLPA, STRAINZPU
/AXLAB, Y, SCHUBSPANNUNG TAU_XY
PLPA, STRESXYPU
/AXLAB, Y, SCHUBSPANNUNG TAU_XZ
PLPA, STRESXZPU

```

```

/TITLE, UNTERSUCHUNG VON FAHRBAHNBELAEGEN (EAS=1000, DAS=70, DPU=3, Z=DPU)
N7=NODE(0,0,DPU)
N8=NODE(RADA,0,DPU)
LPATH,N7,N8
PDEF, VERXA, U, X
PDEF, VERYA, U, Y
PDEF, VERZA, U, Z
PDEF, STRESSXA, S, X
PDEF, STRESSYA, S, Y
PDEF, STRESSZA, S, Z
PDEF, STRAINXA, EPTO, X
PDEF, STRAINYA, EPTO, Y
PDEF, STRAINZA, EPTO, Z
PDEF, STRESXYA, S, XY
PDEF, STRESXZA, S, XZ

```

```

esel, s, mat, , 1
PDEF, VERXPU, U, X
PDEF, VERYPU, U, Y
PDEF, VERZPU, U, Z
PDEF, STRESSXPU, S, X
PDEF, STRESSYPU, S, Y
PDEF, STRESSZPU, S, Z
PDEF, STRAINXPU, EPTO, X
PDEF, STRAINYPU, EPTO, Y
PDEF, STRAINZPU, EPTO, Z
PDEF, STRESXYPU, S, XY
PDEF, STRESXZPU, S, XZ

```

```

/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VX
PLPA, VERXA, VERXPU
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VY
PLPA, VERYA, VERYPU
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VZ
PLPA, VERZA, VERZPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SX
PLPA, STRESSXA, STRESSXPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SY
PLPA, STRESSYA, STRESSYPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SZ
PLPA, STRESSZA, STRESSZPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EX
PLPA, STRAINXA, STRAINXPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EY
PLPA, STRAINYA, STRAINYPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EZ
PLPA, STRAINZA, STRAINZPU
/AXLAB, Y, SCHUBSPANNUNG TAU_XY
PLPA, STRESXYA, STRESXYPU
/AXLAB, Y, SCHUBSPANNUNG TAU_XZ
PLPA, STRESXZA, STRESXZPU

```

```

/title, Untersuchung von Fahrbahnbelaeagen (EAS=1000, DAS=70, DPU=3, Z=DPU/2)
N9=NODE(0,0,DPU/2)
N3=NODE(RADA,0,DPU/2)
LPATH,N9,N3
PDEF, VERXPU, U, X

```

```
PDEF, VERYPU, U, Y
PDEF, VERZPU, U, Z
PDEF, STRESSXPU, S, X
PDEF, STRESSYPU, S, Y
PDEF, STRESSZPU, S, Z
PDEF, STRAINXPU, EPTO, X
PDEF, STRAINYPU, EPTO, Y
PDEF, STRAINZPU, EPTO, Z
PDEF, STRESXYPU, S, XY
PDEF, STRESXZPU, S, XZ
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VX
PLPA, VERXPU
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VY
PLPA, VERYPU
/AXLAB, Y, VERSCHIEBUNG VZ
PLPA, VERZPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SX
PLPA, STRESSXPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SY
PLPA, STRESSYPU
/AXLAB, Y, SPANNUNG SZ
PLPA, STRESSZPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EX
PLPA, STRAINXPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EY
PLPA, STRAINYPU
/AXLAB, Y, DEHNUNG EZ
PLPA, STRAINZPU
/AXLAB, Y, SCHUBSPANNUNG TAU_XY
PLPA, STRESXYPU
/AXLAB, Y, SCHUBSPANNUNG TAU_XZ
PLPA, STRESXZPU
```

fini

# ANSYS-Projektdatei für 2-dimensionales Modell

```

/BATCH
/TITLE, Untersuchung von Fahrbahnbelaeagen (EAS=6000, DAS=120, DPU=5, z=DPU)

