

Anprallschutz für Stützen – Gabelstaplerstoß –

T 2015

T 2015

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.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

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

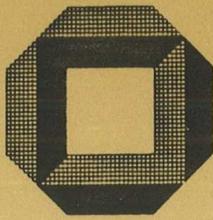
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

T 2015



Massivbau
Baustofftechnologie
Karlsruhe

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

Anprallschutz für Stützen
— Gabelstaplerstoß —

Prof. Dr.-Ing. J. Eibl
Dipl.-Ing. M. Feyerabend

Universität Karlsruhe
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Leitung: Prof. Dr.-Ing. J. Eibl
1988

INHALTSVERZEICHNIS

1. Allgemeines.....	1
1.1 Problemstellung und vorliegende Erfahrungen.....	1
1.2 Zielsetzung des vorliegenden Vorhabens.....	5
2. Der harte Stoß - der weiche Stoß.....	6
3. Das prinzipielle Verhalten einer ohne Anprallschutz quer gestoßenen Stütze.....	10
3.1 Allgemeines.....	10
3.2 Ergebnisse aus früheren Untersuchungen.....	12
3.2.1 Die Stahlstütze.....	12
3.2.2 Die Holzstütze.....	15
3.2.3 Die Stahlbetonstütze.....	15
4. Die prinzipielle Wirkung des Anprallschutzes.....	20
4.1 Allgemeines.....	20
4.2 Die Sandtonne.....	22
5. Das Problem des Maßstabes bei Stoßexperimenten.....	23
6. Experimentelle Untersuchungen.....	29
6.1 Allgemeines.....	29
6.2 Kenndaten handelsüblicher Gabelstapler.....	29
6.3 Versuchsanlage und Meßeinrichtung.....	36
6.4 Versuchsprogramm.....	43
6.5 Materialkennwerte.....	45
6.6 Versuche S1.....	47
6.6.1 Der Stoß ohne Anprallschutz (Versuch S1-).....	47
6.6.2 Der Stoß mit Anprallschutz (Versuch S1+170).....	49
6.6.3 Vergleich von S1- mit S1+170.....	49

6.7	Versuche S2.....	50
6.7.1	Der Stoß ohne Anprallschutz (Versuch S2-).....	50
6.7.2	Der Stoß mit großem Anprallschutz (Versuch S2+170).....	50
6.7.3	Der Stoß mit kleinem Anprallschutz (Versuch S2+110).....	50
6.7.4	Vergleich der Versuche S2-, S2+110, S2+170.....	51
6.8	Vergleich der Versuche S1- und S2-.....	51
6.9	Statische Versuche an den leeren Stahlblechtonnen.....	52
7.	Die Abschirmwirkung.....	54
8.	Näherungslösung mit Hilfe des Zweimassenschwingers.....	59
9.	Konstruktive Gesichtspunkte.....	65
9.1	Allgemeines.....	65
9.2	Das Einfüllmaterial.....	65
9.3	Der Behälter.....	66
10.	Wertung des geprüften Anprallschutzes.....	67
11.	Zusammenfassung und Ausblick.....	68
12.	Literatur.....	70
13.	Anlagen.....	

Vorbemerkung

Die Untersuchungen, über deren Ergebnisse im folgenden berichtet wird, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens "Anprallschutz für Stützen - Gabelstaplerstoß -" durchgeführt.

Sie wurden unter dem Aktenzeichen IV/1-5-316/82 vom
Institut für Bautechnik, Berlin
gefördert, dessen Vertretern hierfür Dank gebührt.

1. Allgemeines

1.1 Problemstellung und vorliegende Erfahrungen

Der Anprall von Fahrzeugen an Baustrukturen ist generell wenig untersucht. Die deutschen Normen operieren für Zwecke der Bemessung mit statischen Ersatzlasten, wie sie in jüngster Zeit vor allem aus den Versuchen von Popp [7], [8] abgeleitet wurden. Wie fragwürdig solche Ersatzlasten sind, wird spätestens dann erkennbar, wenn, wie bei den Verfassern geschehen, die Frage aufgeworfen wird, welche statischen Ersatzlasten z.B. für Schiffsstöße anzunehmen sind.

Schäden mit Gabelstaplern, bei denen schwere Stahlbetonstützen völlig unerwartet zerstört wurden, haben erneut Anlaß gegeben, die Frage dynamischer Stoßlasten, der Bemessung von Stützen gegen solche Stoßlasten und mögliche Schutzmaßnahmen bereits bestehender Baustrukturen zu diskutieren.

Gabelstapler sind insofern besonders unfallträchtig, als sie Lasten oft über Kopfhöhe transportieren und auf engstem Raum arbeiten. Die Sicht des Fahrers nach vorn ist durch das Hubgerüst und die zu transportierende Last eingeschränkt. So ist es nicht verwunderlich, daß Unfälle passieren, indem Gabelstapler an Gebäudestützen prallen. Unter anderem hat einer der Verfasser einen Schadensfall begutachtet, bei dem eine Zentralstütze unter vier über 20 m weit gespannten Bindern abgeschert wurde. Personenschäden wurden dabei nur durch Zufall vermieden.

Bauteile werden von einem Gabelstapleranprall deshalb so empfindlich getroffen, weil zum einen ein beladener Gabelstapler mit bis zu 20 t eine recht erhebliche Masse darstellt und zum anderen das Heck eines solchen Fahrzeugs durch das dort angebrachte Gegengewicht praktisch undeformierbar ist (s. Bild 1). Der Stoß wird dadurch sehr "hart" und die Kräfte entsprechend groß (s. Abschnitt 2). Die mit ca. 20 km/h relativ niedrige maximale Geschwindigkeit reicht deshalb oft aus, die Stützen zum Versagen zu bringen.

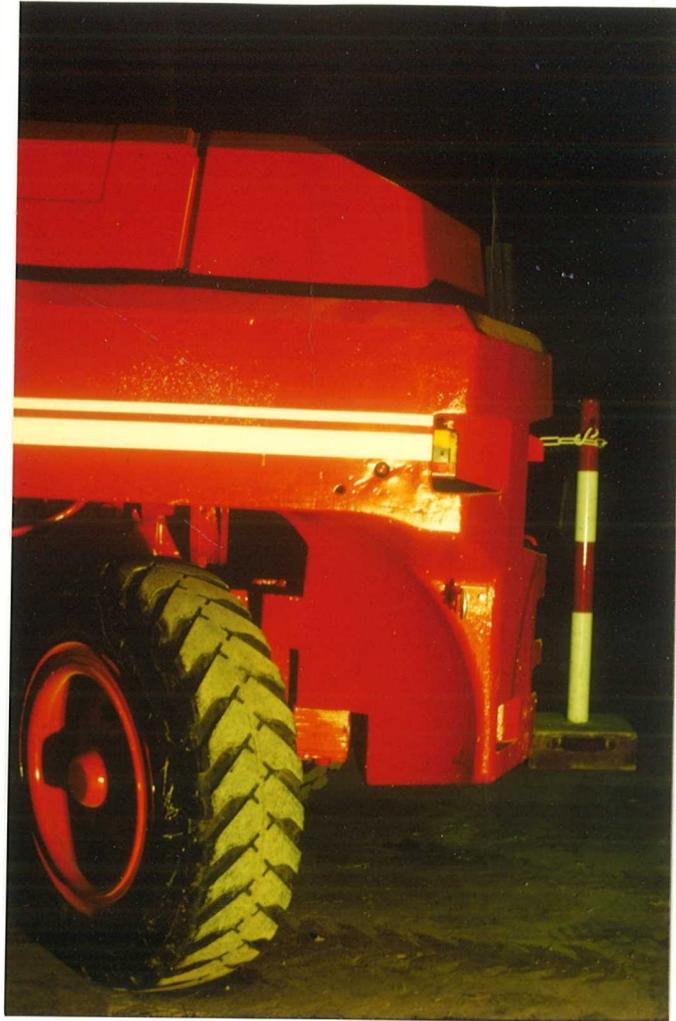


Bild 1: Heck eines Gabelstaplers

Prinzipiell gibt es drei Möglichkeiten, ein solches Bauteilversagen bei Fahrzeuganprall – hier Gabelstaplerstoß – zu verhindern:

- Die ungeschützte Stütze wird für die auftretenden Beanspruchungen beim harten Stoß bemessen;
- Durch Knautschzonen am Fahrzeug wird der Stoß "weicher" (s. Abschnitt 2) gemacht;
- Der Stoßbeanspruchung der Stütze wird durch die Einschaltung einer Knautschzone an der Stütze oder durch Vorschalten von Masse entschärft.

Zum ersten Punkt findet man weitere Hinweise in [4], wie sie in den letzten Jahren am hiesigen Institut erarbeitet wurden.

Der zweite Weg wird im allgemeinen bei Straßenfahrzeugen beschrieben, dort allerdings vornehmlich mit dem Ziel, die Fahrzeuginsassen zu schützen. Natürlich kann man zusätzlich nun auch Baustrukturen mit Knautschzonen versehen und so den zweitgenannten Weg mit dem dritten kombinieren. Dabei ist dann allerdings zu berücksichtigen, daß eine solche zusätzliche energieverzehrende Konstruktion (s. Abschnitt 4) mindestens eine ähnliche große Energieaufnahme wie die Fahrzeugknautschzone aufweisen muß, um eine merkbare Wirkung zu erreichen. Die daraus resultierende unvermeidbare geometrische Ausdehnung solcher Knautschzonen vor Baustrukturen schränkt ihre allgemeine Verwendbarkeit beträchtlich ein.

Der gleiche Mangel kennzeichnet auch Schutzkonstruktionen, bei denen Massen, z.B. Sand, in Behältern den Stützen vorgelagert werden (Bild 2).

Derartige Vorrichtungen wurden des öfteren zum Schutze von Hallenstützen bei Gabelstaplerstoß ausgeführt. Daß sich hier die Frage nach dem Verhältnis von Schutzwirkung und Platzbedarf ganz besonders stellt, bedarf keiner Erörterung.

Sucht man nach systematischen Untersuchungen von Schutzmaßnahmen, so findet man solche im Bereich des Automobilbaues mit der Zielsetzung, Fahrzeuginsassen zu schützen. Hierfür seien stellvertretend auch für andere die Arbeiten von Seiffert [1], Yamanaka und Nagaike [2] sowie Chiapetta und Costello [3] genannt. Weitere Arbeiten sind u.a. in [14] zu finden.

Man findet jedoch kaum Arbeiten, die Schutzmaßnahmen von Baustrukturen behandeln. Die Verfasser sind lediglich auf eine Publikation von Perry und Dinic [5] gestoßen, die sich mit Maßnahmen des Anprallschutzes allerdings bei Off-Shore-Konstruktionen befaßt.

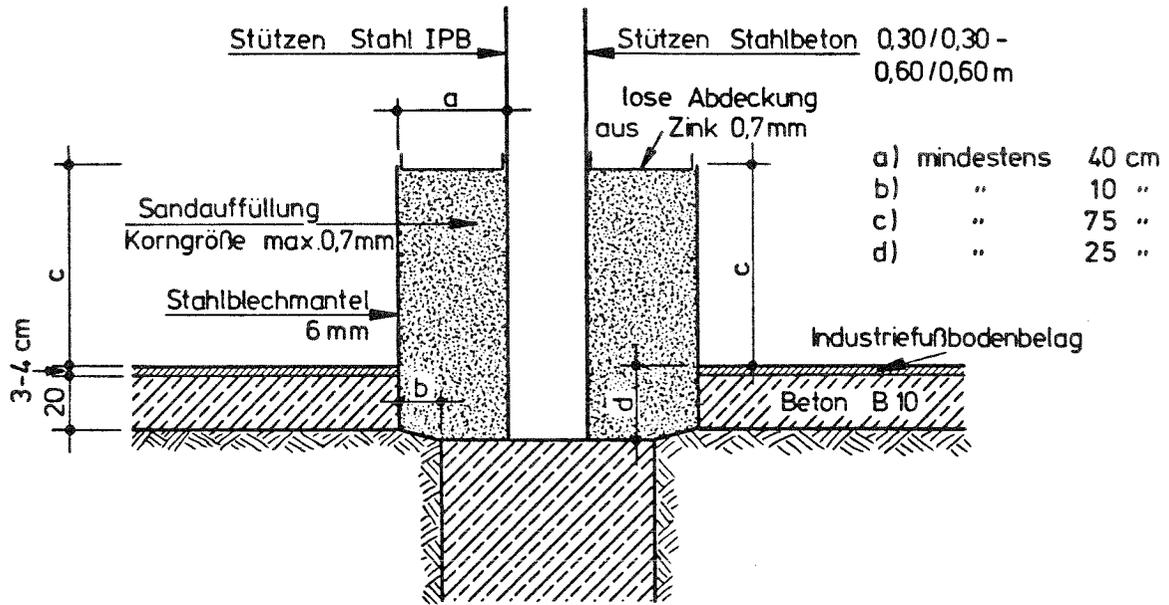


Bild 2: Anprallschutz in Lagerhallen des Hamburger Hafens

Dort wurden auf eine starren Unterlage aufgelegte Stahlbetonblöcke und Stahlbetonkuppeln mit unterschiedlichen Schutzschichten versehen und anschließend mit einem Fallgewicht beschossen. Als Schutzmaßnahmen wurden wassergesättigter Leichtbeton, nasser Sand, wassergesättigter Lehm und trockenes Polystyrol aufgebracht. Tabelle 1 zeigt die bei unterschiedlichen Schichtdicken und Stoßmassen sich ergebenden maximalen Kontaktkräfte.

