

# Zugbeanspruchte Elastomerlager

**T 2832**

T 2832

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1999, ISBN 3-8167-5461-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [irb@irb.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

URL <http://www.irb.fhg.de>

Bauhaus - Universität Weimar  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Professur Verkehrsbau

## **Schlußbericht zum Forschungsthema:**

### ***Zugbeanspruchte Elastomerlager***

Auftraggeber:  
Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30  
10829 Berlin

Bearbeiter:  
Prof. Dr.-Ing. U. Freundt  
Dr.-Ing. B. Frenzel  
Dipl.-Ing. D. Bartels

Weimar, September 1998

## Inhaltsverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Einleitung   | 3  |
| 2   | Gegenwärtige Nachweiskonzepte für bewehrte Elastomerlager im Brückenbau  | 4  |
| 2.1 | Allgemeine Definition von bewehrten Elastomerlagern  | 4  |
| 2.2 | Statischer Nachweis nach Norm DIN 4141, Teil 14, Ausgabe Sept. 1985 [1]  | 5  |
| 2.3 | Nachweise nach prEN 1337-3, Fassung (Entwurf) November 1996, Abschnitt 5.3.: Bewehrte Elastomerlager [2] unter Beachtung der deutschen Stellungnahme [7] | 7  |
| 3   | Analyse der Randbedingungen der Nachweisregeln bezüglich ihrer Gültigkeit bei Zugbeanspruchung   | 9  |
| 4   | Spannungsermittlung für eine Elastomerschicht  | 11 |
| 5   | Analyse der praktischen Nachweisführung in DIN 4141, Teil 14 [1] und deren Übertragbarkeit auf die Nachweisführung bei Zugbeanspruchung                  | 13 |
| 5.1 | Allgemeines  | 13 |
| 5.2 | Gegenwärtiges Nachweiskonzept  | 14 |
| 5.3 | Übertragung des Konzeptes auf Zugbeanspruchung   | 14 |
| 6   | Analyse der praktischen Nachweisführung in prEN 1337-3 [2] und deren Übertragbarkeit auf die Nachweisführung bei Zugbeanspruchung                        | 15 |
| 7   | Analyse der Lagerbeanspruchungen   | 15 |
| 8   | Auswahl eines Tragwerkes zur Ermittlung von Lagerbeanspruchungen   | 15 |
| 9   | Lastfallzusammenstellung für die Ermittlung der Stützkräfte und Verformungen an Brücken  | 16 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 9.1  | Lasten und Lastfälle in DIN 1072   | 16 |
| 9.2  | Einwirkungen und Einwirkungskombinationen in ENV 1991  | 17 |
| 10   | Ergebnisse der Tragwerksberechnung   | 20 |
| 10.1 | Einführung   | 20 |
| 10.2 | Auflagerreaktionen   | 20 |
| 10.3 | Lagerauswahl und -nachweis   | 21 |
| 11   | Analyse der Ergebnisse der Auflagerreaktionen und der Lagerbeanspruchungen   | 22 |
| 11.1 | Vorgehensweise   | 22 |
| 11.2 | Analyse der Auflagerreaktionen (vgl. Anlage 1, S. A1/7 - A1/9)   | 22 |
| 11.3 | Analyse der Lagerbeanspruchungen - Spannungen  | 23 |
| 11.4 | Analyse der Lagerverformungen  | 27 |
| 12   | Schlußfolgerungen für eine Nachweisformulierung der DIN 4141, Teil 14 und des prEN 1337-3 für Lager mit Zugbeanspruchung | 28 |
| 12.1 | DIN 4141, Teil 14  | 28 |
| 12.2 | prEN 1337-3  | 30 |
| 13   | Voruntersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur weiteren Bearbeitung  | 31 |
| 13.1 | Allgemeines  | 31 |
| 13.2 | Auswirkung der differenten Materialkennwerte bei Zug- und Druckbeanspruchung   | 31 |
| 13.3 | Versagensort im Elastomer bei Beanspruchungskombinationen  | 32 |
| 13.4 | Schlußbemerkungen  | 33 |
|      | Literaturverzeichnis   | 41 |
|      | Verzeichnis der Bilder   | 42 |
|      | Verzeichnis der Tabellen   | 42 |
|      | Verzeichnis der Anlagen  | 43 |
|      | Anlagen  |    |

## 1 Einleitung

Die Übertragung von Zugkräften durch bewehrte Elastomerlager ist derzeit weder in DIN 4141, Teil 14 [1] noch in prEN 1337-3 [2] geregelt. Daß der Werkstoff Elastomer Zugkräfte aufnehmen kann, ist seit Jahren bekannt [3], und wurde durch Versuche nachgewiesen. Bisher ist nur in der englischen Vorschrift [9] eine zulässige Zugspannung für Elastomerlager angegeben. Eine versuchstechnische Untersetzung konnte nicht gefunden werden.

Bei der Berechnung von Brücken mit schiefem oder gekrümmtem Grundriß treten durch die Überlagerung ständiger und kurzzeitiger Einwirkungen gelegentlich abhebende Lagerkräfte auf. Für derartige Fälle kann die Verwendung verankerter Elastomerlager sinnvoll sein. Reine Zuglager sind nicht Bestandteil dieses Berichtes.

Es sind somit die Voraussetzungen zur Regelung für die Übertragung von Zugkräften durch bewehrte Elastomerlager zu prüfen. Für den praktischen Einsatz von bewehrten Elastomerlagern sind folgende Arbeiten erforderlich:

- Erweiterung der Nachweisregelungen der Normen DIN 4141, Teil14 und prEN 1337-3 für Beanspruchungen infolge Zug.
- Definition der Lastfälle und Einwirkungskombinationen der Normen DIN 1072 und ENV 1991-3 für die Nachweise bei Zugbeanspruchung.
- Eine experimentell gestützte Festlegung für die aufnehmbare Zugbeanspruchung im Elastomerlager.

Die Zielstellung der vorliegenden Untersuchungen ist die Formulierung der Nachweisregeln für bewehrte Elastomerlager bei Zugbeanspruchung im Rahmen der Sicherheitskonzepte der geltenden Normen und der in Vorbereitung befindlichen europäischen Regelungen. Die Untersuchungen werden nur für Brücken geführt. Der Bericht umfaßt entsprechend der Vorgehensweise folgende Schwerpunkte:

- Überprüfung der in den Normen DIN 4141, Teil14 und prEN 1337-3 dokumentierten Nachweisregeln für bewehrte Elastomerlager hinsichtlich ihrer Gültigkeit für Zugbeanspruchungen und deren spezifische Erweiterung.
- Analyse der in den Normen DIN 1072 und ENV 1991-3 für die Lagerberechnung von Brücken definierten Lastfälle und Einwirkungskombinationen hinsichtlich der relevanten

Einzelreaktionen sowie deren Wichtungen.

Zu diesem Zweck werden für eine in Längsrichtung vorgespannte dreifeldrige, schiefe Straßenbrücke mit Plattenquerschnitt die Stützkräfte und die Verformungen ermittelt und die Ergebnisse für Wichtungen aufbereitet.

- Vorschlag für den Nachweis bewehrter Elastomerlager für die Normen DIN 4141, Teil 14 und prEN 1337-3 sowie Definition der den Nachweisen zugeordneten Lastfälle und Einwirkungskombinationen.
- Hinweise für erforderliche experimentelle Untersuchungen.

## **2 Gegenwärtige Nachweiskonzepte für bewehrte Elastomerlager im Brückenbau**

### **2.1 Allgemeine Definition von bewehrten Elastomerlagern**

In [1] wird folgende Definition eines Elastomerlagers gegeben:

„Elastomerlager sind verformbare Bauteile (Verformungslager). Jede von außen einwirkende Last, die neben der zentrischen Stauchung, eine Relativbewegung (Verschiebung, Verdrehung) der durch das Lager miteinander verbundenen Bauteile bewirkt, erzeugt eine Lagerbewegung.“

Im Brückenbau verwendete Elastomerlager sind bewehrt, das heißt, durch einvulkanisierte Stahlbleche und die Beschränkung der Schichtdicken des Elastomers auf 5 mm bis maximal 18 mm wird die Querdehnung des Elastomers bei Pressung und die damit verbundene Vertikalverformung verringert. In den Bewehrungsblechen entstehen dabei Zugspannungen. In Bild 1 ist das Verformungsverhalten von Elastomerlagern unter Pressung, Verdrehung und Verschiebung dargestellt.

Bisher zugelassene Pressungen bei Regellagern [1] reichen je nach Bauart von 8 bis 15 MN/m<sup>2</sup>. Bei kleinen Lagerpressungen (< 3 MN/m<sup>2</sup>) sind Verankerungen notwendig, die durch an der Oberseite und Unterseite des Elastomers anvulkanisierte Stahlbleche mit Ankerbolzen hergestellt werden (Bild 2). Dieser Bericht befaßt sich ausschließlich mit verankerten, bewehrten Elastomerlagern.

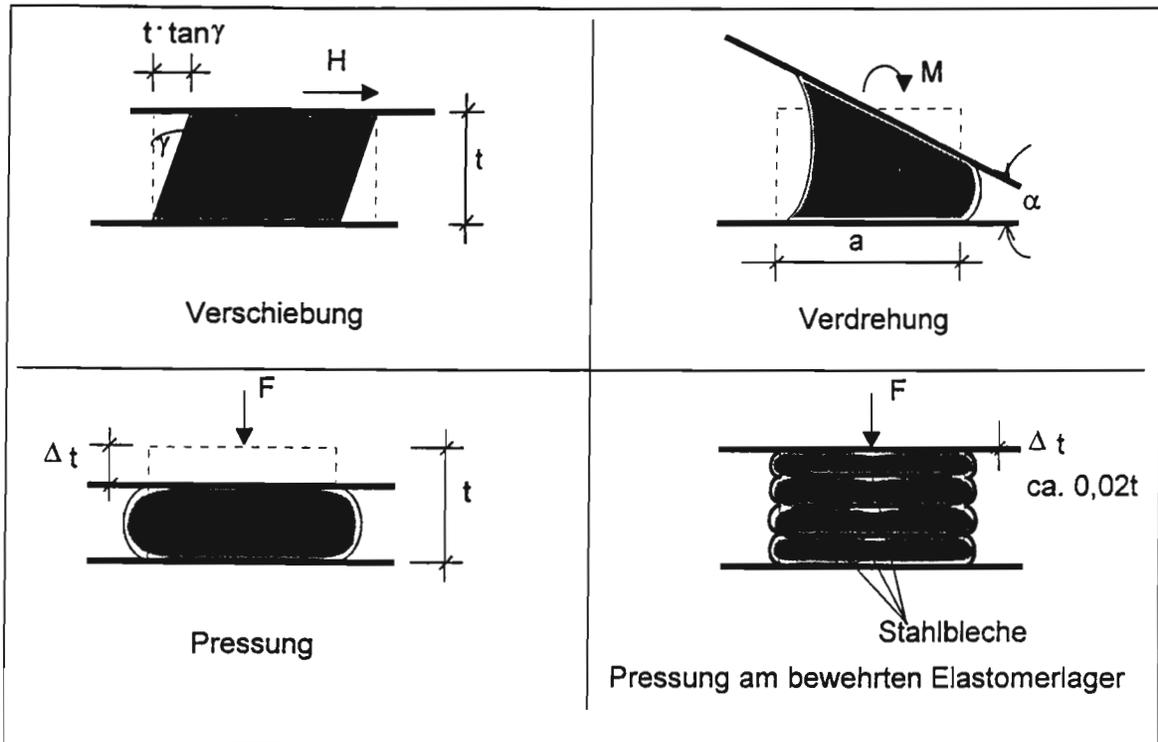


Bild 1: Verformungsverhalten von Elastomerlagern

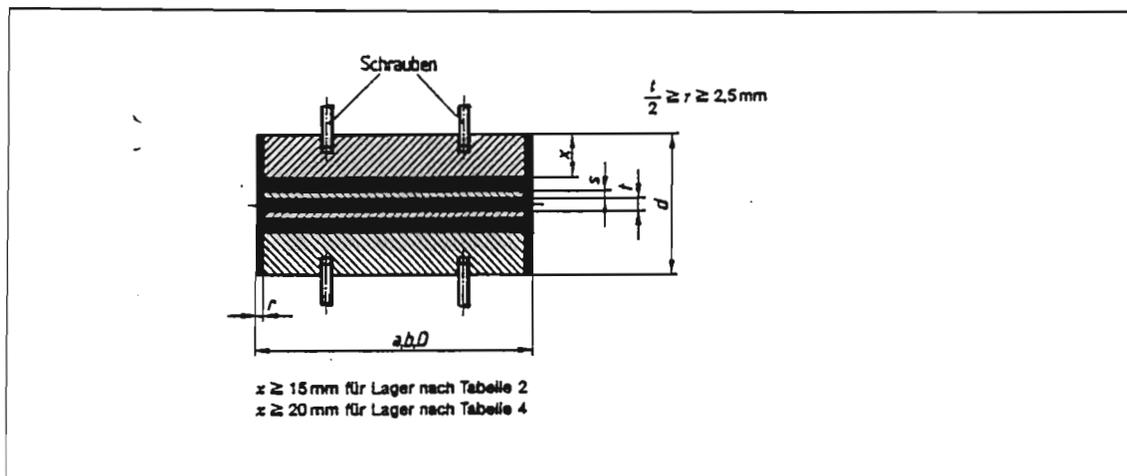


Bild 2: Beispiel eines verankerten, bewehrten Elastomerlagers aus DIN 4141, Teil 14 (Einsatz als Zug - Drucklager möglich)

## 2.2 Statischer Nachweis nach Norm DIN 4141, Teil 14, Ausgabe Sept. 1985 [1]

In der Norm DIN 4141, Teil 14 werden Regellager vorgegeben, deren Geometrien, Drehwinkel, mittlere Lagerpressungen und Schubverformungen  $\tan \gamma$  begrenzt sind.

Dadurch entfallen Stabilitätsbetrachtungen, wie z.B. für das Knicken und „Rollen“ des Lagers. Entsprechend den in Bild 1 dargestellten Beanspruchungen sind folgende Nachweise zu führen:

- **Beanspruchung rechtwinklig zur Lagerebene nach 5.2**

Bei einer Auflast  $F$  ist die mittlere Lagerpressung  $\sigma_m = F/A$  zu ermitteln ( $A$  = Grundfläche des Lagers) und mit dem zulässigen Wert in Abhängigkeit von der Lagergröße zu vergleichen.

- **Beanspruchung parallel zur Lagerebene nach 5.3**

Die Schubverformung  $\tan \gamma$  aus einer Parallelverschiebung  $v$  zwischen Überbau und Unterbau ist zu berechnen:

$$\tan \gamma = v/T \quad \text{mit } T = \text{Elastomerdicke des Lagers.}$$

Die zugehörige Kraft in der Lagerebene (Rückstellkraft) ergibt sich zu :

$$F_{xy} = A \cdot G \cdot \tan \gamma \quad \text{mit } G = 1,0 \text{ N/mm}^2 \text{ Schubmodul des Elastomers.}$$

Bei Lagern mit einer Elastomerdicke  $T \leq a/5$  bzw.  $T \leq D/5$  mit  $a$  = Seitenlänge eines Lagers mit rechteckiger Grundfläche und  $D$  = Durchmesser eines Lagers mit runder Lagerfläche ist **zul  $\tan \gamma = 0,7$** . Für dickere Lager mit  $T \leq a/3$  bzw.  $T \leq D/3$  gilt

$$\text{zul } \tan \gamma = 0,7 - (T/a - 0,2) \text{ bzw. } \text{zul } \tan \gamma = 0,7 - (T/D - 0,2)$$

Schubverformungen in mehreren Richtungen sind vektoriell zu addieren.

Planmäßige Beanspruchungen parallel zur Lagerebene aus ständigen Lasten einschließlich des Erddruckes sind nicht zulässig. Beanspruchungen parallel zur Lagerebene aus Zwang und kurzzeitigen Lasten sind zulässig.

- **Verdrehung nach 5.4**

Aus der Verdrehungsdifferenz  $\vartheta$  zwischen Überbau und Unterbau ist der Drehwinkel je Elastomerschicht  $\alpha = \vartheta/n$  zu ermitteln und mit dem zulässigen Wert zu vergleichen.

Aus dieser aufgezwungenen Verformung des Lagers ergibt sich das rechnerische Rückstellmoment

$$\text{für rechteckige Lager zu } M = a^5 \cdot b \cdot G \cdot \alpha / 50 \cdot t^3$$

$$\text{für runde Lager zu } M = D^6 \cdot G \cdot \alpha / 100 \cdot t^3$$

- **Gleitsicherheit nach 5.5**

Dieser Nachweis ist nur für unverankerte Lager von Bedeutung.

- **Stauchung nach 5.6**

Der Einfluß der Stauchung des Lagers auf das angrenzende Bauteil ist erforderlichenfalls nachzuweisen.

Elastomerlager mit Grundflächen von  $\geq 350 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$  bzw. 400 mm Durchmesser müssen mindestens 3 Elastomerschichten haben.

## 2.3 Nachweise nach prEN 1337-3, Fassung (Entwurf) November 1996, Abschnitt 5.3.: Bewehrte Elastomerlager [2] unter Beachtung der deutschen Stellungnahme [7]

In der zukünftigen Europäischen Norm [2] erfolgt die „Bemessung“ der Lager über einen Verformungsnachweis infolge Auflast (Pressung), Horizontalbewegung (Verschiebung) und Verdrehung (siehe Bild 1) und die Überprüfung von Stabilitätskriterien. Die Grundlage der Europäischen Normung ist die Berechnungsmethode nach Grenzzuständen.

- **Nachweis der maximalen Verformung nach 5.3.3**

An jeder Stelle im Lager ergibt sich die Summe der Teilverformungen ( $\varepsilon_{t,d}$ ) entsprechend der Gesamtbeanspruchung ( $S_d$ ) nach der Formel:

$$\varepsilon_{t,d} = K_L (\varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{a,d}) \text{ mit}$$

$\varepsilon_{c,d}$  Verformung aus Auflast (unter Druck) nach 5.3.3.3

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1,5 \cdot F_{z,d}}{G_d \cdot A_r \cdot S}$$

$A_r$  reduzierte Grundfläche des Lagers

$S$  Formfaktor

$G_d$  Bemessungswert des Schubmoduls

$F_{z,d}$  Bemessungswert der Auflast

$\varepsilon_{q,d}$  Verformung aus Horizontalbewegung (durch Schub) nach 5.3.3.4

$$\varepsilon_{q,d} = v_{xy,d} / T_q \leq 0,7$$

$v_{xy,d}$  die maximale horizontale Lagerverformung ermittelt durch vektorielle Addition von  $v_{x,d}$  und  $v_{y,d}$

$T_q$  Gesamtdicke des Elastomers bei Schubverformung

$\varepsilon_{\alpha,d}$  Verformung aus Verdrehung nach 5.3.3.5

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(a'^2 \cdot \alpha_{a,d} + b'^2 \cdot \alpha_{b,d}) \cdot t_i}{2 \cdot \sum t_i^3}$$

$\alpha_{a,d}$  Verdrehwinkel über die Breite a des Lagers

$\alpha_{b,d}$  Verdrehwinkel über die Länge b des Lagers

$t_i$  Dicke der einzelnen unbelasteten Elastomerschicht

$a'$ ,  $b'$  Breite bzw. Länge der Bewehrungsbleche

$K_L$  i.a.  $K_L = 1,0$

- **Nachweis der maximalen Zugbeanspruchung in den Bewehrungsblechen nach 5.3.3.6**

Es wird eine erforderliche Bewehrungsblechdicke  $t_s$  (mit  $t_s \geq 2$  mm) ermittelt..

- **Kriterien für die Stabilität nach 5.3.3.7.**

- Stabilität in Bezug auf Verdrehung („Rollen“)

Es wird eine Verdrehungsbegrenzung eingeführt, bei der ein Mindestwert der vertikalen Einfederung (in Abhängigkeit der Verdrehwinkel  $\alpha_a$  und  $\alpha_b$  und der Größe der Bewehrungsbleche  $a'$  und  $b'$ ) nicht unterschritten werden darf.

- Stabilität in Bezug auf Knicken

Der Nachweis wird in der Form einer Pressungsbegrenzung geführt, bei der die Pressung  $F_{z,d}/A_r$  einen Maximalwert (abhängig von der Größe der kleineren Lagerseite, der Nenndicke des Elastomers, dem Schubmodul und einem Formfaktor) nicht überschreiten darf.

- Stabilität in Bezug auf das Gleiten

Dieser Nachweis ist nur für unverankerte Lager zu führen.

- **Auf das Bauwerk einwirkende Kräfte, Momente und Verformungen** werden in **5.3.3.8.** angegeben. Im folgenden werden nur die Gleichungen der Rückstellmomente aufgeführt, da in diesem Fall Differenzen zu den Angaben in DIN 4141, Teil 14 bestehen.

- Pressung in den Kontaktflächen
- Kraft, die aus der Horizontalverformung des Lagers auf das Bauwerk einwirkt (Rückstellkraft)

- Verdrehwiderstand (Rückstellmoment)

für rechteckige Lager 
$$M_t = \frac{G}{\gamma_m} \cdot \frac{a \cdot a^5 \cdot b}{n \cdot t^3 \cdot K_s}$$

für runde Lager 
$$M_t = \frac{G}{\gamma_m} \cdot \frac{\pi \cdot a \cdot D^6}{512 \cdot n \cdot t^3}$$

mit  $\gamma_m = 1$  und  $K_s$  nach Tabelle 1.

Tabelle1: Werte  $K_s$  [2]

|       |     |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| b/a   | 0,5 | 0,75 | 1    | 1,2  | 1,25 | 1,3  | 1,4  | 1,5  |
| $K_s$ | 137 | 100  | 86,2 | 80,4 | 79,3 | 78,4 | 76,7 | 75,3 |

|       |      |      |      |      |      |      |      |          |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| b/a   | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2    | 2,5  | 10   | $\infty$ |
| $K_s$ | 74,1 | 73,1 | 72,2 | 71,5 | 70,8 | 68,3 | 61,9 | 60       |

### 3 Analyse der Randbedingungen der Nachweisregeln bezüglich ihrer Gültigkeit bei Zugbeanspruchung

Die praktische Nachweisführung für bewehrte Elastomerlager in [1] und [2] unterscheidet sich prinzipiell durch folgende Merkmale:

- Die „Nachweisführung“ der Norm DIN 4141, Teil 14 beschränkt sich durch die Vorgabe von Regellagern auf eine Lagerwahl. Für das ausgewählte Lager sind Einzelnachweise zur Beschränkung der Pressung, der Verschiebung und der Drehwinkel zu führen.
- Nach prEN 1337-3 ist ein Verformungsnachweis zu führen, bei dem die Gesamtverformung aus Pressung, Verschiebung und Verdrehung beschränkt wird. Weiterhin sind zusätzlich Stabilitätskriterien für die Lager einzuhalten.

Beide Nachweise werden durch das noch ungenügend bekannte Materialverhalten des Elastomers geprägt. Umwelteinflüsse, die Art der Belastung, die Form der Lager u.v.m. beeinflussen das Tragverhalten der Elastomerlager. Die Werte für die Begrenzung von  $\epsilon_{t,d}$  in [2] oder  $\sigma_m$  in [1] sind empirisch festgelegte Werte.

Für die weitere Bearbeitung werden die vorliegenden Nachweiskonzepte als Grundlage verwendet und die Einordnung der Zugbeanspruchung verankerter, bewehrter Elastomerlager unter diesem Aspekt überprüft.

Entsprechend Bild 1 entsteht folgendes Verformungsbild :

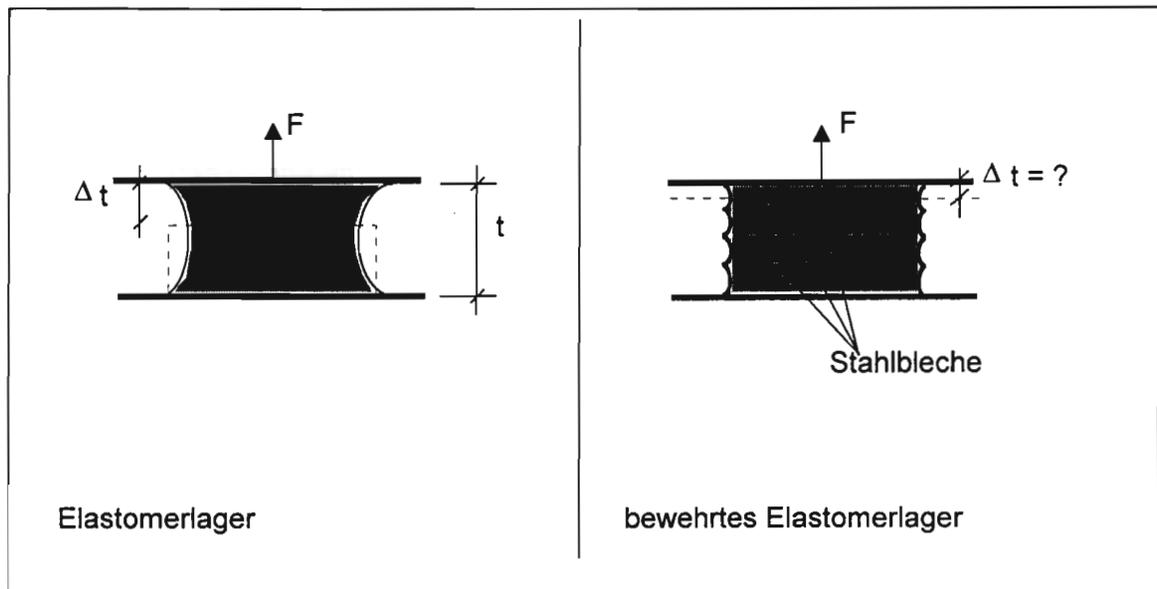


Bild 3: Verformungsverhalten unter zentrischem Zug

Infolge der Zugkraft kommt es zur Dehnung des Elastomers, welche eine Einschnürung in Querrichtung zur Folge hat. Auch in diesem Fall wirken die Bewehrungsbleche der Querverformung entgegen; sie werden auf Druck beansprucht.

Unter den getroffenen Voraussetzungen gilt prinzipiell:

- **Die Spannungen und Verformungen eines bewehrten Elastomerlagers ändern beim Wechsel von Druckbelastung zu Zugbelastung lediglich ihr Vorzeichen.**

Für die praktische Nachweisführung wurde die Spannungs- und Verformungsermittlung durch definierte Randbedingungen vereinfacht. Die Randbedingungen für die Spannungs- und Verformungsermittlung bei Zugbeanspruchung entsprechen denen bei Druckbeanspruchungen. Bei Zugbeanspruchung sind deshalb folgende Sachverhalte zu überprüfen:

- **Bei zugbeanspruchten Lagern ist durch die Beanspruchungsart und die erforderliche Verankerung ein stabiles Gleichgewicht gegeben. Ein Rollen, Knicken oder Gleiten des Lagers ist nicht möglich.**

Die Stabilitätskriterien haben bisher die Verdrehungsgrenzen für die Lager bestimmt. Somit war sichergestellt, daß der Zugspannungsbereich infolge Verdrehung durch die

Druckspannung überdrückt wird. Die auftretende Zugspannung ist damit nicht nachweisrelevant.

Dieser Sachverhalt ändert sich bei Zugbeanspruchung. Es interessieren auch die aus der Verdrehung resultierenden Zugspannungen. Die Verdrehung des Lagers resultiert aus den auftretenden Endtangentialwinkeln und den aus dem Horizontalschub resultierenden Momenten aus Horizontalkraft und Exzentrizität der Vertikalkraft.

- **Die Arbeitslinie des Elastomers weist zwischen dem Zug- und Druckbereich einen unterschiedlichen Verlauf aus.**

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt bei der Betrachtung zugbeanspruchter, bewehrter Elastomerlager ist der veränderte Verlauf der Arbeitslinie im Zugbereich. Mit zunehmender Zugkraft wachsen die Verformungen (Dehnungen) wesentlich stärker an als das im vergleichbaren Druckbereich (Stauchung) der Fall ist. Bisherige Untersuchungen zur Arbeitslinie des Elastomers gingen jedoch nicht weit über eine qualitative Einschätzung hinaus. Um dieses noch weitgehend unbekanntes materialspezifische Verhalten in der Bemessung der Lager auf Zug auszuschließen, ist es unbedingt erforderlich, die Änderung des Elastizitätsmoduls bzw. des Schubmoduls in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart (Zug oder Druck) durch Aufstellen versuchstechnisch ermittelter Arbeitslinien des Elastomers zu beschreiben. Bei Darstellungen von Rechenregeln ist dies zwingend zu beachten.

- **Die Bewehrungsbleche der Lager werden auf Druck beansprucht.**

Die bei Zugbeanspruchung eines bewehrten Elastomerlagers entstehenden Druckkräfte in den Bewehrungsblechen können zur Zeit nur tendenziell eingeschätzt werden, da diese wesentlich durch die Spannungen in der angrenzenden Elastomerschicht beeinflusst werden. Abhängig von der Beanspruchungshöhe muß das Stabilitätsverhalten beurteilt werden. Eine Analyse der Spannungsverläufe in den Blechen wird in den weiteren Untersuchungen nicht geführt.

#### **4 Spannungsermittlung für eine Elastomerschicht**

Aus Übersichtsgründen und als Grundlage nachfolgender Rechnungen folgt eine Zusammenstellung der Gleichungen zur Ermittlung von Schub- und Normalspannungen im Elastomerlager. Die verwendeten Grundlagen sind in [3, 10] umfänglich dokumentiert und werden nur soweit wiederholt, wie es zur Erklärung von Formelzeichen erforderlich ist.

## Formelzusammenstellung für die Berechnung der Schub- und Normalspannungen in der mittleren Elastomerschicht

- **Zentrischer Druck / Zug**

$$\sigma_m = \frac{V}{a \cdot b}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_m}{2 \cdot \eta_2}$$

$$\tau_{\text{Seite a}} = \frac{\sigma_m \cdot t}{a \cdot \eta_2}$$

$$\tau_{\text{Seite b}} = \tau_{\text{Seite a}} \cdot \eta_1$$

mit

- V Vertikalkraft
- a, b Seitenlängen des Lagers (b = längere Seite)
- $\sigma_m$  mittlere Normalspannung
- $\sigma_{\max}$  maximale Zugspannung
- t Elastomerschichtdicke
- $\tau_{\text{Seite a}}$  maximale Schubspannung - Seite a
- $\tau_{\text{Seite b}}$  Schubspannung - Seite b
- $\eta_1, \eta_2$  Beiwerte zur Torsionsbeanspruchung

- **Verschiebung**

Schubspannung aus Verschiebung v

$$\tau = G \cdot \tan \gamma = G \cdot \frac{v}{t}$$

Bei Verschiebung entsteht die Rückstellkraft H und die Exzentrizität der Vertikalkraft e. Beide Anteile führen zu einer Verdrehung des Lagers um den Winkel  $\alpha$ .

$$H = A \cdot G \cdot \tan \gamma$$

$$M = V \cdot \frac{v}{2} + H \cdot d$$

$$a = \frac{M \cdot K_s \cdot t}{2 \cdot n \cdot a^3 \cdot b}$$

Daraus resultieren folgende Spannungen:

$$\tau = \frac{G}{2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot a$$

$$\sigma = \frac{5,76}{K_s} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^3 \cdot G \cdot a$$

mit

- T Gesamtdicke des Elastomers

|                |                                       |
|----------------|---------------------------------------|
| d              | Einbaudicke des Lagers                |
| n              | Anzahl der Elastomerschichten         |
| G              | Schubmodul                            |
| v              | Verschiebung des Lagers               |
| K <sub>s</sub> | Beiwert zur Ermittlung der Verdrehung |
| A              | Grundfläche des Lagers                |

- **Verdrehung**

Bei Verdrehung des Lagers (z.B. durch einen Endtangentialwinkel  $\phi$ ) entstehen folgende Spannungen:

$$\tau = \frac{G}{2} \cdot \frac{\phi}{n} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2$$

$$\sigma = \frac{5,76}{K_s} \cdot G \cdot \frac{\phi}{n} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^3$$

Bei Verdrehung des Lagers entsteht bei vorhandener Vertikalkraft eine Horizontalkraft. Aus dieser Horizontalkraft resultiert ein weiterer Schubspannungsanteil, der i.d.R. sehr klein ist.

$$H = \frac{v \cdot \phi}{2 \cdot n}$$

$$\tau = \frac{H}{A}$$

mit

$$\frac{\phi}{n} \quad \text{Drehwinkel pro Elastomerschicht}$$

## 5 Analyse der praktischen Nachweisführung in DIN 4141, Teil 14 [1] und deren Übertragbarkeit auf die Nachweisführung bei Zugbeanspruchung

### 5.1 Allgemeines

In den bisherigen Darstellungen wurde gezeigt, daß die Grundlagen der Spannungsermittlungen unabhängig von der Beanspruchungsrichtung gelten, vorausgesetzt die unterschiedlichen Kennwerte der Arbeitslinien finden Berücksichtigung. In der Norm DIN 4141, Teil 14 wurde die Berechnung für die praktische Nachweisführung vereinfacht.

Es sind nachzuweisen:

- die mittlere Lagerpressung
- die Schubverformung  $\tan \gamma$
- die Drehwinkel

Für die genannten Kennwerte sind für definierte Regellager zulässige Werte festgelegt. Das Nachweiskonzept ist somit für die praktische und einfache Anwendung erstellt. Die diesbezügliche Vorgehensweise ist wie folgt darstellbar.

## 5.2 Gegenwärtiges Nachweiskonzept

Die maximal auftretenden Schubspannungen sollen den Wert  $5G$  nicht überschreiten.

Schubspannungen entstehen aus Druckbeanspruchung, zweiachsiger Verdrehung und Verschiebung. Die Verschiebung ist mit  $\tan \gamma = 0,7$  begrenzt. Aus Standsicherheitsgründen soll die Resultierende der Beanspruchung im Kern liegen.

Damit liegt eine Gleichung mit drei Unbekannten vor. Zur Lösung stehen zwei Randbedingungen zur Verfügung. Es bleibt die Abhängigkeit der mittleren Lagerpressung und der zweiseitigen Drehwinkel offen. Durch versuchsgestützte Festlegung der mittleren Lagerpressung sind auch die Drehwinkel definierbar.

Festlegung der mittleren Lagerpressung und Ableitung der zulässigen Drehwinkel.

Durch Festlegung von Geometrie und Schichtdicken von Elastomer und Blech sowie einer gesicherten Produktionsüberwachung sind die bekannten materialspezifischen Verhaltensweisen für die praktische Anwendung abgesichert.

## 5.3 Übertragung des Konzeptes auf Zugbeanspruchung

Wird nun das gleiche Konzept unter Beachtung der Feststellungen des Abschnittes 3 verfolgt, ergibt sich folgendes Bild:

Die maximal auftretenden Schubspannungen müssen begrenzt werden. Die Größe der aufnehmbaren Schubspannung bei Zugbeanspruchung muß experimentell ermittelt werden. Wegen des kleineren Elastizitätsmoduls im Zugbereich ist auch eine kleinere aufnehmbare Schubspannung zu erwarten.

Schubspannungen entstehen nunmehr aus Zugbeanspruchung, zweiachsiger Verdrehung und Verschiebung. Die Verschiebung bleibt vorerst mit  $\tan \gamma = 0,7$  begrenzt. Eine Verdrehungsbegrenzung gibt es nicht. Für die Gleichung mit drei Unbekannten steht noch eine Randbedingung zur Verfügung. Wenn der Weg über die Festlegung einer mittleren Zugspannung gegangen wird, dann ist eine pragmatische Festlegung einer Verdrehungsbegrenzung erforderlich.

Da die Untersuchungen für Lager mit Zugbeanspruchungen aus nicht ständigen Lasten

geführt werden, sollte über eine Analyse auftretender Relationen zwischen Zugbeanspruchung und Verdrehungen eine Grundlage für eine pragmatische Begrenzung geschaffen werden. Dann kann durch Begrenzungsfestlegungen und experimentell ermittelten Begrenzungskennwerten das gegenwärtige Nachweiskonzept beibehalten werden. Der Elastizitätsmodul  $E$  und der Schubmodul  $G$  bedürfen einer experimentell abgesicherten Festlegung.

## **6 Analyse der praktischen Nachweisführung in prEN 1337-3 [2] und deren Übertragbarkeit auf die Nachweisführung bei Zugbeanspruchung**

Das Nachweiskonzept beinhaltet einen Verformungsnachweis infolge Auflast, Horizontalbewegung und Verdrehung. Werden für die Auflast Zug- und Druckkräfte verstanden, dann ist nach Festlegung des Elastizitätsmoduls und des Schubmoduls des Elastomers, der aufnehmbaren Schubdehnung und der Überprüfung des Formfaktors  $S$  für Zugbeanspruchung eine Anwendung für Zugbeanspruchung möglich.

## **7 Analyse der Lagerbeanspruchungen**

Die bisherige Analyse der Nachweisführung bewehrter Elastomerlager wird in den folgenden Abschnitten um eine Analyse auftretender Beanspruchungen erweitert. Dabei werden für ein ausgewähltes Tragwerk Auflagerkräfte und Verformungen infolge der Lastannahmen in DIN 1072 und ENV 1991-3 berechnet, Lager ausgewählt und deren Beanspruchungen ermittelt. Ziel ist die Bereitstellung eines Datensatzes zur Auswertung der Einzelbeanspruchungen und deren Eingrenzungsmöglichkeiten.

## **8 Auswahl eines Tragwerkes zur Ermittlung von Lagerbeanspruchungen**

Abhebende Lagerkräfte können bei schiefwinkligen und gekrümmten Platten- und Balkenbrücken auftreten, vor allem unter den Lastfällen Verkehrslast, Temperaturunterschied und Stützensenkung. Bei größeren derartigen Konstruktionen, die längs vorgespannt sind, treten zudem häufig abhebende Lagerkräfte infolge Vorspannung auf, so daß bereits unter den ständigen Einwirkungen (Eigengewicht  $g_1$ , Ausbaulasten  $g_2$ , Vorspannung  $V$  und Kriechen und Schwinden  $KS$ ) nur sehr kleine Auflagerdrücke vorhanden sind.