! Variante 8

! Geometriedaten

rada=750      ! aeusserer Radius
radi=150      ! innerer Radius
eas=6000      ! E-Modul Asphalt
ma=0.35       ! Poisson-Zahl Asphalt
das=120       ! Dicke Asphalt
epu=25        ! E-Modul PU
mu=0.45       ! Poisson-Zahl PU
dpu=5         ! Dicke PU
schnas=13     ! Schnitt im Asphalt
eps=0.1       ! zum Selektieren

/PREP7

ANTYPE,STATIC           ! STATIC ANALYSIS
ET,1,PLANE82,,,1

MP,EX,1,EPU             ! Material 1 : PU
MP,NUXY,1,0.45

MP,EX,2,EAS             ! Material 2 : A
MP,NUXY,2,0.35

K,1,
K,2,,dpu
K,3,,dpu+das
KGEN,2,1,3,1,radi
KGEN,2,1,3,1,rada

L,1,4,40,1
L,4,7,160,1
L,1,2,1
L,2,3,16

ESIZE,1
ESHAPE,2

A,1,4,5,2
A,2,5,6,3
A,4,7,8,5
A,5,8,9,6

amesh,1
amesh,3
mat,2
amesh,2
amesh,4

NSEL,S,LOC,Y,0
D,ALL,,0,, , ,UX      ! KEINE VERSCHIEBUNG IN x-RICHTUNG
D,ALL,,0,, , ,UY      ! KEINE VERSCHIEBUNG IN y-RICHTUNG

NSEL,S,LOC,Y,DPU+DAS   ! DRUCK
NSEL,R,LOC,X,0,RADI+eps
SF,ALL,PRES,1,
SFGRAD,PRES,,X,RADI-20,-0.05 ! abnehmender Druck am Rand
NSEL,S,LOC,Y,DPU+DAS
NSEL,R,LOC,X,RADI-20,RADI+eps
SF,ALL,PRES,1,
NSEL,ALL

FINISH
/SOLU                  ! LOESUNG
SOLVE
FINISH

/POST1                 ! POSTPROCESSING

/RESET
/GFILE,800
/SHOW,STRAPL98

```

! Die Bezeichnung der Achsen (x-, y- und z-Richtung) erfolgt  
! analog zum 3-dimensionalen Modell

esel,s,mat,,2

nselect,loc,y,dpu  
nselect,r,loc,x,0  
\*get,N6,node,,num,min  
nselect,loc,y,dpu  
nselect,r,loc,x,rada  
\*get,N7,node,,num,min  
nselect,all  
LPATH,N6,N7  
PDEF,STRAINXA,EPTO,X  
PDEF,STRAINZA,EPTO,Y  
PDEF,STRESSXA,S,X  
PDEF,STRESSZA,S,Y  
PDEF,STRESXZA,S,XY

esel,s,mat,,1

PDEF,STRAINXP,EPTO,X  
PDEF,STRAINZP,EPTO,Y  
PDEF,STRESSXP,S,X  
PDEF,STRESSZP,S,Y  
PDEF,STRESXZP,S,XY

/AXLAB,Y,DEHNUNG Ex  
PLPA,STRAINXA,STRAINXP  
/AXLAB,Y,DEHNUNG Ez (Asphalt)  
PLPA,STRAINZA  
/AXLAB,Y,DEHNUNG Ez (PU)  
PLPA,STRAINZP  
/AXLAB,Y,SPANNUNG Sx  
PLPA,STRESSXA,STRESSXP  
/AXLAB,Y,SPANNUNG Sz  
PLPA,STRESSZA,STRESSZP  
/AXLAB,Y,SCHUBSPANNUNG TAU\_xz  
PLPA,STRESXZA,STRESXZP

ESEL,ALL  
fini  
/show,x11

## C-Programm für Kontrollrechnungen

```
/* Programm zur Berechnung des Integrals von SigmaZ ueber der Flaechen *//
/* fuer das 2-dimensionale Modell *//
/* Die Aenderungen gegenueber dem 3-dimensionalen Modell sind *//
/* gekennzeichnet mit .. *//
/* Die Eingabedaten stammen aus zwei bereinigten ANSYS-Dateien. *//
/* Aus PRNSOL.lis werden die Knotennummern und die Spannungen in *//
/* z-Richtung eingelesen, aus NLIST.lis die Knoten und die *//
/* x-Koordinaten und in der Struktur Satz abgelegt. *//
/* Nach den x-Koordinaten wird sortiert. *//
/* Integration von sz ueber der Flaechen durch Multiplikation von sz *//
/* mit der entsprechenden Kreisringflaechen und Summation. */