Type of protection on block	Thickness (mm)	Impactor Mass (kg)	Peak Contact Force (kN)
no protection	-	37,85	318
Saturated Lightweight Concrete	60	37,85	142
	80		142
Wet Sand	80	31,3	25
	160		27
Saturated expanded clay	80	31,3	35
	160		17
Dry Polystyrene (density = 37.5kg/m ³)	160	31,3	12
	200		12

Tabelle 1: Vergleich der maximalen Kontaktkräfte bei 8 m/s für wassergesättigte massive Betonblöcke mit unterschiedlichen Schutzschichten, nach [5]

Das Institut für Bautechnik in Berlin hat daher eine Untersuchung derartiger Vorrichtungen für Gabelstapler angeregt und die im folgenden beschriebenen Forschungsarbeiten finanziell unterstützt.

1.2 Zielsetzung des vorliegenden Vorhabens

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte auf den Untersuchungen der Verfasser am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe aufbauend ein spezielles Schutzsystem für Stützen (Bild 2) gegen den Anprall von Gabelstaplern experimentell und, soweit möglich, theoretisch studiert werden. Ein solches wurde bereits bei mehreren Hallen insbesondere im Bereich der Stadt Hamburg ausgeführt.

Ziel der Studie sollte es sein festzustellen, ob mit dieser Art von Vorrichtung ein hinreichender Schutz geboten wird, bzw. ob dieses System u.U. verbessert werden muß.

2. Der harte Stoß - der weiche Stoß

Aus der täglichen Erfahrung ist bekannt, daß man durch Einfügen von weichen Zwischenschichten die bei einem Stoß auftretenden Kräfte reduzieren kann. Da der aufgebrauchte Impuls

$$I = m_0 \cdot v_0 \quad [\text{kNs}]$$

gleich dem bis zum Zeitpunkt der maximalen Verformung aufsummierten Zeitintegral der Kraft sein muß, d.h.

$$I = \int_0^{t_1} F_1 dt \quad [\text{kNs}] ,$$

wird die Stoßdauer bei sinkender Kraft entsprechend größer (s. Bild 3).

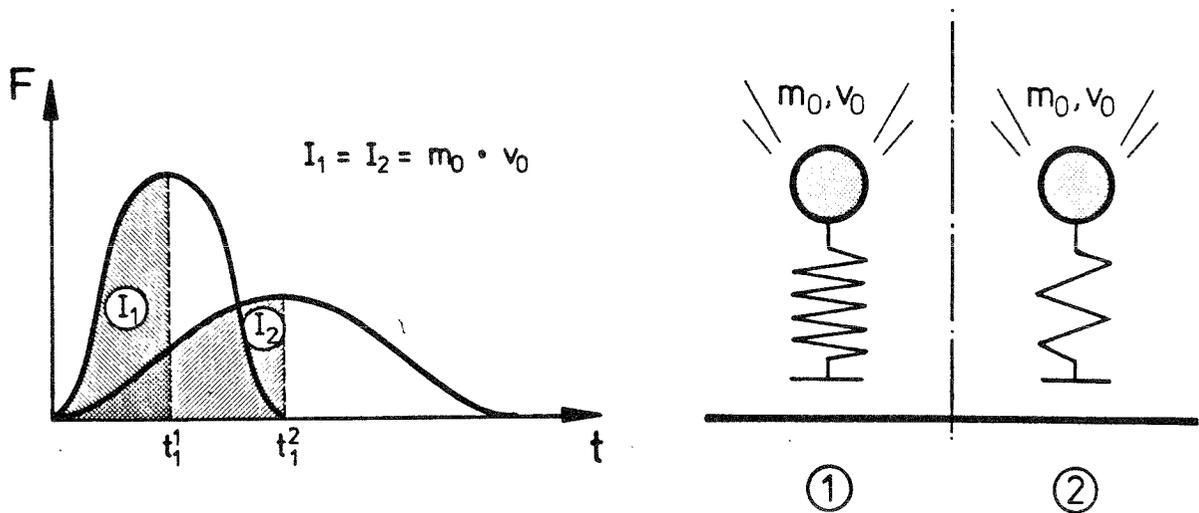


Bild 3: Stoß mit verschiedenen harten Zwischenschichten

Auch eine sinkende Steifigkeit des Stoßkörpers macht den Stoß "weicher". Solange allerdings ein Bezugssystem fehlt, kann man zunächst nur aussagen, daß Stoß 1 härter oder weicher ist als Stoß 2.

Es hat sich aber aus im nachfolgenden aufgeführten Gründen als sinnvoll erwiesen, das Maß für die Härte eines Stoßes als das Verhältnis der Verformung des getroffenen Bauteil zu der des stoßenden Körpers zu definieren.

Anders ausgedrückt ist dann für ein bestimmtes Bauteil ein Stoß (s. Bild 4)

h a r t, wenn die kinetische Stoßenergie des Stoßkörpers fast ausschließlich vom gestoßenen Bauteil aufgenommen wird und der Stoßkörper sich demgegenüber nur nachlässigbar wenig verformt;

er ist

w e i c h, wenn die kinetische Stoßenergie des Stoßkörpers fast ausschließlich durch elastische oder plastische Formänderungsarbeit des stoßenden Körpers aufgenommen wird und das Bauteil demgegenüber nur eine geringe Deformation erfährt.

Es ist also durchaus möglich, daß der Stoß ein und desselben Projektils je nach Steifigkeit der getroffenen Baustruktur nach dieser Unterscheidung als weich oder hart eingeordnet werden muß. Auf dem gestoßenen Bauteil angeordnete Zwischenlagen werden bei der folgenden Betrachtung dem Bauteil zugeordnet.

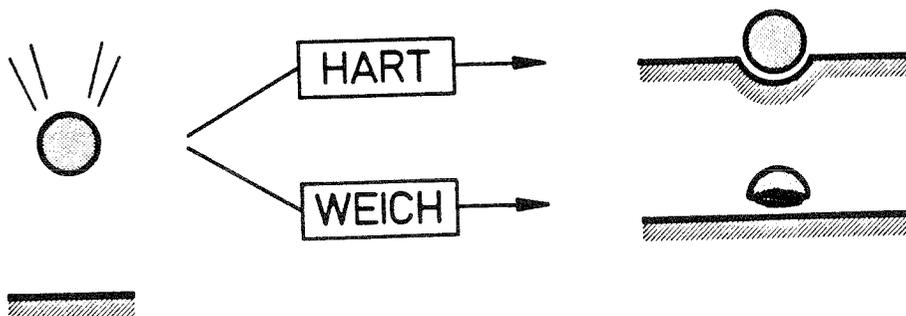


Bild 4: Harter Stoß - weicher Stoß

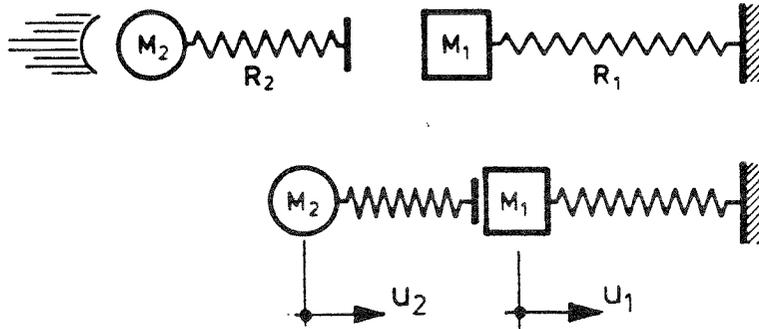


Bild 5: Zweimassenschwinger

Eine genauere Definition läßt sich an Hand des in Bild 5 dargestellten Modells eines Zweimassenschwingers geben. Hier gelten für die Massen 1 und 2 die beiden Gleichgewichtsbedingungen

$$M_2 \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial u_2^2} + R_2(u_2 - u_1) = 0$$

$$M_1 \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial u_1^2} + R_2(u_2 - u_1) + R_1(u_1) = 0$$

Wie man leicht einsieht, wird für $u_2 \gg u_1$ daraus

$$M_2 \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial u_2^2} + R_2(u_2) = 0$$

$$M_1 \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial u_1^2} + R_1(u_1) = R(u_2)$$

d.h., daß sich für den weichen Stoß, gekennzeichnet durch eine Vernachlässigung der Bauteilverformung u_1 , die beiden Gleichgewichtsbedingungen entkoppeln lassen. Es kann zunächst die erste der beiden letzten Gleichungen gelöst werden, ohne daß dabei die Baustruktur überhaupt interessiert. Die Kraft $R(u_2)$ wird ausschließlich durch die Struktur des Projektils bestimmt. In einem unabhängigen zweiten Schritt kann sodann die Verformung der Baustruktur errechnet werden, wobei die vorher bestimmte Funktion $R_2(u)$ nunmehr als äußere Belastung eingeht.

Wenn im Falle eines harten Stoßes eine gleichzeitige Berücksichtigung der beiden Verformungen notwendig ist, müssen die beiden Gleichgewichtsbedingungen simultan berücksichtigt werden müssen.

Der Anprall eines Gabelstaplers an eine Gebäudestütze muß bei den üblichen Massen- und Steifigkeitsverhältnissen immer als "hart" bezeichnet werden. Ein Anprallschutz muß demzufolge entweder die entstehenden Kräfte vor der Stütze abfangen und weglenken oder den Stoß so in Richtung "weich" steuern, daß die reduzierten Kräfte nun von der Stütze aufgenommen werden können.

Die Länge der Stoßzeit wird für eine allgemeine Beurteilung zweckmäßigerweise auf die Eigenschwingzeit der Baustruktur bezogen.

3. Das prinzipielle Verhalten einer ohne Anprallschutz quer gestoßenen Stütze

3.1 Allgemeines

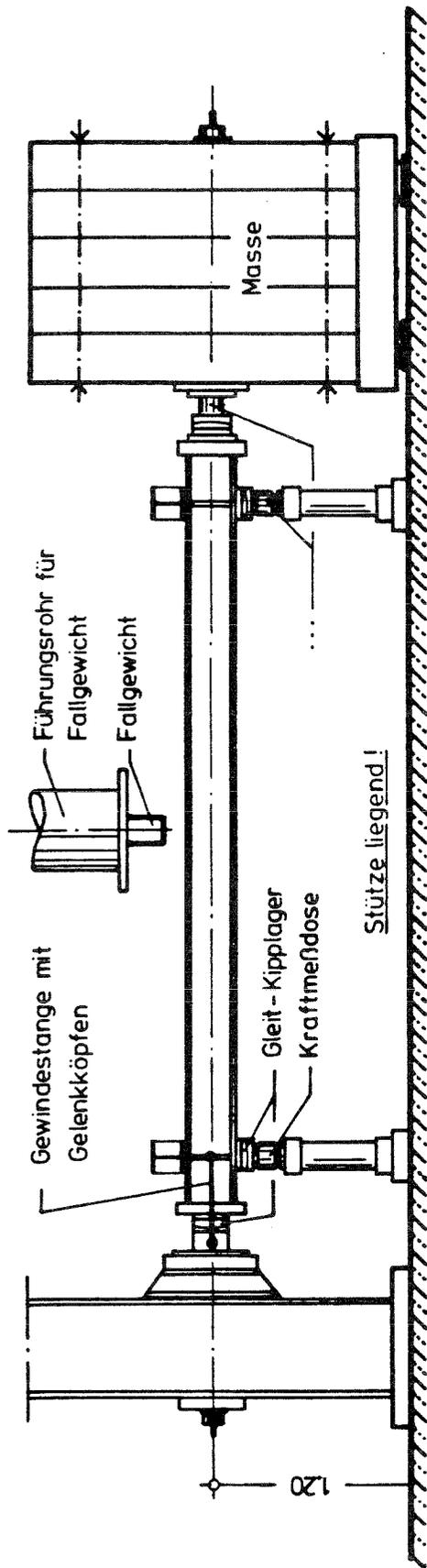
In einem früheren Vorhaben wurde das prinzipielle Verhalten von ohne Anprallschutz quer gestoßenen Stützen aus Stahl, Holz und Stahlbeton experimentell und rechnerisch untersucht [6]. Die wesentlichen Ergebnisse werden im folgenden kurz zusammengefaßt.