Bei dem Beispieltragwerk handelt es sich um eine  $45^\circ$  - schiefe, dreifeldrige Plattenbrücke, längs beschränkt vorgespannt, mit den Stützweiten 14 m / 20 m / 14 m. Je Auflagerachse sind drei Lager mit einem Abstand von 3 m über den Querschnitt symmetrisch verteilt angeordnet.

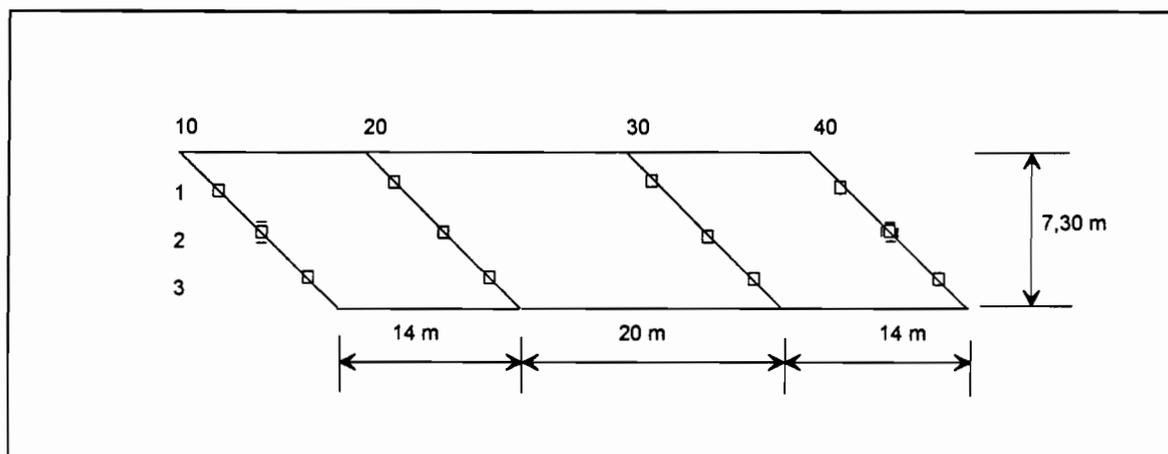


Bild 4: Lagerplan des untersuchten Brückentragwerks

Der Querschnitt des Brückenüberbaus ist eine rd. 85 cm hohe Platte aus Spannbeton mit zwei Kragarmen von je 1,90 m Länge und ist in Anlage 2, S. A2/7 dargestellt.

Für die Ermittlung der vertikalen Stützkräfte und Verformungen wurde die Federsteifigkeit der Elastomerlager nicht berücksichtigt, um ein in Bezug auf die abhebenden Lagerkräfte ungünstiges Modell vorzusetzen. Horizontale Auflagerreaktionen werden nicht ermittelt, da diese keine Untersuchungsrelevanz haben.

## 9 Lastfallzusammenstellung für die Ermittlung der Stützkräfte und Verformungen an Brücken

### 9.1 Lasten und Lastfälle in DIN 1072

Folgende Lastfälle sind bei der Ermittlung von Stützkräften und Verformungen an den Stützpunkten entsprechend der Norm DIN 1072 zu berücksichtigen:

#### Hauptlasten:

- ständige Lasten: Eigengewicht der Tragkonstruktion ( $g_1$ ) und Ausbaulasten ( $g_2$ ) Vorspannung ( $V$ )
- Verkehrslasten ( $p$ )
- Schwinden ( $S$ )

- wahrscheinliche Baugrundbewegungen (DS)

#### **Zusatzlasten:**

- Wärmewirkungen (Temperaturunterschied TU und Temperaturschwankung  $\Delta T_m$ )
- Windlasten (w)
- Bremslasten (in Beispielberechnung nicht von Interesse)

Kriechen und Relaxation (K) sind zugeordnet den erzeugenden Einwirkungen (ständige Lasten und Vorspannung) zu berücksichtigen.

Für die Berechnung der maximalen Stützkräfte wird der Lastfall HZ (ungünstige Zusammenstellung der Lastfälle H und Z) maßgebend. Der Temperaturunterschied ist dabei nach DIN 1072, 4.1.3.(3) mit der ungünstig wirkenden Verkehrslast zu überlagern.

- $g_1 + g_2 + V + KS + DS + p + 0,7 TU + w *$
- $g_1 + g_2 + V + KS + DS + 0,7 p + TU + w *$

\* Anmerkung: Unter der Windlast wird im weiteren die Windlast zugehörig zur Verkehrslast verstanden, da der Lastfall Windlast ohne Verkehr i.d.R. für die Lagerbemessung nicht relevant wird.

Zu Analysezwecken wird in Anlehnung an die Vorschläge der Nachweisführung der Rißbreiten ein „häufiger“ Wert definiert.

In Anlehnung an [5] wird ein häufiger Lastanteil mit 30 % der veränderlichen Lasten vorgeschlagen.

Als Lastfallkombination ergibt sich daraus:

$$g_1 + g_2 + V + KS + DS + 0,3 (p + TU + w).$$

## **9.2 Einwirkungen und Einwirkungskombinationen in ENV 1991**

Nach ENV 1991-3 werden die Einwirkungen wie folgt eingeteilt:

- dauernde Einwirkungen:
  - Eigengewicht der tragenden ( $g_1$ ) und nichttragenden Bauteile ( $g_2$ )
- Vorspannung (V)
- Setzungen (DS)

- Verkehr (p)
- und andere variable Einwirkungen
  - Windlast (w)
  - Temperatur (Temperaturunterschied TU und Temperaturschwankung  $\Delta T_N$ )

Die zeitabhängigen Betonverformungen (Kriechen, Schwinden und Relaxation) werden in ENV 1992, T.1 behandelt. Im weiteren werden sie als Lastfall KS berücksichtigt.

Für die Bemessung der Lager sind die Kombinationen für die ständige und vorübergehende Bemessungssituationen (ULS) zu bilden.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ki}$$

Mit den eingeführten Abkürzungen der zu berücksichtigenden Einwirkungen lauten sie wie folgt:

- Kombination 1 (ständige und vorübergehende Bemessungssituation mit der Verkehrslast als Leiteinwirkung)

$$1,35 \cdot (g_1 + g_2) + 1,0 \cdot V + 1,0 \cdot KS + 1,0 \cdot DS + 1,5 \cdot p + 1,5 \cdot (\psi_{0TU} TU + \psi_{0w} w^*)$$

mit

$$\psi_{0TU} = 0,8$$

$$\psi_{0w} = 1 \text{ (für Wind zugehörig zu Verkehr)}$$

- Kombination 2 (ständige und vorübergehende Bemessungssituation mit dem Temperaturunterschied als Leiteinwirkung)

$$1,35 \cdot (g_1 + g_2) + 1,0 \cdot V + 1,0 \cdot KS + 1,0 \cdot DS + 1,5 \cdot (\psi_{0UDL} p_{UDL} + \psi_{0TS} p_{TS} + TU + \psi_{0w} w^*)$$

mit

$$\psi_{0UDL} = 0,4 \text{ (Kombinationsfaktor für UDL-Anteil der Verkehrslast } p_{UDL})$$

$$\psi_{0TS} = 0,75 \text{ (Kombinationsfaktor für TS -Anteil der Verkehrslast } p_{TS})$$

\* Anmerkung: Unter der Windlast wird im weiteren die Windlast zugehörig zur Verkehrslast verstanden, da der Lastfall Windlast ohne Verkehr i.d.R. für die Lagerbemessung nicht relevant wird.

Zu Analysezwecken werden im weiteren zusätzlich die Kombinationen des SLS zusammengestellt.

charakteristische Kombination

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} Q_{ki}$$

Folgende Kombinationen sind danach zu untersuchen:

- Kombination 1 (charakteristische Kombination mit der Verkehrslast als Leiteinwirkung)

$$g_1 + g_2 + V + KS + DS + p + \psi_{0TU} TU + \psi_{0w} w^*$$

mit

$$\psi_{0TU} = 0,8$$

$$\psi_{0w} = 1 \text{ (für Wind zugehörig zu Verkehr)}$$

- Kombination 2 (charakteristische Kombination mit dem Temperaturunterschied als Leiteinwirkung)

$$g_1 + g_2 + V + KS + DS + \psi_{0UDL} p_{UDL} + \psi_{0TS} p_{TS} + TU + \psi_{0w} w^*$$

mit

$$\psi_{0UDL} = 0,4 \text{ (Kombinationsfaktor für UDL-Anteil der Verkehrslast } p_{UDL})$$

$$\psi_{0TS} = 0,75 \text{ (Kombinationsfaktor für TS -Anteil der Verkehrslast } p_{TS})$$

häufige Kombination:

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} Q_{ki}$$

Mit den eingeführten Abkürzungen der zu berücksichtigenden Einwirkungen lauten sie wie folgt:

- häufige Kombination mit der Verkehrslast als Leiteinwirkung

$$g_1 + g_2 + V + KS + DS + \psi_{1UDL} p_{UDL} + \psi_{1TS} p_{TS} + \psi_{2TU} TU + \psi_{2w} w^*$$

- häufige Kombination mit dem Temperaturunterschied als Leiteinwirkung

$$g_1 + g_2 + V + KS + DS + \psi_{1TU} TU + \psi_{2UDL} p_{UDL} + \psi_{2TS} p_{TS} + \psi_{2w} w^*$$

mit:  $\psi_{1UDL} = 0,4$      $\psi_{1TS} = 0,75$

$$\psi_{2UDL} = 0$$
     $\psi_{2TS} = 0,2$

$$\psi_{1TU} = 0,6$$
     $\psi_{2TU} = 0,5$

$$\psi_{2w} = 0 \text{ ( mit } w^* = \text{ zugehörig zur Verkehrslast)}$$

quasi-ständige Kombination :

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} Q_{ki} \quad \text{und}$$

$$g_1 + g_2 + V + KS + DS + \psi_{2UDL} P_{UDL} + \psi_{2TS} P_{TS} + \psi_{2TU} TU + \psi_{2w} W^*.$$

Die nicht häufige Kombination wird im vorliegenden Beispiel nicht berücksichtigt.

## 10 Ergebnisse der Tragwerksberechnung

### 10.1 Einführung

Die Beispielrechnung wird wie folgt geführt und vorgestellt:

Es werden die Auflagerreaktionen der einzelnen Stützpunkte für die im Abschnitt 9 definierten Kombinationen ermittelt. Die detaillierte Ergebniszusammenstellung ist Anlage 1 zu entnehmen. Eine Zusammenfassung folgt im Abschnitt 10.2.

Für die einzelnen Stützpunkte werden die Lager infolge ihrer maximalen Auflagerkraft und der zugehörigen Verformungen entsprechend DIN 4141, T14 ausgewählt, beziehungsweise entsprechend prEN 1337-3 nachgewiesen. Die Berechnung ist Anlage 2 zu entnehmen, eine Zusammenfassung folgt im Abschnitt 10.3.

### 10.2 Auflagerreaktionen

Abhebende Lagerkräfte (negatives Vorzeichen, siehe Anlage 1) ergaben sich an folgenden Stützpunkten:

10/2 und 40/2: Mittlerer Stützpunkt an den Endauflagern

10/3 und 40/1: Stützpunkt in der stumpfen Ecke an den Endauflagern.

Aufgrund der Symmetrie des Überbaus in Längsrichtung sind die Stützkräfte und Verformungen der Auflagerachsen 10 und 40 identisch. In der weiteren Untersuchung werden die Auflagerpunkte 10/2 und 10/3 betrachtet. Es treten an diesen Stützpunkten sowohl Druckbeanspruchungen als auch Zugbeanspruchungen auf.

Tabelle 2: Auflagerreaktionen mit den Lastannahmen in DIN 1072 (Lastfall HZ)

| Stützpunkt               | 10/2    | 10/3    |
|--------------------------|---------|---------|
| max V in kN              | 1.058,4 | 1.468,7 |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad | 0,01    | -0,34   |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad | 0,09    | -0,95   |
| zug $v_x$ in mm          | 42,94   | 42,94   |

| Stützpunkt               | 10/2  | 10/3   |
|--------------------------|-------|--------|
| min V in kN              | -69   | -406,2 |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad | -1,65 | 0,54   |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad | -1,48 | 1,29   |
| zug $v_x$ in mm          | 42,94 | 42,94  |

Tabelle 3: Auflagerreaktionen mit den Lastannahmen in ENV 1991  
(für ständige und vorübergehende Lastfallkombinationen-ULS)

| Stützpunkt               | 10/2    | 10/3     |
|--------------------------|---------|----------|
| max V in kN              | 1.703,1 | 2.091,15 |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad | -1,63   | -0,57    |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad | -0,78   | -2,18    |
| zug $v_x$ in mm          | 44,59   | 44,59    |

| Stützpunkt               | 10/2    | 10/3    |
|--------------------------|---------|---------|
| min V in kN              | -375,69 | -585,85 |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad | -1,45   | 0,31    |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad | -1,21   | 0,48    |
| zug $v_x$ in mm          | 48,48   | 44,59   |

### 10.3 Lagerauswahl und -nachweis

Die Lager für die Stützpunkte 10/2 und 10/3 (i.w. Lager 10/2 und 10/2) wurden entsprechend DIN 4141, Teil 14 für die Druckbeanspruchungen unter Voraussetzung den Lastannahmen in der DIN 1072 ausgewählt und die Beanspruchung parallel zur Lagerebene ( $\tan \gamma$ ) überprüft.

Es ergaben sich folgende Lager (vgl. Anlage 2):

Lager 10/2:  $a \times b \times T = 250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$ ,  $n = 9$

Lager 10/3:  $a \times b \times T = 300 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$ ,  $n = 9$

Diese Lager wurden in einem weiteren Schritt unter den Beanspruchungen des ENV 1991 (vgl. Auflagerreaktionen) entsprechend den Forderungen des prEN 1337-3 [2] (Anlage 2 S.A2/4 ff.) nachgewiesen. Für das Lager 10/2 konnte der Nachweis der Stabilität gegen Knicken mit 9 Elastomerschichten nicht eingehalten werden. Um i.w. jedoch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde mit  $n = 9$  weitergerechnet.

## **11 Analyse der Ergebnisse der Auflagerreaktionen und der Lagerbeanspruchungen**

### **11.1 Vorgehensweise**

Die Analyse wird in drei Komplexen geführt:

Im ersten Komplex erfolgt die Auswertung der Auflagerreaktionen der einzelnen Lastfälle und Einwirkungskombinationen. Ziel ist die Erfassung und Wertung der Einzelanteile als Voraussetzung einer Auswahl für pragmatische Grenzwerte. Zu diesem Zweck werden die jeweiligen Auflagerreaktionen, die auswahl - oder nachweisrelevant waren, zu 1 gesetzt und die Veränderungen der weiteren Kombinationen errechnet.

Die Berechnung ist in Anlage 1 dargestellt. Die Schlußfolgerungen folgen im Abschnitt 11.2. Im zweiten Komplex werden die Lagerbeanspruchungen untersucht. Entsprechend der Darstellung des Abschnittes 4 werden die Einzelbeanspruchungen des Elastomers im Schub- und Normalspannungsbereich infolge der aufgelisteten Lastfälle und Kombinationen ermittelt und gewertet. Die Einzelbeanspruchungen sind als Anteilsprozent der jeweiligen Gesamtbeanspruchung ausgewiesen. Die Berechnungen und die graphische Auswertung sind in der Anlage 3 und die Schlußfolgerungen in Abschnitt 11.3 dargestellt.

Im dritten Komplex werden die Lagerverformungen nach den Regeln des prEN 1337-3 entsprechend des zweiten Komplexes behandelt, in Anlage 3 ausgewiesen und im Abschnitt 11.4 aufgezeigt.

### **11.2 Analyse der Auflagerreaktionen (vgl. Anlage 1, S. A1/7 - A1/9)**

- Auflagerreaktionen mit Lastannahmen in DIN 1072

Die Stützkräfte und Endtangentialwinkel der Lastfälle HZ und HZ-„häufig“ ändern sich nicht proportional. D.h., daß mit Abnahme der Stützkräfte folglich nicht im gleichen Maße auch die Endtangentialwinkel kleiner werden, sondern u.U. größer werden. Die Ursache dafür liegt vor allem in den Anteilen des Temperaturunterschiedes an der Stützkraft und der Endtangentialwinkel (kleine Stützkraft, große Endtangentialwinkel).

Die Größe der Verschiebung ändert sich beim Übergang vom Lastfall HZ zum Lastfall HZ-„häufig“ nur um die Abminderung des Anteils der Temperaturschwankung.

- Auflagerreaktionen mit Einwirkungskombinationen des ENV 1991

Für die Einwirkungskombinationen des SLS gelten die o.a. Aussagen. Bei den SLS - Kombinationen zu den minimalen Stützkräften am Lager 10/3 schwanken die Auflagerkräfte

zwischen  $-490,9$  kN und  $-156,8$  kN, die Drehwinkel  $\phi_y$  im Bereich von  $1,784 \cdot 10^{-3}$  rad und  $1,57 \cdot 10^{-3}$  rad, die Verschiebungen in einem Bereich von  $35,52$  mm und  $42$  mm.

Im ULS wurden für die Ermittlung der maximalen Pressung bzw. des maximalen Zuges zwei Einwirkungskombinationen untersucht, ULS - K1 mit der Verkehrslast als Leiteinwirkung (ohne Abminderung durch den Kombinationsfaktor) und ULS - K2 mit dem Temperaturunterschied als Leiteinwirkung (Abminderung der Verkehrslast durch den Kombinationsfaktor). Durch die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte  $g$  der einzelnen Lasten werden die o.g. Tendenzen aufgehoben. Generell erscheint es sinnvoll beide Kombinationen (ULS-K1 und ULS-K2) zu untersuchen, da die Stützkräfte, Verschiebungen und Verdrehungen in beiden Fällen in der gleichen Größenordnung liegen.

### 11.3 Analyse der Lagerbeanspruchungen - Spannungen

In Anlage 3 werden auf den Seiten A3/1 bis A3/6 für alle Lastfälle entsprechend DIN 1072 und die Einwirkungskombinationen entsprechend ENV 1991 alle entstehenden Normalspannungen und Schubspannungen aus der Belastung der Lager ermittelt und auf den Seiten A3/17 bis A3/29 grafisch dargestellt. Für die Berechnung der Spannungen unter Zug und Druck wurde mit einem Schubmodul von  $G = 1,0$  MN/m<sup>2</sup> gerechnet. Für die Einschätzung der Größenordnung der einzelnen Spannungsanteile wurde für die Schubspannungen und die Normalspannungen die Summe der Einzelanteile gebildet und als Basis für die prozentuale Angabe der Spannungsanteile (Pressung/Zug, Verschiebung, Verdrehung) verwendet, unabhängig davon, an welchem Ort des Lagers das jeweilige Spannungsmaxima auftritt.

#### - Schubspannungen

Es werden folgende Schubspannungsanteile (Lagerseite a) ermittelt:

- $\tau_1$  Schubspannung bei zentrischer Pressung bzw. zentrischem Zug
- $\tau_2$  Schubspannung aus Verschiebung
- $\tau_3$  Schubspannung aus Exzentrizität der Vertikalkraft und Moment aus Rückstellkraft bei Verschiebung
- $\tau_4$  Schubspannung aus Verdrehung
- $\tau_5$  Schubspannung aus Moment aus entstehender Horizontalkraft bei Verdrehung mit vorhandener Vertikalkraft

Die Schubspannungsverläufe auf den Seiten A3/18 bis A3/19, A3/21-A3/22, A3/25-A3/26, A3/28-A3/29 lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

- Der Schubspannungsanteil  $\tau_5$  ist für die Gesamtbeanspruchung des Lagers bedeutungslos.
- Der Schubspannungsanteil  $\tau_3$  infolge der Exzentrizität der Vertikalkraft und dem Moment aus Rückstellkraft hat einen Anteil an der Gesamtschubspannung von ca. 5-8%.

Tabelle 4: Gesamtschubspannungen (MN/m<sup>2</sup>)

| <b>ENV 1991</b> | bei max V | bei min V |
|-----------------|-----------|-----------|
| Lager 10/2      | 3,233     | 1,342     |
| Lager 10/3      | 2,942     | 1,308     |
| <b>DIN 1072</b> | bei max V | bei min V |
| Lager 10/2      | 2,125     | 0,861     |
| Lager 10/3      | 2,158     | 1,177     |

Die aufgetretenen Gesamtschubspannungen bei Zugbeanspruchung der Lager entsprechen ca. 40 – 50% der Gesamtschubspannungen bei Pressung.

Auf den Seiten A3/11 – A3/12 der Anlage 3 sind die prozentualen Anteile der Schubspannung aus Pressung/Zug, Verschiebung (einschließlich  $\tau_2 + \tau_3$ ) und Verdrehung ( $\tau_4 + \tau_5$ ) an der jeweiligen Gesamtschubspannung ( $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5$ ) für die untersuchten Lastfälle in DIN 1072 und die Einwirkungskombinationen des ENV 1991 als Balkendiagramme dargestellt.

- Auswertung Einwirkungskombinationen nach ENV 1991
  - bei Druckbeanspruchung
 

Die Schubspannung aus Pressung nimmt bei den Einwirkungskombinationen des ULS und der charakteristischen Kombination (SLS-K1) mit ca. 65 – 70% den größten Anteil an der Gesamtschubspannung ein. Der Anteil der Verschiebung entspricht ca. 26 – 29% der Gesamtbeanspruchung. Der Anteil der Verdrehung liegt im Bereich von 1 – 7% und ist damit von untergeordneter Bedeutung für die Gesamtschubspannung.
  - bei Zugbeanspruchung
 

Auch bei Zugbeanspruchung des Lagers zeigt sich, daß die Ergebnisse der ULS-Kombinationen und der charakteristischen Kombinationen (SLS-K1 bzw. SLS-K2) in ihren prozentualen Anteilen ähnlich verlaufen. Die Beanspruchung aus zentrischem Zug umfaßt

ca. 35 – 45% der Gesamtschubspannung, die Verschiebung 47 – 59% und die Verdrehung 3 – 12%.

Die Anteile, die aus der Verformung des Lagers resultieren, erhalten somit größere Bedeutung für die Schubspannung. Diese Tendenz wird in den weiteren Einwirkungskombinationen des SLS (SLS-K3 – häufige Kombination, SLS-K5 – quasi-ständige Kombination) verstärkt: bis zu 80% aus Verschiebung und 15% aus Verdrehung. Die Ursache dafür ist, daß unabhängig von der Größe der Auflagerkraft die Verformungen aus dem Brückenüberbau bestehen bleiben.

- Auswertung Lastfälle nach Norm DIN 1072

- bei Druckbeanspruchung (HZ-K1-max., HZ-K2-max.)

Die Schubspannung aus Pressung nimmt auch beim LF HZ mit 62 – 65% den größten Anteil der Schubbeanspruchung ein.

Der Anteil der Verschiebung entspricht ca. 27 – 37% der Gesamtbeanspruchung. Der Anteil der Verdrehung an der Gesamtschubspannung beträgt 0,2 – 6,5%.

- bei Zugbeanspruchung

Die Schubspannung aus zentrischem Zug liegt beim Lastfall HZ in einem Bereich von 7 – 35%. Der Verschiebungsanteil ist auch in diesen Lastfällen von größter Bedeutung mit 56 – 82%.

Der Anteil der Verdrehung an der Gesamtschubspannung beträgt ca. 10%. Für den Lastfall HZ-“häufig” kann festgestellt werden, daß die Anteile aus Verschiebung (67%) und Verdrehung (bis zu 12,5%) an Bedeutung gewinnen.

- Normalspannungen

Normalspannungen entstehen aus folgenden Beanspruchungen

- aus zentrischem Druck oder Zug ( $\sigma_{\max \text{ Druck/Zug}}$ )
- aus Exzentrizität der Vertikalkraft bei Verschiebung des Lagers und dabei entstehender Rückstellkraft ( $\sigma_{\max \text{ Verschiebung}}$ )
- aus Verdrehung des Lagers ( $\sigma_{\max \text{ Verdrehung}}$ )

Die Normalspannungsverläufe in Abhängigkeit von der Vertikalkraft bzw. Drehwinkel sind auf den Seiten A3/17, A3/20, A3/24 und A3/27 dargestellt.

Da aus einer Verschiebung des Lagers ohne Berücksichtigung der Exzentrizität der Vertikalkraft und dem Moment aus Rückstellkraft keine Normalspannungen entstehen, gibt

es eine Umverteilung der prozentualen Anteile aus zentrischem Zug/Druck, Verschiebung und Verdrehung. Die prozentualen Anteile der Einzelbeanspruchungen an der Gesamtnormalspannung sind in Anlage 3 S. A3/15 – A3/16 dargestellt.

- Auswertung Einwirkungskombinationen nach ENV 1991

- bei Druckbeanspruchung

Die Normalspannung aus Pressung für die Einwirkungskombination des ULS und die charakteristische Kombination (SLS-K1 max.) nimmt mit 95 – 97% der Gesamtbeanspruchung den hauptsächlichsten Anteil der Normalspannungen ein. Die Anteile aus Verschiebung und Verdrehung sind bei diesen Einwirkungskombinationen von untergeordneter Bedeutung.

- bei Zugbeanspruchung

Auch bei Zugbeanspruchung wird mit den Einwirkungskombinationen des ULS und der charakteristischen Kombination im SLS (SLS-K2 – min bzw. SLS-K1 – min) der Hauptanteil der Normalspannung aus reinem Zug mit ca. 90% gebildet.

In den weiteren untersuchten Kombinationen des SLS (SLS-K3 – häufige Kombination und SLS-K5 – quasi-ständige Kombination) sinkt der Anteil der Normalspannung aus zentrischem Zug vor allem zugunsten des Anteils der Verdrehung.

- Auswertung der Lastfälle nach Norm DIN 1072

- bei Druckbeanspruchung

Für den LF HZ nimmt der Anteil aus Pressung ca. 96%, der Anteil aus Verschiebung ca. 3% und der Anteil aus Verdrehung 0% an der Gesamtnormalspannung ein.

- bei Zugbeanspruchung

Bei Zugbeanspruchung und LF HZ sind die für Druckbeanspruchung gemachten Aussagen nicht eindeutig übertragbar. Die Anteile aus reinem Zug schwanken zwischen 60 und 90% der Gesamtnormalspannung, der Anteil aus Verschiebung wächst bis 14% und der Anteil aus Verdrehung bis zu 27% an.

- Zusammenfassung

- Schubspannungen

Die Schubspannungen werden bei Druck- und bei Zugbeanspruchung wesentlich durch den Anteil der Verschiebung ( $\tan \gamma$ ) beeinflusst. Dieser Einfluß ist bei Zugbeanspruchung

noch von größerer Bedeutung, da hier die zu erwartenden abhebenden Lagerkräfte betragsmäßig kleiner als die Druckkräfte am Lager sind (Zug-Druck-Lager vgl. 11.2). Der Anteil der Verdrehung an der Schubspannung ist dagegen relativ gering. Die Auswertung der Schubspannungsverläufe zu den Einzelanteilen (vgl. A3/18 – A3/19, A3/21 – A3/22 u.w.) zeigen, daß der ausgewiesene Anteil  $\tau_3$  (Schubspannung infolge Exzentrizität der Vertikalkraft und Moment aus Rückstellkraft bei Verschiebung) mit den hier vorausgesetzten  $\tan \gamma$  für zugbeanspruchte Lager nicht vernachlässigbar gering ist.

- **Normalspannungen**

Die Größe der Normalspannungen wird vorrangig durch die Auflagerkraft beeinflusst. Als zweite wichtige Komponente ist bei Zugbeanspruchung des Lagers die Verdrehung zu nennen. Berücksichtigt man dabei, daß mit Abnahme der Auflagerkraft, die Endtangentialwinkel nicht zwingend kleiner werden (vgl. 11.2), kann der Anteil der Verdrehung noch bedeutsamer werden.

Die Normalspannungen im Lager, die aus den die Verschiebung begleitenden Anteilen: Verdrehung aus Exzentrizität der Vertikalkraft und Verdrehung infolge Rückstellkraft entstehen, sind jedoch bei Voraussetzung bisher unter Druck zugelassener Verschiebungen des Lagers (mit  $\tan \gamma = 0,7$ ) bei Zugbeanspruchung nicht vernachlässigbar klein.

#### 11.4 Analyse der Lagerverformungen

Die Schubverformungen wurden in Anlage 3 S. A3/7 bis A3/8 tabellarisch und auf den S. A3/23 und A3/30 grafisch dargestellt. Sie sind mit Hilfe der Gleichungen des prEN 1337-3 ermittelt worden, unter Voraussetzung der Gültigkeit des Formfaktors S und des Schubmoduls G auch unter Zugbeanspruchung der Lager. Generell behalten die Aussagen zu den Schubspannungen auch hier ihre Gültigkeit.

Aufgetretene Differenzen zwischen den einzelnen Zahlenwerten basieren auf folgenden differierenden Annahmen:

- $\varepsilon_{cv}$  auf S. A3/7 wurde mit dem Formfaktor berechnet. Es ergeben sich in allen Fällen größere Werte als bei  $\frac{\tau_1(a)}{G}$  mit  $G = 1,0 \text{ MN/m}^2$
- $\varepsilon_{cd}$  auf S. A3/7 nach prEN 1337-3 beinhaltet die reduzierte Lagerfläche  $A_r$ , welche  $\varepsilon_{cd}$  im Vergleich zu  $\varepsilon_{cv}$  erhöht.

- Die Differenzen der Schubverformungen  $\varepsilon_{\alpha av}$  (bzw.  $\varepsilon_{\alpha bv}$ ) und  $\varepsilon_{\alpha a, d}$  (bzw.  $\varepsilon_{\alpha b, d}$ ) nach prEN 1337-3 basieren ebenfalls auf der zu berücksichtigenden reduzierten Lagerfläche in prEN 1337-3.

## 12 Schlußfolgerungen für eine Nachweisformulierung der DIN 4141, Teil 14 und des prEN 1337-3 für Lager mit Zugbeanspruchung

### 12.1 DIN 4141, Teil 14

Der in DIN 4141, Teil 14 eingeschlagene Weg zur Auswahl von Lagern ist gegenwärtig für Lager mit Druck-/Zugbeanspruchung nicht möglich. Eine Verdrehungsbegrenzung ist nach Analyse der Last- und Beanspruchungshorizonte nicht logisch ableitbar. Da die ertragbare Beanspruchung noch experimentell zu ermitteln ist, führt die Einführung weiterer Vereinfachungen zu erhöhtem versuchstechnischem Aufwand und erfordert zudem einen Erfahrungsbereich. Möglicherweise sollte eine Verschiebungsbegrenzung unter dem bisher zulässigen Wert liegen.

Es wird deshalb der Nachweis der Schubspannungen infolge der Einzelbeanspruchungen vorgeschlagen. Die Analyse des Abschnittes 11 gestattet die Vernachlässigung des aus der Verdrehung des Lagers resultierenden Schubspannungsanteils  $\tau_5$  (Schubspannung aus entstehender Horizontalkraft bei vorhandener Vertikalkraft). Auf Grund der Größe der Schubspannungen aus dem die Verschiebung des Lagers begleitenden Anteils der Schubspannung  $\tau_3$  (aus Exzentrizität der Vertikalkraft und Moment aus Rückstellkraft) ist eine Vernachlässigung für zugbeanspruchte Lager nicht vertretbar. Eine erneute Überprüfung dieses Anteils wäre als Folge einer veränderten Verschiebungsbegrenzung für Zuglager zu empfehlen. Der Nachweis ist unter Beachtung der im Abschnitt 5 gemachten Aussagen, wie folgt zu führen:

Nachweis der maximalen Schubspannungen:

Die Summe der Teilschubspannungen ergibt sich nach folgender Formel:

$$\Sigma \tau = \tau_c + \tau_q + \tau_{qM} + \tau_a \text{ mit}$$

$\tau_c$  Schubspannung aus Beanspruchung rechtwinklig zur Lagerebene

$$\tau_{\text{Seite a}} = \frac{\sigma_m \cdot l_1}{a \cdot \eta_2}$$

$$\tau_{\text{Seite b}} = \tau_{\text{Seite a}} \cdot \eta_1$$

$$\tau_c = \sqrt{\tau_{\text{Seite a}}^2 + \tau_{\text{Seite b}}^2}$$

$$\sigma_m = F/A$$

F Auflast

A Lagergrundfläche

a, b Seitenlängen des Lagers

$t_i$  Dicke einer Elastomerschicht

$\eta_1, \eta_2$  nach Tabelle 5

Tabelle 5: Beiwerte  $\eta_1$  und  $\eta_2$

| b/a      | 1     | 1,5   | 2     | 3     | 4     | 6     | 8     | 10    | $\infty$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| $\eta_1$ | 1     | 0,859 | 0,795 | 0,753 | 0,745 | 0,743 | 0,743 | 0,743 | 0,743    |
| $\eta_2$ | 0,208 | 0,231 | 0,246 | 0,267 | 0,282 | 0,299 | 0,307 | 0,313 | 0,333    |

$\tau_q$  Schubspannung aus Beanspruchung parallel zur Lagerebene (Verschiebung)

$$\tau_q = \frac{v_{xy}}{T} \leq \text{zul} \tan \gamma$$

$v_{xy}$  die maximale horizontale Lagerverformung ermittelt durch vektorielle Addition von  $v_x$  und  $v_y$

T Gesamtdicke des Elastomers

$\tau_{qM}$  Schubspannung aus den die Verschiebung begleitenden Anteil aus Exzentrizität der Auflast und Moment aus Rückstellkraft

$$\tau_{qM} = \frac{G}{2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot a_M$$

$$a_M = \frac{M \cdot K_s \cdot t}{2 \cdot n \cdot a^3 \cdot b}$$

$$M = F \cdot \frac{v_x}{2} + H \cdot d$$

$$H = A \cdot G \cdot \frac{v_x}{T}$$

d Einbaudicke des Lagers

$K_s$  nach Tabelle 1 (vgl. 2.3)

G Schubmodul

Bei Verschiebungen in zwei Richtungen sind die Schubspannungen vektoriell zu addieren.

$\tau_\alpha$  Schubspannung aus Verdrehung

$$\tau_a = \frac{G \cdot (a^2 \cdot a_a + b^2 \cdot a_b) \cdot t_i}{2 \cdot \sum t_i^3}$$

$\alpha_a$  Verdrehwinkel über die Breite a des Lagers

$\alpha_b$  Verdrehwinkel über die Länge b des Lagers

Der Nachweis ist für den Lastfall HZ zu führen. Dabei ist zusätzlich nachzuweisen, daß unter folgenden Lasten entsprechend DIN 1072 nur Auflagerdruck vorliegt:

- ständige Lasten
- Vorspannung
- Kriechen und Schwinden
- wahrscheinliche oder mögliche Baugrundbewegungen.

## 12.2 prEN 1337-3

Der in prEN 1337-3 formulierte Nachweis der maximalen Schubverformung ist auch für zugbeanspruchte Lager unter Beachtung der unter Abschnitt 6 gemachten Aussagen anwendbar.

Der die Schubverformung aus Horizontalbewegung begleitende Anteil aus Exzentrizität der Auflast und Moment aus Rückstellkraft ist zusätzlich in der Summe der Schubverformungen zu berücksichtigen. Zu den Anteilen  $\varepsilon_{c,d}$ ,  $\varepsilon_{q,d}$  und  $\varepsilon_{a,d}$  kommt der Anteil  $\varepsilon_{qM,d}$  hinzu.

Damit lautet die Summe der Teilverformungen:

$$\varepsilon_{t,d} = \varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{qM,d} + \varepsilon_{a,d}$$

mit

$$\varepsilon_{qM,d} = \frac{G_d}{2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot \alpha_{M,d}$$

$$\alpha_{M,d} = \frac{M_d \cdot K_s \cdot t}{2 \cdot n \cdot a^3 \cdot b}$$

$$M_d = F_{z,d} \cdot \frac{v_{x,d}}{2} + H_d \cdot d$$

$$H_d = A_r \cdot G_d \cdot \frac{v_{x,d}}{T_q}$$

(verwendete Bezeichnungen entsprechend prEN 1337-3)

Bei Verschiebungen in zwei Richtungen sind die Schubspannungen vektoriell zu addieren.

Dieser Nachweis ist für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation (ULS) zu führen. Zusätzlich ist nachzuweisen, daß unter dauernden Einwirkungen, Vorspannung, Setzungen und Kriechen und Schwinden nur Auflagerdruck vorliegt.

## **13 Voruntersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur weiteren Bearbeitung**

### **13.1 Allgemeines**

Die Anwendung bewehrter Elastomerlager als Zuglager ist gegenwärtig nur mit einer Einzelzulassung möglich. Deshalb liegt kein Erfahrungsbereich vor. Vorhandene Einzelversuche aus Anwendungen stehen den Bearbeitern dieses Berichtes nicht zur Verfügung. Die Absicht der vorliegenden Untersuchung ist die Überprüfung des Einsatzes von Drucklagern bei Zugbeanspruchung.

Die theoretische Lösung dieser Fragestellung setzt die Kenntnis des Versagensmechanismus bewehrter Elastomerlager voraus, die gegenwärtig noch nicht vorliegt, aber eine erforderliche Grundlagenarbeit darstellt.

Zur praktischen Lösung sind folgende Sachverhalte zu klären:

- Die Auswirkung des unterschiedlichen Anstieges der Arbeitslinie des Elastomers im Zug- und Druckbereich.
- Die Auswirkung von Beanspruchungskombinationen im Elastomer hinsichtlich des Versagens und die Bestimmung des Versagensortes zur Minimierung der erforderlichen experimentellen Untersuchungen.

Für eine qualitative Einschätzung dieser Sachverhalte werden Voruntersuchungen durchgeführt.