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include "strdef.h"

#define MAXLONG 90 /* maximale Laenge einer Zeile */
#define MAXLINES 500 /* maximale Anzahl von Zeilen */
char *getword(char *cptr, int clong, char *wptr);
void qsort(struct Satz *sptr[], int left, int right);
void swap(struct Satz *sptr[], int i, int j);

main()
{
    FILE *fptrx, *fpترز;

    Jim zeile[MAXLINES], *sptr[MAXLINES];
    int i,j, Node, NN, Nx;
    float Wert;
    float integral=0;
    float pi=3.1416;
    float gesfl, dif;
    char c, line[MAXLONG];
    char *s, *wpt, *lpt;
    char word[20];

    s=&line[0];

    putchar('\n');

    if((fpترز = fopen("PRNS73.lis","r"))==NULL)
    {
        printf("Error opening input file PRNS73.lis");
        exit(1);
    }

    if((fptrx = fopen("NLIST73.lis","r"))==NULL)
    {
        printf("Error opening input file NLIST73.lis");
        exit(2);
    }

    /* File PRNS73.lis einlesen */
    Node=-1;
    while (fgets(s, MAXLONG, fpترز) != NULL)
    {
        ++Node;
        lpt=s;
        wpt=&word[0];
        lpt=getword(lpt, 7, wpt);
        zeile[Node].NodeNumber=atoi(word);
        wpt=&word[0];
        lpt=getword(lpt, 13, wpt);
        zeile[Node].sx=atof(word);
        wpt=&word[0];
        lpt=getword(lpt, 12, wpt);
        zeile[Node].sy=atof(word);
        wpt=&word[0];
        lpt=getword(lpt, 12, wpt);
        zeile[Node].sz=atof(word);
    }

    /* File NLIST73.lis einlesen */

    s=&line[0];

    putchar('\n');
    NN=-1;
```



```

while ((fgets(s, MAXLONG, fptrx) != NULL) && ( NN < Node))
{
    ++NN;
    lpt=s;
    wpt=&word[0];
    lpt=getword(lpt, 8, wpt);
    Nx=atoi(word);
    if(zeile[NN].NodeNumber==Nx)
    {
        wpt=&word[0];
        lpt=getword(lpt, 7, wpt);
        zeile[NN].x=atof(word);
    }
    else --NN;
}

printf("\nSortierung");          /* Sortierung */
for (i=0;i<=Node;++i)
    sptr[i]=&zeile[i];
qsort(sptr, 0, Node);
for(i=0;i<=Node;++i)
{
    printf("\nN = %d      x = %.3f      sx = %e", zeile[i].NodeNumber, zeile[i].x,
zeile[i].sx);
    printf("      sy = %e      sz = %e", zeile[i].sy, zeile[i].sz);
}

printf("\nIntegration");        /* Integration */
gesfl=.0;
for(i=0;i<Node;++i)
{
    Wert=(zeile[i+1].x*zeile[i+1].x)-(zeile[i].x*zeile[i].x);
    gesfl=gesfl+Wert;
/* ..      integral=integral+.5*(zeile[i+1].sz+zeile[i].sz)*(pi*Wert);          */
    integral=integral+.5*(zeile[i+1].sy+zeile[i].sy)*(pi*Wert);
}
printf("\nGesamtflaeche=%f  exakt: %f",pi*gesfl, 750*750*pi);
printf("\nIntegral(Mitte)=%f\n", integral);

integral=0;
gesfl=.0;
for(i=0;i<Node;++i)
{
    dif=(zeile[i].x+zeile[i+1].x)/2;
    Wert=dif*dif;
    dif=zeile[i].x*zeile[i].x;
    gesfl=gesfl+Wert-dif;
/* ..      integral=integral+zeile[i].sz*pi*(Wert-dif);          */
    integral=integral+zeile[i].sy*pi*(Wert-dif);
    dif=zeile[i+1].x*zeile[i+1].x;
    gesfl=gesfl+dif-Wert;
/* ..      integral=integral+zeile[i+1].sz*pi*(dif-Wert);          */
    integral=integral+zeile[i+1].sy*pi*(dif-Wert);
}
printf("\nGesamtflaeche=%f  exakt: %f",pi*gesfl, 750*750*pi);
printf("\nIntegral(halbe Flaechen)=%f\n", integral);
}