Bild 6 zeigt den für diese Experimente entworfenen Versuchsstand. Da der Querstoß mit Hilfe einer Fallgewichtsanlage aufgebracht wurde, mußten die Stützen liegend geprüft werden.

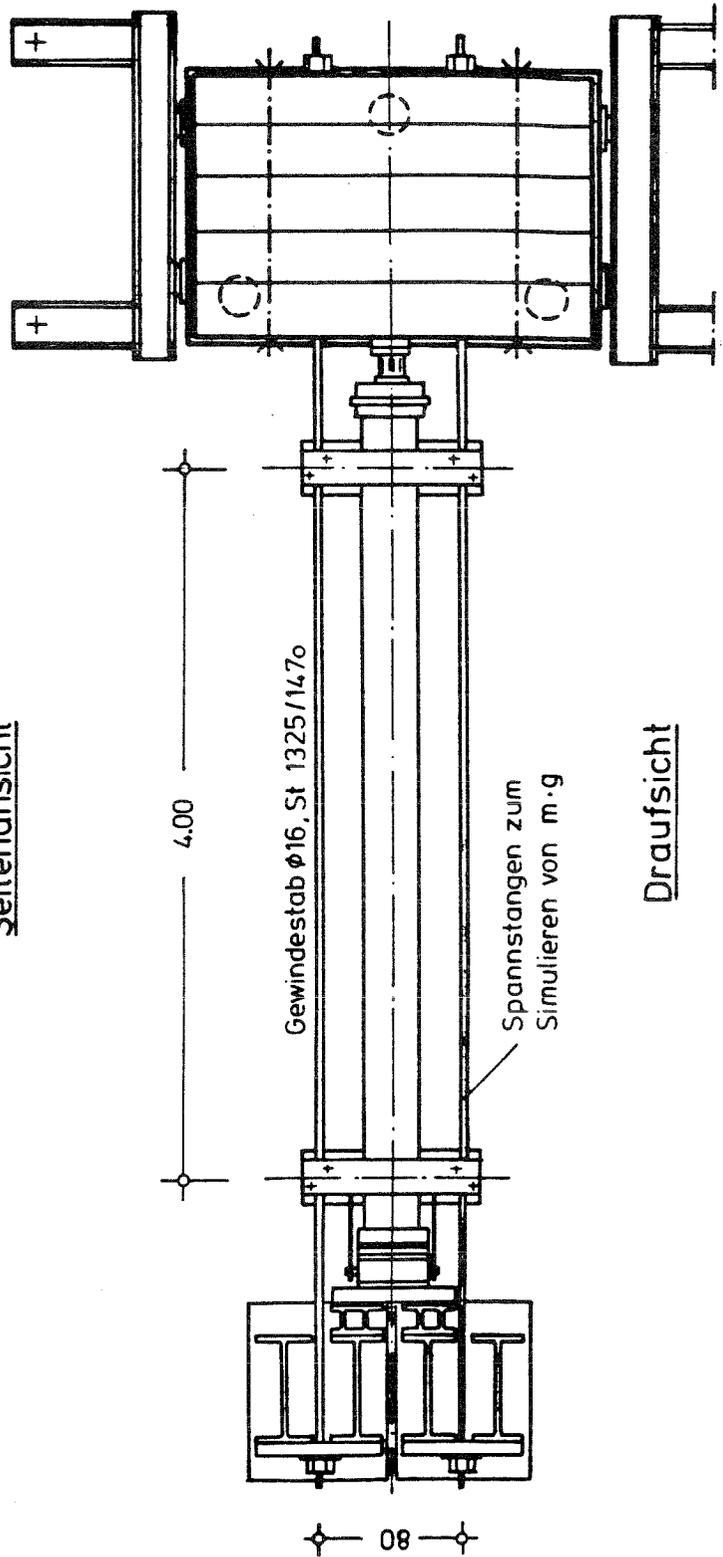
Zur Simulation der Auflast aus Decken- oder Dachkonstruktionen wurde eine Betonmasse von 20 t verwendet, die auf PTFE-Lagern in Stützenachsrichtung gleiten konnte. Die durch die auf die Masse wirkende Erdbeschleunigung hervorgerufene Gewichtskraft in Stabrichtung wurde mit Hilfe von Spanngliedern simuliert, d.h. die Betonmasse von 20 t wurde durch zwei Spannglieder mit einer Kraft von $20 \cdot g \approx 200 \text{ kN}$ über die Stütze gegen ein festes Widerlager gespannt.

Die Querstoßbelastung wurde durch ein Fallgewicht aufgebracht. Form und Abmessungen sind in Bild 7 dargestellt. Dabei wurde in manchen Fällen die Masse zusätzlich durch Preßluft beschleunigt, um die erforderliche Endgeschwindigkeit zu erreichen. Die Stoßkraft wurde mittels einer zwischen Masse und Stoßkopf eingebauten 10 MN-Kraftmeßdose gemessen. Das Fallgewicht wurde in einem Rohr von ca. 500 mm Durchmesser geführt.

Mit dieser Versuchseinrichtung, begleitet durch eine ganze Reihe von theoretischen Arbeiten wurden prinzipiell die folgenden Erkenntnisse gewonnen bzw. abgesichert.



Seitenansicht



Draufsicht

Bild 6: Versuchsaufbau für Stützenstoßversuche, nach [6]

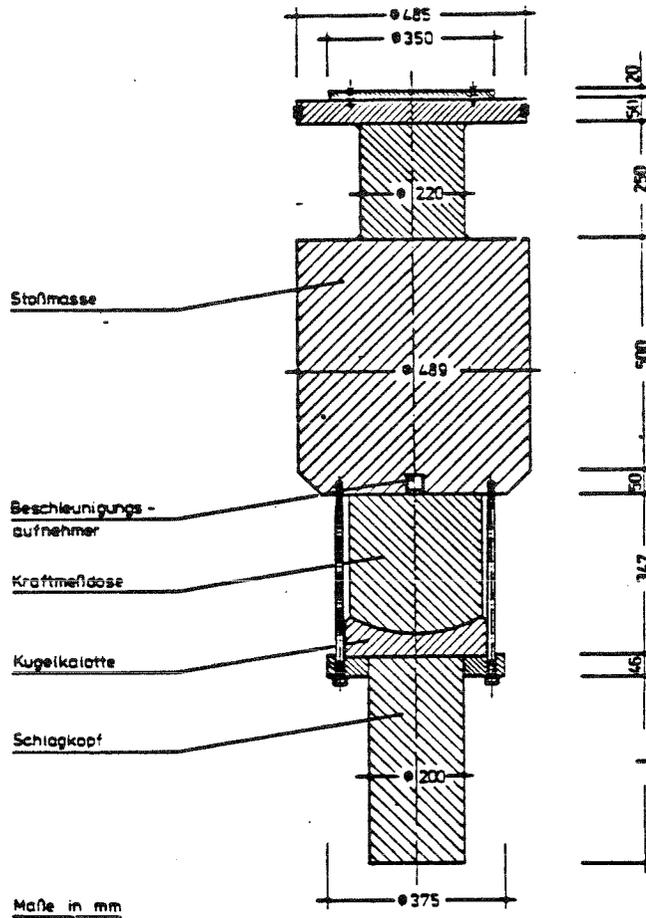


Bild 7: Fallgewicht mit Meßeinrichtungen

3.2 Ergebnisse aus früheren Untersuchungen

3.2.1 Die Stahlstütze

Wird eine Stahlstütze mit aufliegender Masse m von einer undeformierbaren Masse m_0 mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_0 quer zur Stabachse getroffen, so kann das hervorgerufene Bauteilverhalten grob in vier zeitliche Abschnitte gegliedert werden (s. Bild 8).

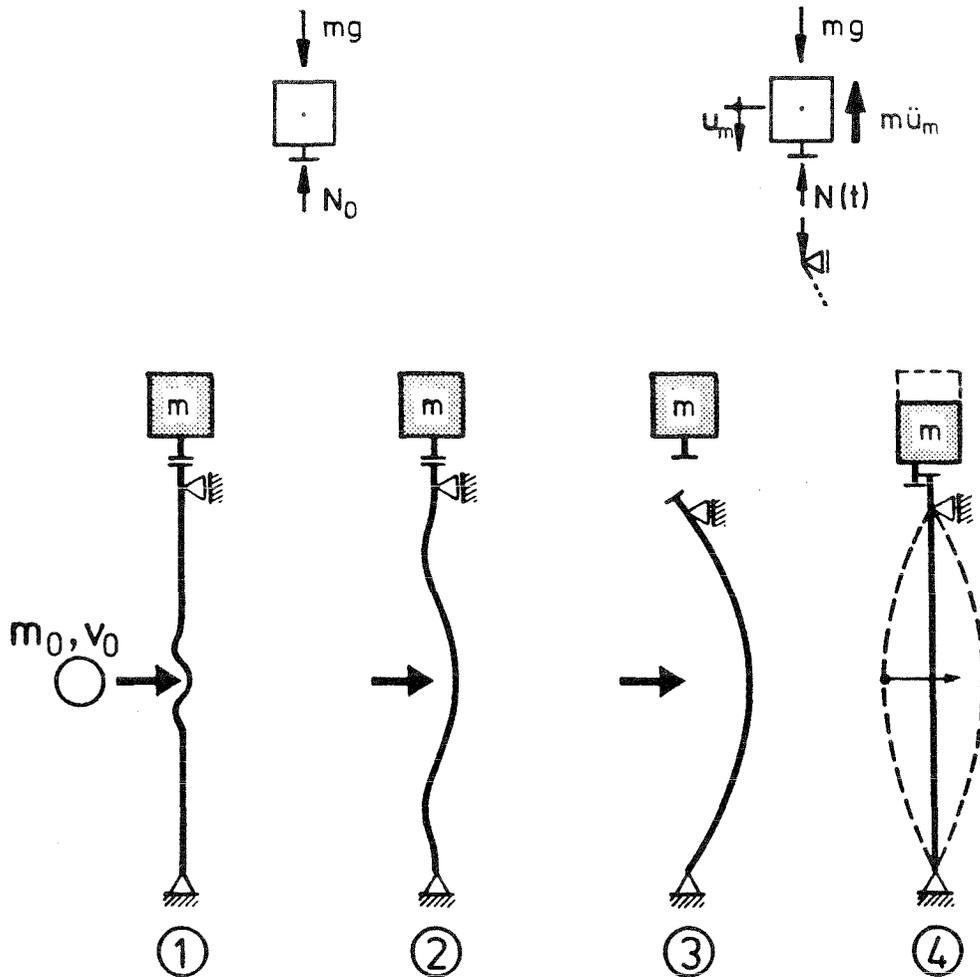


Bild 8: Stoßphasen

Stoßphase - 1

In der Stoßphase - 1 findet die erste Berührung zwischen Stoßkörper und Bauteil statt. Es wird nur der Bauteilbereich in unmittelbarer Nähe der Stoßstelle beansprucht. Der Stoßkraft wird fast ausschließlich durch die Trägheitskräfte dieses eng begrenzten Bauteilbereichs das Gleichgewicht gehalten, Auflagerkräfte treten noch keine auf. Die Längskraft entsprechend dem Gewicht der aufliegenden Masse verändert sich nicht.