### **13.2 Auswirkung der differenten Materialkennwerte bei Zug- und Druckbeanspruchung**

Die Arbeitslinie von Elastomer ist qualitativ beschreibbar, jedoch nicht experimentell abgesichert. Für die Voruntersuchungen wurde der in Bild 5 dargestellte Verlauf für die Berechnung eines Elastomerlagers mit drei Elastomerschichten und einer geometrisch und physikalisch nichtlinearen Arbeitsgleichung formuliert. Bei der verwendeten Geometrie des Modells ( $a \times b = 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ) ergibt der Einfluß des sechsmal kleineren Elastizitätsmoduls des Elastomers im Zugbereich gegenüber dem Druckbereich eine 25% ige Vergrößerung der Verformung des Elastomers im Lager. Es wird deutlich, daß mindestens für die Beanspruchung der Bleche dieser Sachverhalt überprüft werden muß.

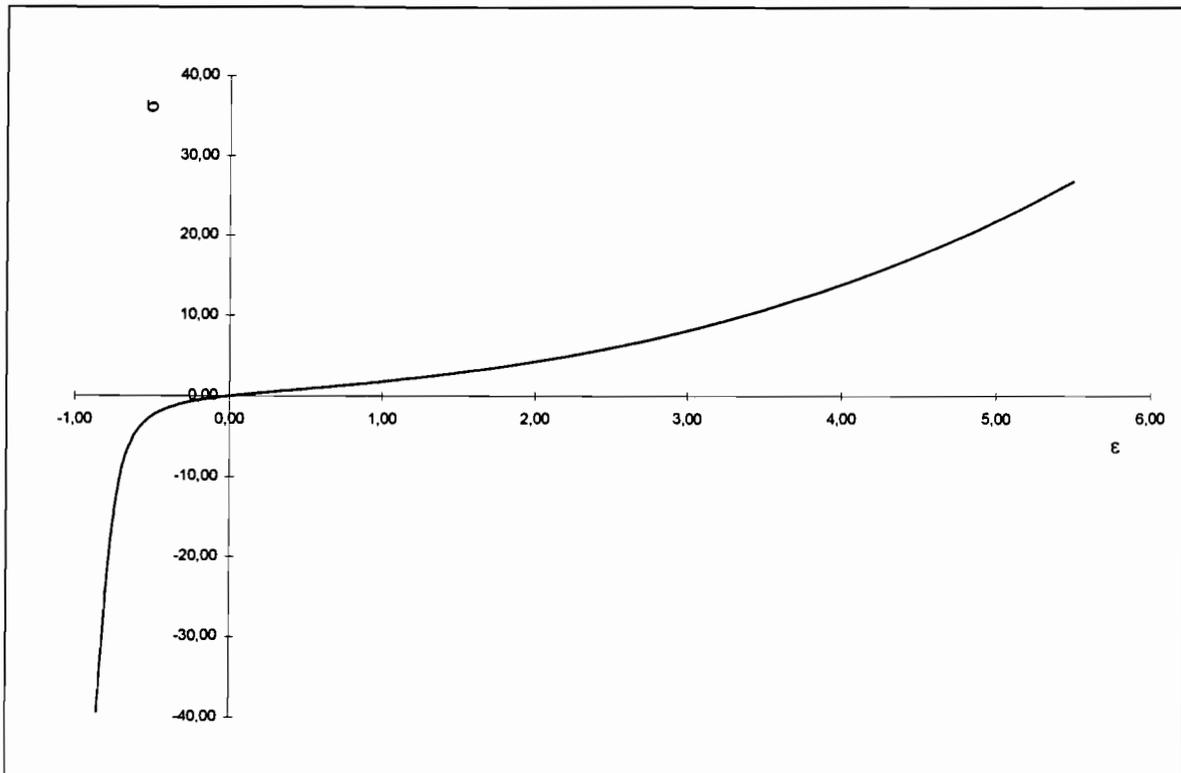


Bild 5:  $\sigma$  -  $\epsilon$  - Diagramm für Elastomer

### 13.3 Versagensort im Elastomer bei Beanspruchungskombinationen

Eine Beurteilung des Versagensortes ist durch den Verlauf der Deviatorspannungen möglich. Deshalb wird für eine Elastomerschicht mit beidseitig anvulkanisierten Blechen entsprechend Bild 6 eine FEM- Berechnung durchgeführt. Zur Vergleichbarkeit mit den Berechnungen im Abschnittes 10 des vorliegenden Berichtes wird eine lineare Arbeitslinie verwendet. In den Bildern 7 bis 10 ist der Verlauf der Deviatorspannungen für eine vertikale Zugbeanspruchung in den einzelnen Schichtebenen des Elastomer von der Vulkanisationsfuge bis zur Schichtmitte dargestellt. Es zeigt sich, daß die maximalen Spannungen in der obersten Elastomerebene in der Mitte der längeren Lagerseite auftreten. Dieser Sachverhalt ist bekannt und ist durch die Schubspannungen erklärt. Die freie Verformungsmöglichkeit an den Elastomerrändern führt zur Veränderung der Spannungsverteilung bis zur Schichtmitte dergestalt, daß die Spannungsmaxima der Deviatorspannungen in die Ecken des Lagers wandern, allerdings randnah bleiben.

Verformungsbedingt nehmen die Betragswerte der Spannungen ab. Sie sind nicht versagensrelevant. Wird die Vertikallast mit einer Verdrehung und einer Verschiebung überlagert (Bilder 11 und 12), dann bleiben in der obersten Elastomerebene die

Spannungsmaxima an den freien Rändern, sie verschieben sich nur entlang des Lagerandes. In Schichtmitte ist das Spannungsmaxima deutlich zur Mitte hin verschoben. Betragsmäßig bleiben die Spannungen in der obersten Ebene relevant, obwohl der Spannungsabbau zur Schichtmitte hin im Überlagerungsfall nicht die Größenordnung der reinen Vertikalbelastung einnimmt. Als Belastungsgrößen wurden die Relationen der Anteile aus den Berechnungsergebnissen des Abschnittes 11 genutzt, da nur ein qualitatives Ziel angestrebt wurde.

#### **13.4 Schlußbemerkungen**

Die Analysen zu den Auflagerreaktionen aus der Tragwerksberechnung und die Analysen zu den Anteilen der Spannungen in den Abschnitten 10 bis 11 verdeutlichen, daß bei Einsatz von Drucklagern für Zugbeanspruchungen die Verformungsanteile aus Verdrehung und Verschiebung einen stärkeren Einfluß haben als bei der gegenwärtigen Anwendung. Die Voruntersuchungen zeigen, daß bei kombinierter Beanspruchung eine gleichmäßigere Beanspruchung des Elastomers über die Höhe vorliegt. Die Gefahr des schlagartigen Versagens steigt. Bei Lagern mit Zugbeanspruchung ist deshalb eine Verformungsbegrenzung erforderlich. Da die konstruktive Umsetzung von Zug mit Verschiebung zusätzliche Überlegungen der Bauart bedingt, sollte eine Verschiebungsbegrenzung unter  $\tan \gamma = 0,7$  angedacht werden.

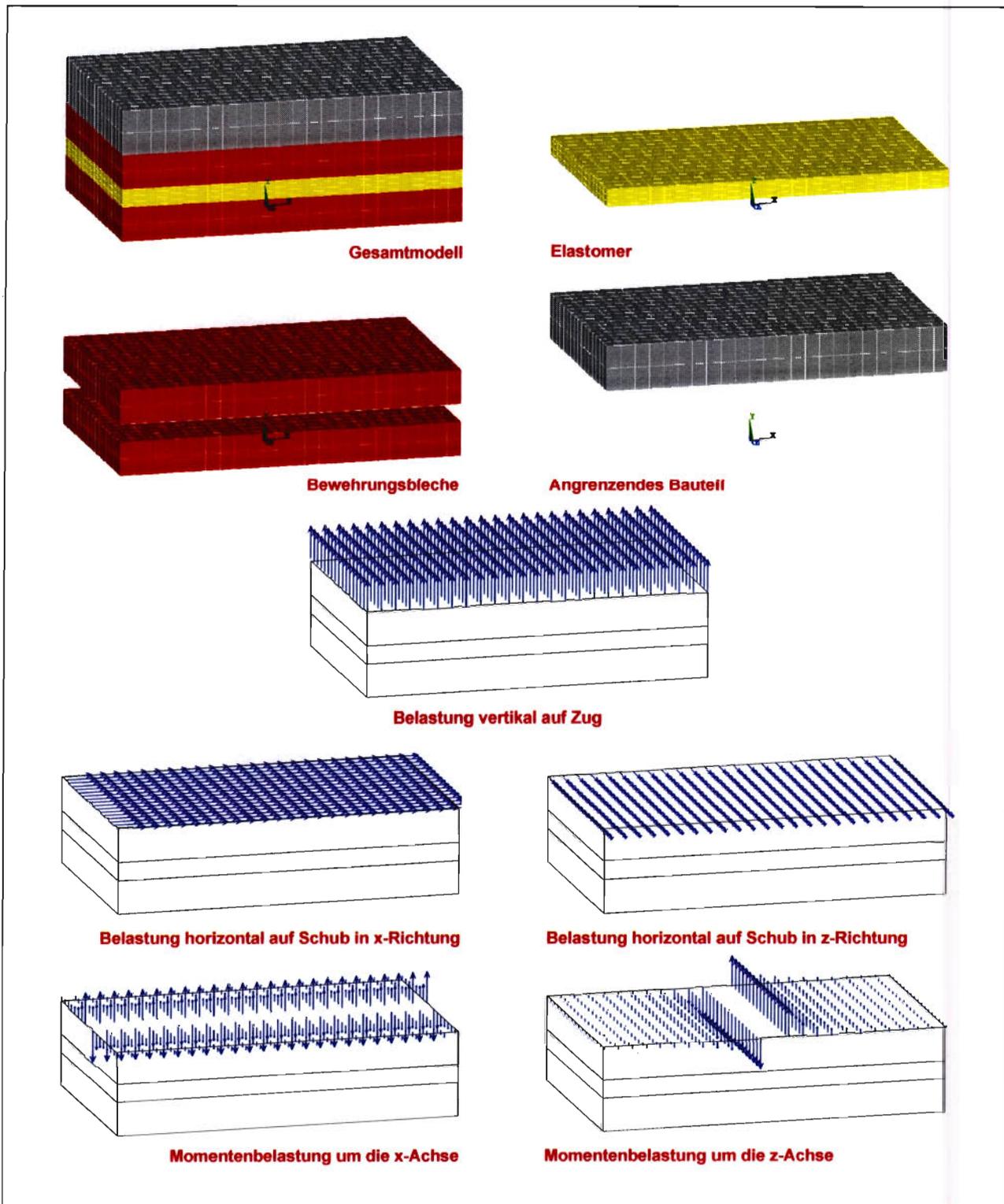


Bild 6: Gesamtmodell und Bestandteile, Belastung  
Die Darstellung der Spannungen erfolgt am unverformten System.

#### Geometrie

Größe: 100 x 150 mm

Anzahl der Elastomerschichten: 1

Elastomerschichtdicke: 8 mm

Dicke der äußeren Bewehrungsbleche: 15 mm

Dicke des angrenzenden Bauteiles: 20 mm

#### Randbedingungen

unterste Ebene: Festhaltungen vertikal an allen Knoten; horizontal in x-Richtung an einem und in z-Richtung an zwei Knoten.

Alle anderen Ebenen: Keine Festhaltungen.

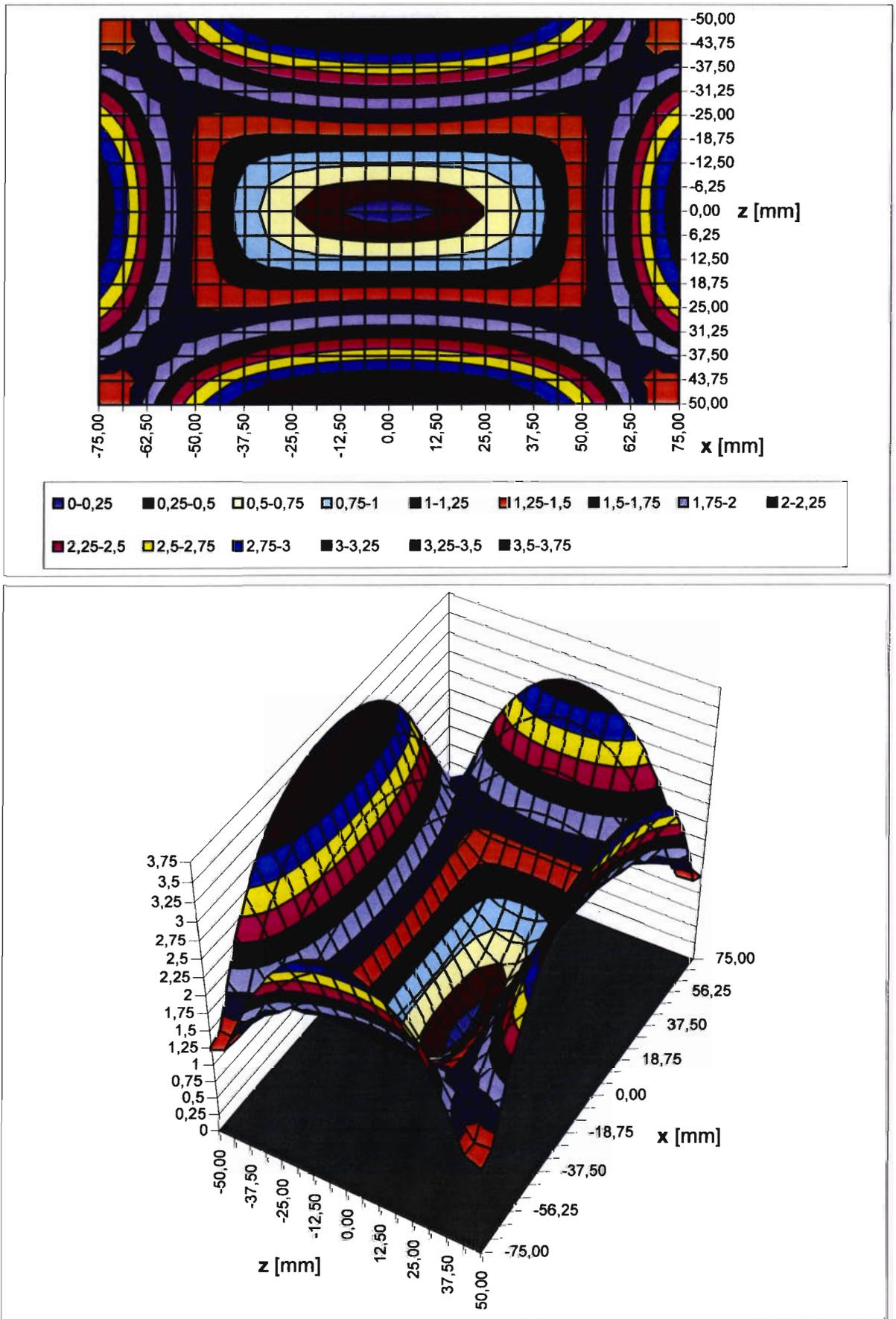


Bild 7: Deviatorspannung in der oberen Ebene der Elastomerschicht infolge Zugbeanspruchung  
( $y = 8,00$  mm)

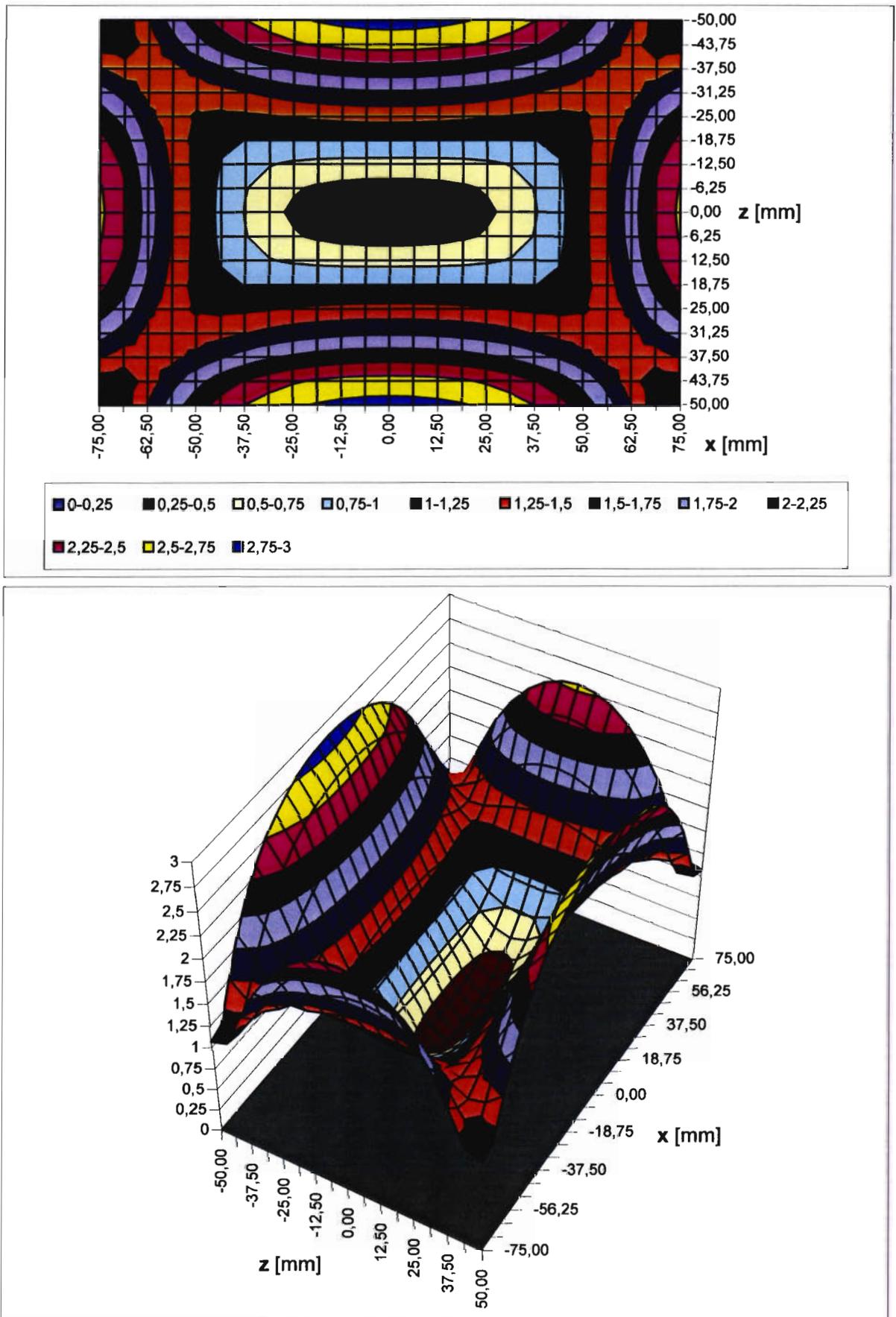


Bild 8: Deviatorspannung in der Elastomerschicht infolge Zugbeanspruchung

(y= 6,67 mm)

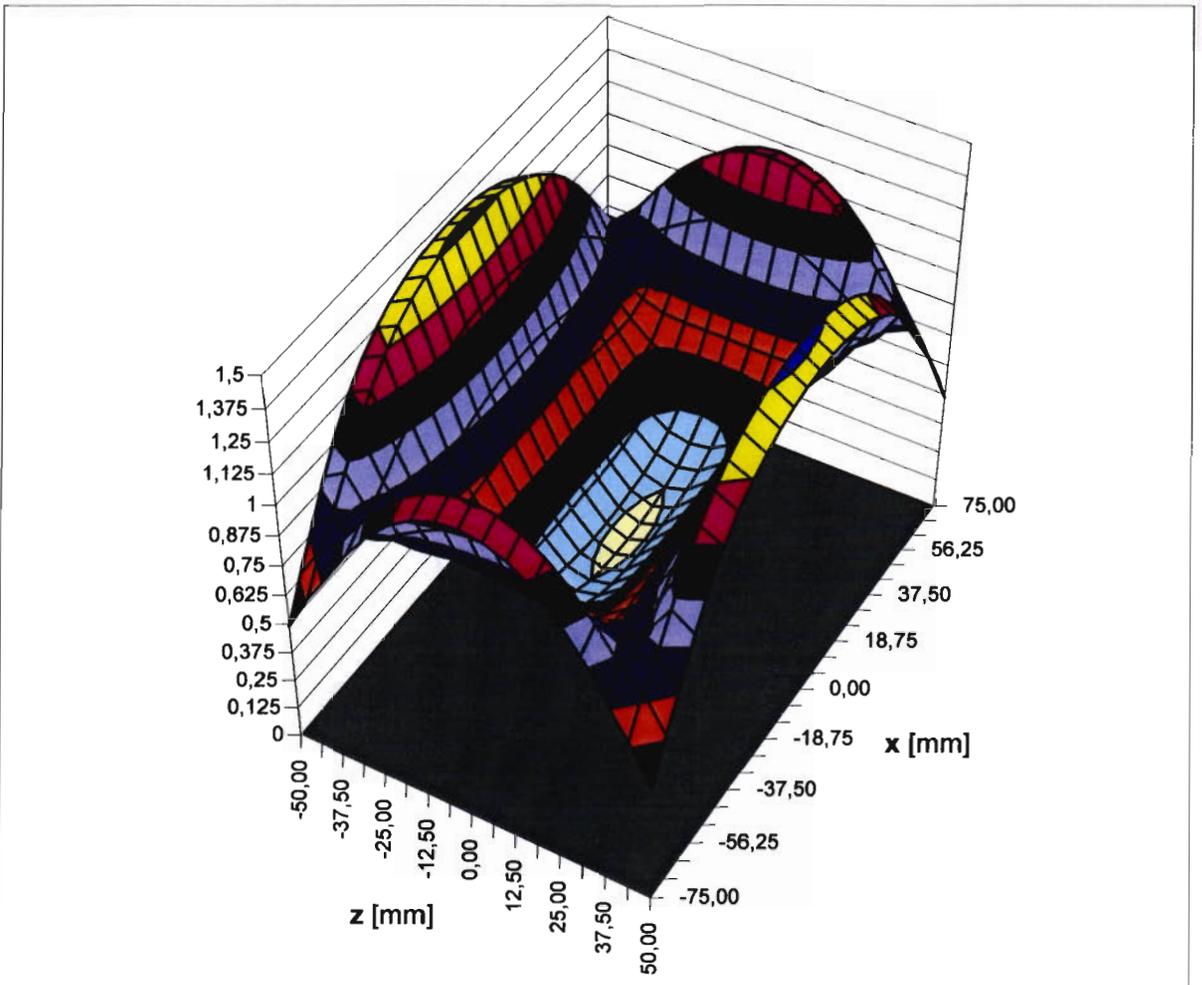
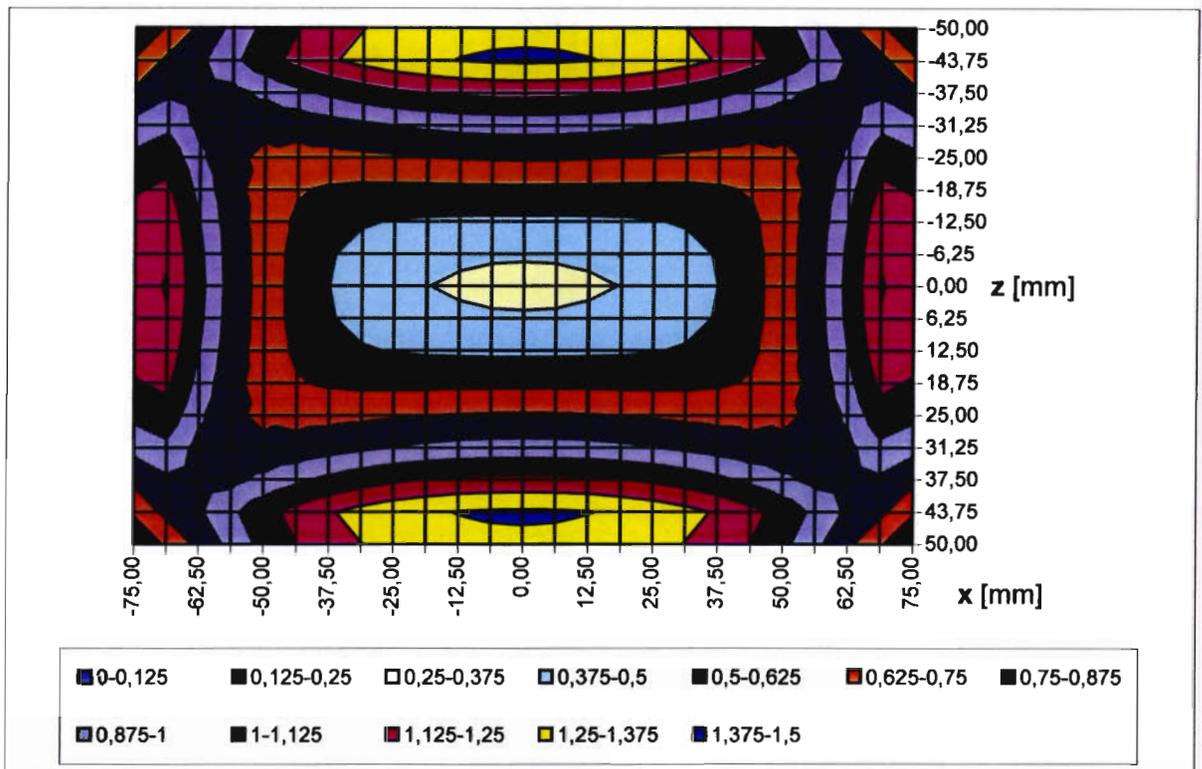


Bild 9: Deviatorspannung in der Elastomerschicht infolge Zugbeanspruchung

(y= 5,33 mm)

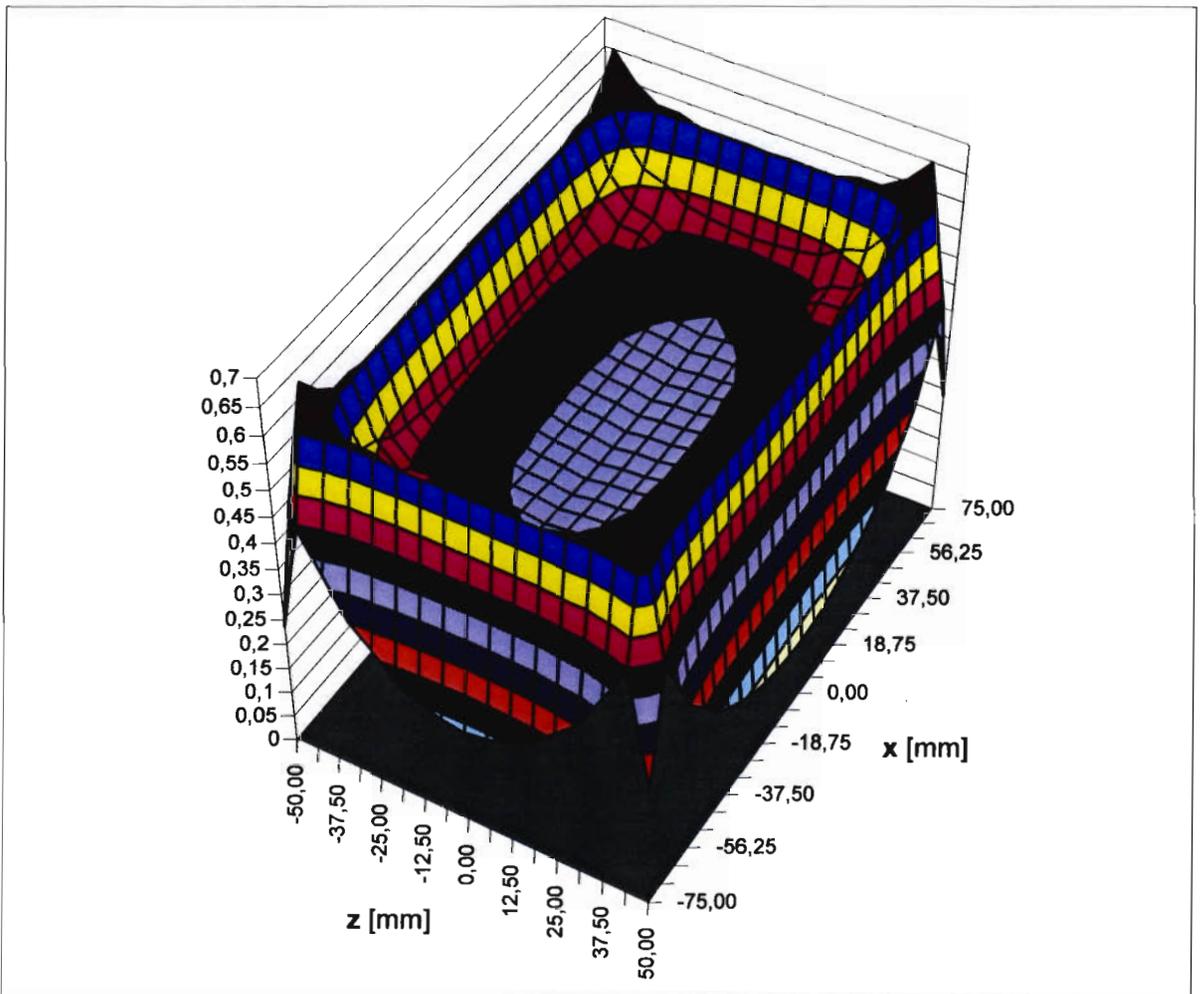
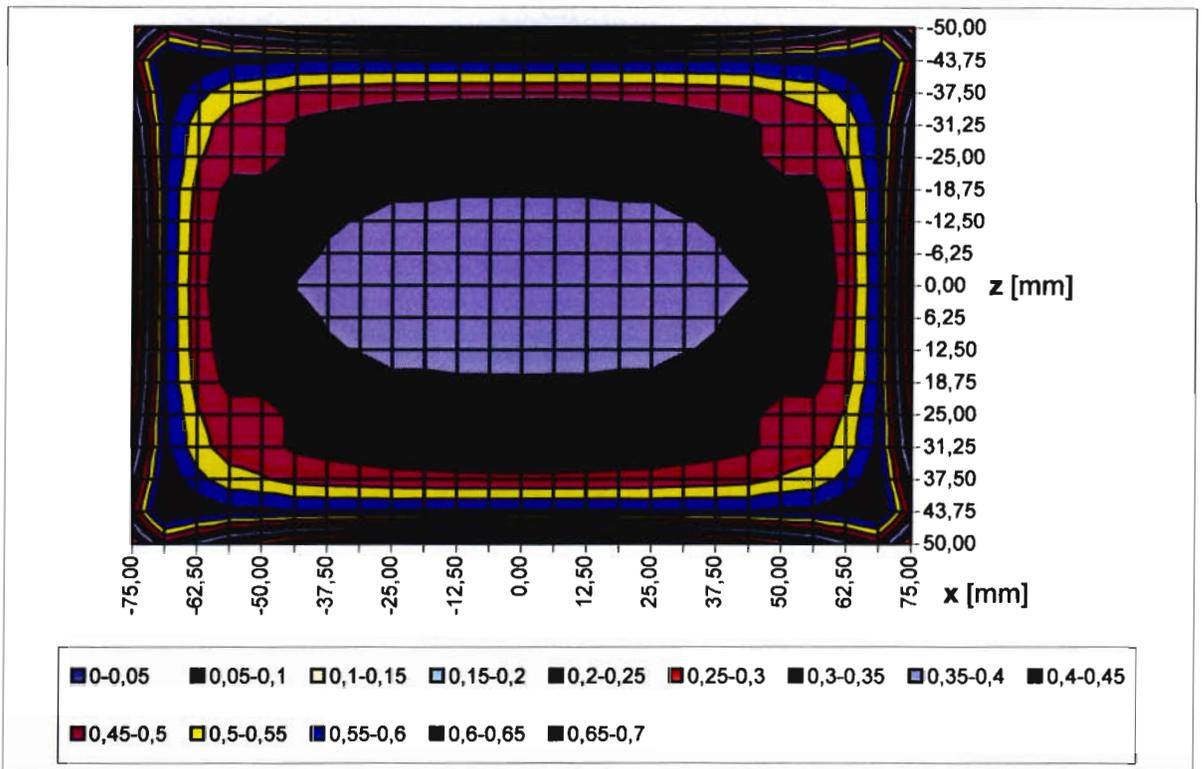


Bild 10: Deviatorspannung in der mittleren Ebene der Elastomerschicht infolge Zugbeanspruchung ( $y = 4,00$  mm)

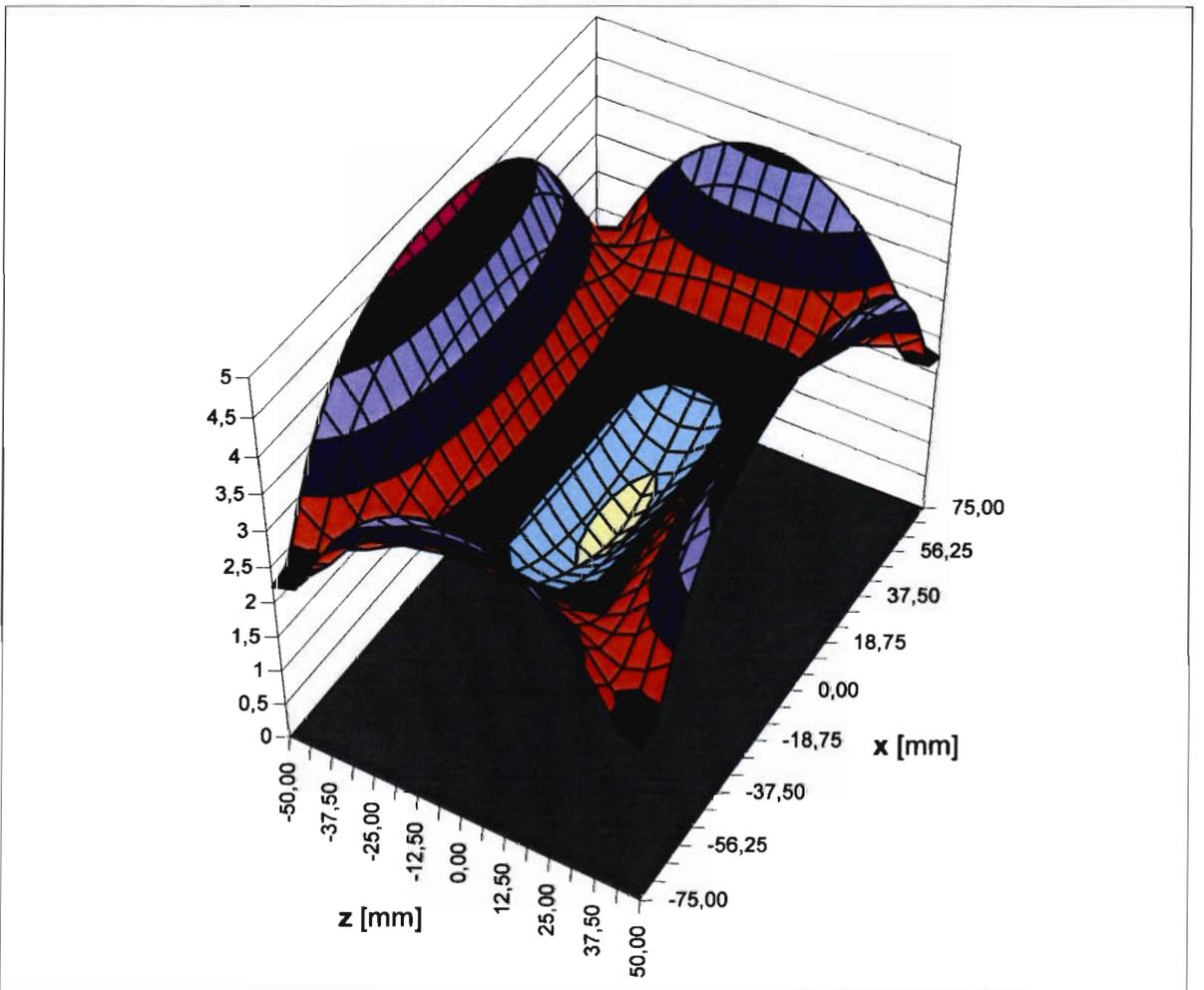
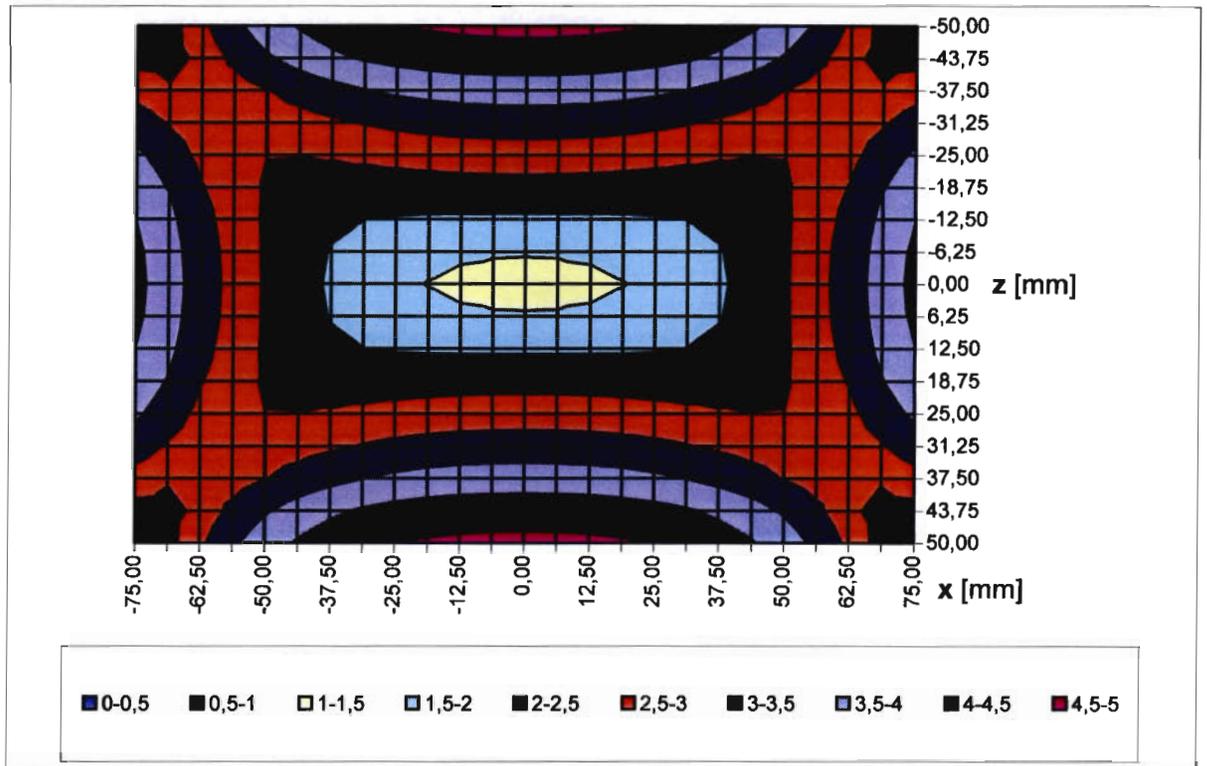