/* Sortierung
/* Quicksort nach Hoare (Kernighan, Ritchie, Programmieren in C, S.85) */
/* qsort: sortiere v[left] ... v[right] in aufsteigender Reihenfolge */
/* void qsort(int v[], int left, int right) */

void qsort(struct Satz *sptr[], int left, int right)
{
    int i, last;
    void swap(struct Satz *sptr[], int i, int j);
/*  printf("\nleft=%d  right=%d", left, right);          */
    if(left >= right)
        return;
/*  printf("\n(*sptr[0]).NodeNumber=%d", (*sptr[0]).NodeNumber);          */
    swap(sptr, left, (left+right)/2);
    last=left;
    for(i=left+1; i<=right; i++)

```

```

    {
/*      if(v[i] < v[left])          */
        if((*sptr[i]).x < (*sptr[left]).x)
            swap(sptr, ++last, i);
    }
    swap(sptr, left, last);
    qsort(sptr, left, last-1);
    qsort(sptr, last+1, right);
}

/* swap: vertausche v[i] und v[j]          */
/* void swap(int v[], int i, int j)        */
void swap(struct Satz *sptr[], int i, int j)
{
    struct Satz temp;

    temp.NodeNumber=(*sptr[i]).NodeNumber;
    temp.x=(*sptr[i]).x;
    temp.sx=(*sptr[i]).sx;
    temp.sy=(*sptr[i]).sy;
    temp.sz=(*sptr[i]).sz;
    (*sptr[i]).NodeNumber=(*sptr[j]).NodeNumber;
    (*sptr[i]).x=(*sptr[j]).x;
    (*sptr[i]).sx=(*sptr[j]).sx;
    (*sptr[i]).sy=(*sptr[j]).sy;
    (*sptr[i]).sz=(*sptr[j]).sz;
    (*sptr[j]).NodeNumber=temp.NodeNumber;
    (*sptr[j]).x=temp.x;
    (*sptr[j]).sx=temp.sx;
    (*sptr[j]).sy=temp.sy;
    (*sptr[j]).sz=temp.sz;
/*    printf("\nswap: i=%d      j=%d", (*sptr[i]).NodeNumber, (*sptr[j]).NodeNumber);    */
}