Stoßphase - 2

In der zweiten Stoßphase greift die Beanspruchung auf die übrigen Stabbereiche über. Die Stabdurchbiegungen, die in der ersten Stoßphase auf den eng begrenzten Bereich der Stoßstelle beschränkt waren, breiten sich zu den Auflagern hin aus. Sobald die Wellenfronten die Stützenenden erreicht haben, zeigen sich Auflagerkräfte mit unter Umständen wechselnden Vorzeichen.

In dieser Phase kann auch eine erste Veränderung der Längskraft auftreten. Durch die einwirkende Stoßkraft wird der Querschnittsbereich im Angriffspunkt der Stoßmasse quer zur Stabachse gestaucht. Wegen der Querdehnung des Materials in Stablängsrichtung in diesem Bereich hat der Stab das Betreiben, sich zu verlängern. Dies wird durch die Trägheit der aufliegenden Masse teilweise behindert, so daß sich eine Zwängungskraft aufbaut, die ein Ansteigen der Stabnormalkraft über den Wert im Ruhezustand hinaus zur Folge hat.

Stoßphase - 3

Die dritte Stoßphase ist die Phase des "klassischen" Schwingvorganges. Der Stab beginnt, soweit er im Bereich elastischer Beanspruchungen verbleibt, mit je nach Belastung unterschiedlichen Eigenformen zu schwingen, erreicht die Umkehrlage und schwingt zurück. Während dieser Stoßphase erfährt die Stablängskraft ihre größten Betragsänderungen. Infolge der Querausbiegung verschiebt sich der Stützenkopf nach unten, d.h. in Richtung Stabmitte, da die Sehne der Stabachse kürzer ist als die Stabachse selbst. Von der auf die Masse am Kopf der Stütze wirkenden Erdbeschleunigung g wird ein Anteil $\ddot{u}(t)$ zur Überwindung der Massenträgheit "verbraucht", um dem Stützenkopf in seiner Bewegung abwärts zu folgen. So wird aus der Längskraft im Ruhezustand N_0

$$N_0 = - m \cdot g$$

während des Stoßvorganges die veränderliche Längskraft $N(t)$

$$N(t) = - m (g - \ddot{u}(t)).$$

Infolge der Verschiebung des Stützenkopfes fällt die Längskraft im Stab also zunächst ab. Sobald eine Bremsung, d.h. eine Beschleunigung der aufliegenden Masse in die entgegengesetzte Richtung erfolgt, steigt die Längskraft wieder an, und zwar über den Betrag des Ruhezustandes hinaus (s. Bild 9).

Stoßphase - 4

In der vierten Stoßphase schwingt der Stab aus. Maßgebende Beanspruchungen treten keine mehr aus.

3.2.2 Die Holzstütze

Das Verhalten der Holzstütze ist prinzipiell ähnlich wie bei der Stahlstütze. Bedingt durch das weichere Material und die geringere Masse sind die Stützenreaktionen jedoch nicht so rauh wie bei der Stahlstütze (s. Bild 10).

3.2.3 Die Stahlbetonstütze

In den ersten beiden Stoßphasen ist das Verhalten prinzipiell ähnlich wie bei der Stahlstütze. In der dritten Stoßphase allerdings treten deutliche Unterschiede zu Tage. Anstatt abzufallen, steigt die Längskraft hier betragsmäßig stark an.

Der Grund dafür liegt darin, daß sich eine Stahlbetonstütze in ihrer Stabachse durch Biegerisse ausdehnt. Dann wird die Verschiebung des Stützenkopfes von zwei Einflüssen gegenteiliger Auswirkung bestimmt:

- einerseits wird im ausgebogenen Zustand die Sehne der Stabachse kürzer als die Stabachse, d.h. es erfolgt eine Verschiebung des Stützenendes nach unten;
- andererseits läßt wie erwähnt eine durch Querausbiegung, z.B. durch Biegerisse, gedehnte Stabachse den Stützenkopf nach oben wandern.

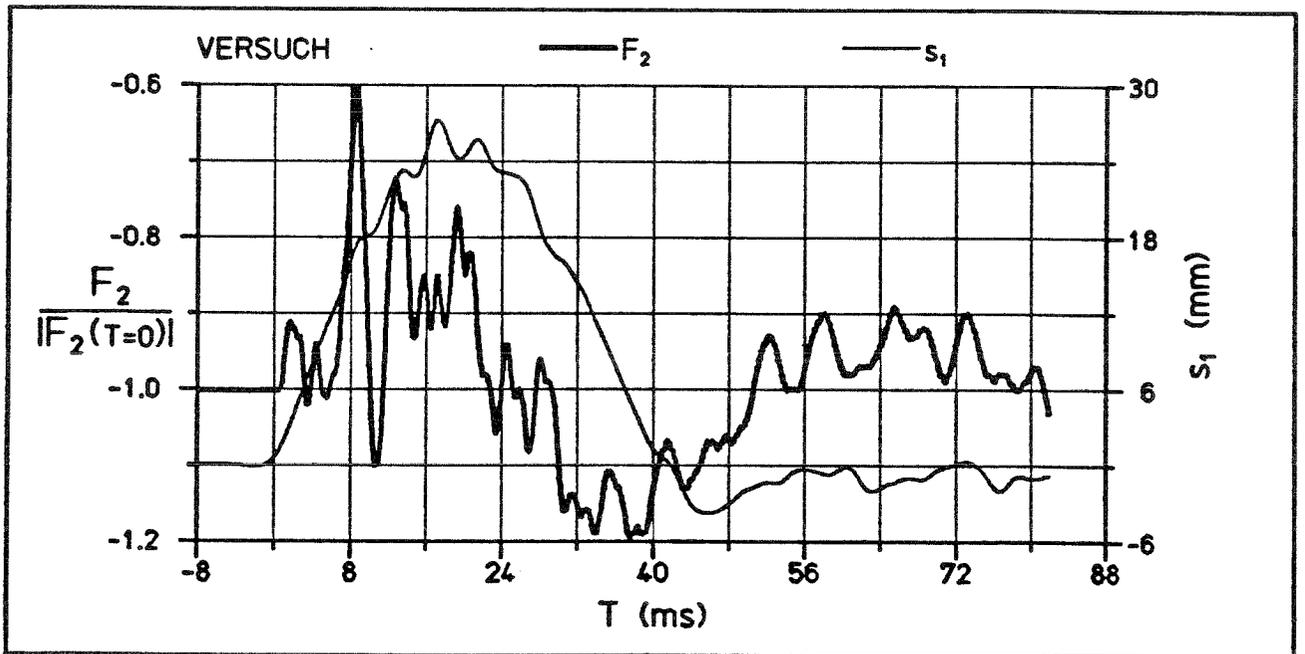
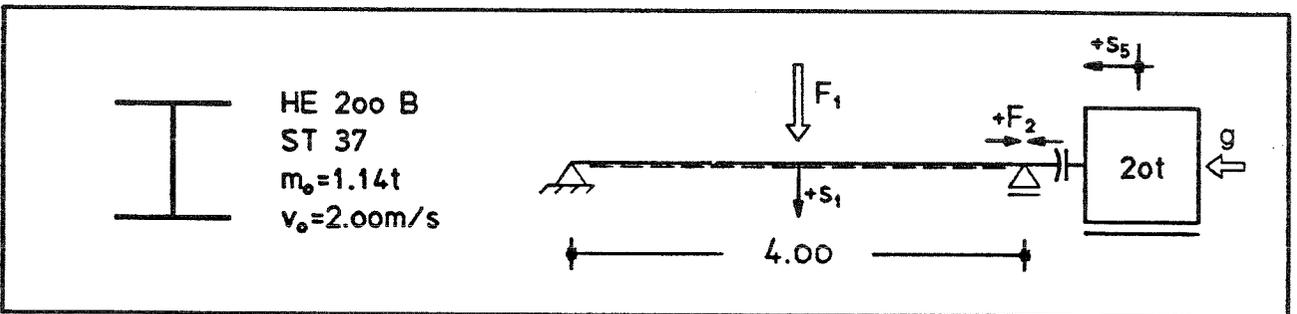
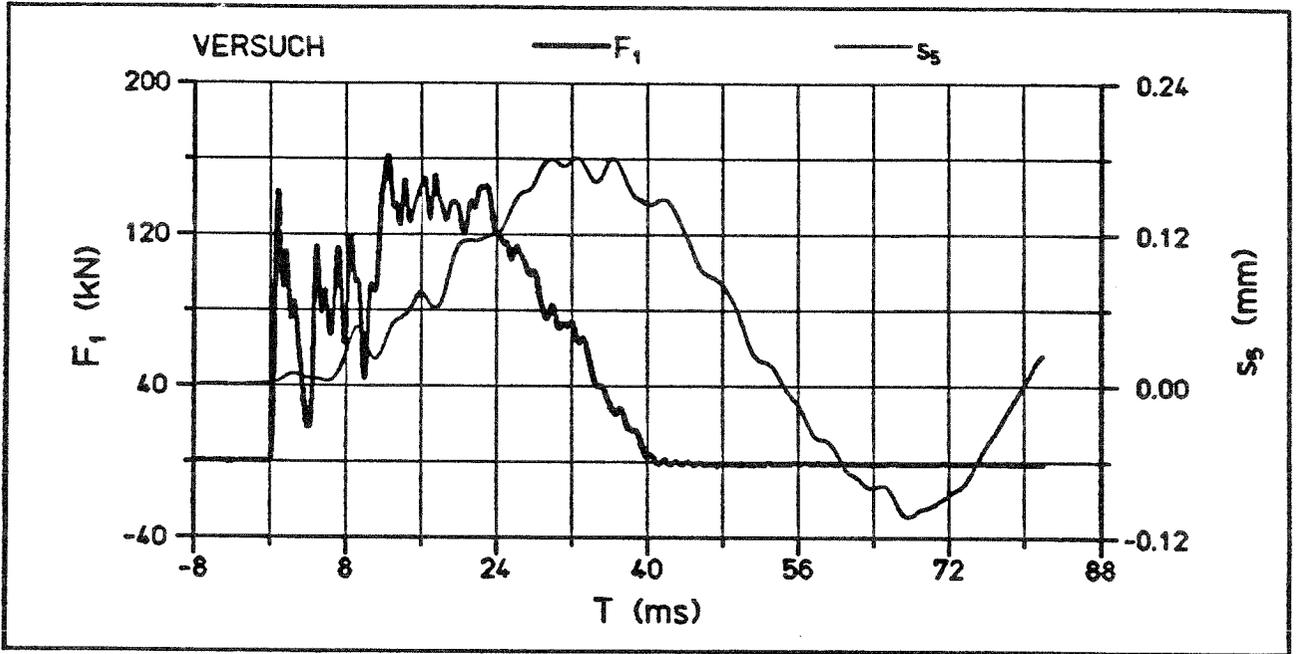


Bild 9: Verlauf von Stoßkraft, Längskraft, Massenverschiebung und Querausbiegung über die Zeit bei einer Stahlstütze; Versuchsergebnisse