Bild 11: Deviatorspannung in der oberen Ebene der Elastomerschicht infolge Überlagerung von Beanspruchungen -  $V$ ,  $H_x$ ,  $M_z$  ( $y = 8,00$  mm)

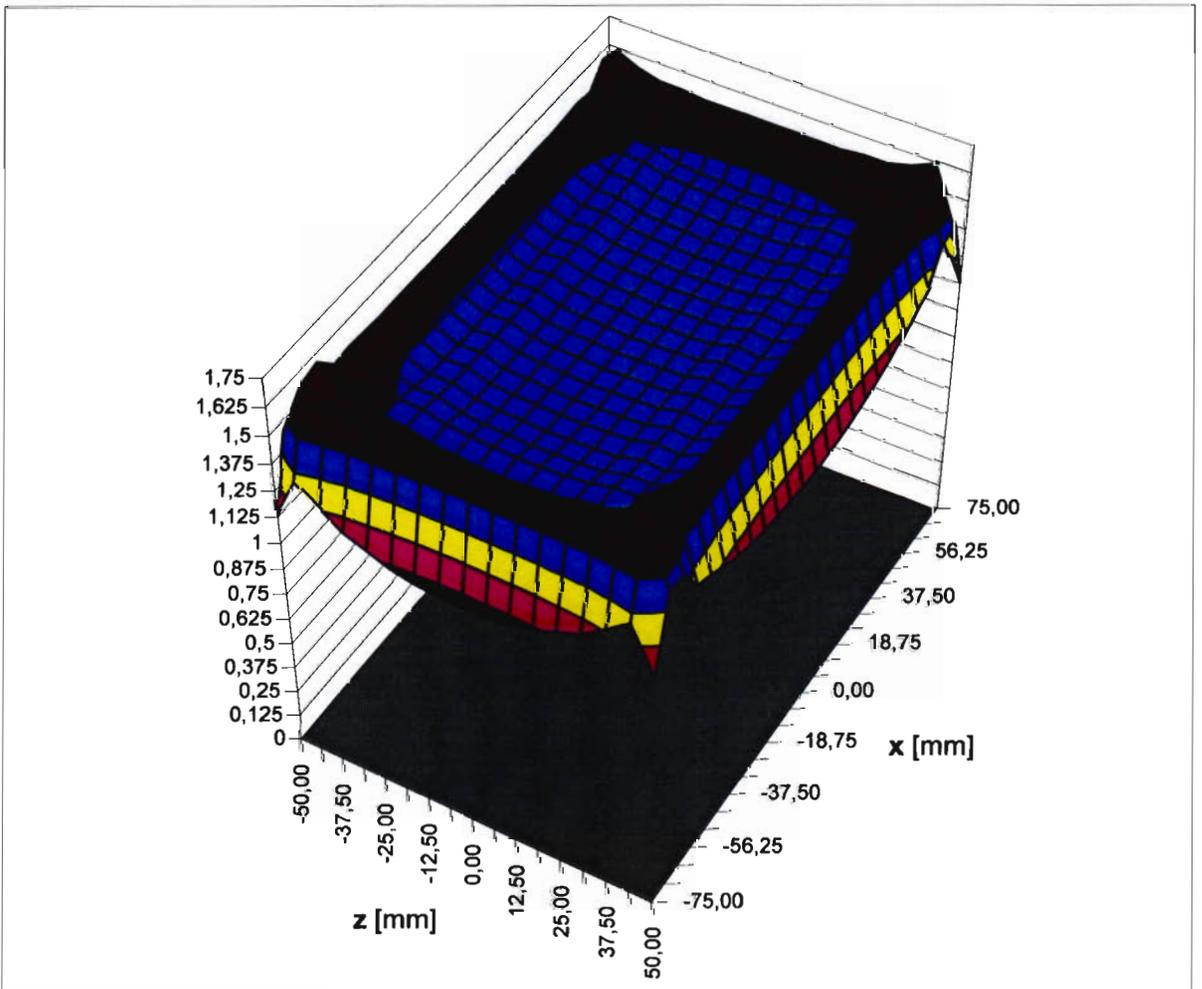
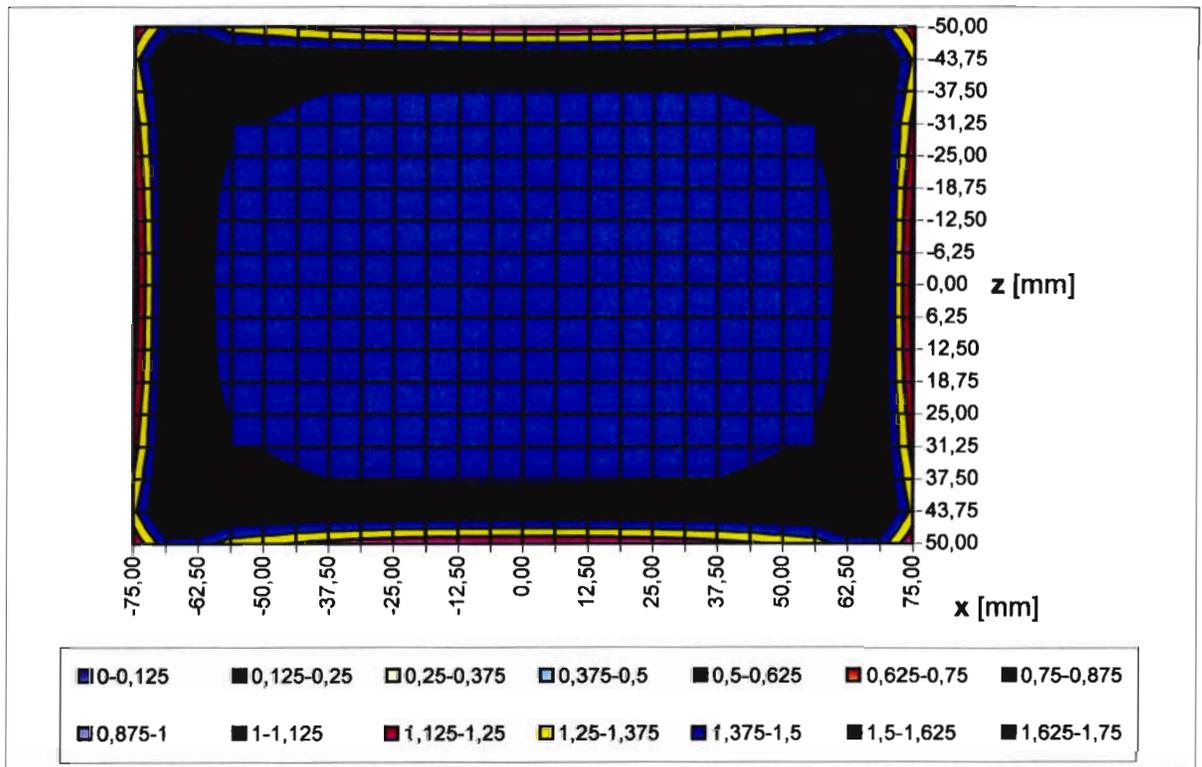


Bild 12: Deviatorspannung in der mittleren Ebene der Elastomerschicht infolge Überlagerung von Beanspruchungen -  $V$ ,  $H_x$ ,  $M_z$  ( $y = 4,00$  mm)

**Literaturverzeichnis**

- [1] DIN 4141, Teil 14, Ausgabe 09/85: Lager im Bauwesen - Bewehrte Elastomerlager
- [2] EN 1337-3, Ausgabe 11/96: Lager im Bauwesen - Elastomerlager
- [3] Eggert, H.; Kauschke, W.: Lager im Bauwesen. - 2.Auflage, Ernst & Sohn Verlag. 1996
- [4] Rahlwes, K.; Maurer, R.: Lagerung und Lager von Bauwerken, Betonkalender 1995, Teil II
- [5] Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau, 4. Teil: Nachweis der Gebrauchsfähigkeit. - 2.Auflage, Springer Verlag. 1978
- [6] Wölfel, M.: Reaktionskräfte von Tragsystemen des Brückenbaus. Studienarbeit - Bauhaus - Universität Weimar. 1998
- [7] Freundt, U. u.a.: Überprüfung der CEN - Normvorlagen des TC 167, hinsichtlich der Einhaltung der Grundsätze des Nachweiskonzeptes der Grenzzustände für die Bemessung und Konstruktion entsprechend „Basis of Design“, Forschungsbericht. 1994
- [8] Kordina, K.; Osteroth, H.-H.: Zur Auflagerung von Stahlbetonbauteilen mittels unbewehrter und bewehrter Elastomerlager, Bauingenieur 59 (1984) 461-466
- [9] Ministry of Transport: Provisional Rules for the Use of Rubber Bearings in Highway Bridges, Memo. 802, London (1962)
- [10] Topaloff, B.: Gummilager für Brücken - Berechnung und Anwendung, Bauingenieur 39(1964) Heft 2
- [11] Bartels, D.: Analyse des Tragverhaltens von Elastomerlagern. Diplomarbeit, 9/1995. Bauhaus - Universität Weimar
- [12] Bestimmung von Kombinationsfaktoren und -regeln für Einwirkungen auf Brücken, Forschungsbericht, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1996, Heft 715
- [13] DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Ausgabe 07/88
- [14] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken - Lastannahmen, Ausgabe 12/85
- [15] ENV 1991: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teile 1 bis 3

**Verzeichnis der Bilder**

|   | Seite |
|---|-------|
| Bild 1: Verformungsverhalten von Elastomerlagern  | 5     |
| Bild 2: Beispiel eines verankerten, bewehrten Elastomerlagers aus DIN 4141, Teil 14 (Einsatz als Zug- Drucklager möglich)                     | 5     |
| Bild 3: Verformungsverhalten unter zentrischem Zug  | 10    |
| Bild 4: Lagerplan des untersuchten Brückentragwerks   | 16    |
| Bild 5: $\sigma - \varepsilon$ - Diagramm für Elastomer   | 32    |
| Bild 6: Gesamtmodell und Bestandteile, Belastung  | 34    |
| Bild 7: Deviatorspannung in der oberen Ebene der Elastomerschicht infolge Zugbeanspruchung ( $y= 8,00$ mm)                                    | 35    |
| Bild 8: Deviatorspannung in der Elastomerschicht infolge Zugbeanspruchung ( $y= 6,67$ mm)   | 36    |
| Bild 9: Deviatorspannung in der Elastomerschicht infolge Zugbeanspruchung ( $y= 5,33$ mm)   | 37    |
| Bild 10: Deviatorspannung in der mittleren Ebene der Elastomerschicht infolge Zugbeanspruchung ( $y= 4,00$ mm)                                | 38    |
| Bild 11: Deviatorspannung in der oberen Ebene der Elastomerschicht infolge Überlagerung von Beanspruchungen $-V, H_x, M_z$ ( $y= 8,00$ mm)    | 39    |
| Bild 12: Deviatorspannung in der mittleren Ebene der Elastomerschicht infolge Überlagerung von Beanspruchungen $-V, H_x, M_z$ ( $y= 4,00$ mm) | 40    |

**Verzeichnis der Tabellen**

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Werte $K_s$ [2]   | 9  |
| Tabelle 2: Auflagerreaktionen mit den Lastannahmen in DIN 1072 (Lastfall HZ)   | 20 |
| Tabelle 3: Auflagerreaktionen mit den Lastannahmen in ENV 1991 (für ständige und vorübergehende Lastfallkombinationen - ULS) | 21 |
| Tabelle 4: Gesamtschubspannungen ( $MN/m^2$ )  | 24 |
| Tabelle 5: Beiwerte $\eta_1$ und $\eta_2$  | 29 |

**Verzeichnis der Anlagen**

|   | Seiten     |
|---|------------|
| Anlage 1    Auflagerreaktionen Lager 10/2 und 10/3 Beispiel 1 | A1/1-A1/9  |
| Anlage 2    Lagerberechnung                                   | A2/1-A2/7  |
| Anlage 3    Spannungs- und Verformungsberechnung              | A3/1-A3/30 |

Lager 10/2: Auflagerreaktionen nach Lastannahmen in der DIN 1072

| Einwirkung                          | V in kN     | zug $\phi_x$ in 1000 rad | zug $\phi_y$ in 1000 rad |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| Eigengewicht $g_1$                  | 387         | -0,5                     | -0,51                    |
| Ausbaulast $g_2$                    | 40          | -0,15                    | -0,14                    |
| Vorspannung V                       | -109        | 0,28                     | 0,33                     |
| Kriechen und Schwinden KS           | 2           | -0,83                    | -0,73                    |
| <b>Zwischensumme ständig:</b>       | <b>320</b>  | <b>-1,2</b>              | <b>-1,05</b>             |
| Stützensenkung Achse 10:<br>DS 10   | 60          | 0,75                     | 0,73                     |
| Stützensenkung Achse 20:<br>DS 20   | -108        | -0,78                    | -0,74                    |
| Stützensenkung Achse 30:<br>DS 30   | 56          | 0,03                     | 0,01                     |
| Stützensenkung Achse 40:<br>DS 40   | -8          | -                        | -                        |
| <b>Zwischensumme max DS</b>         | <b>116</b>  | <b>0,78</b>              | <b>0,74</b>              |
| <b>Zwischensumme min DS</b>         | <b>-116</b> | <b>-0,78</b>             | <b>-0,74</b>             |
| Verkehrslast :                      |             |                          |                          |
| max $p_2$                           | 61,6        | 0,11                     | 0,1                      |
| min $p_2$                           | -1,74       | 0                        | 0                        |
| max $\phi_{p_{H0}}$                 | 51,6        | 0,05                     | 0,04                     |
| min $\phi_{p_{H0}}$                 | -8,54       | 0,01                     | 0,01                     |
| max aus SLW                         | 438         | 0,36                     | 0,36                     |
| min aus SLW                         | -95,6       | 0,09                     | 0,05                     |
| <b>Zwischensumme max Verkehr</b>    | <b>551</b>  | <b>0,52</b>              | <b>0,5</b>               |
| <b>Zwischensumme min Verkehr</b>    | <b>-106</b> | <b>0,1</b>               | <b>0,06</b>              |
| Temperaturunterschied nach :<br>+TU | -196        | 0,26                     | 0,27                     |
| Temperaturunterschied : -TU         | 98          | -0,13                    | -0,14                    |
| ± Wind mit Verkehr                  | ±2,8        | 0                        | 0                        |

Lager 10/3: Auflagerreaktionen nach Lastannahmen in der DIN 1072

| Einwirkung                          | V in kN     | zug $\phi_x$ in 1000 rad | zug $\phi_y$ in 1000 rad |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| Eigengewicht $g_1$                  | 285         | -0,31                    | -0,31                    |
| Ausbaulast $g_2$                    | 65          | -0,06                    | -0,09                    |
| Vorspannung V                       | -70         | 0,35                     | 0,21                     |
| Kriechen und Schwinden KS           | 2           | -0,04                    | -0,43                    |
| <b>Zwischensumme ständig:</b>       | <b>282</b>  | <b>-0,06</b>             | <b>-0,62</b>             |
| Stützensenkung Achse 10:<br>DS 10   | -181        | 0,76                     | 0,88                     |
| Stützensenkung Achse 20:<br>DS 20   | 320         | -0,79                    | -1,01                    |
| Stützensenkung Achse 30:<br>DS 30   | -157        | 0,03                     | 0,14                     |
| Stützensenkung Achse 40:<br>DS 40   | 18          | -                        | -0,02                    |
| <b>Zwischensumme max DS</b>         | <b>338</b>  | <b>-0,79</b>             | <b>-1,02</b>             |
| <b>Zwischensumme min DS</b>         | <b>-338</b> | <b>0,79</b>              | <b>1,02</b>              |
| Verkehrslast :                      |             |                          |                          |
| max $p_2$                           | 135,1       | 0,08                     | 0,14                     |
| min $p_2$                           | -82,1       | -0,02                    | -0,08                    |
| max $\phi_{p_{H0}}$                 | 73,13       | 0,02                     | 0,05                     |
| min $\phi_{p_{H0}}$                 | -13,9       | -0,01                    | -0,03                    |
| max aus SLW                         | 535         | 0,19                     | 0,39                     |
| min aus SLW                         | -193        | -0,05                    | -0,18                    |
| <b>Zwischensumme max Verkehr</b>    | <b>742</b>  | <b>0,29</b>              | <b>0,58</b>              |
| <b>Zwischensumme min Verkehr</b>    | <b>-289</b> | <b>-0,08</b>             | <b>-0,29</b>             |
| Temperaturunterschied nach :<br>+TU | 131         | 0,32                     | 0,16                     |
| Temperaturunterschied : -TU         | -66         | -0,16                    | -0,08                    |
| ± Wind mit Verkehr                  | ±15,2       | 0                        | 0                        |

Lager 10/2: Charakteristische Werte der Auflagerreaktionen nach Lastannahmen des ENV 1991

| Einwirkung                          | V in kN      | zug $\phi_x$ in 1000 rad | zug $\phi_y$ in 1000 rad |
|-------------------------------------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| Eigengewicht $g_1$                  | 387          | -0,5                     | -0,51                    |
| Ausbaulast $g_2$                    | 40           | -0,15                    | -0,14                    |
| Vorspannung V                       | -109         | 0,28                     | 0,33                     |
| Kriechen und Schwinden KS           | 2            | -0,83                    | -0,73                    |
| <b>Zwischensumme ständig:</b>       | <b>320</b>   | <b>-1,2</b>              | <b>-1,05</b>             |
| Stützensenkung Achse 10:<br>DS 10   | 60           | 0,75                     | 0,73                     |
| Stützensenkung Achse 20:<br>DS 20   | -108         | -0,78                    | -0,74                    |
| Stützensenkung Achse 30:<br>DS 30   | 56           | 0,03                     | 0,01                     |
| Stützensenkung Achse 40:<br>DS 40   | -8           | -                        | -                        |
| <b>Zwischensumme max DS</b>         | <b>116</b>   | <b>0,78</b>              | <b>0,74</b>              |
| <b>Zwischensumme min DS</b>         | <b>-116</b>  | <b>-0,78</b>             | <b>-0,74</b>             |
| Verkehrslast :                      |              |                          |                          |
| UDL-System zug zu maxTS             | 145,8        | -0,13                    | -0,14                    |
| UDL-System zug zu minTS             | -16,6        | -0,02                    | -0,02                    |
| max TS - System                     | 433          | -0,27                    | -0,24                    |
| min TS - System                     | -66,6        | -0,1                     | -0,07                    |
| <b>Zwischensumme max Verkehr</b>    | <b>578,8</b> | <b>-0,4</b>              | <b>-0,38</b>             |
| <b>Zwischensumme min Verkehr</b>    | <b>-83,2</b> | <b>-0,12</b>             | <b>-0,09</b>             |
| Temperaturunterschied nach :<br>+TU | -420         | 0,56                     | 0,58                     |
| Temperaturunterschied : -TU         | 196          | -0,28                    | 0,3                      |
| ± Wind mit Verkehr                  | ±9,5         | +0,03                    | +0,02                    |

Lager 10/3: Charakteristische Werte der Auflagerreaktionen nach Lastannahmen des ENV 1991

| Einwirkung                          | V in kN     | zug $\phi_x$ in 1000 rad | zug $\phi_y$ in 1000 rad |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| Eigengewicht $g_1$                  | 285         | -0,31                    | -0,31                    |
| Ausbaulast $g_2$                    | 65          | -0,06                    | -0,09                    |
| Vorspannung V                       | -70         | 0,35                     | 0,21                     |
| Kriechen und Schwinden KS           | 2           | -0,04                    | -0,43                    |
| <b>Zwischensumme ständig:</b>       | <b>282</b>  | <b>-0,06</b>             | <b>-0,62</b>             |
| Stützensenkung Achse 10:<br>DS 10   | -181        | 0,76                     | 0,88                     |
| Stützensenkung Achse 20:<br>DS 20   | 320         | -0,79                    | -1,01                    |
| Stützensenkung Achse 30:<br>DS 30   | -157        | 0,03                     | 0,14                     |
| Stützensenkung Achse 40:<br>DS 40   | 18          | -                        | -0,02                    |
| <b>Zwischensumme max DS</b>         | <b>338</b>  | <b>-0,79</b>             | <b>-1,02</b>             |
| <b>Zwischensumme min DS</b>         | <b>-338</b> | <b>0,79</b>              | <b>1,02</b>              |
| Verkehrslast :                      |             |                          |                          |
| UDL-System zug zu maxTS             | 210         | -0,08                    | -0,16                    |
| UDL-System zug zu minTS             | -103        | 0,03                     | 0,1                      |
| max TS - System                     | 412         | -0,2                     | -0,36                    |
| min TS - System                     | -174        | 0,05                     | 0,16                     |
| <b>Zwischensumme max Verkehr</b>    | <b>622</b>  | <b>-0,28</b>             | <b>-0,52</b>             |
| <b>Zwischensumme min Verkehr</b>    | <b>-277</b> | <b>0,08</b>              | <b>0,26</b>              |
| Temperaturunterschied nach :<br>+TU | 281         | 0,69                     | 0,34                     |
| Temperaturunterschied : -TU         | -132        | -0,34                    | -0,17                    |
| ± Wind mit Verkehr                  | ±52,3       | 0                        | +0,02                    |

**Aufstellung entsprechend den Lastfällen in der DIN 1072**

| Kombination 1 nach DIN 1072        | ständig        | DS        | p           | w           | 0,7 TU       | Σ             |
|------------------------------------|----------------|-----------|-------------|-------------|--------------|---------------|
| <b>max V 10/2 in kN</b>            | 320            | 116       | 551         | 2,8         | 68,6         | <b>1058,4</b> |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -1,2           | 0,78      | 0,52        | 0           | -0,09        | 0,01          |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | -1,05          | 0,74      | 0,5         | 0           | -0,1         | 0,09          |
| <b>min V 10/2 in kN</b>            | 320            | -116      | -106        | -2,8        | -137,2       | <b>-42</b>    |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -1,2           | -0,78     | 0,1         | 0           | 0,182        | -1,698        |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | -1,05          | -0,74     | 0,06        | 0           | 0,189        | -1,541        |
| <b>max V 10/3 in kN</b>            | 282            | 338       | 742         | 15          | 91,7         | <b>1468,7</b> |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -0,06          | -0,79     | 0,29        | 0           | 0,224        | -0,336        |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | -0,62          | -1,02     | 0,58        | 0           | 0,112        | -0,948        |
| <b>min V 10/3 in kN</b>            | 282            | -338      | -289        | -15         | -46,2        | <b>-406,2</b> |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -0,06          | 0,79      | -0,08       | 0           | -0,112       | 0,538         |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | 0,62           | 1,02      | -0,29       | 0           | -0,06        | 1,29          |
| <b>Kombination 2 nach DIN 1072</b> | <b>ständig</b> | <b>DS</b> | <b>0,7p</b> | <b>w</b>    | <b>TU</b>    | <b>Σ</b>      |
| <b>max V 10/2 in kN</b>            | 320            | 116       | 385,7       | 2,8         | 98           | <b>922,5</b>  |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -1,2           | 0,78      | 0,364       | 0           | -0,13        | -0,186        |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | -1,05          | 0,74      | 0,35        | 0           | -0,14        | -0,1          |
| <b>min V 10/2 in kN</b>            | 320            | -116      | -74,2       | -2,8        | -196         | <b>-69</b>    |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -1,2           | -0,78     | 0,07        | 0           | 0,26         | -1,65         |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | -1,05          | -0,74     | 0,042       | 0           | 0,27         | -1,478        |
| <b>max V 10/3 in kN</b>            | 282            | 338       | 519,4       | 15          | 131          | <b>1285,4</b> |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -0,06          | -0,79     | 0,203       | 0           | 0,32         | -0,327        |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | -0,62          | -1,02     | 0,406       | 0           | 0,16         | -1,074        |
| <b>min V 10/3 in kN</b>            | 282            | -338      | -202,3      | -15         | -66          | <b>-339,3</b> |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -0,06          | 0,79      | -0,056      | 0           | -0,16        | 0,514         |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | 0,62           | 1,02      | -0,203      | 0           | -0,08        | 1,357         |
| <b>Kombination 3 für DIN 1072:</b> |                |           |             |             |              |               |
| <b>häufige Kombination</b>         | <b>ständig</b> | <b>DS</b> | <b>0,3p</b> | <b>0,3w</b> | <b>0,3TU</b> | <b>Σ</b>      |
| <b>min V 10/2 in kN</b>            | 320            | -116      | -31,8       | -0,84       | -58,8        | <b>112,56</b> |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -1,2           | -0,78     | 0,03        | 0           | 0,078        | -1,872        |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | -1,05          | -0,74     | 0,018       | 0           | 0,081        | -1,691        |
| <b>min V 10/3 in kN</b>            | 282            | -338      | -86,7       | -4,5        | -19,8        | <b>-167</b>   |
| zug $\phi_x$ in 1000 rad           | -0,06          | 0,79      | -0,024      | 0           | -0,048       | 0,658         |
| zug $\phi_y$ in 1000 rad           | 0,62           | 1,02      | -0,087      | 0           | -0,024       | 1,529         |

Kombinationsvorschriften:

max/min aus Kombination 1 und 2

Kombination 1:  $g_1 + g_2 + V + KS + DS + p + 0,7 TU + w$

Kombination 2:  $g_1 + g_2 + V + KS + DS + 0,7 p + TU + w$

Nur für abhebende Lagerkräfte

Kombination 3:  $g_1 + g_2 + V + KS + DS + 0,3 (p + TU + w)$

Nach ENV 1991 mit Lastfallkombinationen des SLS

| Kombination 1 nach ENV 1991<br>(charakteristische Kombination) | ständig | DS    | p-UDL       | p-TS        | 1 x w* | 0,8 x TU | Σ       |
|--|---------|-------|-------------|-------------|--------|----------|---------|
| max V 10/2 in kN   | 320     | 116   | 145,8       | 433         | 9,5    | 156,8    | 1181,1  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -1,2    | 0,78  | -0,13       | -0,27       | -0,03  | -0,224   | -1,074  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -1,05   | 0,74  | -0,14       | -0,24       | -0,02  | 0,24     | -0,47   |
| min V 10/2 in kN   | 320     | -116  | -16,6       | -66,6       | -9,5   | -336     | -224,7  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -1,2    | -0,78 | -0,02       | -0,1        | 0,03   | 0,448    | -1,622  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -1,05   | -0,74 | -0,02       | -0,07       | 0,02   | 0,464    | -1,396  |
| max V 10/3 in kN   | 282     | 338   | 210         | 412         | 52,3   | 224,8    | 1519,1  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -0,06   | -0,79 | -0,08       | -0,2        | 0      | 0,552    | -0,578  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -0,62   | -1,02 | -0,16       | -0,36       | -0,02  | 0,272    | -1,908  |
| min V 10/3 in kN   | 282     | -338  | -103        | -174        | -52,3  | -105,6   | -490,9  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -0,06   | 0,79  | 0,03        | 0,05        | 0      | -0,272   | 0,538   |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | 0,62    | 1,02  | 0,1         | 0,16        | 0,02   | -0,136   | 1,784   |
| Kombination 2 nach ENV 1991<br>(charakteristische Kombination) | ständig | DS    | 0,4 x p-UDL | 0,75 x p-TS | 1 x w* | TU       | Σ       |
| max V 10/2 in kN   | 320     | 116   | 58,32       | 324,75      | 9,5    | 196      | 1024,57 |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -1,2    | 0,78  | -0,052      | -0,2025     | -0,03  | -0,28    | -0,9845 |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -1,05   | 0,74  | -0,056      | -0,18       | -0,02  | 0,3      | -0,266  |
| min V 10/2 in kN   | 320     | -116  | -6,64       | -49,95      | -9,5   | -420     | -282,09 |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -1,2    | -0,78 | -0,008      | -0,075      | 0,03   | 0,56     | -1,473  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -1,05   | -0,74 | -0,008      | -0,0525     | 0,02   | 0,58     | -1,2505 |
| max V 10/3 in kN   | 282     | 338   | 84          | 309         | 52,3   | 281      | 1346,3  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -0,06   | -0,79 | -0,032      | -0,15       | 0      | 0,69     | -0,342  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -0,62   | -1,02 | -0,064      | -0,27       | -0,02  | 0,34     | -1,654  |
| min V 10/3 in kN   | 282     | -338  | -41,2       | -130,5      | -52,3  | -132     | -412    |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -0,06   | 0,79  | 0,012       | 0,0375      | 0      | -0,34    | 0,4395  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | 0,62    | 1,02  | 0,04        | 0,12        | 0,02   | -0,17    | 1,65    |
| Kombination 3 nach ENV 1991<br>(häufige Kombination)           | ständig | DS    | 0,4 x p-UDL | 0,75 x p-TS | 0 x w* | 0,5 x TU | Σ       |
| min V 10/2 in kN   | 320     | -116  | -6,64       | -49,95      | 0      | -210     | -62,59  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -1,2    | -0,78 | -0,008      | -0,075      | 0      | 0,28     | -1,783  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -1,05   | -0,74 | -0,008      | -0,0525     | 0      | 0,29     | -1,5605 |
| min V 10/3 in kN   | 282     | -338  | -41,2       | -130,5      | 0      | -66      | -293,7  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -0,06   | 0,79  | 0,012       | 0,0375      | 0      | -0,17    | 0,6095  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | 0,62    | 1,02  | 0,04        | 0,12        | 0      | -0,085   | 1,715   |
| Kombination 4 nach ENV 1991<br>(häufige Kombination)           | ständig | DS    | 0 x p-UDL   | 0,2 x p-TS  | 0 x w* | 0,6 x TU | Σ       |
| min V 10/2 in kN   | 320     | -116  | 0           | -13,32      | 0      | -252     | -61,32  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -1,2    | -0,78 | 0           | -0,02       | 0      | 0,336    | -1,664  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -1,05   | -0,74 | 0           | -0,014      | 0      | 0,348    | -1,456  |
| min V 10/3 in kN   | 282     | -338  | 0           | -34,8       | 0      | -79,2    | -170    |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -0,06   | 0,79  | 0           | 0,01        | 0      | -0,204   | 0,536   |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | 0,62    | 1,02  | 0           | 0,032       | 0      | -0,102   | 1,57    |
| Kombination 5 nach ENV 1991<br>(quasi-ständig Kombination)     | ständig | DS    | 0 x p-UDL   | 0,2 x p-TS  | 0 x w* | 0,5 x TU | Σ       |
| min V 10/2 in kN   | 320     | -116  | 0           | -13,32      | 0      | -210     | -19,32  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -1,2    | -0,78 | 0           | -0,02       | 0      | 0,28     | -1,72   |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | -1,05   | -0,74 | 0           | -0,014      | 0      | 0,29     | -1,514  |
| min V 10/3 in kN   | 282     | -338  | 0           | -34,8       | 0      | -66      | -156,8  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad                                 | -0,06   | 0,79  | 0           | 0,01        | 0      | -0,17    | 0,57    |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad                                 | 0,62    | 1,02  | 0           | 0,032       | 0      | -0,085   | 1,587   |

Kombinationsvorschriften:

max/min aus Kombination 1 und 2 (charakteristische Kombinationen)

Kombination 1:  $g_1 + g_2 + V + KS + DS + p + \psi_{0TU} TU + \psi_{0w} W^*$

Kombination 2:  $g_1 + g_2 + V + KS + DS + \psi_{0p} p + TU + \psi_{0w} W^*$

mit:  $\psi_{0p}$ :  $\psi_{0UDL} = 0,4$  ;  $\psi_{0TS} = 0,75$

$\psi_{0TU} = 0,8$  für Lagerberechnungen

$\psi_{0w} = 1$  (mit  $w^*$  = Wind zugehörig zu Verkehr)

Nur abhebende Lagerkräfte:

min aus Kombination 3 und 4 nur für abhebende Lagerkräfte (häufige Kombinationen)

Kombination 3:  $g_1 + g_2 + V + KS + DS + \psi_{1p} p + \psi_{2TU} TU + \psi_{2w} w^*$

Kombination 4:  $g_1 + g_2 + V + KS + DS + \psi_{2p} p + \psi_{1TU} TU + \psi_{2w} w^*$

mit:  $\psi_{1p}$ :  $\psi_{1UDL} = 0,4$  ;  $\psi_{1TS} = 0,75$

$\psi_{2p}$ :  $\psi_{2UDL} = 0$  ;  $\psi_{2TS} = 0,2$

$\psi_{1TU} = 0,6$

$\psi_{2TU} = 0,5$

$\psi_{2w} = 0$  (mit  $w^*$  = Wind zugehörig zu Verkehr)

Nur abhebende Lagerkräfte:

Kombination 5:  $g_1 + g_2 + V + KS + DS + \psi_{2p} p + \psi_{2TU} TU + \psi_{2w} w^*$

Nach ENV 1991 mit Lastfallkombinationen des ULS

| Kombination 1 nach ENV 1991<br>(ständige und vorübergehende Bemessungssituation) | 1,35 x (g <sub>1</sub> + g <sub>2</sub> ) | 1,0 x (V + KS) | 1,0 x DS | 1,5 x p-UDL       | 1,5 x p-TS       | 1,5 x 1 x w* | 1,5 x 0,8 x TU | Σ        |
|--|---|----------------|----------|-------------------|------------------|--------------|----------------|----------|
| max V 10/2 in kN   | 576,45                                    | -107           | 116      | 218,7             | 649,5            | 14,25        | 235,2          | 1703,1   |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad   | -0,8775                                   | -0,55          | 0,78     | -0,195            | -0,405           | -0,045       | -0,336         | -1,6285  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad   | -0,8775                                   | -0,4           | 0,74     | -0,21             | -0,36            | -0,03        | 0,36           | -0,7775  |
| min V 10/2 in kN   | 576,45                                    | -107           | -116     | -24,9             | -99,9            | -14,25       | -504           | -289,6   |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad   | -0,8775                                   | -0,55          | -0,78    | -0,03             | -0,15            | 0,045        | 0,672          | -1,6705  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad   | -0,8775                                   | -0,4           | -0,74    | -0,03             | -0,105           | 0,03         | 0,696          | -1,4265  |
| max V 10/3 in kN   | 472,5                                     | -68            | 338      | 315               | 618              | 78,45        | 337,2          | 2091,15  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad   | -0,4995                                   | 0,31           | -0,79    | -0,12             | -0,3             | 0            | 0,828          | -0,5715  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad   | -0,54                                     | -0,22          | -1,02    | -0,24             | -0,54            | -0,03        | 0,408          | -2,182   |
| min V 10/3 in kN   | 472,5                                     | -68            | -338     | -154,5            | -261             | -78,45       | -158,4         | -585,85  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad   | -0,4995                                   | 0,31           | 0,79     | 0,045             | 0,075            | 0            | -0,408         | 0,3125   |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad   | -0,54                                     | -0,22          | 1,02     | 0,15              | 0,24             | 0,03         | -0,204         | 0,476    |
| Kombination 2 nach ENV 1991<br>(ständige und vorübergehende Bemessungssituation) | 1,35 x (g <sub>1</sub> + g <sub>2</sub> ) | 1,0 x (V + KS) | 1,0 x DS | 1,5 x 0,4 x p-UDL | 1,5 x 0,75 x p-T | 1,5 x 1 x w* | 1,5 x TU       | Σ        |
| max V 10/2 in kN   | 576,45                                    | -107           | 116      | 87,48             | 487,125          | 14,25        | 294            | 1468,305 |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad   | -0,8775                                   | -0,55          | 0,78     | -0,078            | -0,30375         | -0,045       | -0,42          | -1,49425 |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad   | -0,8775                                   | -0,4           | 0,74     | -0,084            | -0,27            | -0,03        | 0,45           | -0,4715  |
| min V 10/2 in kN   | 576,45                                    | -107           | -116     | -9,96             | -74,925          | -14,25       | -630           | -375,685 |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad   | -0,8775                                   | -0,55          | -0,78    | -0,012            | -0,1125          | 0,045        | 0,84           | -1,447   |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad   | -0,8775                                   | -0,4           | -0,74    | -0,012            | -0,07875         | 0,03         | 0,87           | -1,20825 |
| max V 10/3 in kN   | 472,5                                     | -68            | 338      | 126               | 463,5            | 78,45        | 421,5          | 1831,95  |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad   | -0,4995                                   | 0,31           | -0,79    | -0,048            | -0,225           | 0            | 1,035          | -0,2175  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad   | -0,54                                     | -0,22          | -1,02    | -0,096            | -0,405           | -0,03        | 0,51           | -1,801   |
| min V 10/3 in kN   | 472,5                                     | -68            | -338     | -61,8             | -195,75          | -78,45       | -198           | -467,5   |
| zug φ <sub>x</sub> in 1000 rad   | -0,4995                                   | 0,31           | 0,79     | 0,018             | 0,05625          | 0            | -0,51          | 0,16475  |
| zug φ <sub>y</sub> in 1000 rad   | -0,54                                     | -0,22          | 1,02     | 0,06              | 0,18             | 0,03         | -0,255         | 0,275    |