/* getword:                                */
/* liest von der Adresse cptr an das naechste Wort (max. clong Zeichen) */
/* das gelesene Wort steht danach bei der Adresse wptr          */
/* zurueckgegeben wird in cptr die Anfangsadresse fuer das naechste */
/* zu lesende Wort                                             */
char *getword(char *cptr, int clong, char *wptr)
{
    int j=0;
    while (*cptr==' ')
    {
        ++cptr;
        ++j;
    }
    while ((*cptr != ' ') && (j<clong))
    {
        *wptr=*cptr;
        ++cptr;
        ++wptr;
        ++j;
    }
    if (j<clong)
        cptr=cptr+clong-j;
    *wptr='\0';
    return cptr;
}

```

# 11 Literaturverzeichnis

- [1] **Bathe, Klaus-Jürgen:**  
Finite-Elemente-Methoden (Matrizen und lineare Algebra, die Methoden der finiten Elemente, Lösung von Gleichgewichtsbedingungen und Bewegungsgleichungen). Springer, Berlin 1990.
- [2] **Braess, Dietrich:** Finite Elemente. Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie. Springer, Berlin 1992.
- [3] **Breitschuh, Ulrich; Jurisch, Ronald:**  
Die Finite-Elemente-Methode (Theorie, Praxis und Programmierung auf Personalcomputern). Akademie Verlag, Berlin 1993.
- [4] **Brenner, Susanne C.; Scott, L. Ridgway:**  
The Mathematical Theory of Finite Element Methods. Texts in Applied Mathematics Vol.15, Springer, Berlin 1994.
- [5] **Fritscher, Thomas; Zammert, Wolf-Udo:**  
FEM-Praxis mit ANSYS. Vieweg, Wiesbaden 1993.
- [6] **Frölich, Peter:** FEM-Leitfaden (Einführung und praktischer Einsatz von Finite-Elemente-Programmen). Springer, Berlin 1995.
- [7] **Göring, Herbert; Roos, Hans-Georg; Tobiska, Lutz:** Finite-Elemente-Methode. Akademie Verlag, Berlin 1993.
- [8] **Großmann, Christian; Roos, Hans Georg:**  
Numerik partieller Differentialgleichungen. B. G. Teubner, Stuttgart 1994.
- [9] **Holand, Ivar; Bell, Kolbein:** Finite Element Methods in Stress Analysis. Tapir, Trondheim 1969.
- [10] **Huang, Hou-Cheng; Usmani, Asif S.:**  
Finite Elemente Analysis for Heat Transfer (Theory and Software). Springer, Berlin 1994.
- [11] **Kämmel, Günter; Franeck, Heinzjochim; Recke, Hans-Georg:** Einführung in die Methode der finiten Elemente. Studienbücher der technischen Wissenschaften, Hanser, München 1990 (2., durchges. Aufl.).
- [12] **Kernighan, B.W.; Ritchie, D. M.:** The C Programming Language. Prentice Hall, London 1988.
- [13] **Klein, Bernd:** FEM (Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode). Vieweg, Wiesbaden 1990.
- [14] **Knothe, Klaus; Wessels, Heribert:** Finite Elemente (Eine Einführung für Ingenieure). Springer, Berlin 1992.
- [15] **Lorenz, Peter; Poterasu, Victor; Mihalache, Nicu:**  
Methode der finiten Elemente und der Randelemente (Theorie und Beispiele aus der Praxis). Vieweg, Wiesbaden 1990
- [16] **Marsal, Dietrich:** Finite Differenzen und Elemente (Numerische Lösung von Variationsproblemen und partiellen Differentialgleichungen). Springer, Berlin 1989.
- [17] **Märtens, Frank-Werner; Kranz, Otto:** Überprüfung von FE-Berechnungen für offene und geschlossenen Zylinder unter Innen- und Außendruck durch Vergleich mit Berechnungen auf der Basis von analytischen Formeln. Wirtschaftsverlag NW, Braunschweig 1994.
- [18] **Mitchell, A. R.; Wait, R.:**  
The Finite Element Method in Partial Differential Equations. Wiley, London 1977.
- [19] **Müller, G., Rehfeld, I., Katheder, W.**  
FEM für Praktiker. Die Methode der finiten Elemente mit dem FE-Programm ANSYS Rev. 5.0. expert, Renningen-Malmsheim 1995.
- [20] **Nasatta, Karlheinz; Hagel, Heinz:** Finite Elemente (Mechanik, Physik und nichtlineare Prozesse). Springer, Berlin 1992.
- [21] **Oden, J. T.:** Finite Elements of Nonlinear Continua. McGraw-Hill, New York 1972.
- [22] **Quarteroni, Alfio; Valli, Alberto:**  
Numerical Approximation of Partial Differential Equations. Springer-Verlag, Berlin 1994.
- [23] **Schwarz, Hans Rudolf:** Methode der finiten Elemente (Eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung der Rechenpraxis). B. G. Teubner, Stuttgart 1984.
- [24] **Stoffel, Alexander:** Finite Elemente und Wärmeleitung (Eine Einführung). VCH, Wiesbaden 1992.
- [25] **Törnig, Willi; Gipser, Michael; Kaspar, Bernhard:**  
Numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen der Technik (Differenzenverfahren, finite Elemente und die Behandlung großer Gleichungssysteme). B. G. Teubner, Stuttgart 1991.
- [26] **Vocke, W.:** Räumliche Probleme der linearen Elastizität. Fachbuchverlag, Leipzig 1969.
- [27] **Whiteman, J. R.:** The Mathematics of finite Elements and Applications (Highlights 1993). Wiley, Chichester 1994
- [28] **Zienkiewicz, O. C.:** The Finite Elemente Method. McGraw-Hill, London 1977.
- [29] **Zienkiewicz, O. C.; Zhu, J. Z.:** A Simple Error Estimator and Adaptive Procedure for Practical Engineering Analysis. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.24, pp. 337-357 (1987).

# Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas  
**Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**

Nr. 3/1970

J. Ziebs  
**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester  
**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971

N. Steiner  
**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971

P. Schneider  
**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz  
**Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971

H. Veith  
**Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971

K.-H. Möller  
**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin  
**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972

H.-J. Krause  
**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972

H. Feuerberg  
**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörpergerleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und 2.10<sup>-7</sup> Torr**

Nr. 14/1972

E. Fischer  
**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**

Nr. 15/1972

H. Pohl  
**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972

E. Knublauch  
**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102 Blatt 2 im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer**

Nr. 17/1972

P. Reimers  
**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973

W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos  
**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973

R. Rudolphi  
**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973

D. Klaffke, W. Maennig  
**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch  
**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973

W. Ruske  
**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi  
**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973

E. Knublauch  
**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise  
**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg  
**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974

H. Heinrich  
**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974

P. Schneider  