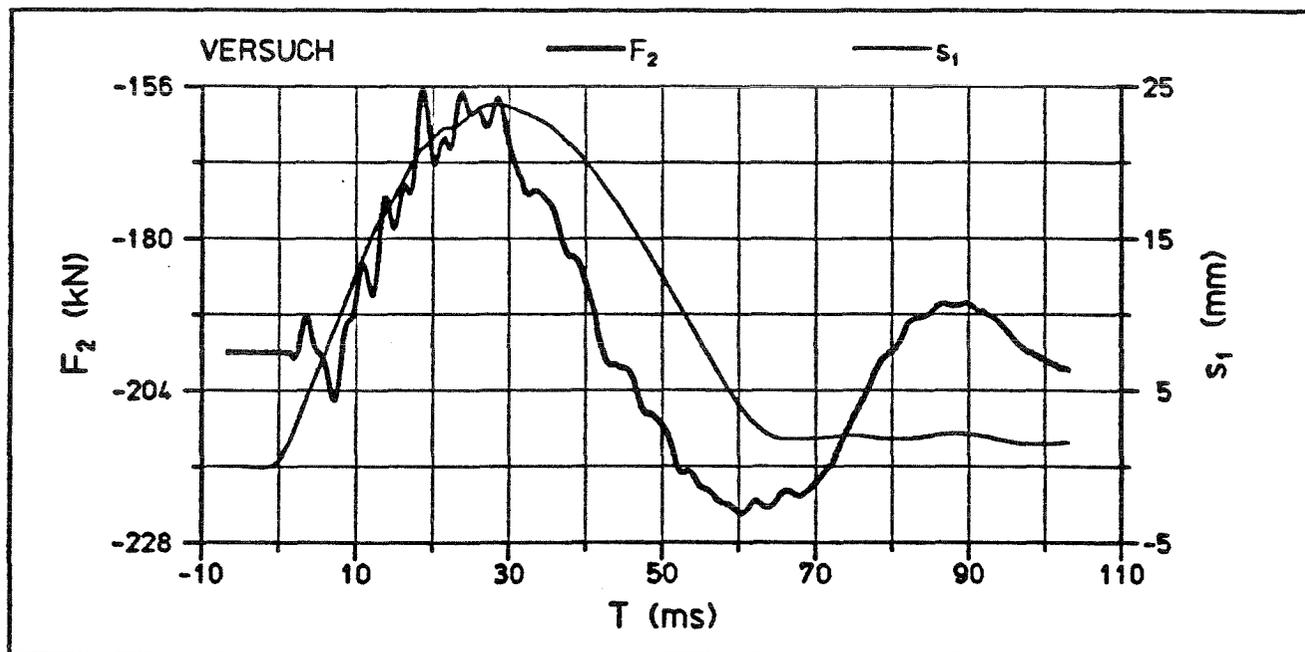
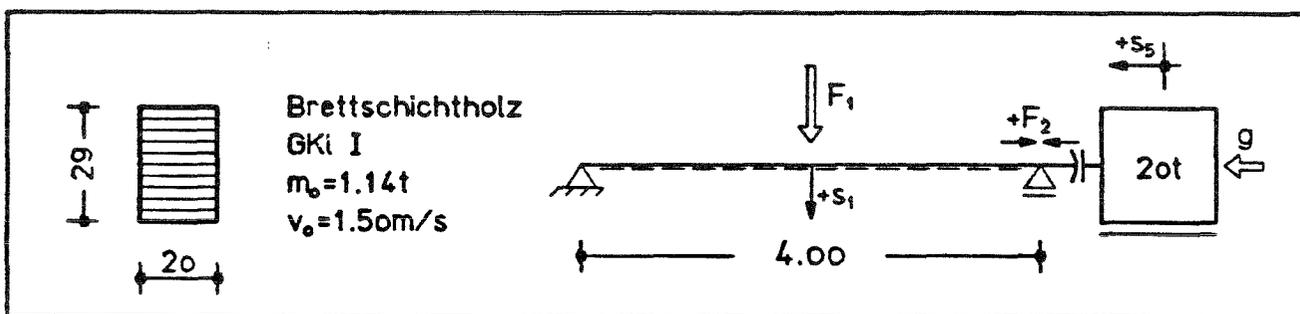
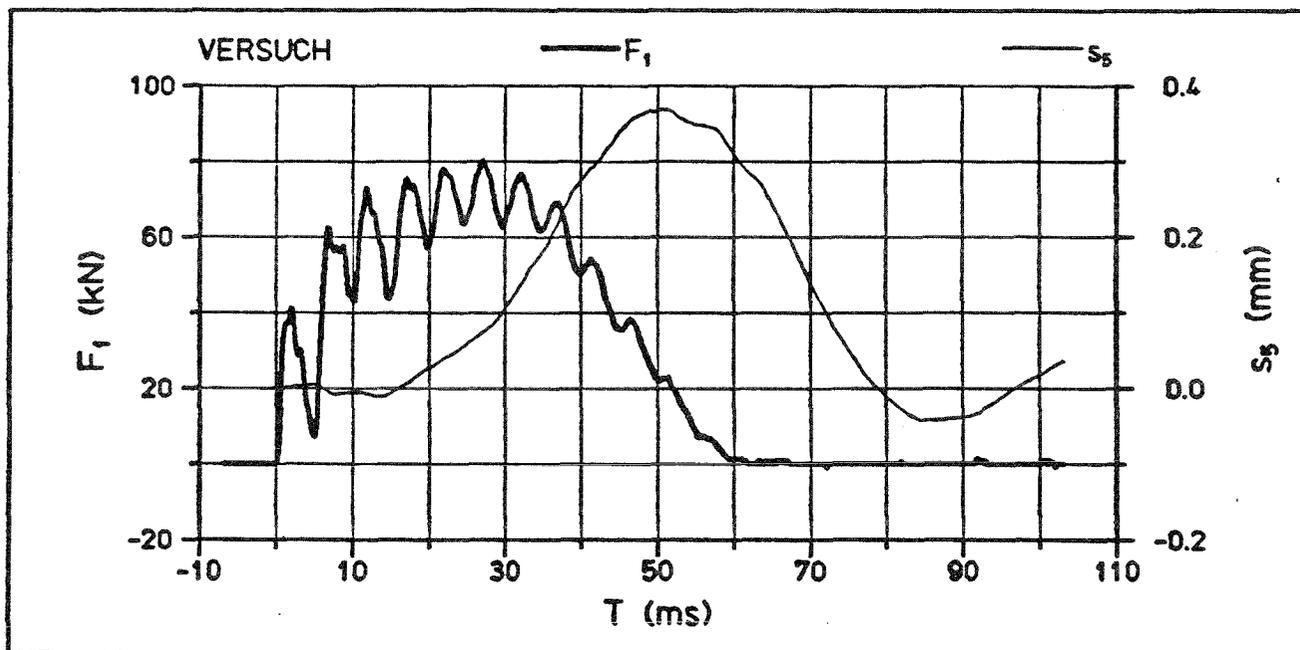


Bild 10: Verlauf von Stoßkraft, Längskraft, Massenverschiebung und Querausbiegung über die Zeit bei einer Holzstütze;
Versuchsergebnisse

Da bei einer Stahlbetonstütze in der Regel der zweite Einfluß überwiegt, ergibt sich in der Summe eine Stützenkopfverschiebung nach oben.

Diese Stützenkopfverschiebung gegen die aufliegende Masse bewirkt eine betragsmäßige Vergrößerung der Längskraft, da, um die Masse ebenfalls nach oben zu bewegen, Trägheitskräfte überwunden werden müssen. Noch vor Erreichen der Schwingumkehrlage fällt die Längskraft dann betragsmäßig wieder ab. Bei Annäherung an den unteren Totpunkt der Schwingungsform wird die Stützenbewegung nach unten und damit auch nach außen wieder langsamer; die Masse fährt indes infolge ihrer Trägheit zunächst weiter nach außen, so daß die Längskraft in der Stütze abfällt.

Die Längskraft fällt dabei auf Werte unterhalb des Ruhezustandes (s. Bild 11).

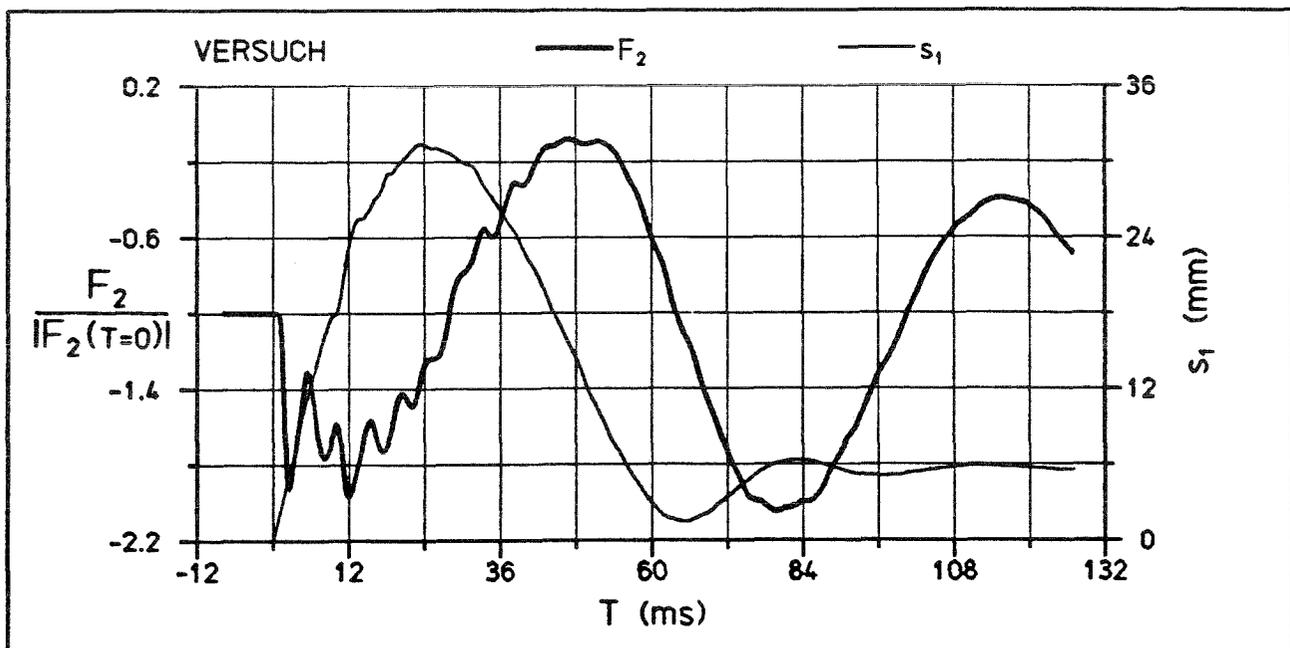
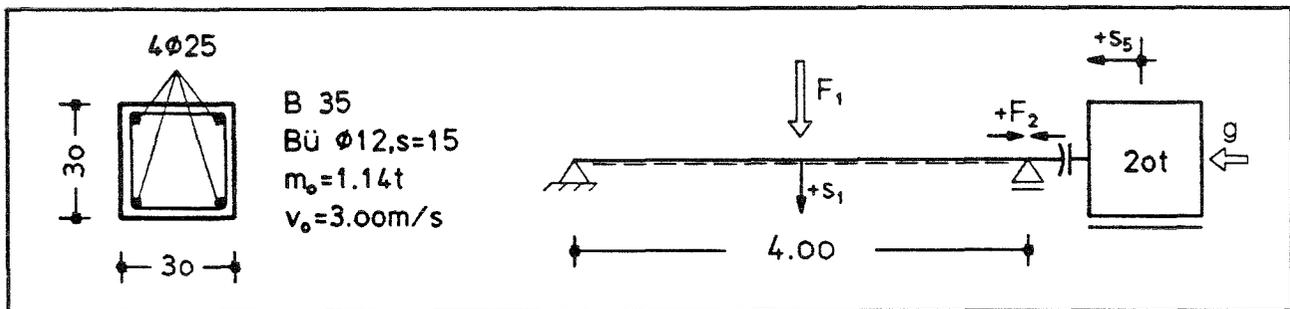
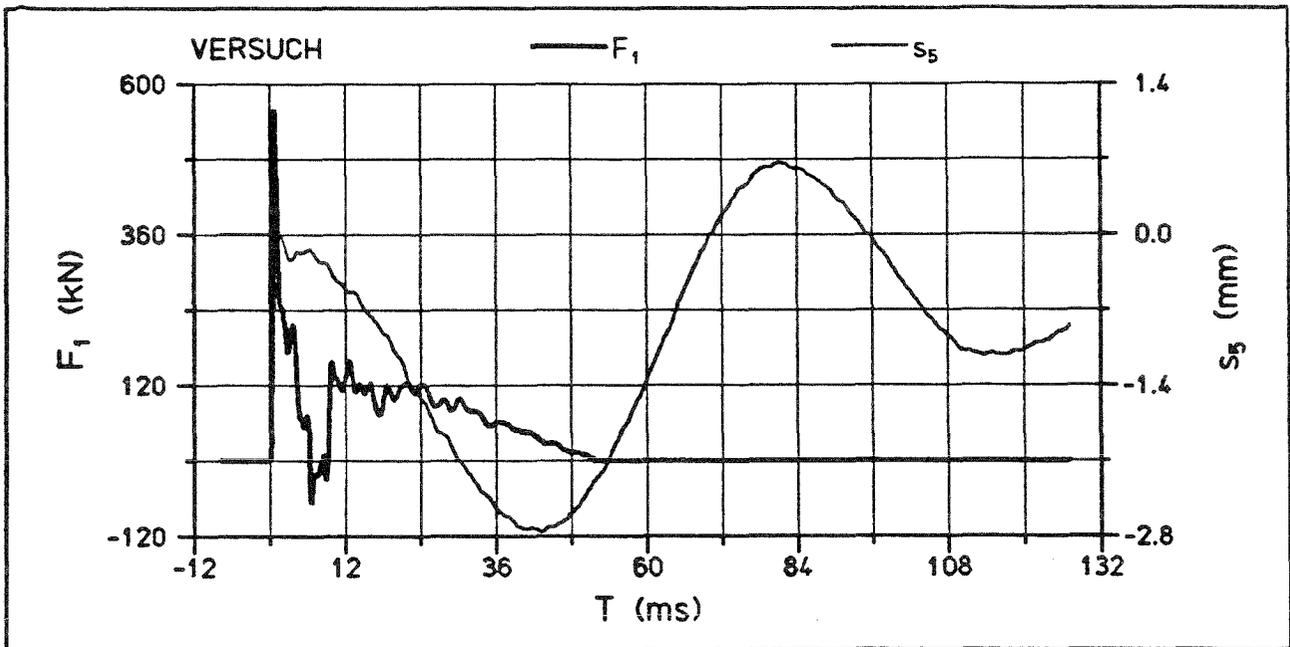