Kombinationsvorschriften:

max/min aus Kombination 1 und 2 (ständige und vorübergehende Bemessungssituationen)

Kombination 1:  $\gamma_G g_1 + \gamma_G g_2 + \gamma_P (V + KS) + \gamma_S DS + \gamma_P p + \gamma_{TU} \psi_{0TU} TU + \gamma_w \psi_{0w} w^*$

Kombination 2:  $\gamma_G g_1 + \gamma_G g_2 + \gamma_P (V + KS) + \gamma_S DS + \gamma_P \psi_{0p} p + \gamma_{TU} TU + \gamma_w \psi_{0w} w^*$

mit:  $\gamma_G = 1,35$

$\gamma_P = 1,0$

$\gamma_S = 1,0$

$\gamma_P = 1,5$

$\gamma_{TU} = 1,5$

$\gamma_w = 1,5$

mit:  $\psi_{0p}$ :  $\psi_{0UDL} = 0,4$  ;  $\psi_{0TS} = 0,75$

$\psi_{0TU} = 0,8$  nach [13]

$\psi_{0w} = 1$  (mit  $w^* =$  Wind zugehörig zu Verkehr)

max/min aus Kombination 3 und 4 nur für abhebende Lagerkräfte (häufige Kombinationen)

Kombination 3:  $\gamma_G g_1 + \gamma_G g_2 + \gamma_P (V + KS) + \gamma_S DS + \gamma_P \psi_{1p} p + \gamma_{TU} \psi_{2TU} TU + \gamma_w \psi_{2w} w^*$

Kombination 4:  $\gamma_G g_1 + \gamma_G g_2 + \gamma_P (V + KS) + \gamma_S DS + \gamma_P \psi_{2p} p + \gamma_{TU} \psi_{1TU} TU + \gamma_w \psi_{2w} w^*$

mit:  $\psi_{1p}$ :  $\psi_{1UDL} = 0,4$  ;  $\psi_{1TS} = 0,75$

$\psi_{2p}$ :  $\psi_{2UDL} = 0$  ;  $\psi_{2TS} = 0,2$

$\psi_{1TU} = 0,6$

$\psi_{2TU} = 0,5$

$\psi_{2w} = 0$  (mit  $w^* =$  Wind zugehörig zu Verkehr)

## Lastfälle der DIN 1072

## Lager 10/2

| Lastfall           | V in kN       | $\phi_x$ in 1000 rad | $\phi_y$ in 1000 rad | $v_x$ in mm  |
|--------------------|---------------|----------------------|----------------------|--------------|
| <b>HZ-K1-max</b>   | <b>1058,4</b> | <b>0,01</b>          | <b>0,09</b>          | <b>42,94</b> |
|                    | 1             | 1                    | 1                    | 1            |
| <b>HZ-K2-max</b>   | <b>922,5</b>  | <b>-0,186</b>        | <b>-0,1</b>          | <b>42,94</b> |
|                    | 0,872         | -18,600              | -1,111               | 1,000        |
| <b>HZ-"häufig"</b> | <b>112,56</b> | <b>-1,872</b>        | <b>-1,691</b>        | <b>32,86</b> |
|                    | 0,106         | -187,200             | -18,789              | 0,765        |
| <b>HZ-K1-min</b>   | <b>-42</b>    | <b>-1,698</b>        | <b>-1,541</b>        | <b>42,94</b> |
|                    | 1             | 1                    | 1                    | 1            |
| <b>HZ-K2-min</b>   | <b>-69</b>    | <b>-1,65</b>         | <b>-1,478</b>        | <b>42,94</b> |
|                    | 1,643         | 0,972                | 0,959                | 1,000        |

## Lager 10/3

| Lastfall           | V in kN       | $\phi_x$ in 1000 rad | $\phi_y$ in 1000 rad | $v_x$ in mm  |
|--------------------|---------------|----------------------|----------------------|--------------|
| <b>HZ-K1-max</b>   | <b>1468,7</b> | <b>-0,336</b>        | <b>-0,948</b>        | <b>42,94</b> |
|                    | 1             | 1                    | 1                    | 1            |
| <b>HZ-K2-max</b>   | <b>1285,4</b> | <b>-0,327</b>        | <b>-1,074</b>        | <b>42,94</b> |
|                    | 0,875         | 0,973                | 1,133                | 1,000        |
| <b>HZ-K1-min</b>   | <b>-406,2</b> | <b>0,538</b>         | <b>1,29</b>          | <b>42,94</b> |
|                    | 1             | 1                    | 1                    | 1            |
| <b>HZ-K2-min</b>   | <b>-339,3</b> | <b>0,514</b>         | <b>1,357</b>         | <b>42,94</b> |
|                    | 0,835         | 0,955                | 1,052                | 1,000        |
| <b>HZ-"häufig"</b> | <b>-167</b>   | <b>0,658</b>         | <b>1,529</b>         | <b>32,86</b> |
|                    | 0,411         | 1,223                | 1,185                | 0,765        |

## Einwirkungskombinationen nach ENV 1991 im SLS

## Lager 10/2

| Lastfall          | V in kN        | $\phi_x$ in 1000 rad | $\phi_y$ in 1000 rad | $v_x$ in mm  |
|-------------------|----------------|----------------------|----------------------|--------------|
| <b>SLS-K1-max</b> | <b>1181,1</b>  | <b>-1,074</b>        | <b>-0,47</b>         | <b>36,82</b> |
|                   | 1              | 1                    | 1                    | 1            |
| <b>SLS-K2-max</b> | <b>1024,57</b> | <b>-0,9845</b>       | <b>-0,266</b>        | <b>42</b>    |
|                   | 0,867          | 0,917                | 0,566                | 1,141        |
| <b>SLS-K1-min</b> | <b>-224,7</b>  | <b>-1,622</b>        | <b>-1,396</b>        | <b>36,82</b> |
|                   | 1,000          | 1,000                | 1,000                | 1,000        |
| <b>SLS-K2-min</b> | <b>-282,09</b> | <b>-1,473</b>        | <b>-1,2505</b>       | <b>42</b>    |
|                   | 1,255          | 0,908                | 0,896                | 1,141        |
| <b>SLS-K3-min</b> | <b>-62,59</b>  | <b>-1,783</b>        | <b>-1,5605</b>       | <b>35,52</b> |
|                   | 0,279          | 1,099                | 1,118                | 0,965        |
| <b>SLS-K4-min</b> | <b>-61,32</b>  | <b>-1,664</b>        | <b>-1,456</b>        | <b>36,82</b> |
|                   | 0,273          | 1,026                | 1,043                | 1,000        |
| <b>SLS-K5-min</b> | <b>-19,32</b>  | <b>-1,72</b>         | <b>-1,514</b>        | <b>35,52</b> |
|                   | 0,086          | 1,060                | 1,085                | 0,965        |

## Lager 10/3

| Lastfall          | V in kN       | $\phi_x$ in 1000 rad | $\phi_y$ in 1000 rad | $v_x$ in mm  |
|-------------------|---------------|----------------------|----------------------|--------------|
| <b>SLS-K1-max</b> | <b>1519,1</b> | <b>-0,578</b>        | <b>-1,908</b>        | <b>36,82</b> |
|                   | 1             | 1                    | 1                    | 1            |
| <b>SLS-K2-max</b> | <b>1346,3</b> | <b>-0,342</b>        | <b>-1,654</b>        | <b>42</b>    |
|                   | 0,886         | 0,592                | 0,867                | 1,141        |
| <b>SLS-K1-min</b> | <b>-490,9</b> | <b>0,538</b>         | <b>1,784</b>         | <b>36,82</b> |
|                   | 1,000         | 1,000                | 1,000                | 1,000        |
| <b>SLS-K2-min</b> | <b>-412</b>   | <b>0,4395</b>        | <b>1,65</b>          | <b>42</b>    |
|                   | 0,839         | 0,817                | 0,925                | 1,141        |
| <b>SLS-K3-min</b> | <b>-293,7</b> | <b>0,6095</b>        | <b>1,715</b>         | <b>35,52</b> |
|                   | 0,598         | 1,133                | 0,961                | 0,965        |
| <b>SLS-K4-min</b> | <b>-170</b>   | <b>0,536</b>         | <b>1,57</b>          | <b>36,82</b> |
|                   | 0,346         | 0,996                | 0,880                | 1,000        |

|                   |               |             |              |              |
|-------------------|---------------|-------------|--------------|--------------|
| <b>SLS-K5-min</b> | <b>-156,8</b> | <b>0,57</b> | <b>1,587</b> | <b>35,52</b> |
|                   | 0,319         | 1,059       | 0,890        | 0,965        |

**Einwirkungskombinationen nach ENV 1991 im ULS**

**Lager 10/2**

| <b>Lastfall</b>   | <b>V in kN</b>  | <b><math>\phi_x</math> in 1000 rad</b> | <b><math>\phi_y</math> in 1000 rad</b> | <b><math>v_x</math> in mm</b> |
|-------------------|-----------------|--|--|-------------------------------|
| <b>ULS-K1-max</b> | <b>1703,1</b>   | <b>-1,6285</b>                         | <b>-0,7775</b>                         | <b>44,59</b>                  |
|                   | 1               | 1                                      | 1                                      | 1                             |
| <b>ULS-K2-max</b> | <b>1468,305</b> | <b>-1,4942</b>                         | <b>-0,4715</b>                         | <b>48,48</b>                  |
|                   | 0,862           | 0,918                                  | 0,606                                  | 1,087                         |
| <b>ULS-K1-min</b> | <b>-289,6</b>   | <b>-1,6705</b>                         | <b>-1,4265</b>                         | <b>44,59</b>                  |
|                   | 1,000           | 1,000                                  | 1,000                                  | 1,000                         |
| <b>ULS-K2-min</b> | <b>-375,685</b> | <b>-1,447</b>                          | <b>-1,208</b>                          | <b>48,48</b>                  |
|                   | 1,297           | 0,866                                  | 0,847                                  | 1,087                         |

**Lager 10/3**

| <b>Lastfall</b>   | <b>V in kN</b> | <b><math>\phi_x</math> in 1000 rad</b> | <b><math>\phi_y</math> in 1000 rad</b> | <b><math>v_x</math> in mm</b> |
|-------------------|----------------|--|--|-------------------------------|
| <b>ULS-K1-max</b> | <b>2091,15</b> | <b>-0,5715</b>                         | <b>-2,182</b>                          | <b>44,59</b>                  |
|                   | 1              | 1                                      | 1                                      | 1                             |
| <b>ULS-K2-max</b> | <b>1831,95</b> | <b>-0,2175</b>                         | <b>-1,801</b>                          | <b>48,48</b>                  |
|                   | 0,876          | 0,381                                  | 0,825                                  | 1,087                         |
| <b>ULS-K1-min</b> | <b>-585,85</b> | <b>0,3125</b>                          | <b>0,476</b>                           | <b>44,59</b>                  |
|                   | 1,000          | 1,000                                  | 1,000                                  | 1,000                         |
| <b>ULS-K2-min</b> | <b>-467,5</b>  | <b>0,16475</b>                         | <b>0,275</b>                           | <b>48,48</b>                  |
|                   | 0,798          | 0,527                                  | 0,578                                  | 1,087                         |

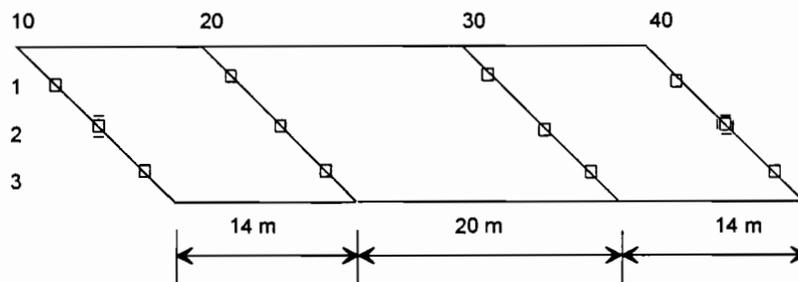
**Lagerberechnung**

**System:** In Längsrichtung beschränkt vorgespannte dreifeldrige, schiefe Straßenbrücke mit Plattenquerschnitt (vgl. S. A2/7)

**Stützweiten:** 14 m / 20 m / 14 m

**Schiefe:** 45°

Je Auflagerachse 3 Lager

**Aufzunehmende Verschiebung:****Berechnung nach DIN 1072**

$$A_b = 7,22 \text{ m}^2 \quad u = 24,7 \text{ m}$$

Beton B 45

$$\varepsilon_{s,t} = -24,96 \cdot 10^{-5}$$

$$\phi_{t,\infty} = 2,18$$

23 Spannglieder, mittlere Vorspannkraft = 1,836 MN

**- infolge Schwinden**

$$\Delta l_s = \varepsilon_{s,t} \cdot l = -24,96 \cdot 10^{-5} \cdot 48000 \text{ mm} = \underline{\underline{-12 \text{ mm}}}$$

**- infolge Kriechen**

$$\Delta l_{KS} = \phi_{t,\infty} \cdot \Delta l_{NV}$$

$$\Delta l_{NV} = l \cdot \sigma_{NV} / E_b \quad \sigma_{NVi.M.} = -23 \cdot 1,836 \text{ MN} / 7,22 \text{ m}^2 = 5,85 \text{ MN/m}^2$$

$$\Delta l_{NV} = -5,85 \cdot 48000 / 37000 = -7,59 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{KS} = -7,59 \cdot 2,18 = \underline{\underline{-16,54 \text{ mm}}}$$

- infolge Temperatur

$$\Delta l_T = \pm \Delta T_m \cdot \alpha_t \cdot l$$

$$+\Delta l_T = 20 \cdot 10^{-5} \cdot 48000 = \underline{9,6 \text{ mm}}$$

$$-\Delta l_T = -30 \cdot 10^{-5} \cdot 48000 = \underline{-14,4 \text{ mm}}$$

Gesamtverschiebung nach DIN 1072:

$$\Delta l = -12,00 - 16,54 - 14,40 = \underline{-42,94 \text{ mm}}$$

Gesamtverschiebung für „häufigen“ Lastfall:

$$\Delta l = -12,00 - 16,54 - 0,3 \cdot 14,40 = \underline{-32,86 \text{ mm}}$$

**Berechnung nach ENV 1991**

$$A_b = 7,22 \text{ m}^2 \quad u = 24,7 \text{ m}$$

Beton C 45/55

$$\varepsilon_{s,t} = -28 \cdot 10^{-5}$$

$$\phi_{t,\infty} = 2,00$$

23 Spannglieder, mittlere Vorspannkraft = 1,836 MN

- infolge Schwinden

$$\Delta l_s = \varepsilon_{s,t} \cdot l = -28 \cdot 10^{-5} \cdot 48000 \text{ mm} = \underline{-13,44 \text{ mm}}$$

- infolge Kriechen

$$\Delta l_{KS} = \phi_{t,\infty} \cdot \Delta l_{NV}$$

$$\Delta l_{NV} = l \cdot \sigma_{NV} / E_b \quad \sigma_{Nvi.M.} = -23 \cdot 1,836 \text{ MN} / 7,22 \text{ m}^2 = 5,85 \text{ MN/m}^2$$

$$\Delta l_{NV} = -5,85 \cdot 48000 / 36000 = -7,80 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{KS} = -7,80 \cdot 2,00 = \underline{-15,60 \text{ mm}}$$

- infolge Temperatur

$$\Delta l_T = \pm \Delta T_N \cdot \alpha_t \cdot l$$

$$+\Delta l_T = (37 - 10 + 20) \cdot 10^{-5} \cdot 48000 = \underline{22,56 \text{ mm}}$$

$$-\Delta l_T = (10 - 17 - 20) \cdot 10^{-5} \cdot 48000 = \underline{-12,96 \text{ mm}}$$

Gesamtverschiebung nach ENV 1991:

Kombination für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen:

für Kombination 1: mit 1,5 · 0,8 T  $l = -13,44 - 1,5 \cdot 0,8 \cdot 12,96 - 15,60 = \underline{-44,59 \text{ mm}}$

für Kombination 2: mit 1,5 T  $l = -13,44 - 1,5 \cdot 12,96 - 15,60 = \underline{-48,48 \text{ mm}}$

charakteristische Kombination:

für Kombination 1: mit 0,6 T  $l = -13,44 - 0,6 \cdot 12,96 - 15,60 = \underline{\underline{-36,82 \text{ mm}}}$

für Kombination 2: mit 1,0 T  $l = -13,44 - 1,0 \cdot 12,96 - 15,60 = \underline{\underline{-42,00 \text{ mm}}}$

häufige Kombination:

für Kombination 3: mit 0,5 T  $l = -13,44 - 0,5 \cdot 12,96 - 15,60 = \underline{\underline{-35,52 \text{ mm}}}$

für Kombination 4: mit 0,6 T  $l = -13,44 - 0,6 \cdot 12,96 - 15,60 = \underline{\underline{-36,82 \text{ mm}}}$

quasi-ständige Kombination:

für Kombination 5: mit 0,5 T  $l = -13,44 - 0,5 \cdot 12,96 - 15,60 = \underline{\underline{-35,52 \text{ mm}}}$

### Lagerberechnung für Druckbeanspruchung

#### Lager 10/2 nach DIN 1072:

max V = 1058,4 kN                      min V = -42 kN

zug  $\phi_x = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

zug  $\phi_y = 0,09 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

$\Delta l = 42,94 \text{ mm}$

Grundrißwahl: a x b = 250 mm x 400 mm , verankert

$$\sigma_m = \frac{1,0584}{0,25 \times 0,4} = 10,584 \text{ MN/m}^2 < 12,5 \text{ MN/m}^2 = \text{zul } \sigma_m$$

erf T =  $\Delta l / 0,7 = 42,94 / 0,7 = 63,4 \text{ mm}$

T > a/5 = 50 mm, T < a/3 = 83,33 mm; dickeres Lager

gewählt: T = 72 mm, n = 9, t<sub>i</sub> = 8 mm

zul tan  $\gamma = 0,7 - (T/a - 0,2) = 0,7 - 72/250 + 0,2 = 0,612$

tan  $\gamma = 42,94 / 72 = 0,596 < 0,612$

zul  $\alpha_a = 0,0025 \text{ rad} > \text{vorh } \alpha_a = 0,09 / 9000 \text{ rad} = 10^{-5} \text{ rad}$

zul  $\alpha_b = 0,0012 \text{ rad} > \text{vorh } \alpha_b = 0,01 / 9000 \text{ rad} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$

#### Lager 10/3 nach DIN 1072:

max V = 1468,7 kN                      min V = -406,2 kN

zug  $\phi_x = 0,336 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

zug  $\phi_y = 0,948 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

Grundrißwahl: a x b = 300 mm x 400 mm , verankert

$$\sigma_m = \frac{1,4687}{0,3 \times 0,4} = 12,24 \text{ MN/m}^2 < 15,0 \text{ MN/m}^2 = \text{zul } \sigma_m$$

erf T =  $\Delta l / 0,7 = 42,94 / 0,7 = 63,4 \text{ mm}$  wie Lager 10/2

gewählt: T = 72 mm, n = 9, t<sub>i</sub> = 8 mm

zul  $\alpha_a = 0,002 \text{ rad} > \text{vorh } \alpha_a = 0,948 / 9000 \text{ rad} = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$   
 zul  $\alpha_b = 0,0012 \text{ rad} > \text{vorh } \alpha_b = 0,336 / 9000 \text{ rad} = 3,73 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$

### Lager 10/2 nach prEN 1337-3 (unter Berücksichtigung der deutschen Stellungnahme)

#### Nachweisführung im ULS:

max V = 1703,1 kN (aus Komb. 1 ULS)    min V = -375,685 kN (aus Komb. 2 ULS)

zug  $\phi_x = 1,6285 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

zug  $\phi_y = 0,7775 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

$\Delta v_x = 44,59 \text{ mm}$

$\Delta v_y \approx 0 \text{ mm}$

gewählt: a x b = 250 mm x 400 mm , T = 72 mm, n = 9, verankert  
 (Klammerwerte für n=8, T = 64 mm)

Pressung:

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1,5 \cdot F_{z,d}}{G_d \cdot A_r \cdot S}$$

$$G_d = 0,8 \text{ MN/m}^2$$

$$A_r = A' \left[ 1 - \frac{v_{x,d}}{a'} - \frac{v_{y,d}}{b'} \right]$$

$$a' = 250 - 8 = 242 \text{ mm} \quad b' = 400 - 8 = 392 \text{ mm}$$

$$A_r = 0,242 \cdot 0,392 (1 - 42/242) = 0,0784 \text{ m}^2$$

$$S = A' / (l_p \cdot t_e) \quad t_e = 8 \text{ mm} \quad l_p = 2 (a' + b') = 1,268 \text{ m}$$

$$S = (0,242 \cdot 0,392) / (1,268 \cdot 0,008) = 9,35$$

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1,5 \cdot 1,7031}{0,8 \cdot 0,0784 \cdot 9,35} = 4,36 (4,36)$$

Verschiebung:

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{v_{xy,d}}{T_q} = 44,59/72 = 0,619 (0,697) < 0,7$$

Verdrehung:

$$\varepsilon_{a,d} = \frac{(a'^2 \cdot a_{a,d} + b'^2 \cdot a_{b,d}) \cdot t_i}{2 \cdot \sum t_i^3} = 0,032 (0,036)$$

Gesamtverformung:

$$\varepsilon_{t,d} = K_L \cdot (\varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{a,d})$$

$$K_L = 1$$

$$\varepsilon_{t,d} (n=9) = 4,36 + 0,619 + 0,032 = \underline{\underline{5,011}} < 6$$

$$\varepsilon_{t,d} (n=8) = 4,36 + 0,697 + 0,036 = \underline{\underline{5,093}} < 6$$

Stabilität in Bezug auf Verdrehung:

$$\Sigma V_{z,d} \geq \frac{(a' \cdot a_a + b' \cdot a_b)}{K_r}$$

mit  $K_r = 3$

$$\Sigma V_{z,d} = \Sigma \left[ \frac{F_{z,d} \cdot l_i}{A'} \cdot \left( \frac{1}{5 \cdot G \cdot S_i^2} + \frac{1}{E_b} \right) \right]$$

mit  $E_b = 2000 \text{ MN/m}^2$  und  $G_d = 1,2 \text{ MN/m}^2$

$$\Sigma V_{z,d} = \Sigma \left[ \frac{1,7031 \cdot 0,008}{0,242 \cdot 0,392} \cdot \left( \frac{1}{5 \cdot 1,2 \cdot 9,35^2} + \frac{1}{2000} \right) \right] = 2,76 \text{ mm}$$

$$\frac{a_a \cdot a' + a_b \cdot b'}{K_r} = \frac{242 \cdot \frac{0,7775}{9 \cdot 1000} + 392 \cdot \frac{1,8285}{9 \cdot 1000}}{3} = 0,031 \text{ mm (0,034 mm)} < 2,76 \text{ mm}$$

Stabilität in Bezug auf Knicken ( $G_d = 0,8 \text{ MN/m}^2$ )

$$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \frac{2 \cdot a' \cdot G_d \cdot S'}{3 \cdot T_e}$$

$$\frac{1,7031}{0,242 \cdot 0,392} = 17,95 \text{ MN/m}^2 \quad (\text{für } n = 9 \text{ Nachweis nicht eingehalten!})$$

$$\frac{2 \cdot 242 \cdot 0,8 \cdot 9,35}{3 \cdot 72} = 16,76 \text{ MN/m}^2 \quad (18,86 \text{ MN/m}^2)$$

**Lager 10/3 nach prEN 1337-3 (unter Berücksichtigung der deutschen Stellungnahme)-**  
**Nachweisführung im ULS:**

max V = 2091,15 kN (aus Komb. 1 ULS)    min V = -585,85 kN (aus Komb. 1 ULS)

zug  $\phi_x = 0,5715 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

zug  $\phi_y = 2,182 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

$\Delta v_x = 44,59 \text{ mm}$

$\Delta v_y \approx 0 \text{ mm}$

gewählt: a x b = 300 mm x 400 mm , T = 72 mm, n = 9, verankert  
(Klammerwerte für n=8, T = 64 mm)

Pressung:

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1,5 \cdot F_{z,d}}{G_d \cdot A_r \cdot S}$$

$G_d = 0,8 \text{ MN/m}^2$

$$A_r = A' \left[ 1 - \frac{v_{x,d}}{a'} - \frac{v_{y,d}}{b'} \right]$$

$a' = 300 - 8 = 292 \text{ mm}$                        $b' = 400 - 8 = 392 \text{ mm}$

$$A_r = 0,292 \cdot 0,392 (1 - 42/292) = 0,098 \text{ m}^2$$

$S = A' / (l_p \cdot t_e)$      $t_e = 8 \text{ mm}$                        $l_p = 2 (a' + b') = 1,368 \text{ m}$

$$S = (0,292 \cdot 0,392) / (1,368 \cdot 0,008) = 10,46$$

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1,5 \cdot 2,09115}{0,8 \cdot 0,098 \cdot 10,46} = 3,82 \text{ (3,82)}$$

Verschiebung:

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{v_{xy,d}}{T_q} = 44,59/72 = 0,619 \text{ (0,697)} < 0,7$$

Verdrehung:

$$\varepsilon_{a,d} = \frac{(a'^2 \cdot a_{a,d} + b'^2 \cdot a_{b,d}) \cdot t_i}{2 \cdot \sum t_i^3} = 0,03 \text{ (0,033)}$$

Gesamtverformung:

$$\varepsilon_{t,d} = K_L \cdot (\varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{a,d})$$

$$K_L = 1$$

$$\varepsilon_{t,d} (n=9) = 3,82 + 0,619 + 0,03 = \underline{4,47} < 6$$

$$\varepsilon_{t,d} (n=8) = 3,82 + 0,697 + 0,033 = \underline{4,55} < 6$$

Stabilität in Bezug auf Verdrehung:

$$\sum v_{z,d} \geq \frac{(a' \cdot a_a + b' \cdot a_b)}{K_r}$$

$$\text{mit } K_r = 3$$

$$\sum v_{z,d} = \sum \left[ \frac{F_{z,d} \cdot t_i}{A'} \cdot \left( \frac{1}{5 \cdot G \cdot S_f^2} + \frac{1}{E_b} \right) \right]$$

$$\text{mit } E_b = 2000 \text{ MN/m}^2 \text{ und } G_d = 1,2 \text{ MN/m}^2$$

$$\sum v_{z,d} = \sum \left[ \frac{2,09115 \cdot 0,008}{0,292 \cdot 0,392} \cdot \left( \frac{1}{5 \cdot 1,2 \cdot 10,46^2} + \frac{1}{2000} \right) \right] = 2,8 \text{ mm}$$

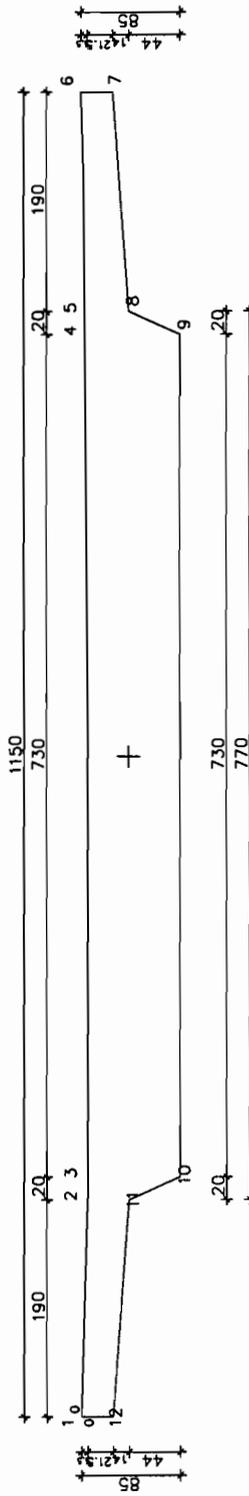
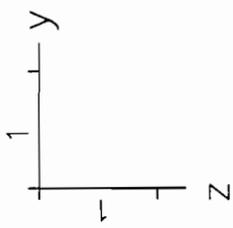
$$\frac{a_a \cdot a' + a_b \cdot b'}{K_r} = \frac{292 \cdot \frac{2,182}{9 \cdot 1000} + 392 \cdot \frac{0,5715}{9 \cdot 1000}}{3} = 0,032 \text{ mm (0,036 mm)} < 2,8 \text{ mm}$$

Stabilität in Bezug auf Knicken

$$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \frac{2 \cdot a' \cdot G_d \cdot S'}{3 \cdot T_e}$$

$$\frac{2,09115}{0,292 \cdot 0,392} = 18,27 \text{ MN/m}^2$$

$$\frac{2 \cdot 292 \cdot 0,8 \cdot 10,46}{3 \cdot 72} = 22,62 \text{ MN/m}^2 \text{ (25,45 MN/m}^2)$$



$Y_s = 5.7500$  [m]  
 $I_y = 3.9518e-01$  [m<sup>4</sup>]  
 $Phi_s = -0.0000$  [Grad]

$Z_s = 0.4056$  [m]  
 $I_z = 5.8212e-01$  [m<sup>4</sup>]  
 $A = 7.2210e+00$  [m<sup>2</sup>]

Querschnittspolygon Nr. 1 [cm]

**Lager 10/2:****a x b x T=250 mm x 400 mm x 72 mm,****d=126 mm, t=8 mm**

Hilfswerte:

 $K_s(a) = 74,1; K_s(b) = 118,5; \eta_2 = 0,234; \eta_1 = 0,8456$ **Normalspannungen und Schubspannungen bei zentrischem Zug / Druck**

$$\sigma_m = V/(a \times b) \quad \sigma_{\max} = \sigma_m/(2 \times \eta_2)$$

$$\tau_1(a) = V \times t/(a^2 \times b \times \eta_2)$$

$$\tau_1(b) = \tau_{\max}(a) \times \eta_1$$

| Lastfall    | V in kN  | $\sigma_m$ in MN/m <sup>2</sup> | $\sigma_{\max}$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_1(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_1(b)$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|----------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| ULS-K2-min  | -375,685 | 3,76                            | 8,03                                 | 0,51                             | 0,43                             |
| SLS-K2-min  | -282,09  | 2,82                            | 6,03                                 | 0,39                             | 0,33                             |
| SLS-K3-min  | -62,59   | 0,63                            | 1,34                                 | 0,09                             | 0,07                             |
| SLS-K5-min  | -19,32   | 0,19                            | 0,41                                 | 0,03                             | 0,02                             |
| ULS-K1-max  | 1703,1   | 17,03                           | 36,39                                | 2,33                             | 1,97                             |
| SLS-K1-max  | 1141,9   | 11,42                           | 24,40                                | 1,56                             | 1,32                             |
| HZ-K1-min   | -42      | 0,42                            | 0,90                                 | 0,06                             | 0,05                             |
| HZ-K2-min   | -69      | 0,69                            | 1,47                                 | 0,09                             | 0,08                             |
| HZ-K1-max   | 1058,4   | 10,58                           | 22,62                                | 1,45                             | 1,22                             |
| HZ-K2-max   | 922,5    | 9,23                            | 19,71                                | 1,26                             | 1,07                             |
| HZ-"häufig" | 112,56   | 1,13                            | 2,41                                 | 0,15                             | 0,13                             |

**Normalspannungen und Schubspannungen bei Verschiebung**

Schubspannung aus Verschiebung

$$\tau_2(a) = G \times \tan \gamma = G \times v_x/T \quad \tau_2(b) = G \times \tan \gamma = G \times v_y/T \quad v_y \approx 0$$

Schubspannung und Normalspannung aus Exzentrizität der Vertikalkraft und aus Rückstellkraft

$$M = V \times e \quad \text{mit } e = v_x/2 + e_1$$

$$e_1 = H \times d / V$$

$$H = A \times G \times \tan \gamma$$

$$M(a) = V \times v_x/2 + H \times d$$

$$\alpha(a) = M(a) \times K_s(a) \times t^3 / (n \times a^5 \times b \times G)$$

$$\tau_3(a) = G/2 \times (a/t)^2 \times \alpha(a)$$

$$\tau_3(a) = M(a) \times K_s(a) \times t / (2 \times n \times a^3 \times b)$$

$$\sigma_{\max(a)} = 5,76/K_s(a) \times \alpha(a) \times G \times (a/t)^3$$

$$\sigma_{\max(a)} = 5,76 \times M(a) / (n \times a^2 \times b)$$

Fortsetzung: Normalspannungen und Schubspannungen bei Verschiebung

| Lastfall    | V in kN  | zug $v_x$ in mm | $\sigma_{\max(a)}$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_2(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_3(a)$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|----------|-----------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| ULS-K2-min  | -375,685 | 48,48           | 0,450                                   | 0,673                            | 0,093                            |
| SLS-K2-min  | -282,09  | 42              | 0,340                                   | 0,583                            | 0,070                            |
| SLS-K3-min  | -62,59   | 35,52           | 0,188                                   | 0,493                            | 0,039                            |
| SLS-K5-min  | -19,32   | 35,52           | 0,168                                   | 0,493                            | 0,035                            |
| ULS-K1-max  | 1703,1   | 44,59           | 1,172                                   | 0,619                            | 0,241                            |
| SLS-K1-max  | 1141,9   | 36,82           | 0,703                                   | 0,511                            | 0,145                            |
| HZ-K1-min   | -42      | 42,94           | 0,215                                   | 0,596                            | 0,044                            |
| HZ-K2-min   | -69      | 42,94           | 0,230                                   | 0,596                            | 0,047                            |
| HZ-K1-max   | 1058,4   | 42,94           | 0,774                                   | 0,596                            | 0,159                            |
| HZ-K2-max   | 922,5    | 42,94           | 0,699                                   | 0,596                            | 0,144                            |
| HZ-"häufig" | 112,56   | 32,86           | 0,195                                   | 0,456                            | 0,040                            |

**Normalspannungen und Schubspannungen bei Verdrehung**

Schubspannung und Normalspannung aus Rückstellung

$$\tau_4(a) = \phi_y \times G \times (a/t)^2 / (2 \times n) \quad \tau_4(b) = \phi_x \times G \times (b/t)^2 / (2 \times n)$$

$$\sigma_{\max(a)} = 5,76 \times \phi_y \times G \times (a/t)^3 / (K_s(a) \times n)$$

$$\sigma_{\max(b)} = 5,76 \times \phi_x \times G \times (b/t)^3 / (K_s(b) \times n)$$

aus entstehender Horizontalkraft bei vorhandener Vertikalkraft

$$H(a) = V \times \phi_y / (2 \times n) \quad H(b) = V \times \phi_x / (2 \times n)$$

$$\tau_5(a) = H(a) / A \quad \tau_5(b) = H(b) / A$$

| Lastfall    | $\phi_x$ in<br>1000 rad | $\phi_y$ in<br>1000 rad | $\sigma_{\max(a)}$<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\sigma_{\max(b)}$<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_4(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_4(b)$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|-------------------------|-------------------------|--|--|----------------------------------|----------------------------------|
| ULS-K2-min  | 1,447                   | 1,208                   | 0,318                                      | 0,977                                      | 0,066                            | 0,201                            |
| SLS-K2-min  | 1,473                   | 1,2505                  | 0,330                                      | 0,994                                      | 0,068                            | 0,205                            |
| SLS-K3-min  | 1,783                   | 1,5605                  | 0,411                                      | 1,204                                      | 0,085                            | 0,248                            |
| SLS-K5-min  | 1,72                    | 1,514                   | 0,399                                      | 1,161                                      | 0,082                            | 0,239                            |
| ULS-K1-max  | 1,6285                  | 0,7775                  | 0,205                                      | 1,099                                      | 0,042                            | 0,226                            |
| SLS-K1-max  | 1,018                   | 0,53                    | 0,140                                      | 0,687                                      | 0,029                            | 0,141                            |
| HZ-K1-min   | 1,698                   | 1,541                   | 0,406                                      | 1,146                                      | 0,084                            | 0,236                            |
| HZ-K2-min   | 1,65                    | 1,478                   | 0,390                                      | 1,114                                      | 0,080                            | 0,229                            |
| HZ-K1-max   | 0,01                    | 0,09                    | 0,024                                      | 0,007                                      | 0,005                            | 0,001                            |
| HZ-K2-max   | 0,186                   | 0,1                     | 0,026                                      | 0,126                                      | 0,005                            | 0,026                            |
| HZ-"häufig" | 1,872                   | 1,691                   | 0,446                                      | 1,264                                      | 0,092                            | 0,260                            |

Fortsetzung: Schubspannungen bei Verdrehung

| Lastfall    | V in kN  | $\phi_x$ in | $\phi_y$ in | $\tau_5(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_5(b)$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|----------|-------------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|
|             |          | 1000 rad    | 1000 rad    |                                  |                                  |
| ULS-K2-min  | -375,685 | 1,447       | 1,208       | 0,00025                          | 0,00030                          |
| SLS-K2-min  | -282,09  | 1,473       | 1,2505      | 0,00020                          | 0,00023                          |
| SLS-K3-min  | -62,59   | 1,783       | 1,5605      | 0,00005                          | 0,00006                          |
| SLS-K5-min  | -19,32   | 1,72        | 1,514       | 0,00002                          | 0,00002                          |
| ULS-K1-max  | 1703,1   | 1,6285      | 0,7775      | 0,00074                          | 0,00154                          |
| SLS-K1-max  | 1141,9   | 1,018       | 0,53        | 0,00034                          | 0,00065                          |
| HZ-K1-min   | -42      | 1,698       | 1,541       | 0,00004                          | 0,00004                          |
| HZ-K2-min   | -69      | 1,65        | 1,478       | 0,00006                          | 0,00006                          |
| HZ-K1-max   | 1058,4   | 0,01        | 0,09        | 0,00005                          | 0,00001                          |
| HZ-K2-max   | 922,5    | 0,186       | 0,1         | 0,00005                          | 0,00010                          |
| HZ-"häufig" | 112,56   | 1,872       | 1,691       | 0,00011                          | 0,00012                          |