**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon  
**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann  
**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffstoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher  
**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi  
**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe  
**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff**

Nr. 35/1976

E. Limberger  
**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren**

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt  
**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976

W. Struck  
**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenüberliegenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren**

Nr. 38/1976

K.-H. Habig  
**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf  
**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung**

Nr. 40/1976

H. Hantsche  
**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976

B. Böttcher  
**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976

S. Dietlen  
**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976

W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 44/1976

W. Mathees  
**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms "Stab-Werk"**

Nr. 45/1976

W. Paatsch  
**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**

Nr. 46/1977 (vergriffen)

G. Schickert, H. Winkler  
**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung (Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses)**

- Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**
- Nr. 48/1977  
U. Holzlöhner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**
- Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**
- Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andraea, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**
- Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**
- Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**
- Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**
- Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**
- Nr. 56/1979  
W. Brünner, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**
- Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung (Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing)**
- Nr. 58/1979  
W. Struck  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**
- Nr. 59/1979  
G. Plauk  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**
- Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**
- Nr. 61/1979  
K. Richter  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**
- Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**
- Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**
- Nr. 64/1980  
W. Rücker  
**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**
- Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**
- Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**
- Nr. 67/1980  
W. Mathees  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**
- Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik — Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers**
- Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
**Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**
- Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**
- Nr. 71/1980  
W. Mathees, G. Magiera  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**
- Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**
- Nr. 73/1980  
P. Wegener  
**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**
- Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**
- Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**
- Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**
- Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Maultzsch  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**
- Nr. 78/1981  
W. Rücker  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**
- Nr. 79/1981  
V. Neumann  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**
- Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**
- Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**
- Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski  
**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches (Assesment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test)**
- Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen**
- Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982  
H. Czichos  
**Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm "Basic Technological Research"**
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimmelwitz  
**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Dietlen  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**



- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Studt  
**Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Quan Dong  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eifler  
**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
**Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
**Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie**
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiera  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton**
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schnitger  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
**Korrosion von Stahlradiatoren**
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen**
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
**Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N**
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
**Wasserstoff als Energieträger**
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Andex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützwow  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen**
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**Materials Technologies and Techno-Economic Development — A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung — Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 1)**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen**  
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Rennoch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I)**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II)**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit (Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load — Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates)**
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II (Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load — Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II)**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andreae, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau**



- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogunke, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-86314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefährzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load)**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzlöhner  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987  