Bild 11: Verlauf von Stoßkraft, Längskraft, Massenverschiebung und Querausbiegung über die Zeit bei einer Stahlbetonstütze; Versuchsergebnisse

4 Die prinzipielle Wirkung des Anprallschutzes

4.1 Allgemeines

Wie bereits in Abschnitt 1.1 generell erörtert, gibt es mehrere im nachfolgenden im einzelnen beschriebene Möglichkeiten, Stützen vor einem Anprall zu schützen. Die folgende Systematik zeigt diese unterschiedlichen Varianten (s. auch Bild 12):

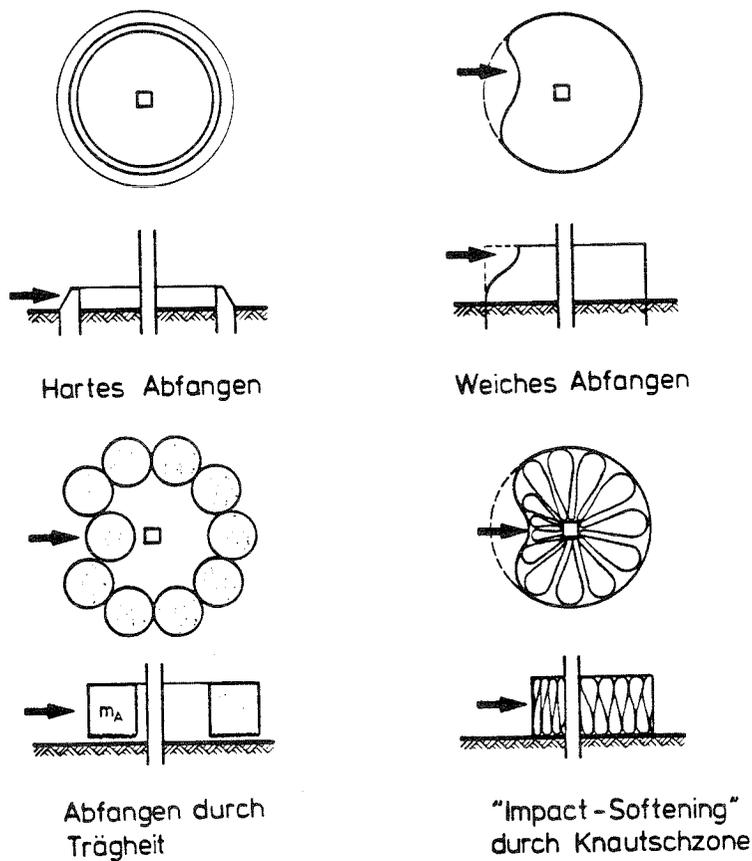
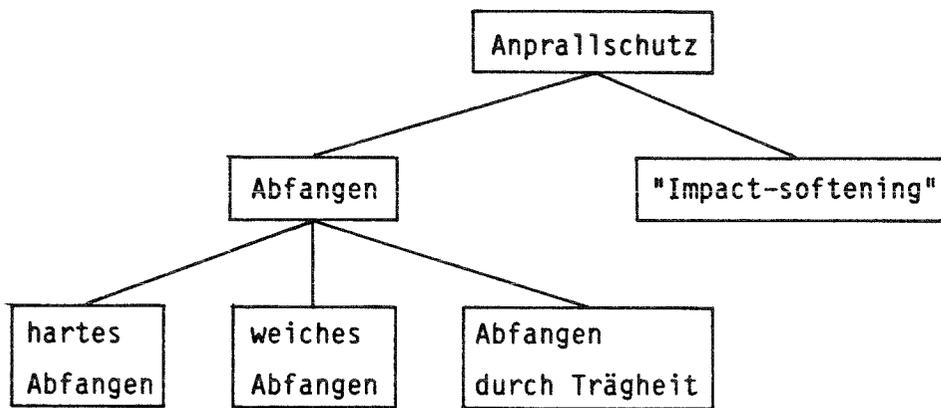


Bild 12: Prinzipielle Wirkungsweisen eines Anprallschutzes

Zum Abfangen dient dabei ein System, das den Stoß aufnimmt oder umleitet, bevor er die Stütze erreicht. Beim "harten Abfangen" (s. Bild 12) werden im allgemeinen die Kräfte durch Kragarmwirkung in den Baugrund abgetragen. Die Energiedissipation erfolgt größtenteils am Fahrzeug. Für das Abfangen eines Gabelstapleranpralls ist diese Variante wenig geeignet, da die auftretenden negativen Beschleunigungen sehr groß werden. Beim weichen Abfangen (s. Bild 12) findet die Energiedissipation am Anprallschutz statt. Zum Beispiel können im Baugrund eingespannte Spundwandprofile durch plastische Verformung die Kräfte klein und - bei ausreichender Verschiebewegvorgabe - den Stoß von der Stütze fern halten.

Ein Abfangen durch Trägheit (s. Bild 12) lenkt die kinetische Energie der stoßenden Masse um zu einer abfangenden Masse m_A , welche ihrerseits zunächst die kinetische Energie übernimmt, so daß diese die Stütze nicht erreicht. Die kinetische Energie der Masse m_A wird dabei z.B. durch Reibung in der Aufstandsfläche dissipiert (s. Bild 12). Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Abfangmasse aus vielen Mikromassen, z.B. Sandkörnern, mit individueller Bewegungsmöglichkeit zusammensetzen. Die kinetische Energie wird sodann durch Reibung bzw. Wegfliegen der Körner abgeführt.

Eine weitere prinzipielle Variante des Anprallschutzes soll hier in Ermangelung eines geeigneten deutschen Wortes mit "Impact-softening" bezeichnet worden (s. Systematik und Bild 12). Dabei wird der Stoß im Gegensatz zur Abfangung zwar voll über die Stütze abgeleitet, aber durch eine vorgeschaltete Knautschzone derart in Richtung "weich", d.h. verlängerter Einwirkzeit bei kleinerer Stoßlast gesteuert (s. Abschnitt 2), daß die verbleibenden Kräfte von der Stütze aufgenommen werden können. Da jede korrekt bemessene Stütze durch die Herabsetzung des Sicherheitsfaktors beim Anpralllastfall zumindest eine kleine zusätzliche Tragfähigkeit aufweist, erscheint es auch sinnvoll, zumindest einen Teil der Stoßlast auf diese Art der Stütze zuzuweisen.

Wie schon zuvor das Abfangen durch Trägheit tritt auch das "Impact-softening" selten in seiner Form auf.

4.2 Die Sandtonne

Die Schutzwirkung der im vorliegenden Vorhaben speziell untersuchten Sandtonne setzt sich aus einer Kombination von weichem Abfangen, Abfangen durch Trägheit und Impact-softening zusammen (s. auch die Bilder 12 und 13).

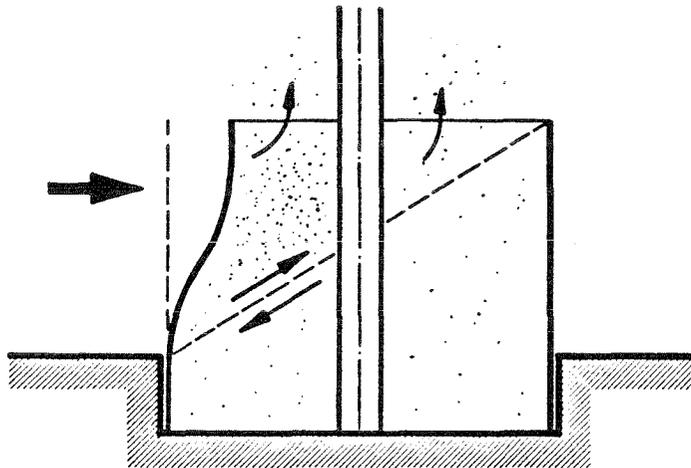


Bild 13: Prinzipielle Wirkungsweise der Sandtonne

Die zylinderförmige Stahlblechtonne ist in den Baugrund eingespannt und übt wegen der relativ großen Blechdicke ($t = 6 \text{ mm}$) eine nicht zu unterschätzende Abfangwirkung aus. Der seitlich an der Stütze vorbei herausgedrückte Sand nimmt einen Anteil der Stoßenergie als kinetische Energie auf und dissipiert sie in für die Stütze unschädlicher Weise. Das Impact-softening schließlich wird bewirkt durch die Zusammendrückung des Sandes vor der Stütze sowie durch die Reibung verursachenden Bewegungen des Sandes in den Gleitfugen.

Allein die Kombination von drei Schutzwirkungen in der Sandtonne läßt schon vorab vermuten, daß das Schutzwirkungs- Raumbedarfsverhältnis bei diesem Anprallschutz vergleichsweise hoch liegt.

5. Das Problem des Maßstabes bei Stoßexperimenten

Ein zentrales Problem der experimentellen Forschung ist das des Maßstabes. Häufig ist das zu untersuchende Objekt so groß, daß der Versuch an einem maßstäblich verkleinerten Modell durchgeführt werden muß, um bei der Auswertung letztendlich wieder zum Original zurückzukehren. Die Folgen dieser zweifachen Konversion müssen sorgsam bedacht werden.

Bei dem vorliegenden Problem gab es bezüglich der Maßstabswahl drei prinzipielle Möglichkeiten:

- Das gesamte System wird im Originalmaßstab geprüft;
- Das gesamte System wird im verkleinerten Maßstab geprüft;
- Teilsysteme werden in jeweils unterschiedliche Maßstäbe konvertiert. Jedes Teilsystem muß dann allerdings möglichst unabhängig von den Maßstäben der übrigen Teilsysteme sein. Beim vorliegenden Problem kommen als Teilsysteme die Belastung, der Anprallschutz und die Stütze in Betracht.

Die erste Möglichkeit schied aus mehreren Gründen aus. Zum einen wäre eine repräsentative Lagerhallenstütze im Originalmaßstab zu lang und im Versuch zu schwierig zu handhaben, zum anderen war es nicht möglich, die einem repräsentativen Gabelstapler äquivalente Masse von ca. 3 t und mehr als Stoßkörper aufzubringen.

Die zweite Möglichkeit wurde verworfen, weil die Vorgänge im Sand während des Stoßes offensichtlich so komplex sind, daß eine Aussage über die Folgen einer Maßstabstransformation nicht möglich ist.

Gewählt wurde die dritte Möglichkeit mit einem Maßstab 1:1 für den Sandkasten.

Dazu wurde die Stütze in einem verkleinerten Maßstab nachgebildet. Dies erschien zulässig, weil auf das Absorptionsverhalten des Anprallschutzes die Stützeigenschaften wahrscheinlich einen relativ kleinen Einfluß haben.

Gewählt wurde für die nachfolgend beschriebenen Versuche eine Stahlstütze HE 200 B.