**Lager 10/3:****a x b x T=300 mm x 400 mm x 72 mm,****d=126 mm, t=8 mm**

Hilfswerte:

 $K_s(a) = 77,9; K_s(b) = 100; \eta_2 = 0,223; \eta_1 = 0,906$ **Normalspannungen und Schubspannungen bei zentrischem Zug / Druck**

$$\sigma_m = V/(a \times b) \quad \sigma_{\max} = \sigma_m/(2 \times \eta_2)$$

$$\tau_1(a) = V \times t/(a^2 \times b \times \eta_2)$$

$$\tau_1(b) = \tau_{\max}(a) \times \eta_1$$

| Lastfall    | V in kN | $\sigma_m$ in MN/m <sup>2</sup> | $\sigma_{\max}$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_1(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_1(b)$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|---------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| ULS-K1-min  | -585,85 | 4,88                            | 10,95                                | 0,58                             | 0,53                             |
| SLS-K1-min  | -464,5  | 3,87                            | 8,68                                 | 0,46                             | 0,42                             |
| SLS-K3-min  | -293,7  | 2,45                            | 5,49                                 | 0,29                             | 0,27                             |
| SLS-K5-min  | -156,8  | 1,31                            | 2,93                                 | 0,16                             | 0,14                             |
| ULS-K1-max  | 2091,15 | 17,43                           | 39,07                                | 2,08                             | 1,89                             |
| SLS-K1-max  | 1462,9  | 12,19                           | 27,33                                | 1,46                             | 1,32                             |
| HZ-K1-min   | -406,2  | 3,39                            | 7,59                                 | 0,40                             | 0,37                             |
| HZ-"häufig" | -167    | 1,39                            | 3,12                                 | 0,17                             | 0,15                             |
| HZ-K1-max   | 1468,7  | 12,24                           | 27,44                                | 1,46                             | 1,33                             |

**Normalspannungen und Schubspannungen bei Verschiebung**

Schubspannung aus Verschiebung

$$\tau_2(a) = G \times \tan \gamma = G \times v_x/T \quad \tau_2(b) = G \times \tan \gamma = G \times v_y/T \quad v_y \approx 0$$

Schubspannung und Normalspannung aus Exzentrizität der Vertikalkraft und aus Rückstellkraft

$$M = V \times e \quad \text{mit } e = v_x/2 + e_1$$

$$e_1 = H \times d / V \quad H = A \times G \times \tan \gamma$$

$$M(a) = V \times v_x/2 + H \times d$$

$$\alpha(a) = M(a) \times K_s(a) \times t^3 / (n \times a^5 \times b \times G)$$

$$\tau_3(a) = G/2 \times (a/t)^2 \times \alpha(a)$$

$$\tau_3(a) = M(a) \times K_s(a) \times t / (2 \times n \times a^3 \times b)$$

$$\sigma_{\max(a)} = 5,76/K_s(a) \times \alpha(a) \times G \times (a/t)^3$$

$$\sigma_{\max(a)} = 5,76 \times M(a) / (n \times a^2 \times b)$$

Fortsetzung: Normalspannungen und Schubspannungen bei Verschiebung

| Lastfall    | V in kN | zug $v_x$ in mm | $\sigma_{\max(a)}$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_2(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_3(a)$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|---------|-----------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| ULS-K1-min  | -585,85 | 44,59           | 0,399                                   | 0,619                            | 0,072                            |
| SLS-K1-min  | -464,5  | 36,82           | 0,289                                   | 0,511                            | 0,052                            |
| SLS-K3-min  | -293,7  | 35,52           | 0,225                                   | 0,493                            | 0,041                            |
| SLS-K5-min  | -156,8  | 35,52           | 0,182                                   | 0,493                            | 0,033                            |
| ULS-K1-max  | 2091,15 | 44,59           | 0,995                                   | 0,619                            | 0,179                            |
| SLS-K1-max  | 1462,9  | 36,82           | 0,616                                   | 0,511                            | 0,111                            |
| HZ-K1-min   | -406,2  | 42,94           | 0,315                                   | 0,596                            | 0,057                            |
| HZ-"häufig" | -167    | 32,86           | 0,171                                   | 0,456                            | 0,031                            |
| HZ-K1-max   | 1468,7  | 42,94           | 0,721                                   | 0,596                            | 0,130                            |

**Normalspannungen und Schubspannungen bei Verdrehung**

| Schubspannung und Normalspannung aus Rückstellung                                   |   |
|---|---|
| $\tau_4(a) = \phi_y \times G \times (a/t)^2 / (2 \times n)$                         | $\tau_4(b) = \phi_x \times G \times (b/t)^2 / (2 \times n)$ |
| $\sigma_{\max(a)} = 5,76 \times \phi_y \times G \times (a/t)^3 / (K_s(a) \times n)$ |   |
| $\sigma_{\max(b)} = 5,76 \times \phi_x \times G \times (b/t)^3 / (K_s(b) \times n)$ |   |
| aus entstehender Horizontalkraft bei vorhandener Vertikalkraft                      |   |
| $H(a) = V \times \phi_y / (2 \times n)$   | $H(b) = V \times \phi_x / (2 \times n)$                     |
| $\tau_5(a) = H(a) / A$  | $\tau_5(b) = H(b) / A$                                      |

| Lastfall    | $\phi_x$ in<br>1000 rad | $\phi_y$ in<br>1000 rad | $\sigma_{\max(a)}$<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\sigma_{\max(b)}$<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_4(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_4(b)$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|-------------------------|-------------------------|--|--|----------------------------------|----------------------------------|
| ULS-K1-min  | 0,3125                  | 0,476                   | 0,206                                      | 0,250                                      | 0,037                            | 0,043                            |
| SLS-K1-min  | 0,606                   | 1,818                   | 0,788                                      | 0,485                                      | 0,142                            | 0,084                            |
| SLS-K3-min  | 0,6095                  | 1,715                   | 0,743                                      | 0,488                                      | 0,134                            | 0,085                            |
| SLS-K5-min  | 0,57                    | 1,587                   | 0,688                                      | 0,456                                      | 0,124                            | 0,079                            |
| ULS-K1-max  | 0,5715                  | 2,182                   | 0,945                                      | 0,457                                      | 0,170                            | 0,079                            |
| SLS-K1-max  | 0,716                   | 1,976                   | 0,856                                      | 0,573                                      | 0,154                            | 0,099                            |
| HZ-K1-min   | 0,538                   | 1,29                    | 0,559                                      | 0,430                                      | 0,101                            | 0,075                            |
| HZ-"häufig" | 0,658                   | 1,529                   | 0,662                                      | 0,526                                      | 0,119                            | 0,091                            |
| HZ-K1-max   | 0,336                   | 0,948                   | 0,411                                      | 0,269                                      | 0,074                            | 0,047                            |

Fortsetzung: Schubspannungen bei Verdrehung

| Lastfall    | V in kN | $\phi_x$ in | $\phi_y$ in | $\tau_5(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_5(b)$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|---------|-------------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|
|             |         | 1000 rad    | 1000 rad    |                                  |                                  |
| ULS-K1-min  | -585,85 | 0,3125      | 0,476       | 0,00013                          | 0,00008                          |
| SLS-K1-min  | -464,5  | 0,606       | 1,818       | 0,00039                          | 0,00013                          |
| SLS-K3-min  | -293,7  | 0,6095      | 1,715       | 0,00023                          | 0,00008                          |
| SLS-K5-min  | -156,8  | 0,57        | 1,587       | 0,00012                          | 0,00004                          |
| ULS-K1-max  | 2091,15 | 0,5715      | 2,182       | 0,00211                          | 0,00055                          |
| SLS-K1-max  | 1462,9  | 0,716       | 1,976       | 0,00134                          | 0,00048                          |
| HZ-K1-min   | -406,2  | 0,538       | 1,29        | 0,00024                          | 0,00010                          |
| HZ-"häufig" | -167    | 0,658       | 1,529       | 0,00012                          | 0,00005                          |
| HZ-K1-max   | 1468,7  | 0,336       | 0,948       | 0,00064                          | 0,00023                          |

**Schubverformung bei zentrischem Zug/Druck**  
**Berechnung nach prEN 1337**

$\epsilon_{c,d} = 1,5 \times F_{z,d} / (G_d \times A_r \times S)$        $F_{z,d} = V$        $G_d = 1 \text{ MN/m}^2$   
 Vergleichswert für Schubspannungsberechnung  $\epsilon_{cv}$  mit  $A_r = A$  und  $G_d = 1 \text{ MN/m}^2$

**Lager 10/2:**

$A_r = 0,0949 \text{ m}^2$

$A = 0,1 \text{ m}^2$

$S = 9,62$

| Lastfall    | V in kN  | $\sigma_m$ in MN/m <sup>2</sup> | $\epsilon_{cv}$ | $\epsilon_{c,d}$ |
|-------------|----------|---------------------------------|-----------------|------------------|
| ULS-K2-min  | -375,685 | 3,76                            | 0,586           | 0,617            |
| SLS-K2-min  | -282,09  | 2,82                            | 0,440           | 0,463            |
| SLS-K3-min  | -62,59   | 0,63                            | 0,098           | 0,103            |
| SLS-K5-min  | -19,32   | 0,19                            | 0,030           | 0,032            |
| ULS-K1-max  | 1703,1   | 17,03                           | 2,656           | 2,798            |
| SLS-K1-max  | 1181,1   | 11,81                           | 1,842           | 1,941            |
| HZ-K1-min   | -42      | 0,42                            | 0,065           | 0,069            |
| HZ-K2-min   | -69      | 0,69                            | 0,108           | 0,113            |
| HZ-K1-max   | 1058,4   | 10,58                           | 1,650           | 1,739            |
| HZ-K2-max   | 922,5    | 9,23                            | 1,438           | 1,516            |
| HZ-"häufig" | 112,56   | 1,13                            | 0,176           | 0,185            |

**Lager 10/3:**

$A_r = 0,1145 \text{ m}^2$

$A = 0,12 \text{ m}^2$

$S = 10,71$

| Lastfall    | V in kN | $\sigma_m$ in MN/m <sup>2</sup> | $\epsilon_{cv}$ | $\epsilon_{c,d}$ |
|-------------|---------|---------------------------------|-----------------|------------------|
| ULS-K1-min  | -585,85 | 4,88                            | 0,684           | 0,717            |
| SLS-K1-min  | -490,9  | 4,09                            | 0,573           | 0,600            |
| SLS-K3-min  | -293,7  | 2,45                            | 0,343           | 0,359            |
| SLS-K5-min  | -156,8  | 1,31                            | 0,183           | 0,192            |
| ULS-K1-max  | 2091,15 | 17,43                           | 2,441           | 2,558            |
| SLS-K1-max  | 1519,1  | 12,66                           | 1,773           | 1,858            |
| HZ-K1-min   | -406,2  | 3,39                            | 0,474           | 0,497            |
| HZ-"häufig" | -167    | 1,39                            | 0,195           | 0,204            |
| HZ-K1-max   | 1468,7  | 12,24                           | 1,714           | 1,797            |

**Schubverformung bei Verdrehung****Berechnung nach prEN 1337**

$$\epsilon_{aa,d} = (a'^2 \times \alpha_{a,d}) t_i / 2 \times \Sigma t_i^3 \quad \epsilon_{ab,d} = (b'^2 \times \alpha_{b,d}) t_i / 2 \times \Sigma t_i^3$$

Vergleichswert für Schubspannungsberechnung  $\epsilon_{av}$  mit  $a' = a$  und  $b' = b$

**Lager 10/2:**

$$a' = 0,242 \text{ m} \quad b' = 0,392 \text{ m}$$

| Lastfall    | $\phi_x$ in | $\phi_y$ in | $\epsilon_{av}$ | $\epsilon_{aa,d}$ | $\epsilon_{abv}$ | $\epsilon_{ab,d}$ |
|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|-------------------|
|             | 1000 rad    | 1000 rad    |                 |                   |                  |                   |
| ULS-K2-min  | 1,447       | 1,208       | 0,066           | 0,061             | 0,201            | 0,193             |
| SLS-K2-min  | 1,473       | 1,2505      | 0,068           | 0,064             | 0,205            | 0,196             |
| SLS-K3-min  | 1,783       | 1,5605      | 0,085           | 0,079             | 0,248            | 0,238             |
| SLS-K5-min  | 1,72        | 1,514       | 0,082           | 0,077             | 0,239            | 0,229             |
| ULS-K1-max  | 1,6285      | 0,7775      | 0,042           | 0,040             | 0,226            | 0,217             |
| SLS-K1-max  | 1,074       | 0,47        | 0,025           | 0,024             | 0,149            | 0,143             |
| HZ-K1-min   | 1,698       | 1,541       | 0,084           | 0,078             | 0,236            | 0,226             |
| HZ-K2-min   | 1,65        | 1,478       | 0,080           | 0,075             | 0,229            | 0,220             |
| HZ-K1-max   | 0,01        | 0,09        | 0,005           | 0,005             | 0,001            | 0,001             |
| HZ-K2-max   | 0,186       | 0,1         | 0,005           | 0,005             | 0,026            | 0,025             |
| HZ-"häufig" | 1,872       | 1,691       | 0,092           | 0,086             | 0,260            | 0,250             |

**Lager 10/3:**

$$a' = 0,292 \text{ m} \quad b' = 0,392 \text{ m}$$

| Lastfall    | $\phi_x$ in | $\phi_y$ in | $\epsilon_{av}$ | $\epsilon_{aa,d}$ | $\epsilon_{abv}$ | $\epsilon_{ab,d}$ |
|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------|-------------------|
|             | 1000 rad    | 1000 rad    |                 |                   |                  |                   |
| ULS-K1-min  | 0,3125      | 0,476       | 0,037           | 0,035             | 0,043            | 0,042             |
| SLS-K1-min  | 0,538       | 1,784       | 0,139           | 0,132             | 0,075            | 0,072             |
| SLS-K3-min  | 0,6095      | 1,715       | 0,134           | 0,127             | 0,085            | 0,081             |
| SLS-K5-min  | 0,57        | 1,587       | 0,124           | 0,117             | 0,079            | 0,076             |
| ULS-K1-max  | 0,5715      | 2,182       | 0,170           | 0,161             | 0,079            | 0,076             |
| SLS-K1-max  | 0,578       | 1,908       | 0,149           | 0,141             | 0,080            | 0,077             |
| HZ-K1-min   | 0,538       | 1,29        | 0,101           | 0,095             | 0,075            | 0,072             |
| HZ-"häufig" | 0,658       | 1,529       | 0,119           | 0,113             | 0,091            | 0,088             |
| HZ-K1-max   | 0,336       | 0,948       | 0,074           | 0,070             | 0,047            | 0,045             |

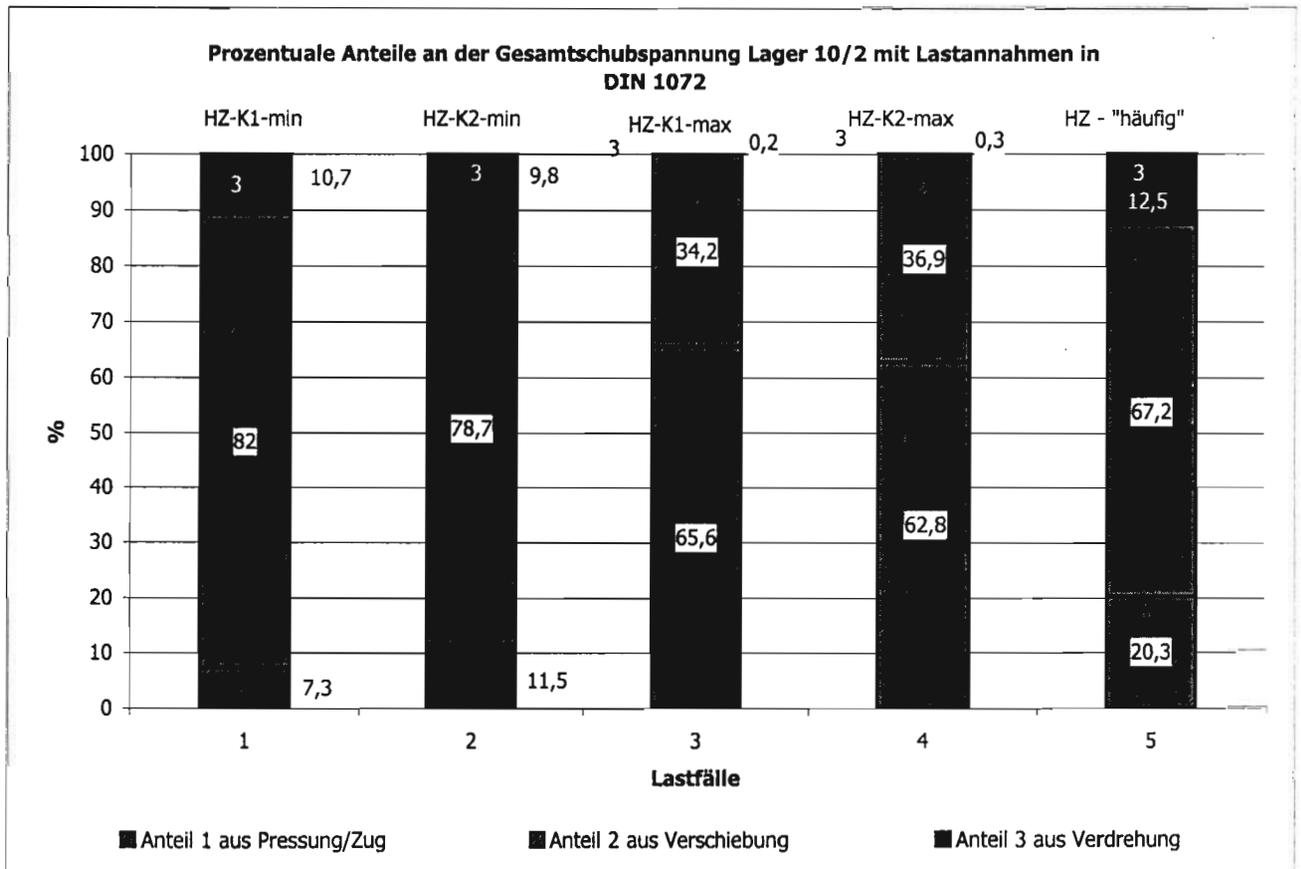
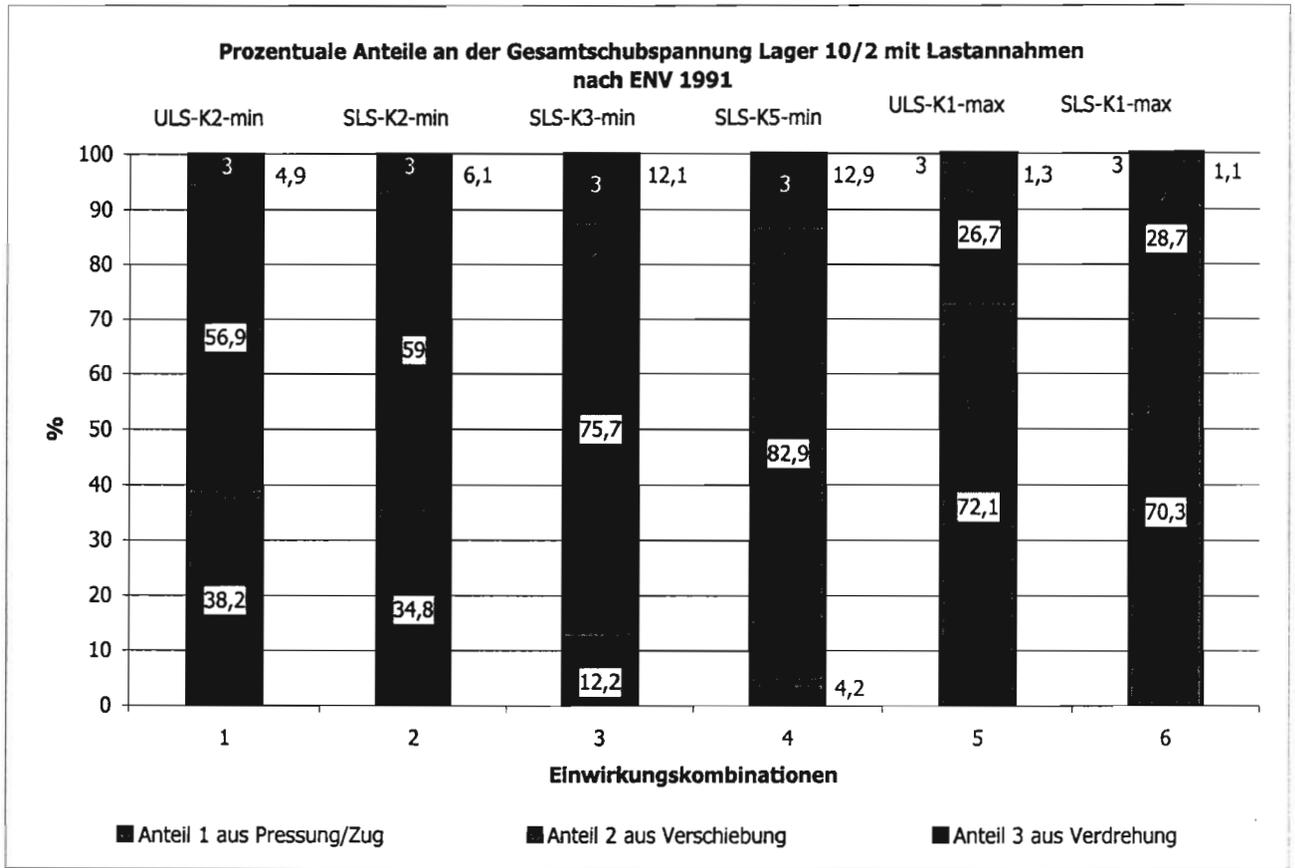
## Schubspannungssummen und Anteile

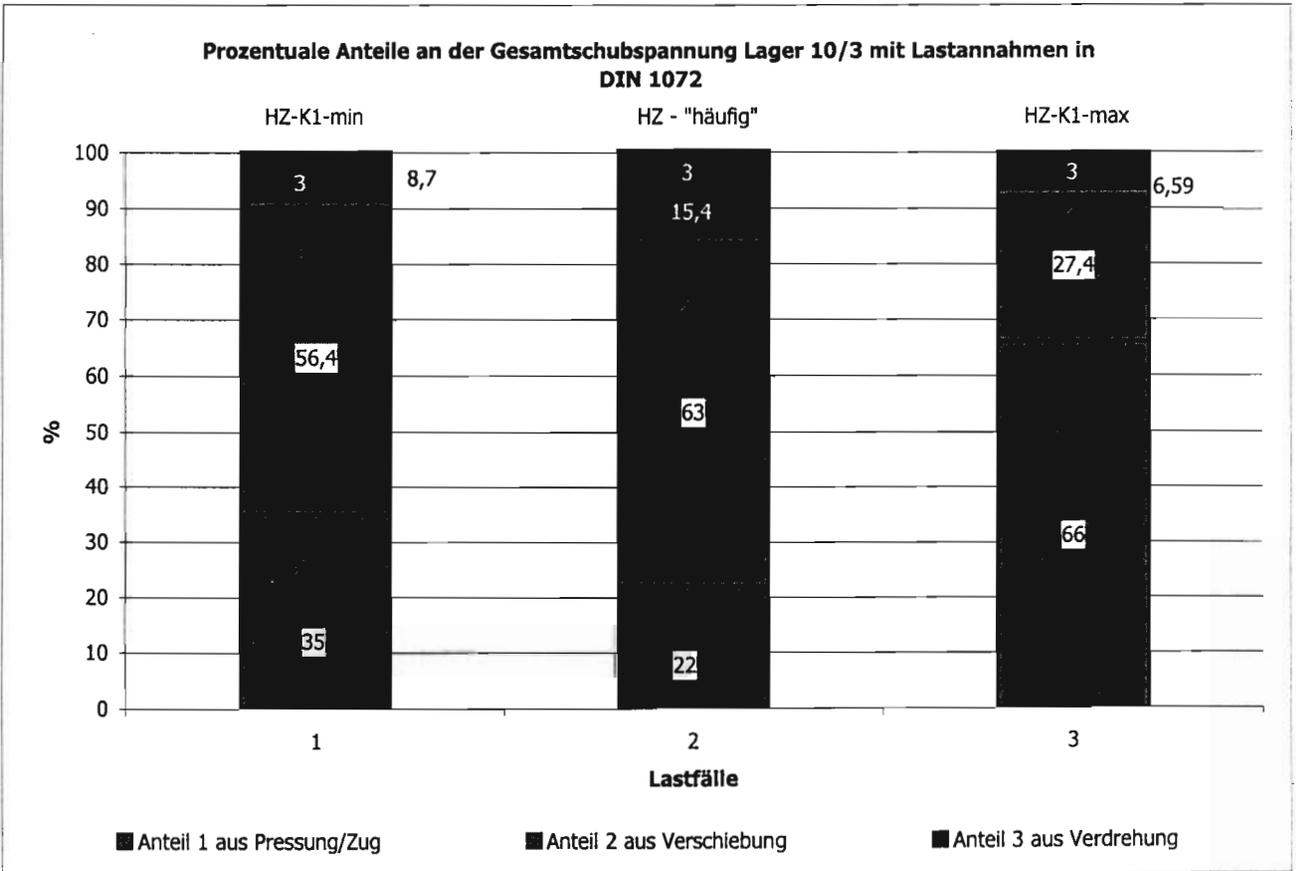
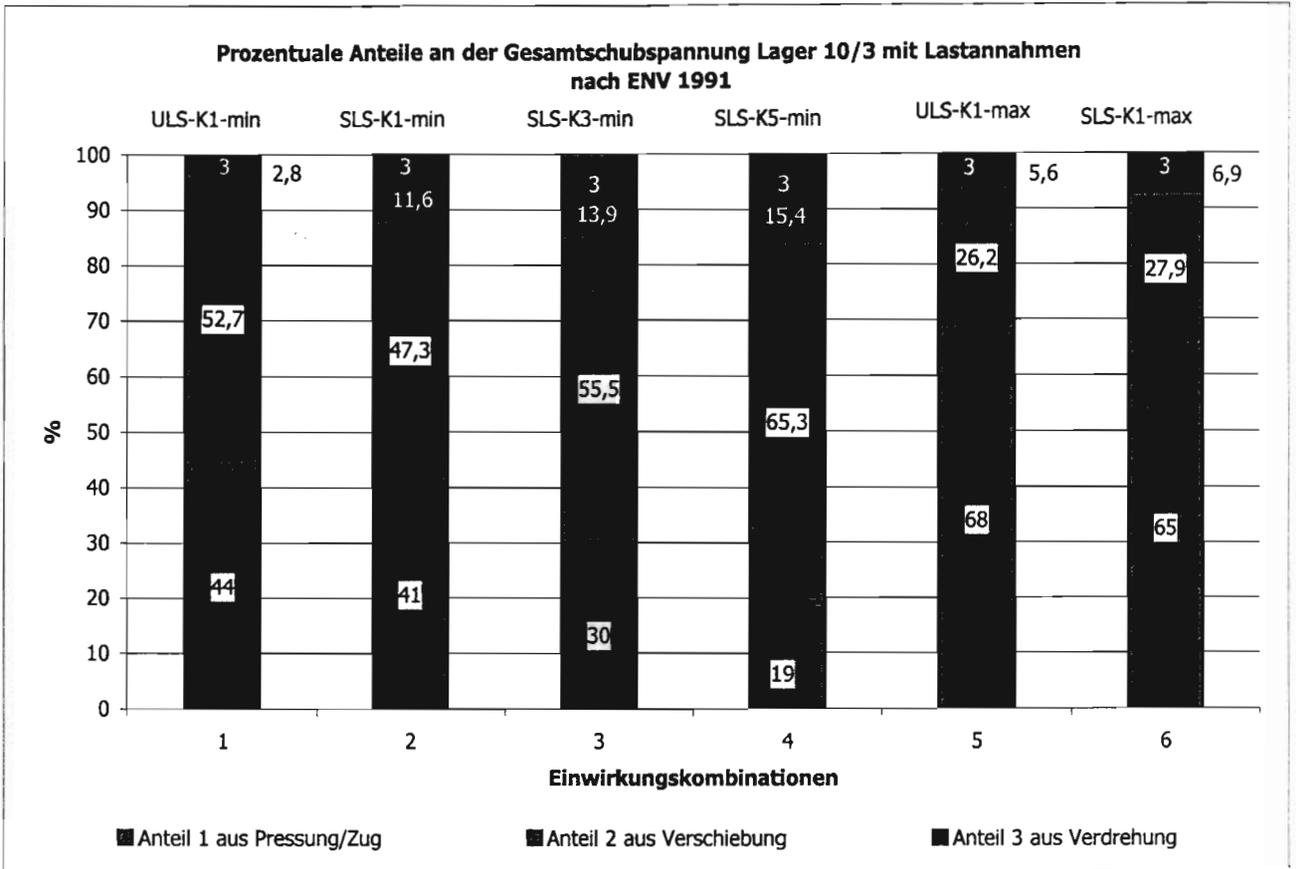
## Lager 10/2: Lagerseite a

| Lastfall    | $\tau_1(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_2(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_3(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_4(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_5(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\Sigma \tau_a$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
|             | Pressung/Zug (1)                 | Verschiebungsanteile (2 und 3)   |                                  | Verdrehungsanteile (4 und 5)     |                                  | Summe                                |
| ULS-K2-min  | <b>0,514</b>                     | <b>0,673</b>                     | <b>0,093</b>                     | <b>0,066</b>                     | <b>0,000</b>                     | <b>1,346</b>                         |
|             | 0,382                            | 0,500                            | 0,069                            | 0,049                            | 0,000                            | 1,000                                |
| SLS-K2-min  | <b>0,386</b>                     | <b>0,583</b>                     | <b>0,070</b>                     | <b>0,068</b>                     | <b>0,000</b>                     | <b>1,107</b>                         |
|             | 0,348                            | 0,527                            | 0,063                            | 0,061                            | 0,000                            | 1,000                                |
| SLS-K3-min  | <b>0,086</b>                     | <b>0,493</b>                     | <b>0,039</b>                     | <b>0,085</b>                     | <b>0,000</b>                     | <b>0,702</b>                         |
|             | 0,122                            | 0,702                            | 0,055                            | 0,121                            | 0,000                            | 1,000                                |
| SLS-K5-min  | <b>0,026</b>                     | <b>0,493</b>                     | <b>0,035</b>                     | <b>0,082</b>                     | <b>0,000</b>                     | <b>0,636</b>                         |
|             | 0,042                            | 0,775                            | 0,054                            | 0,129                            | 0,000                            | 1,000                                |
| ULS-K1-max  | <b>2,329</b>                     | <b>0,619</b>                     | <b>0,241</b>                     | <b>0,042</b>                     | <b>0,001</b>                     | <b>3,232</b>                         |
|             | 0,721                            | 0,192                            | 0,075                            | 0,013                            | 0,000                            | 1,000                                |
| SLS-K1-max  | <b>1,620</b>                     | <b>0,511</b>                     | <b>0,149</b>                     | <b>0,025</b>                     | <b>0,000</b>                     | <b>2,306</b>                         |
|             | 0,703                            | 0,222                            | 0,065                            | 0,011                            | 0,000                            | 1,000                                |
| HZ-K1-min   | <b>0,057</b>                     | <b>0,596</b>                     | <b>0,044</b>                     | <b>0,084</b>                     | <b>0,000</b>                     | <b>0,782</b>                         |
|             | 0,073                            | 0,763                            | 0,057                            | 0,107                            | 0,000                            | 1,000                                |
| HZ-K2-min   | <b>0,094</b>                     | <b>0,596</b>                     | <b>0,047</b>                     | <b>0,080</b>                     | <b>0,000</b>                     | <b>0,818</b>                         |
|             | 0,115                            | 0,729                            | 0,058                            | 0,098                            | 0,000                            | 1,000                                |
| HZ-K1-max   | <b>1,45</b>                      | <b>0,596</b>                     | <b>0,159</b>                     | <b>0,005</b>                     | <b>0,00005</b>                   | <b>2,208</b>                         |
|             | 0,656                            | 0,270                            | 0,072                            | 0,002                            | 0,000                            | 1,000                                |
| HZ-K2-max   | <b>1,26</b>                      | <b>0,596</b>                     | <b>0,144</b>                     | <b>0,005</b>                     | <b>0,00005</b>                   | <b>2,007</b>                         |
|             | 0,628                            | 0,297                            | 0,072                            | 0,003                            | 0,000                            | 1,000                                |
| HZ-"häufig" | <b>0,15</b>                      | <b>0,456</b>                     | <b>0,04</b>                      | <b>0,092</b>                     | <b>0,00011</b>                   | <b>0,73811</b>                       |
|             | 0,203                            | 0,618                            | 0,054                            | 0,125                            | 0,000                            | 1,000                                |

**Schubspannungssummen und Anteile****Lager 10/3: Lagerseite a**

| Lastfall    | $\tau_1(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_2(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_3(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_4(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\tau_5(a)$ in MN/m <sup>2</sup> | $\Sigma \tau_a$ in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
|             | Pressung/Zug (1)                 | Verschiebungsanteile (2 und 3)   |                                  | Verdrehungsanteile (4 und 5)     |                                  | Summe                                |
| ULS-K1-min  | <b>0,58</b>                      | <b>0,619</b>                     | <b>0,072</b>                     | <b>0,037</b>                     | <b>0,00013</b>                   | <b>1,312</b>                         |
|             | 0,44                             | 0,472                            | 0,055                            | 0,028                            | 0,00010                          | 1,000                                |
| SLS-K1-min  | <b>0,49</b>                      | <b>0,511</b>                     | <b>0,054</b>                     | <b>0,139</b>                     | <b>0,00041</b>                   | <b>1,195</b>                         |
|             | 0,41                             | 0,428                            | 0,045                            | 0,116                            | 0,00034                          | 1,000                                |
| SLS-K3-min  | <b>0,29</b>                      | <b>0,493</b>                     | <b>0,041</b>                     | <b>0,134</b>                     | <b>0,00023</b>                   | <b>0,961</b>                         |
|             | 0,30                             | 0,513                            | 0,042                            | 0,139                            | 0,00024                          | 1,000                                |
| SLS-K5-min  | <b>0,16</b>                      | <b>0,493</b>                     | <b>0,033</b>                     | <b>0,124</b>                     | <b>0,00012</b>                   | <b>0,807</b>                         |
|             | 0,19                             | 0,612                            | 0,041                            | 0,154                            | 0,00014                          | 1,000                                |
| ULS-K1-max  | <b>2,08</b>                      | <b>0,619</b>                     | <b>0,179</b>                     | <b>0,170</b>                     | <b>0,00211</b>                   | <b>3,055</b>                         |
|             | 0,68                             | 0,203                            | 0,059                            | 0,056                            | 0,00069                          | 1,000                                |
| SLS-K1-max  | <b>1,51</b>                      | <b>0,511</b>                     | <b>0,114</b>                     | <b>0,149</b>                     | <b>0,00134</b>                   | <b>2,286</b>                         |
|             | 0,66                             | 0,224                            | 0,050                            | 0,065                            | 0,00059                          | 1,000                                |
| HZ-K1-min   | <b>0,40</b>                      | <b>0,596</b>                     | <b>0,057</b>                     | <b>0,101</b>                     | <b>0,00024</b>                   | <b>1,159</b>                         |
|             | 0,35                             | 0,515                            | 0,049                            | 0,087                            | 0,00021                          | 1,000                                |
| HZ-"häufig" | <b>0,17</b>                      | <b>0,456</b>                     | <b>0,031</b>                     | <b>0,119</b>                     | <b>0,00012</b>                   | <b>0,773</b>                         |
|             | 0,22                             | 0,590                            | 0,040                            | 0,154                            | 0,00015                          | 1,000                                |
| HZ-K1-max   | <b>1,46</b>                      | <b>0,596</b>                     | <b>0,130</b>                     | <b>0,074</b>                     | <b>0,001</b>                     | <b>2,265</b>                         |
|             | 0,65                             | 0,263                            | 0,057                            | 0,033                            | 0,00028                          | 1,000                                |