W. Schon, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzlöhner  
**Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D — Zeichenprogramm für vektographische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund, insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breitzkreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke  
**Druckgetriggerte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthees  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**
- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission — Teil B: Textilien**
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitzkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rücker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rucker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kermer, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung**
- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum**
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggenhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken**
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andreae, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C**
- Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten**
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs**

- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992  
M. Weber  
**Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken**
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992  
F. Buchhardt  
**Zur Dekonvolution im Zeitbereich**
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992  
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-M. Vater  
**Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")**
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992  
Renate Müller  
**Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen — Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen**
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992  
B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig  
**Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen**
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992  
Th. Schneider, E. Santner  
**Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten — Literaturübersicht**
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992  
K. Mallwitz  
**Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung**
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992  
W. Matthees, G. Magiera  
**Impedanzeigenschaften von Finiten-Elemente-Modellen bei Integration im Zeitraum**
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992  
G. Zachariév  
**Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch**
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992  
H.-M. Bock, S. Erbay, J. With  
**Kritische Stahltemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl**
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte — Lokales Rißwachstum, Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit**
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993  
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn  
**Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfea/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)**
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993  
U. Krause  
**Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen**
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993  
U. Schmidtchen, G. Würsig  
**Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln**
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993  
D. Lietze  
**Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme**
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993  
A. Skopp  
**Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C**
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994  
St. Meretz  
**Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen**
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994  
W. F. Rücker, S. Said  
**Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden**
- Nr. 200/ISBN 3-89429-423-X/1994  
D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggenhauser  
**Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom**
- Nr. 201/ISBN 3-89429-475-2/1994  
U. Holzöhner, H. August, T. Meggyes, M. Brune  
**Deponieabdichtungssysteme — Statusbericht**
- Nr. 202/ISBN 3-89429-481-7/1994  
J. Schmidt  
**Über eine Verteilungsfunktion mit Parametern für Median, Spannweite, Schiefe und Wölbung — Konzept und Anwendung**
- Nr. 203/ISBN 3-89429-483-3/1994  
B. Schulz-Forberg, J. Ludwig  
**Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut**
- Nr. 204/ISBN 3-89429-484-1/1994  
W. Struck, E. Limberger  
**Der Glaskugelsack als Prüfkörper für Beanspruchungen durch weichen Stoß — eine erweiterte Modellvorstellung**
- Nr. 205/ISBN 3-89429-516-3/1995  
P. Rose  
**Bestimmung charakteristischer Fehlermerkmale zur rechnergestützten Bildauswertung von Schweißnahradiographien**
- Nr. 206/ISBN 3-89429-517-1/1995  
D. Lietze  
**Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Bandsicherungen bei Deflagrationen und bei einem Nachbrand**
- Nr. 207/ISBN 3-89429-593-7/1995  
W. Daum  
**Zur objektiven Beurteilung der Bildqualität industrieller Radioskopiesysteme**
- Nr. 208/ISBN 3-89429-557-0/1995  
G. Kalinka  
**Ein Beitrag zur Kristallisation gefüllter und ungefüllter Thermoplaste**
- Nr. 209/ISBN 3-89429-594-5/1995  
D. Hoffmann, K. Niesel  
**Zur Quantifizierung des Effekts von Luftverunreinigungen auf Putzmörtel**
- Nr. 210/ISBN 3-89429-595-3/1995  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera  
**Zur Erfassung der hysteretischen Dämpfung im Zeitraum**
- Nr. 211/ISBN 3-89429-973-8/1997  
G. Meier zu Köcker, K.-H. Habig  
**Steigerung der Lebensdauer und der Prozeßsicherheit durch beschichtungsgerechte Fertigung von Werkzeugen und Bauteilen**
- Nr. 212/ISBN 3-89429-974-6/1996  
S. Dähne  
**Analytische Grundlagenuntersuchungen zur Laserimpulsfluorometrie im ultravioletten Spektralbereich**
- Nr. 213/ISBN 3-89429-975-4/1995  
J. Kelm  
**High Resolution NMR Spectroscopy for the Determination of Elastomers, Blends and Thermoplastic Elastomers — Carbon and Proton NMR Spectra Catalogue**
- Nr. 214/ISBN 3-89429-976-2/1995  
J. Moll  
**Exciton-Dynamics in J-Aggregates of an Organic Dye**
- Nr. 215/ISBN 3-89429-950-9/1995  
W. Müller u. a.  
**Modellhafte Untersuchungen zu Umweltschädigungen in Innenräumen anhand des Grünen Gebäudes**
- Nr. 216/ISBN 3-89429-774-3/1997  
C.-P. Bork, J. Hünecke, M. Golmann  
**Neue Stähle mit hoher statischer, dynamischer und Dauerfestigkeit für den Automobilbau**
- Nr. 217/ISBN 3-89429-775-1/1997  
W. Müller, M. Torge, D. Kruschke, K. Adam  
**Sicherung, Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien**
- Nr. 218/ISBN 3-89429-776-X/1997  
S. Steinborn  
**Analyse von Verformung und Rißbildung bei Straßenbelägen durch Finite-Elemente-Methoden**