Mit diesen Festlegungen ergab sich ein weiteres Problem. Wenn die Sandtonne in Originalgröße abgebildet wird, muß auch die Beanspruchung in Originalgröße aufgebracht werden. Nun ist aber wie bereits ausgeführt in der Fallgewichtsanlage die Realisierung einer Gabelstaplermasse nicht möglich. Die Grenze der aufbringbaren Stoßmasse liegt bei etwa 2 t. Demnach ist auch bei maßstäblich verkleinerter Masse einer Vergrößerung der Beanspruchung durch Erhöhung der Stoßgeschwindigkeit möglich. Es ist aber a priori nicht klar, ob sinnvollerweise die Stoßenergie

$$E = \frac{1}{2} m v_0^2$$

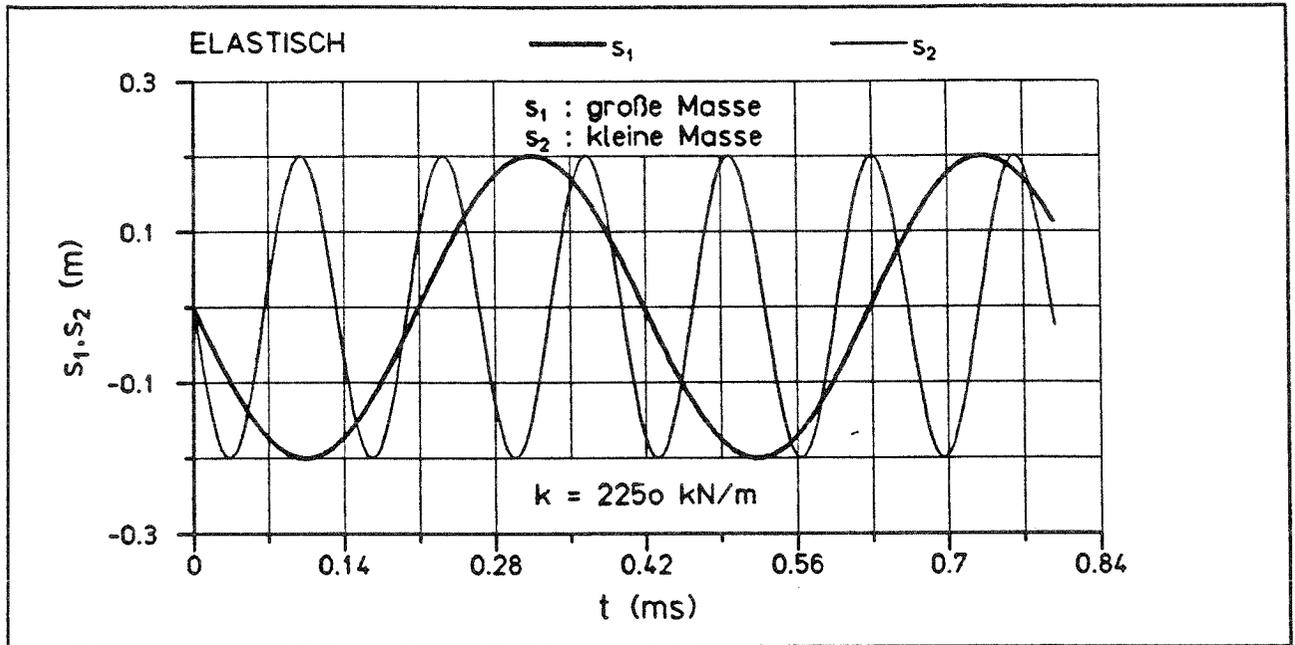
oder den Impuls

$$I = m \cdot v_0$$

als Maß für die Beanspruchung zu wählen ist. Die gleiche Erholung beider Beanspruchungsgrößen bei verkleinerter Stoßmasse durch Erhöhung der Stoßgeschwindigkeit ist nicht möglich.

Deshalb wurden zunächst rechnerische Untersuchungen an Einmassenschwingern durchgeführt, um dieses Problem vorab zu klären (Bilder 14 und 15).

Mit dem Modell des Einmassenschwingers kann jedoch nicht das durch Relativbewegungen zwischen Stoßmasse und gestoßener Masse entstehende lokale Verhalten, d.h. die Kontaktkraft untersucht werden, sondern nur das globale Biegeschwingverhalten der Stütze; der Einfluß unterschiedlicher Stoßmassen und Anfangsgeschwindigkeiten auf die Kontaktkraft zwischen Masse und Stütze wurde aber bereits in [4] untersucht.



VERGLEICH ZWEIER EINMASSENSCHWINGER

Stoßenergie 1 = Stoßenergie 2 ; Impuls 1 > Impuls 2

$m_1 = 1 \text{ t}$, $v_1 = 3.00 \text{ m/s}$; $E_1 = 45 \text{ kNm}$, $l_1 = 30.0 \text{ kNs}$

$m_2 = 1 \text{ t}$, $v_2 = 9.49 \text{ m/s}$; $E_2 = 45 \text{ kNm}$, $l_2 = 9.49 \text{ kNs}$

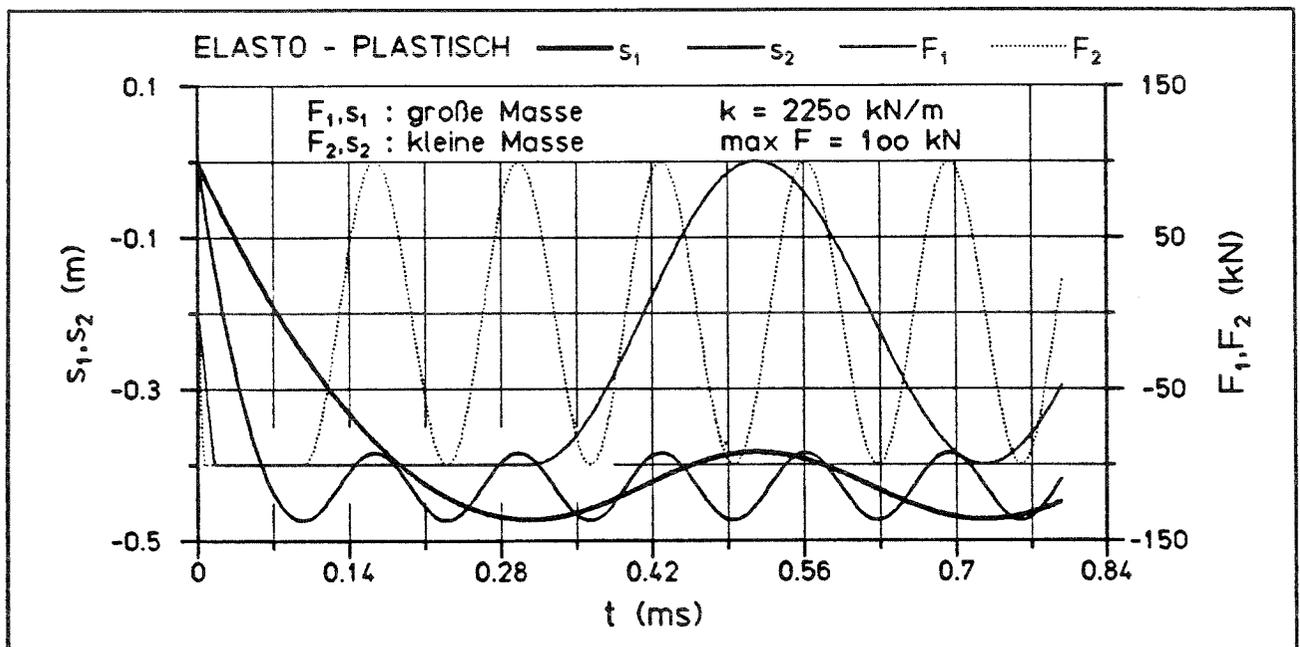
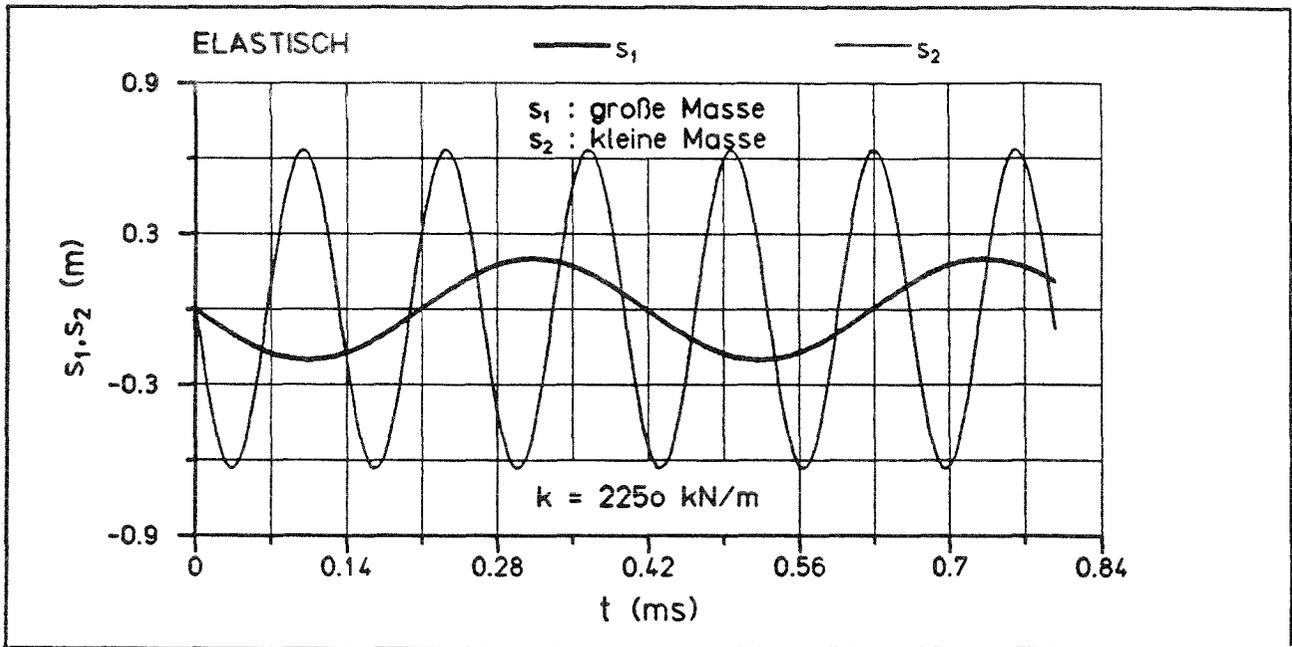


Bild 14: Maßstabsproblem am Einmassenschwinger, Stoßenergie konstant



VERGLEICH ZWEIER EINMASSENSCHWINGER

Stoßenergie 1 < Stoßenergie 2 ; Impuls 1 = Impuls 2

$m_1 = 1 \text{ t}$, $v_1 = 3.00 \text{ m/s}$; $E_1 = 45 \text{ kNm}$, $l_1 = 30.0 \text{ kNs}$

$m_2 = 1 \text{ t}$, $v_2 = 30.0 \text{ m/s}$; $E_2 = 450 \text{ kNm}$, $l_2 = 30.0 \text{ kNs}$