## Normalspannungsanteile und Summen

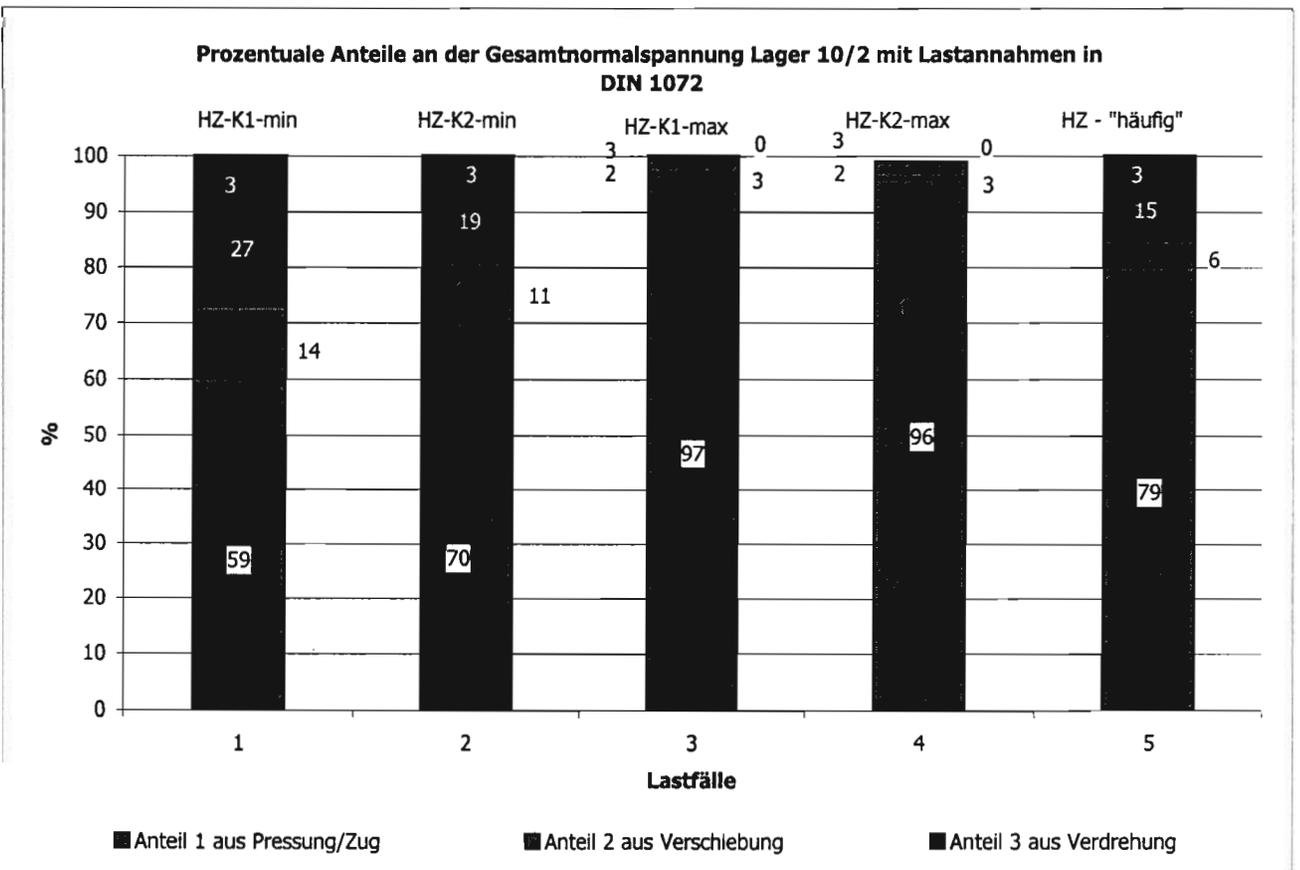
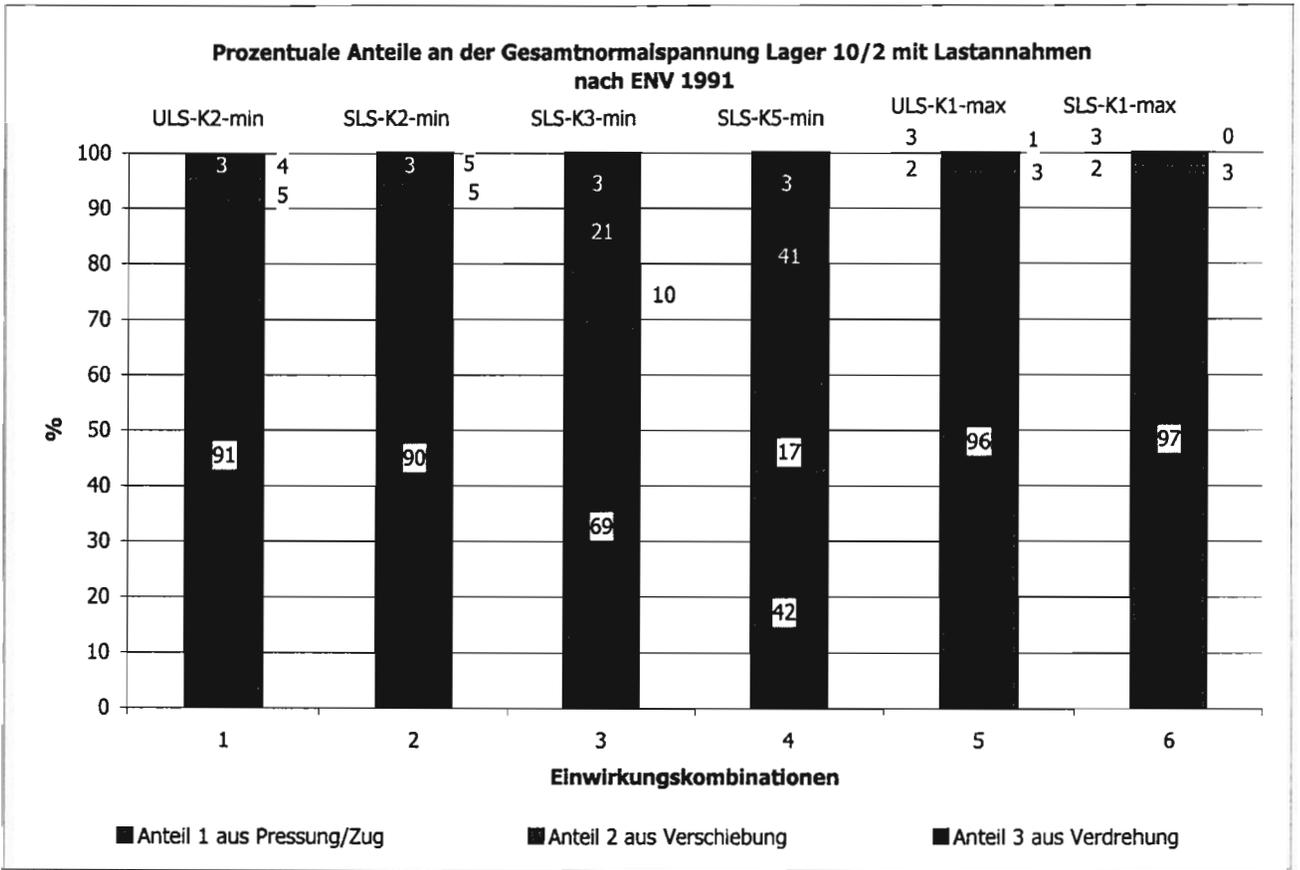
## Lager 10/2: Lagerseite a

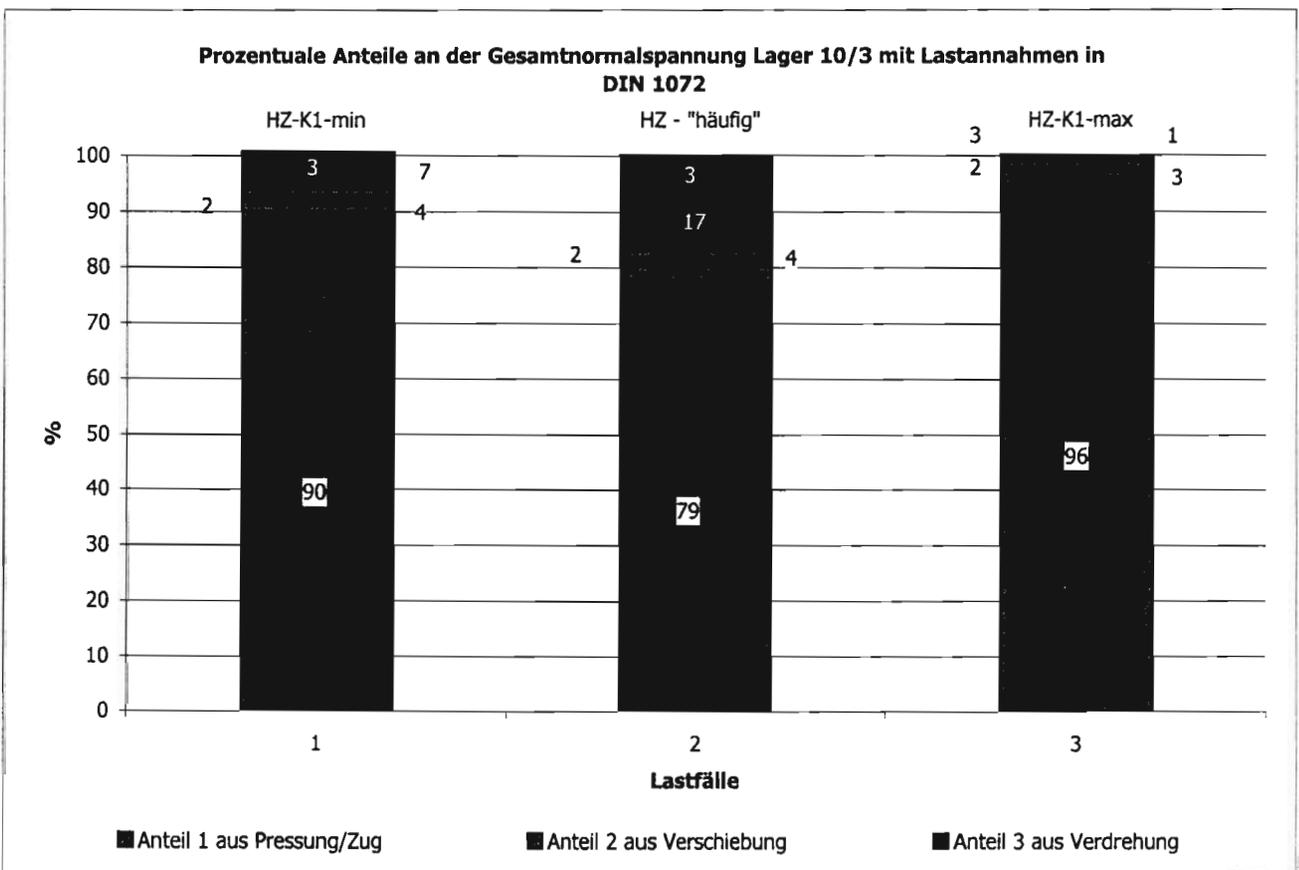
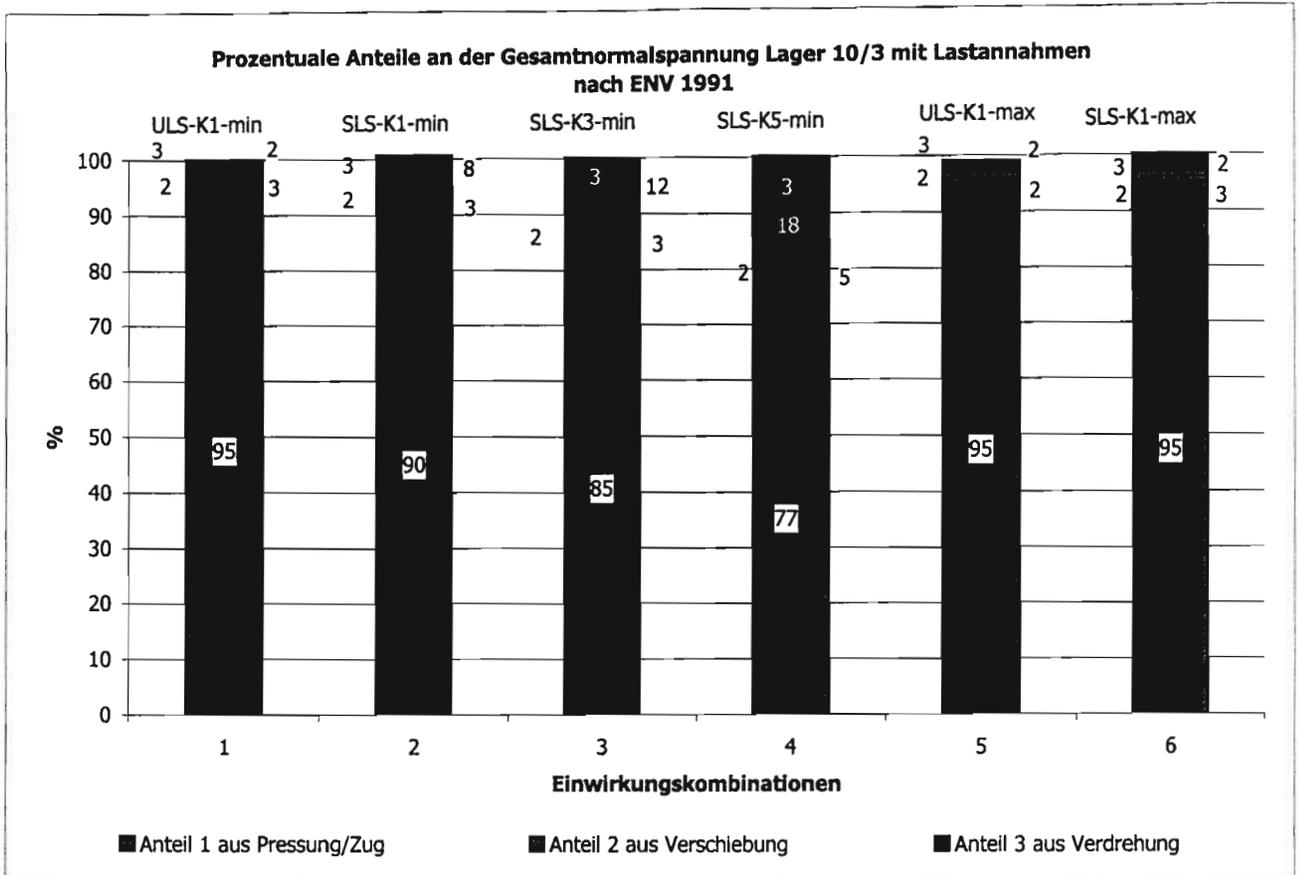
| Lastfall    | $\sigma_{\max}$ Druck/Zug<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\sigma_{\max}$ Verschiebung<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\sigma_{\max}$ Verdrehung<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\Sigma \sigma_{\max}$<br>in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|---|--|--|--|
| ULS-K2-min  | <b>8,03</b>                                       | <b>0,45</b>  | <b>0,32</b>  | <b>8,80</b>                                    |
|             | 0,91  | 0,05   | 0,04   | 1,00   |
| SLS-K2-min  | <b>6,03</b>                                       | <b>0,34</b>  | <b>0,33</b>  | <b>6,70</b>                                    |
|             | 0,90  | 0,05   | 0,05   | 1,00   |
| SLS-K3-min  | <b>1,34</b>                                       | <b>0,19</b>  | <b>0,41</b>  | <b>1,94</b>                                    |
|             | 0,69  | 0,10   | 0,21   | 1,00   |
| SLS-K5-min  | <b>0,41</b>                                       | <b>0,17</b>  | <b>0,40</b>  | <b>0,98</b>                                    |
|             | 0,42  | 0,17   | 0,41   | 1,00   |
| ULS-K1-max  | <b>36,39</b>                                      | <b>1,17</b>  | <b>0,21</b>  | <b>37,77</b>                                   |
|             | 0,96  | 0,03   | 0,01   | 1,00   |
| SLS-K1-max  | <b>25,24</b>                                      | <b>0,72</b>  | <b>0,12</b>  | <b>26,09</b>                                   |
|             | 0,97  | 0,03   | 0,00   | 1,00   |
| HZ-K1-min   | <b>0,90</b>                                       | <b>0,22</b>  | <b>0,41</b>  | <b>1,52</b>                                    |
|             | 0,59  | 0,14   | 0,27   | 1,00   |
| HZ-K2-min   | <b>1,47</b>                                       | <b>0,23</b>  | <b>0,39</b>  | <b>2,09</b>                                    |
|             | 0,70  | 0,11   | 0,19   | 1,00   |
| HZ-K1-max   | <b>22,62</b>                                      | <b>0,77</b>  | <b>0,02</b>  | <b>23,42</b>                                   |
|             | 0,97  | 0,03   | 0,00   | 1,00   |
| HZ-K2-max   | <b>19,71</b>                                      | <b>0,70</b>  | <b>0,03</b>  | <b>20,44</b>                                   |
|             | 0,96  | 0,03   | 0,00   | 1,00   |
| HZ-"häufig" | <b>2,41</b>                                       | <b>0,20</b>  | <b>0,45</b>  | <b>3,05</b>                                    |
|             | 0,79  | 0,06   | 0,15   | 1,00   |

### Normalspannungsanteile und Summen

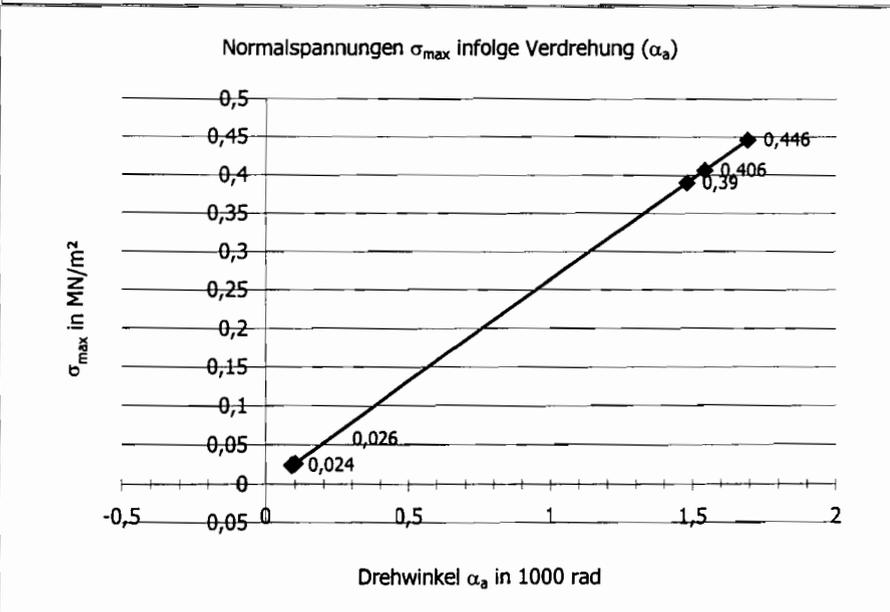
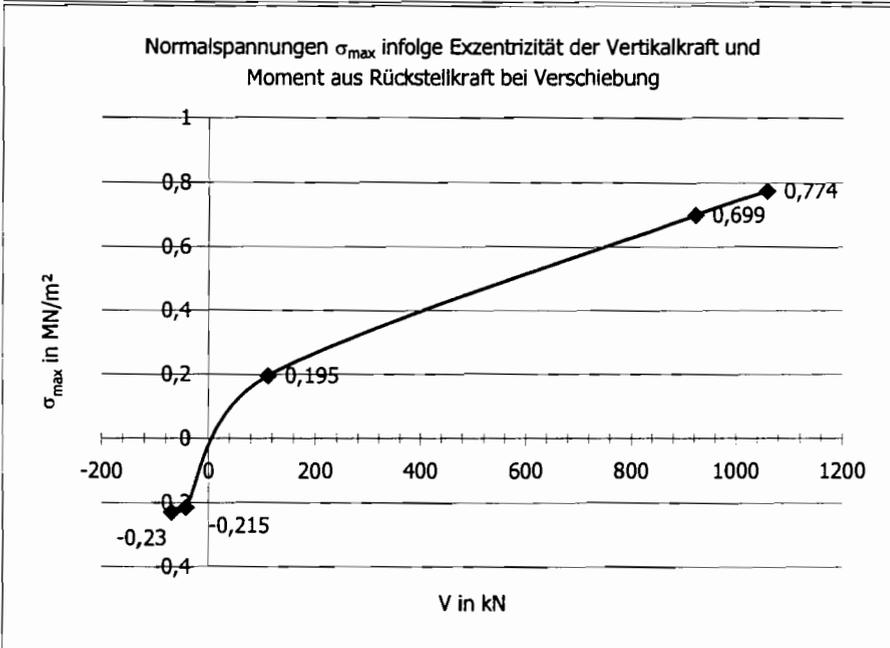
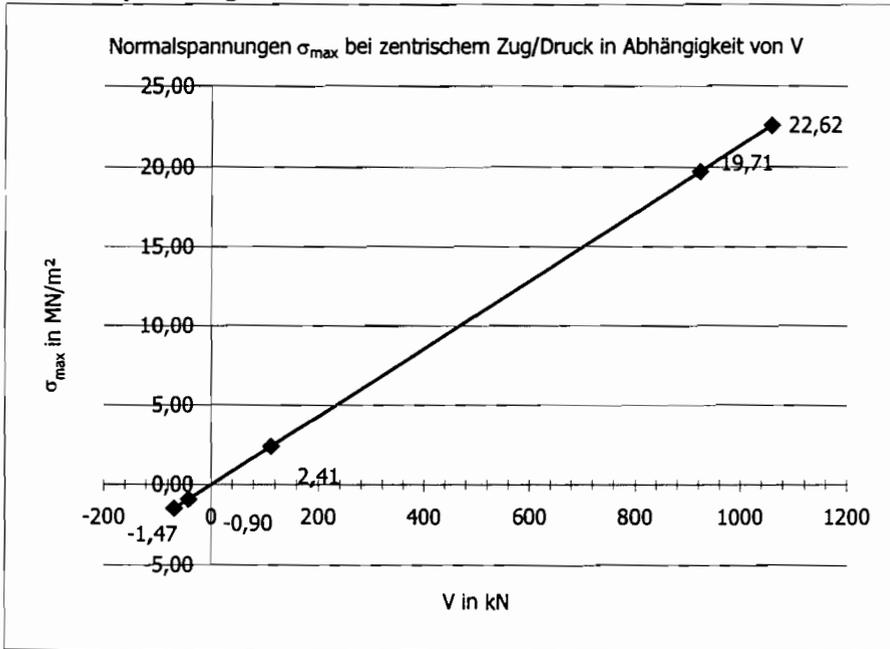
#### Lager 10/3: Lagerseite a

| Lastfall    | $\sigma_{\max}$ Druck/Zug<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\sigma_{\max}$ Verschiebung<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\sigma_{\max}$ Verdrehung<br>in MN/m <sup>2</sup> | $\Sigma \sigma_{\max}$<br>in MN/m <sup>2</sup> |
|-------------|---|--|--|--|
| ULS-K1-min  | <b>10,95</b>                                      | <b>0,40</b>  | <b>0,21</b>  | <b>11,56</b>                                   |
|             | 0,95  | 0,03   | 0,02   | 1,00   |
| SLS-K1-min  | <b>9,17</b>                                       | <b>0,30</b>  | <b>0,77</b>  | <b>10,24</b>                                   |
|             | 0,90  | 0,03   | 0,08   | 1,00   |
| SLS-K3-min  | <b>5,49</b>                                       | <b>0,23</b>  | <b>0,74</b>  | <b>6,46</b>                                    |
|             | 0,85  | 0,03   | 0,12   | 1,00   |
| SLS-K5-min  | <b>2,93</b>                                       | <b>0,18</b>  | <b>0,69</b>  | <b>3,80</b>                                    |
|             | 0,77  | 0,05   | 0,18   | 1,00   |
| ULS-K1-max  | <b>39,07</b>                                      | <b>1,00</b>  | <b>0,95</b>  | <b>41,01</b>                                   |
|             | 0,95  | 0,02   | 0,02   | 1,00   |
| SLS-K1-max  | <b>28,38</b>                                      | <b>0,64</b>  | <b>0,83</b>  | <b>29,84</b>                                   |
|             | 0,95  | 0,02   | 0,03   | 1,00   |
| HZ-K1-min   | <b>7,59</b>                                       | <b>0,32</b>  | <b>0,56</b>  | <b>8,46</b>                                    |
|             | 0,90  | 0,04   | 0,07   | 1,00   |
| HZ-"häufig" | <b>3,12</b>                                       | <b>0,17</b>  | <b>0,66</b>  | <b>3,95</b>                                    |
|             | 0,79  | 0,04   | 0,17   | 1,00   |
| HZ-K1-max   | <b>27,44</b>                                      | <b>0,72</b>  | <b>0,41</b>  | <b>28,57</b>                                   |
|             | 0,96  | 0,03   | 0,01   | 1,00   |



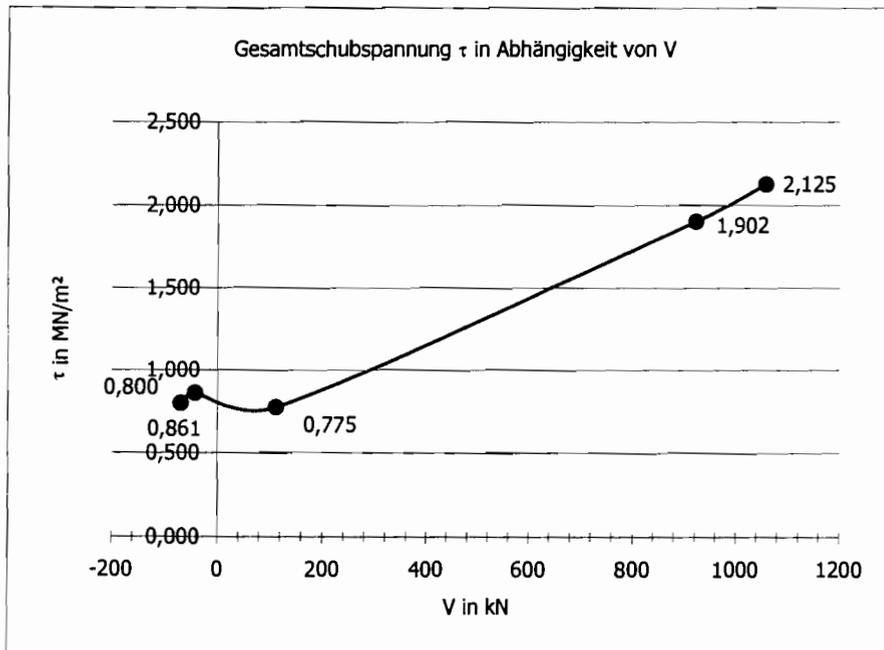
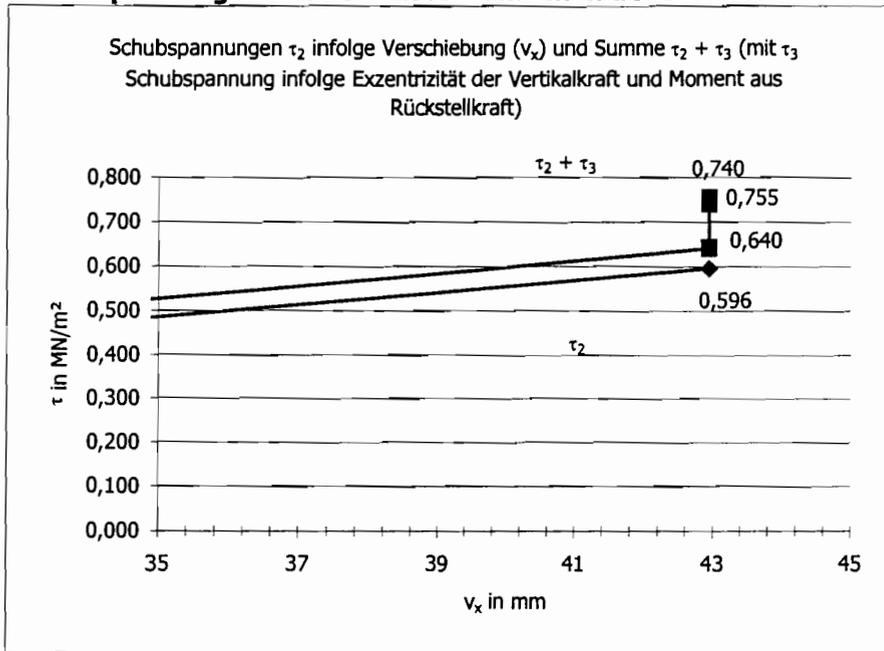


Normalspannungen mit den Lastannahmen in der DIN 1072

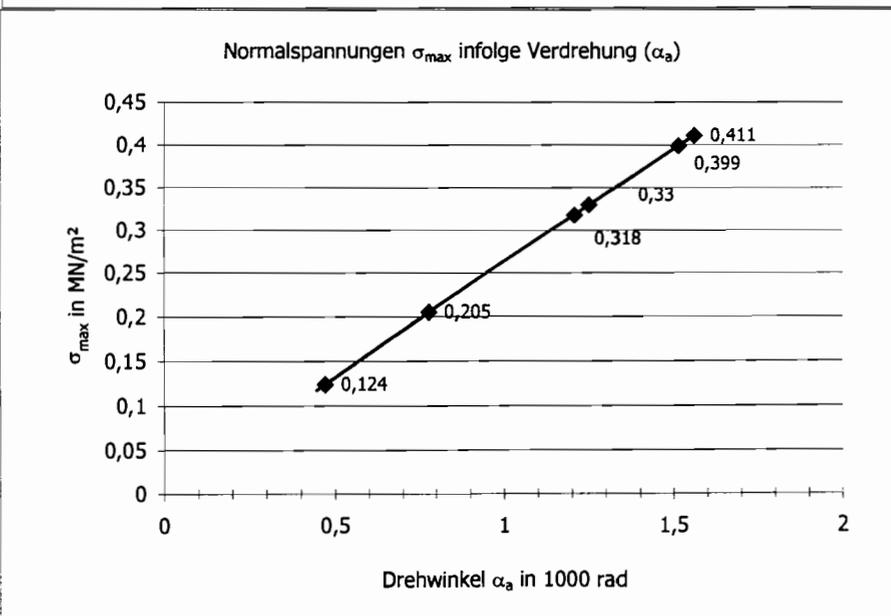
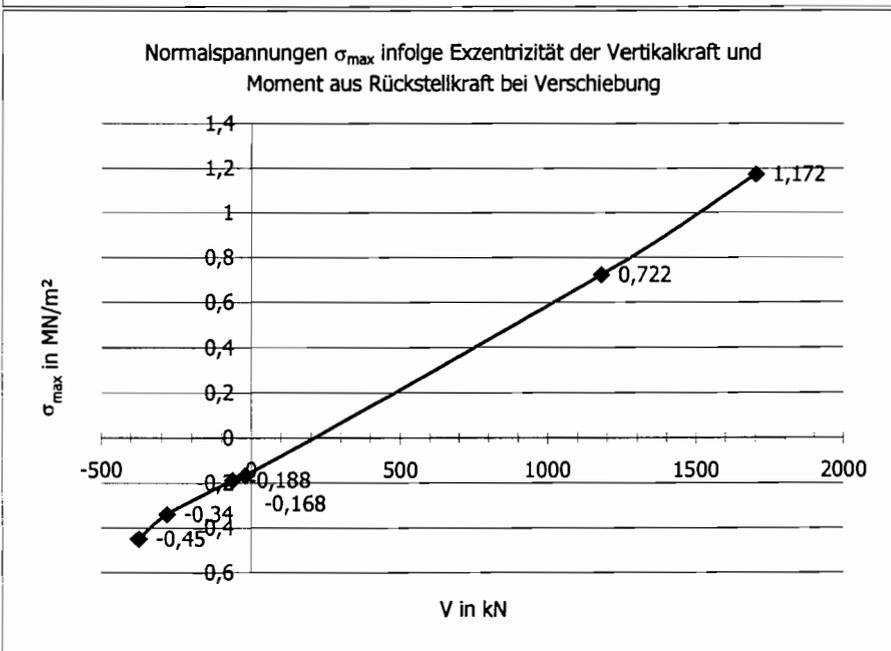
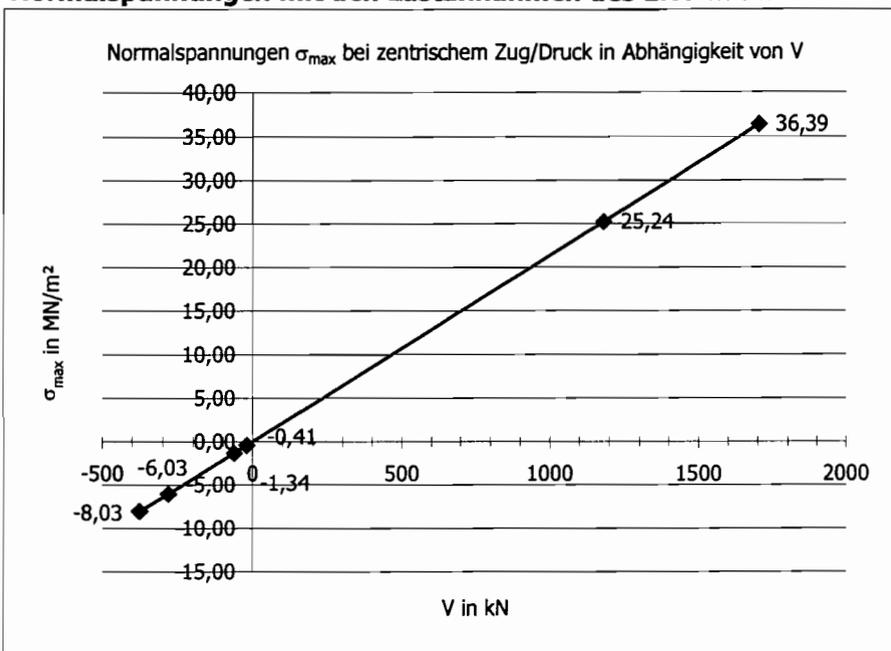




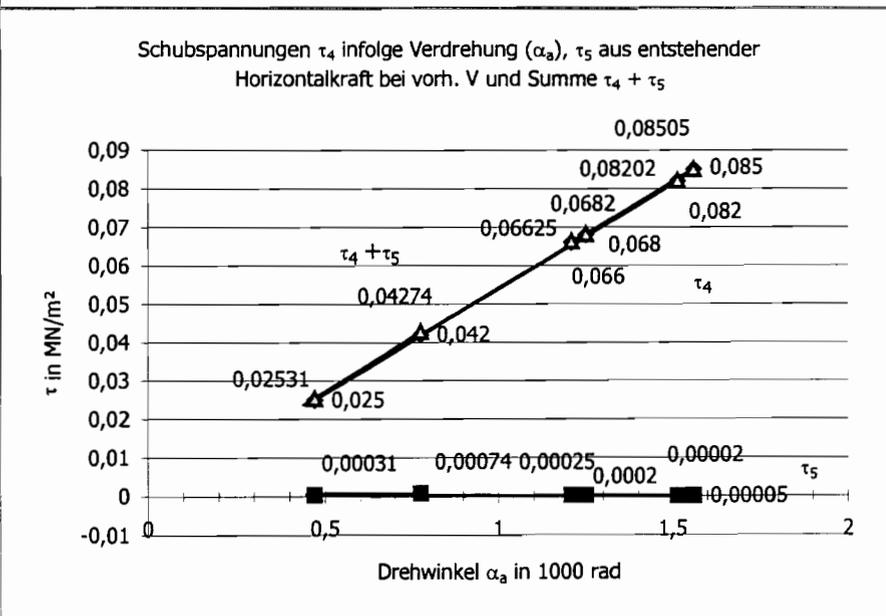
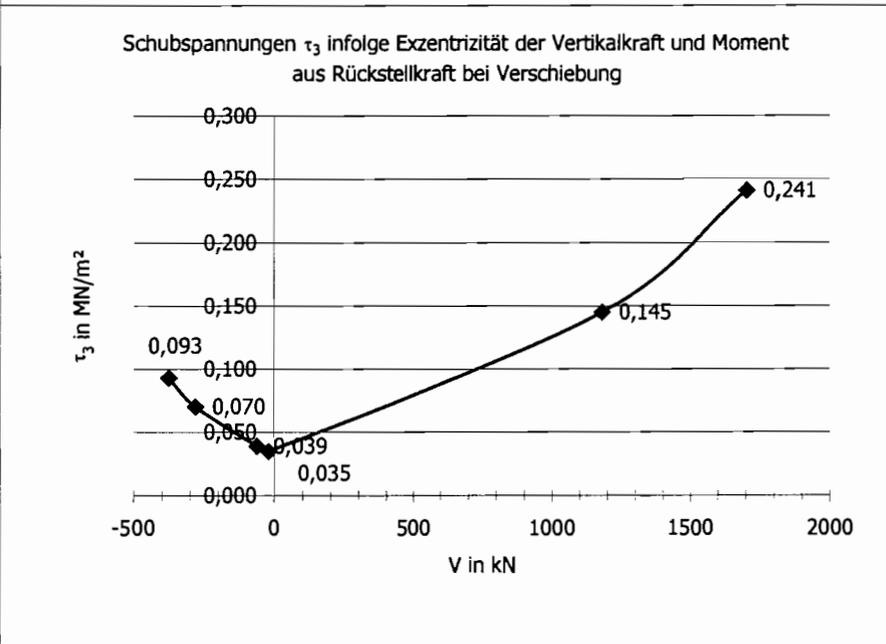
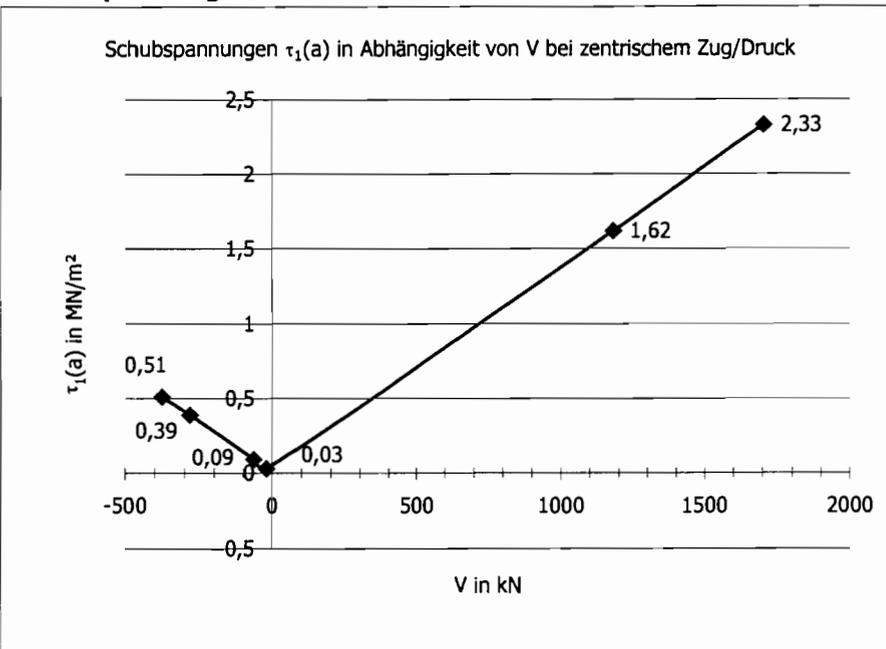
Schubspannungen mit den Lastannahmen in der DIN 1072



**Normalspannungen mit den Lastannahmen des ENV 1991**

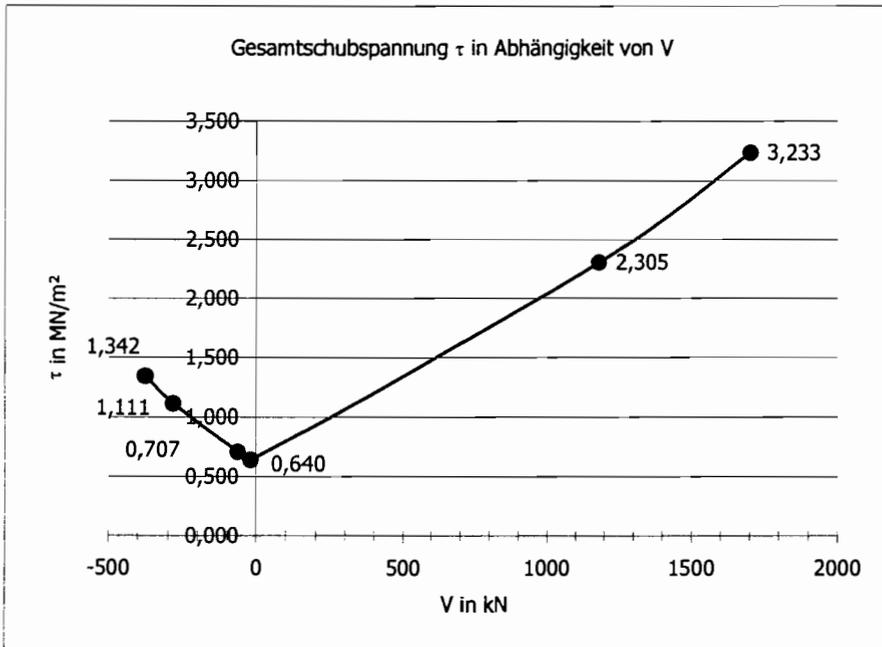
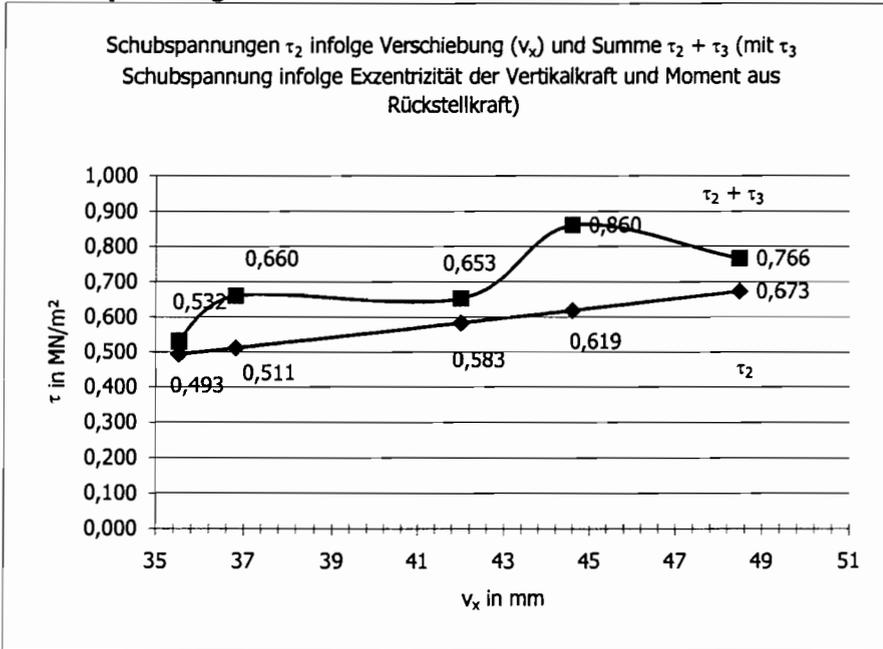


Schubspannungen mit den Lastannahmen des ENV 1991

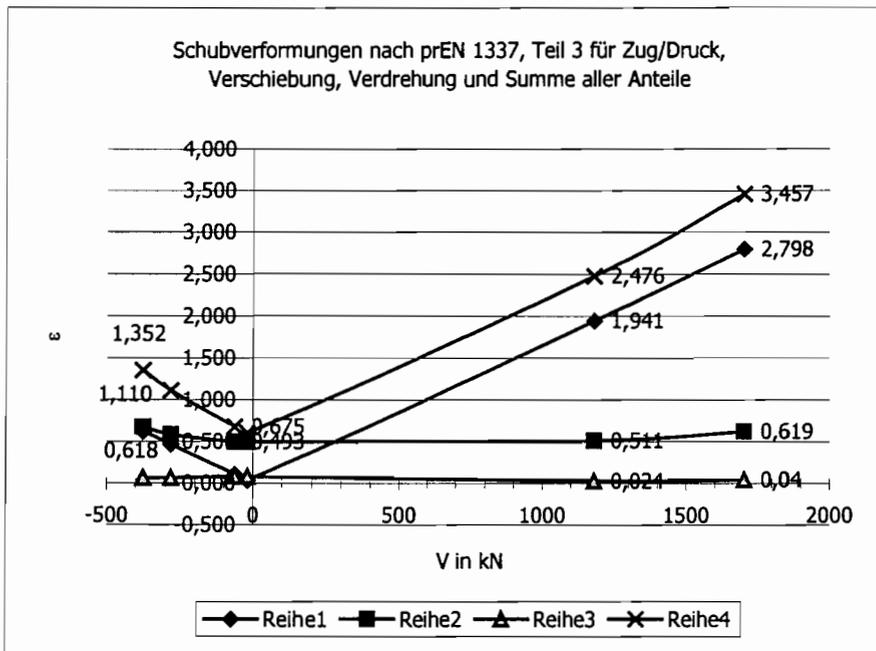


Lager 10/2:

Schubspannungen mit den Lastannahmen des ENV 1991



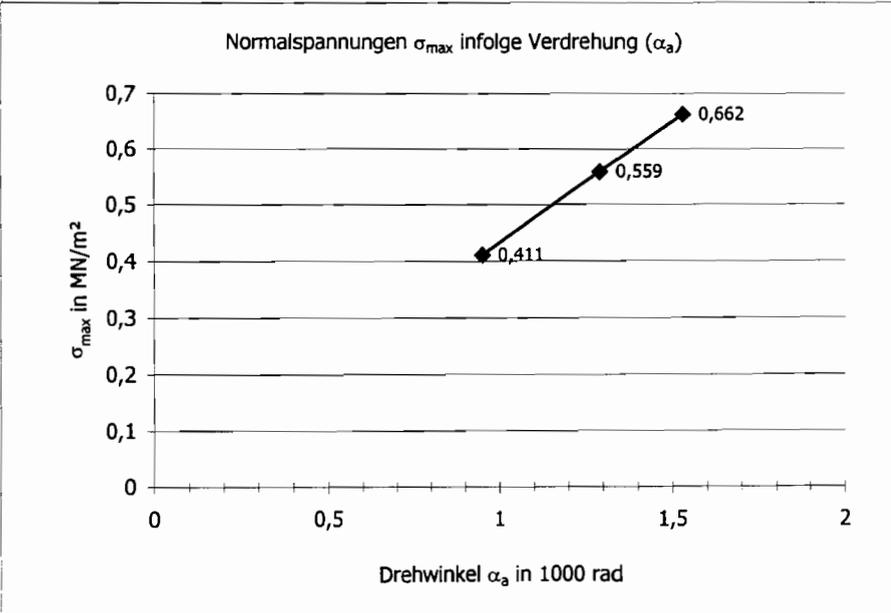
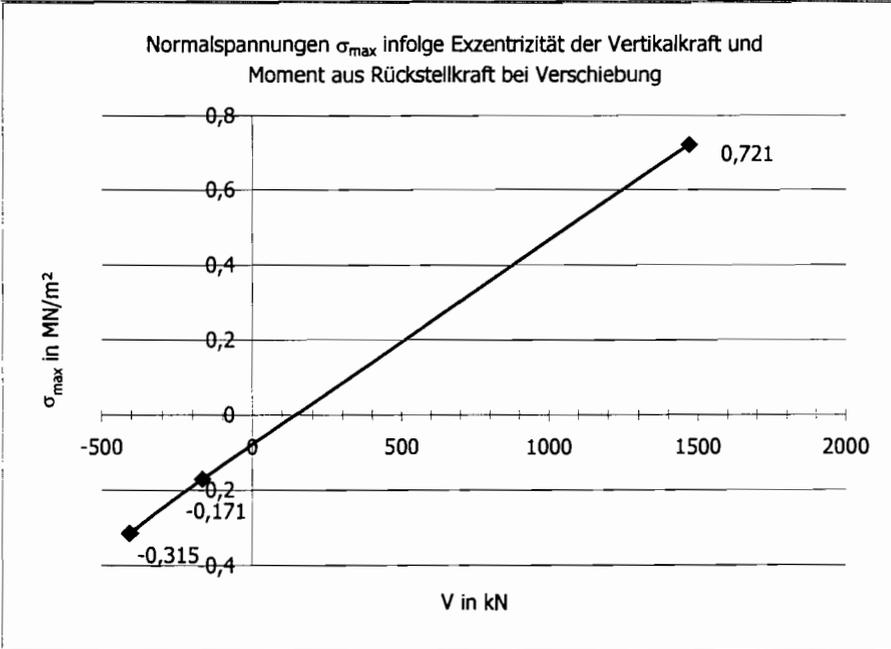
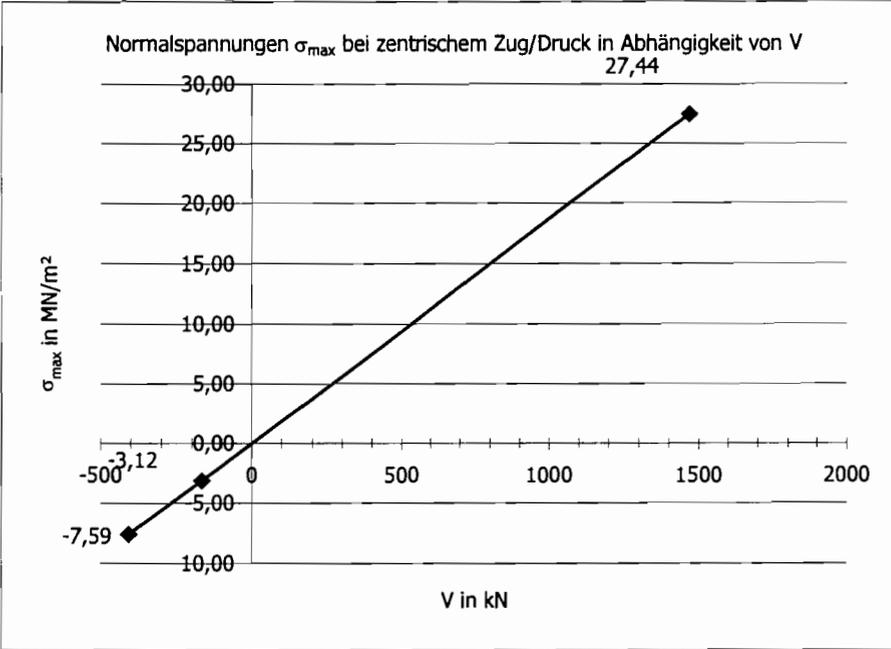
## Lager 10/2



- Reihe 1: Verformung aus Zug/Druck  
Reihe 2: Verformung aus Horizontalbewegung (Verschiebung)  
Reihe 3: Verformung aus Verdrehung  
Reihe 4: Gesamtverformung

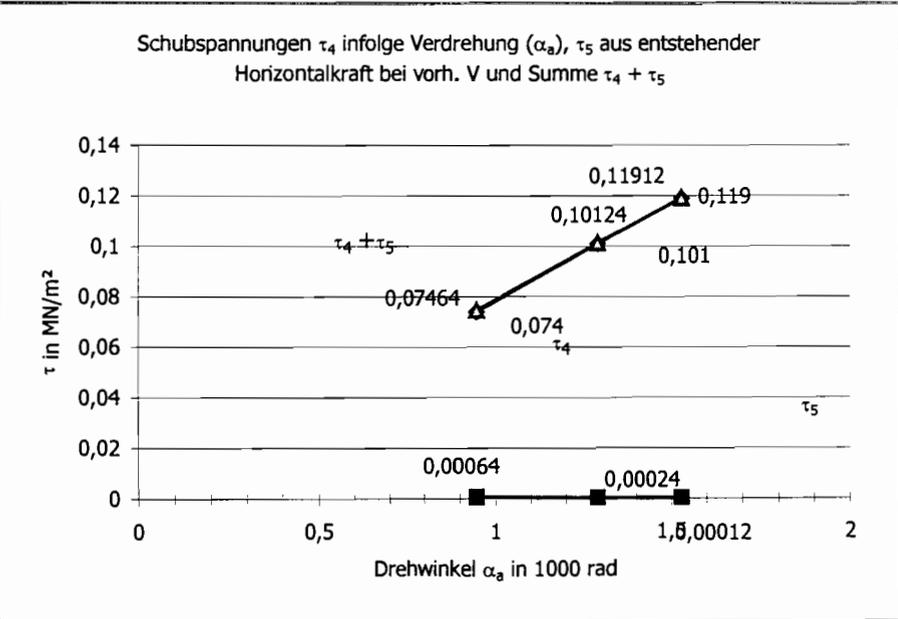
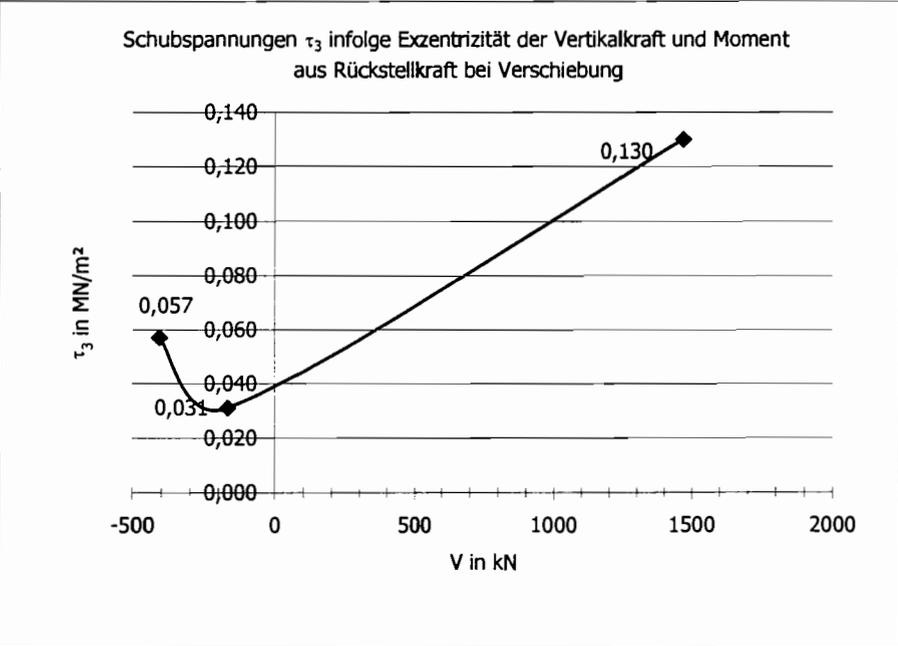
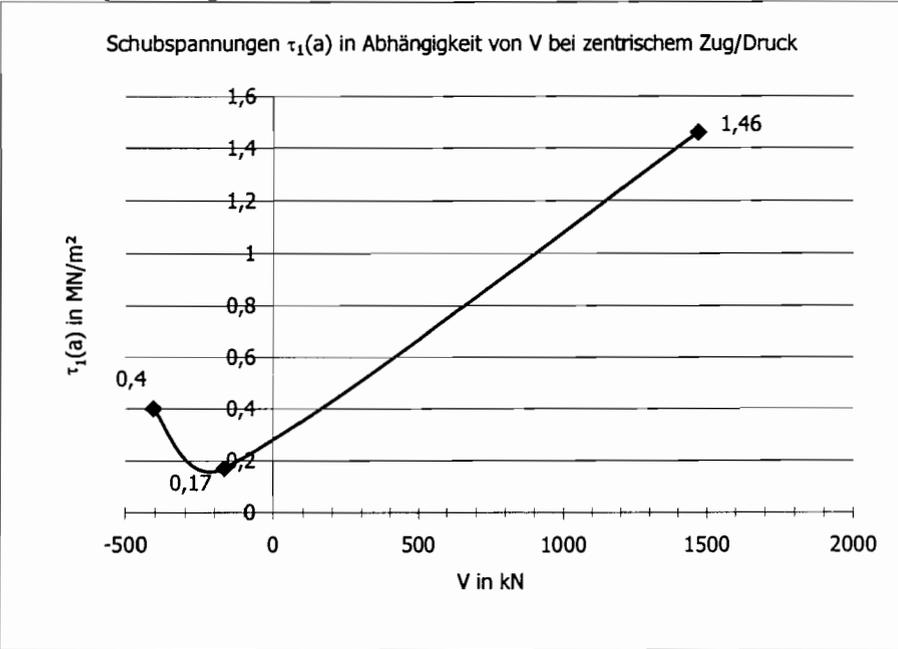
**Lager 10/3:**

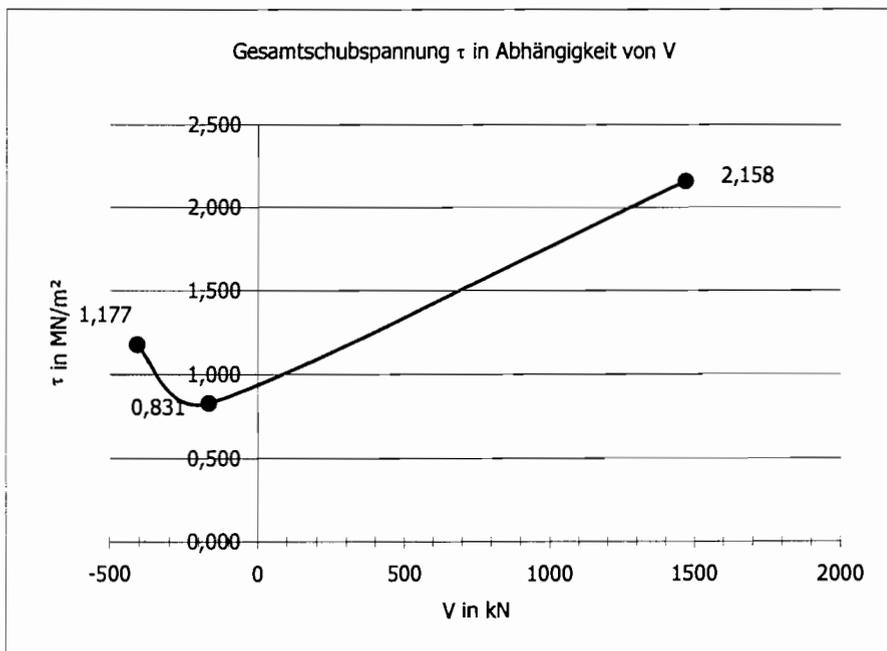
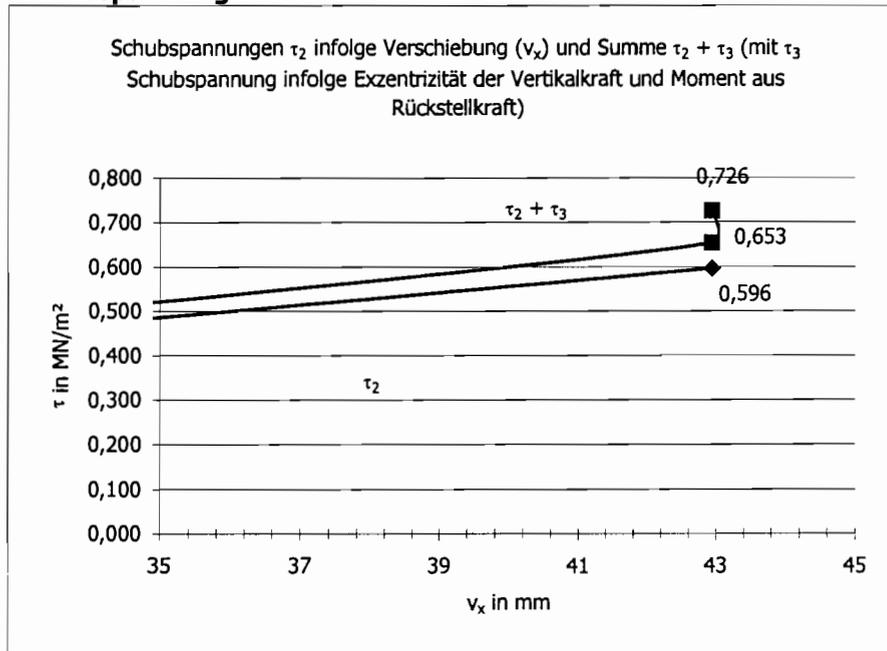
**Normalspannungen mit den Lastannahmen in DIN 1072**



**Lager 10/3:**

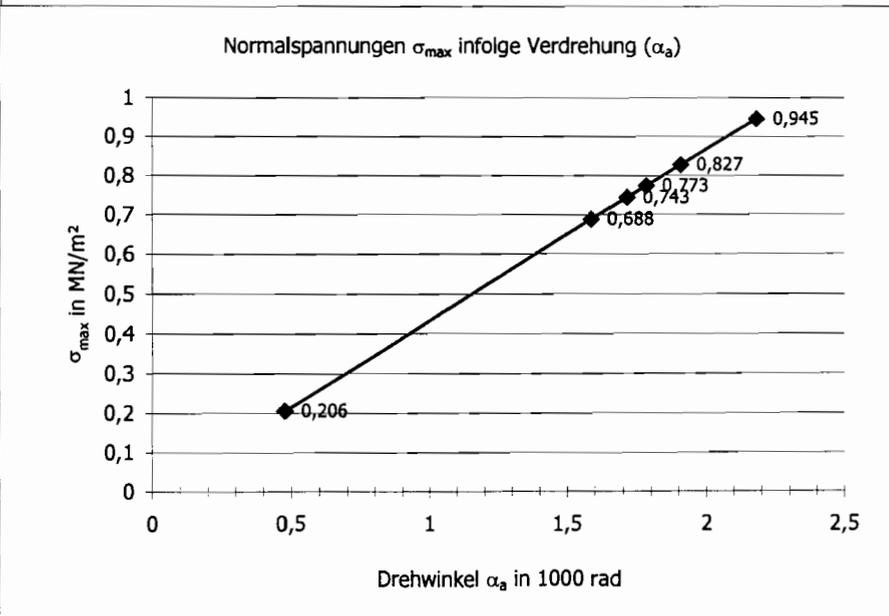
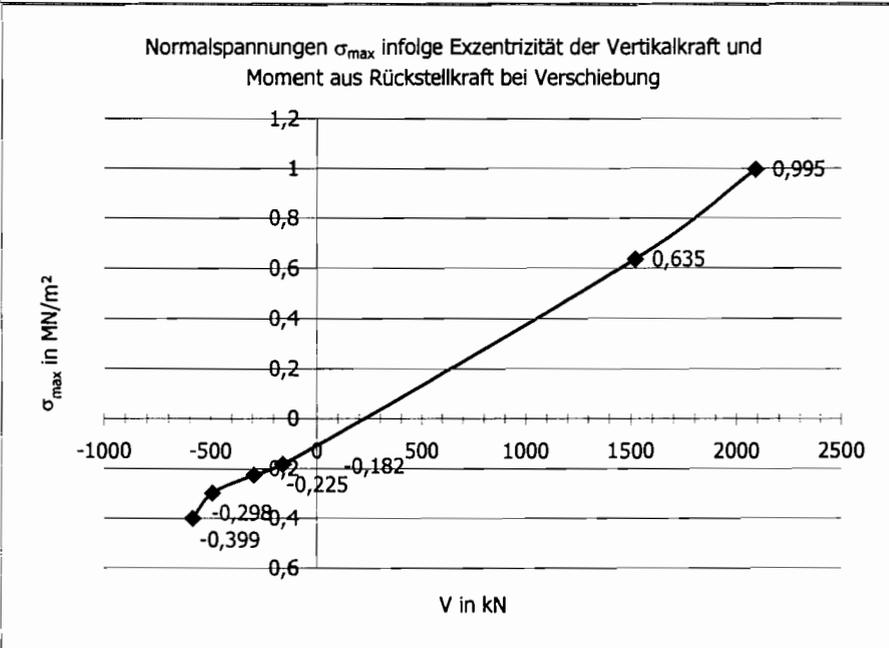
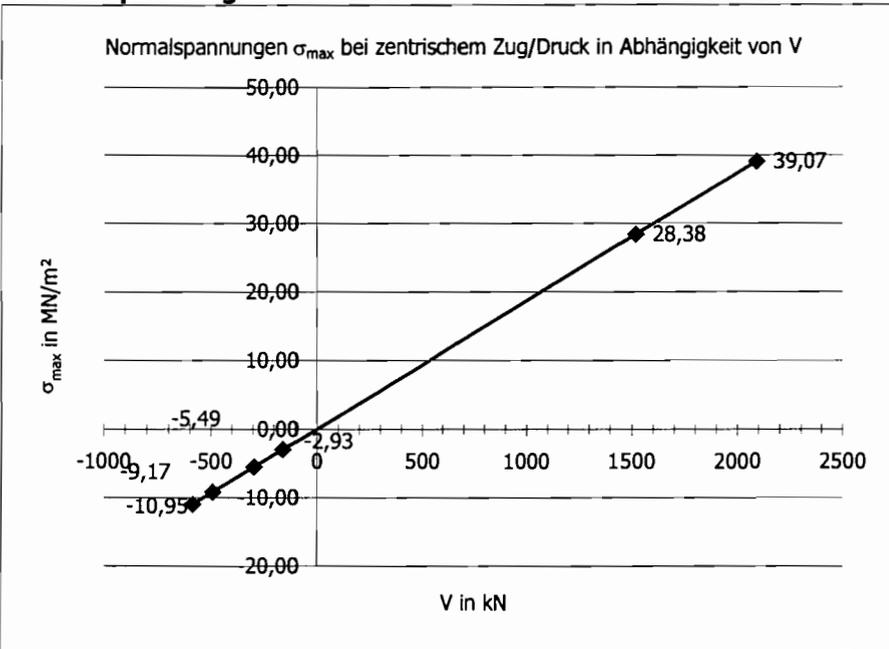
**Schubspannungen mit den Lastannahmen in DIN 1072**



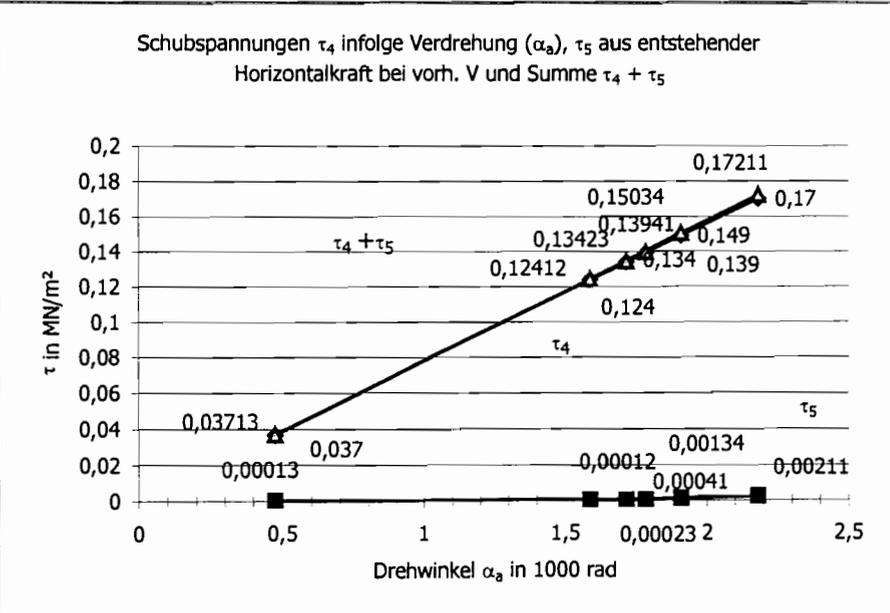
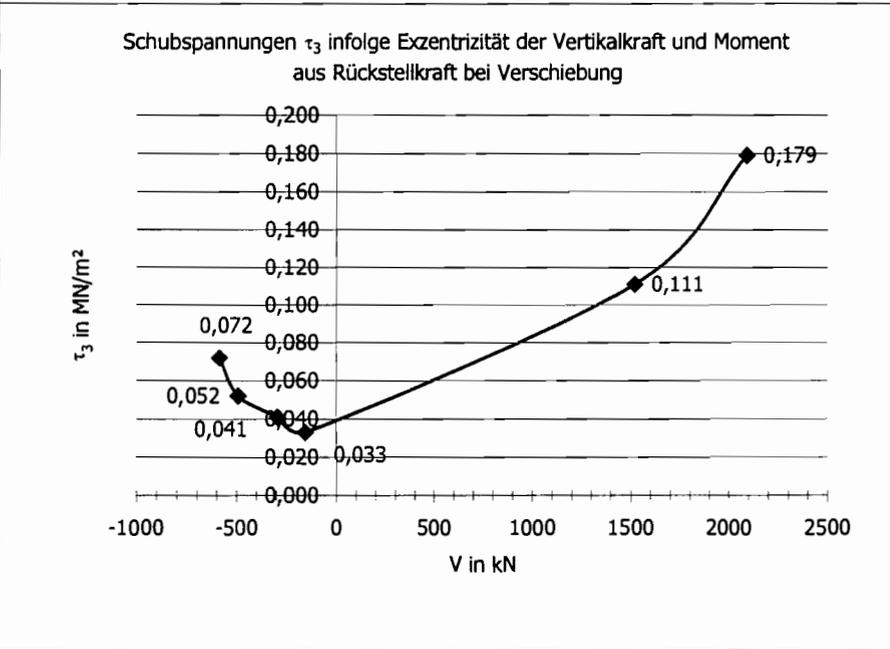
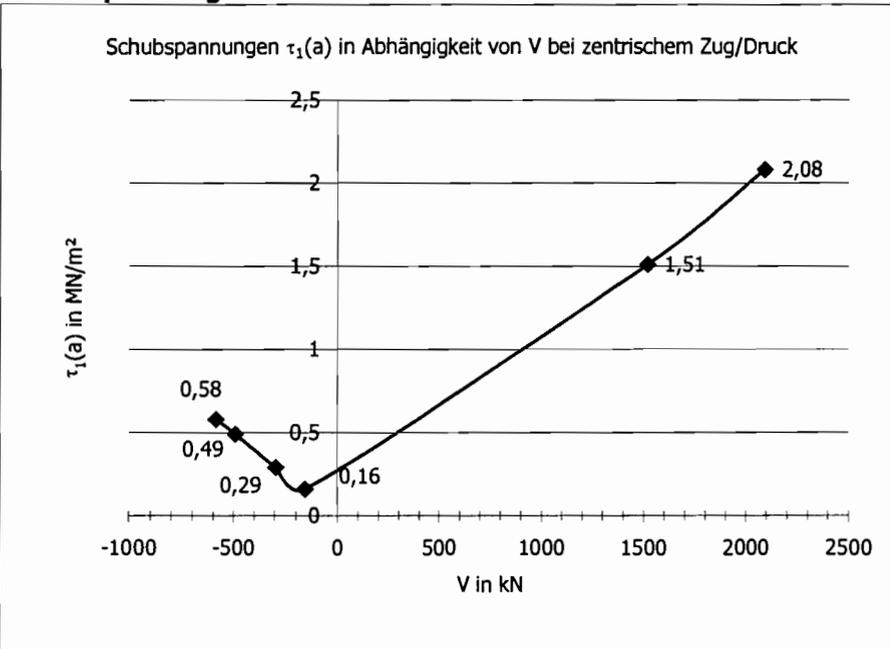
**Lager 10/3:****Schubspannungen mit den Lastannahmen in DIN 1072**

## Lager 10/3:

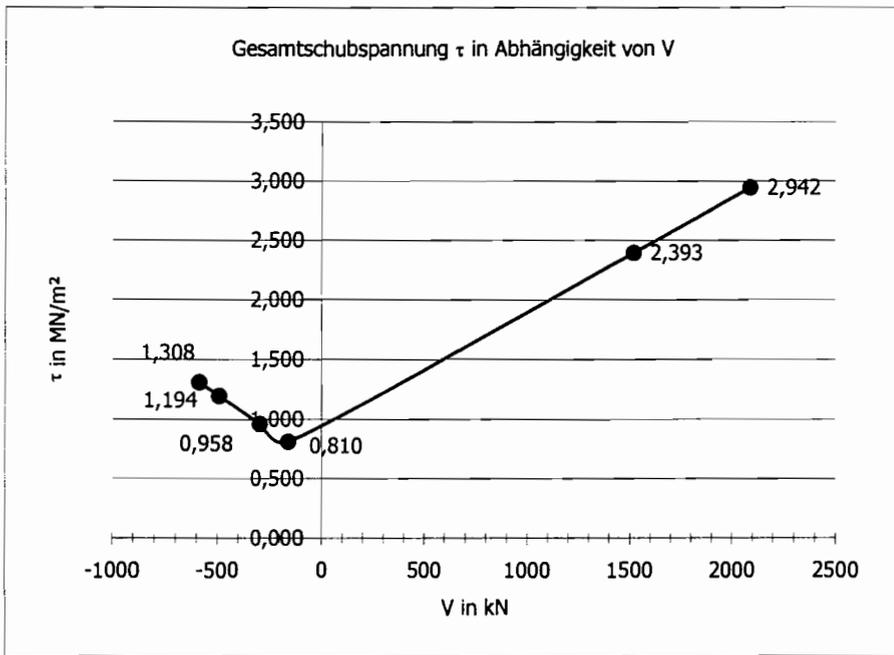
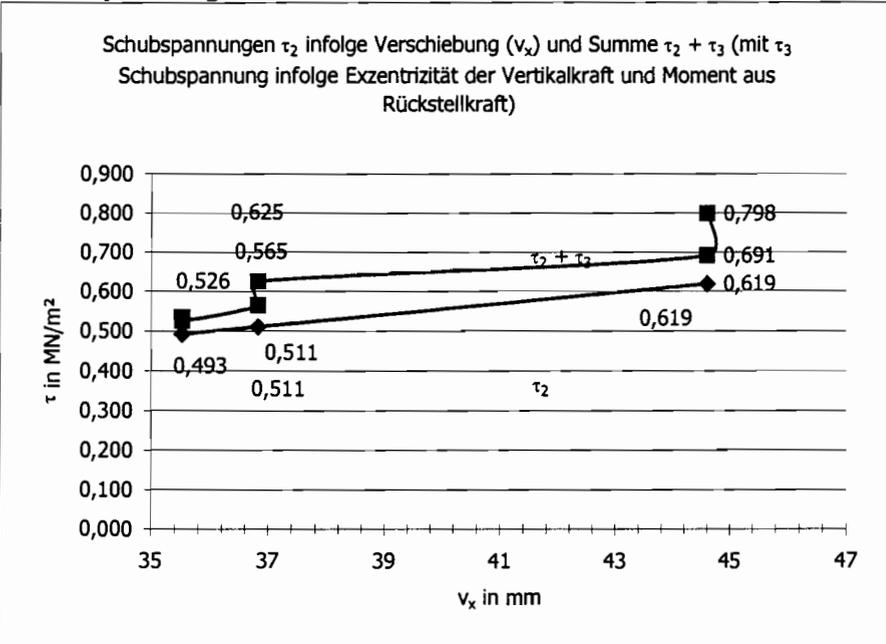
## Normalspannungen mit den Lastannahmen des ENV 1991



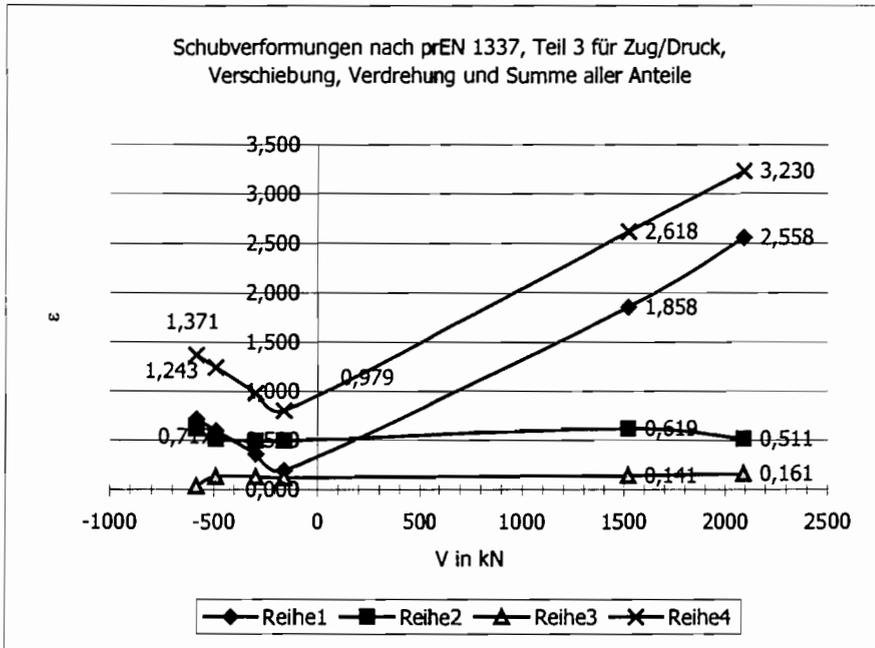
**Lager 10/3:  
Schubspannungen mit den Lastannahmen des ENV 1991**



**Lager 10/3:**  
**Schubspannungen mit den Lastannahmen des ENV 1991**



## Lager 10/3



- Reihe 1: Verformung aus Zug/Druck  
 Reihe 2: Verformung aus Horizontalbewegung (Verschiebung)  
 Reihe 3: Verformung aus Verdrehung  
 Reihe 4: Gesamtverformung