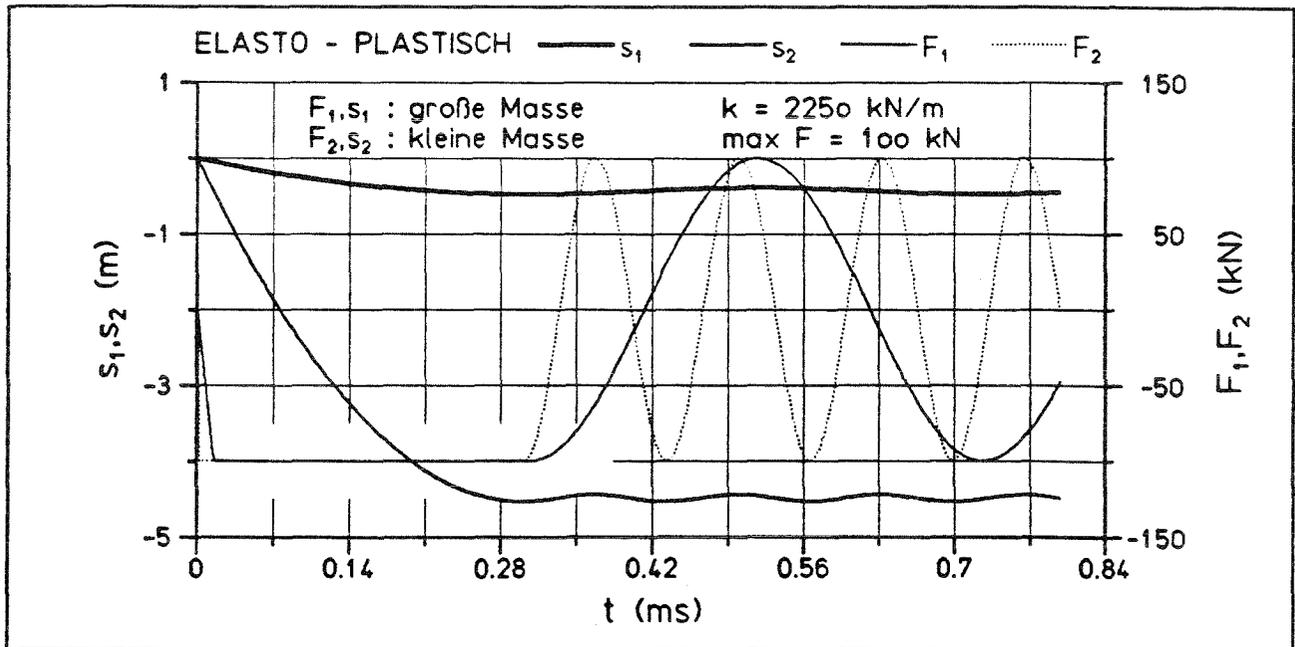


Bild 15: Maßstabsproblem am Einmassenschwinger, Impuls konstant

Es wurde jeweils ein elastischer und ein elasto-plastischer Einmassenschwinger untersucht. Die Federsteifigkeit k betrug 2250 kN/m, die maximal aufnehmbare Kraft beim elasto-plastischen Schwinger wurde auf 100 kN begrenzt. Bild 14 zeigt das Systemverhalten jeweils zweier Einmassenschwinger mit unterschiedlicher Masse, aber konstanter Energie. In Bild 15 erkennt man das Verhalten bei ebenfalls unterschiedlicher Masse, aber mit konstantem Impuls.

Die elastischen Schwinger in Bild 14 oben zeigen, daß bei Konstanthalten der Energie dieselben maximalen Verschiebungen erreicht werden. Der Schwinger mit dem kleineren Impuls 1 erreicht dieses Maximum aber früher, weil er bei gleicher Federsteifigkeit, aber kleinere Masse eine größere Eigenfrequenz d.h. kleinere Schwingdauer hat.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Der Schwinger mit dem größeren Impuls 2, d.h. größerem Zeitintegral der Stoßkraft hingegen erbringt bei gleicher Amplitude des Weges und damit der Kraft eine längere Wirkungsdauer.

Die beiden elasto-plastischen Schwinger in Bild 14 unten verhalten sich bezüglich Schwingwegamplitude und Frequenz prinzipiell gleich wie die elastischen Schwinger.

Hält man statt der Energien den Impuls konstant (s. Bild 15), so ergeben sich bei unterschiedlichen Frequenzen auch unterschiedliche Weg-Amplituden.

Mit

$$E = \int F ds$$

und

$$F = k \cdot s$$

sind zwei voneinander verschiedenen Energien E bei konstantem k durch unterschiedliche Durchbiegungen s gekennzeichnet.

Die auftretenden Frequenzen sind dieselben wie im Fall der konstanten Energie, da diese nicht von der Stoßgeschwindigkeit abhängen.

Auch bei den elasto-plastischen Schwingern (s. Bild 15 unten) erhält man unterschiedliche Schwingwegamplituden. Im Gegensatz zum Verhalten bei konstanter Energie fallen hier allerdings die Zeitpunkte des Endes der plastischen Verformung praktisch zusammen, wie man leicht einzusehen vermag.

Mit

$$I = \int_0^T F dt$$

und

$$F_{\max,1} = F_{\max,2} \ll F_{el,1,2}$$

gilt

$$T_1 \approx T_2 \quad \text{für } I_1 = I_2.$$

T_1 und T_2 nähern sich umso stärker an, je weniger sich die beiden Kraftverläufe beim Anstieg zwischen 0 und F_{\max} unterscheiden.

Faßt man das Ergebnis dieser Untersuchung zusammen, so läßt sich für den elastoplastischen Einmassenschwinger feststellen:

Bei gleicher Energie sind die Weg-Amplituden gleich, ebenso wie die Kraft-Amplituden. Ihr zeitlicher Verlauf ist unterschiedlich.

Bei gleichem Impuls sind die Kraftamplituden gleich, die Weg-Amplituden verschieden.

Diese Aussagen am Einmassenschwinger lassen sich auf das globale Biegeschwingverhalten der Stütze übertragen (siehe z.B. Block [9]).

Da die Energiedissipation in der hier interessierenden Anprallsicherung entscheidend durch den Weg bestimmt wird, ist im Versuch die Geschwindigkeit so einzurichten, daß die auftretende kinetische Energie gleich der des tatsächlichen Gabelstaplers ist. Kürzer andauernde Stöße sind die notwendige Konsequenz.

6. Experimentelle Untersuchungen

6.1 Allgemeines

Im Versuch wurde der Gabelstapleranprall durch den Anprall einer undeformierbaren Masse simuliert. Für die Auslegung der Stoßmasse wurden deshalb im November 1983 Informationen über handelsübliche Gabelstapler bei den Firmen

- ALMOCAR, Dachau
- CLARK, Mühlheim a.d. Ruhr
- STILL, Hamburg

eingeholt.

6.2 Kenndaten handelsüblicher Gabelstapler

Für die Auslegung der Versuchseinrichtung war das Fahrzeuggesamtgewicht, die Höchstgeschwindigkeiten, die Heckausformung und die Höhe des Lastangriffspunktes von Interesse. Von den vier Antriebsarten Diesel, Otto, Treibgas, Elektro wurde dem Elektromotor für den Betrieb in geschlossenen Räumen die größte Bedeutung zugemessen; dies war bei der Festlegung der repräsentativen Kenndaten zu berücksichtigen. Die Tabellen 2 bis 4 geben einen Überblick über das Gabelstaplerprogramm der oben genannte drei Firmen.

Man erkennt leicht, daß die beladenen Fahrzeuge eine höhere kinetische Energie liefern als die unbeladenen.

Zur Ermittlung der kinetischen Energie, die im Versuch aufgebracht werden sollte, wurde stellvertretend eine Gabelstaplermasse von 5 t und eine Geschwindigkeit von 11 km/h entsprechend 3,1 m/s angesetzt. Die Tabellen 2, 3 und 4 zeigen, daß damit in etwa ein repräsentativer Elektrostapler abgebildet ist; extrem große Fahrzeuge wurden hier wegen ihres relativ seltenen Einsatzes nicht betrachtet.

Die mittlere kinetische Energie beträgt dann

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 3,1^2 = 24,2 \text{ kNm},$$

die die Zielvorgabe für die experimentellen Untersuchungen gab.

ALMOCAR					
Typ	Antrieb	Eigen- masse	Gesamt- masse	max v ohne Last	max v mit Last
	D =Diesel O =Otto TG=Treibgas E =Elektro	[t]	[t]	[km/h]	[km/h]
MAX G(B), (D) 100	TG, O, D	2,25	3,25	19	18
MAX G(B), (D) 120	TG, O, D	2,38	3,58	19	18
MAX G(B), (D) 160	TG, O, D	2,65	4,25	19	18
MAX E 100 HD	E	2,43	3,43	9	8
MAX E 120 HD	E	2,64	3,84	9	8
MAX E 160 HD	E	2,95	4,55	12	11
MAX E 100	E	2,00	3,00	9	8
MAX E 120	E	2,10	3,30	9	8
MAX E 160 H	E	2,70	4,30	12	9
D 2000	D	4,05	6,05	20	19
D 2500	D	4,50	7,00	20	19
D 3000	D	4,70	7,70	20	19
D 3500	D	5,40	8,90	20	19
D 50	D	8,98	13,98	21,5	20,4
D 60	D	9,56	15,56	21,5	20,4
D 70	D	10,36	17,36	21,5	20,4
D 80	D	11,36	19,36	21,5	20,4
D 100	D	14,00	24,00	23	22

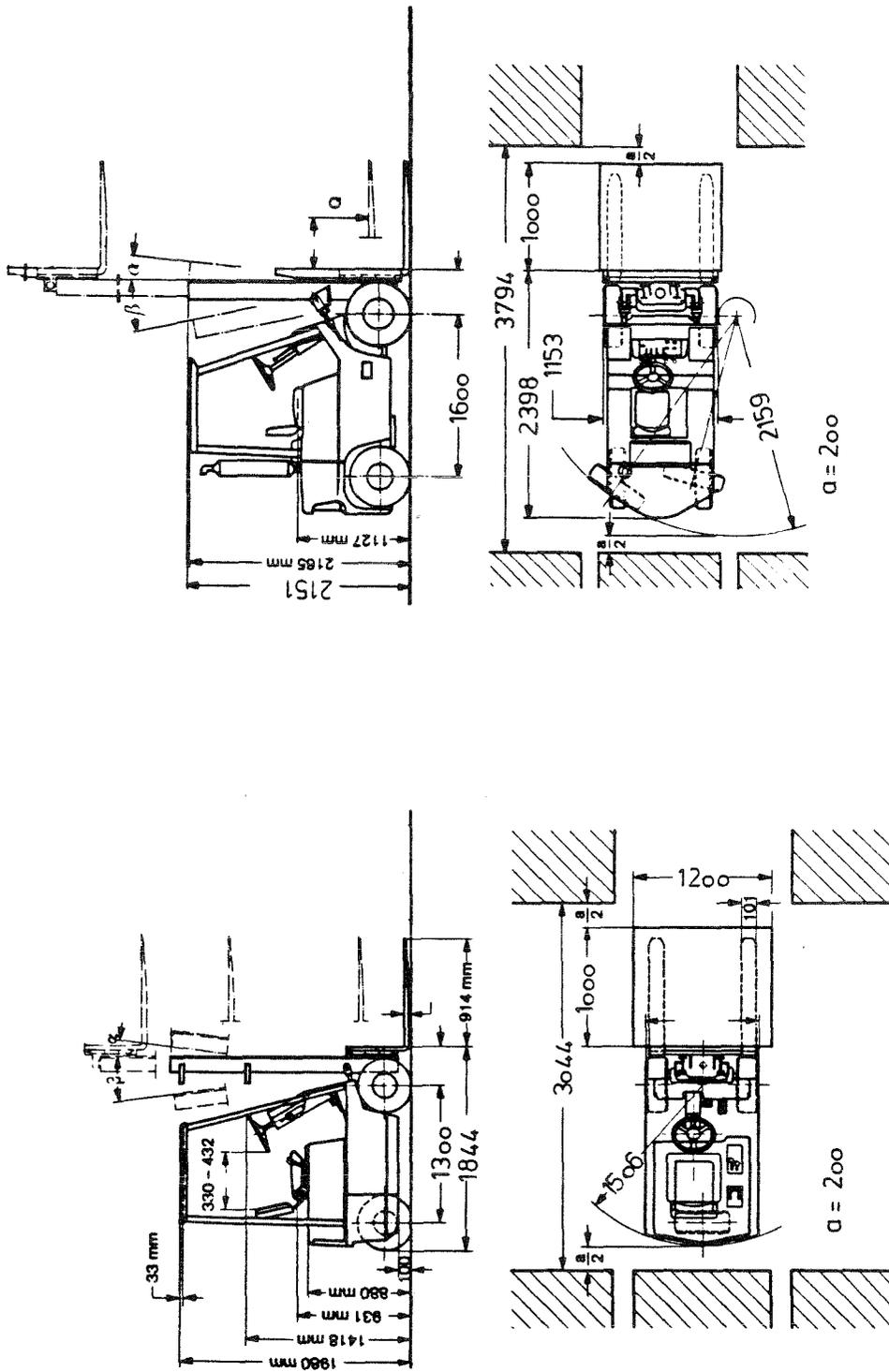
Tabelle 2: Gabelstapler-Programm der Firma ALMOCAR (11/83)

CLARK					
Typ	Antrieb	Eigen- masse	Gesamt- masse	max v ohne Last	max v mit Last
	D =Diesel O =Otto TG=Treibgas E =Elektro	[t]	[t]	[km/h]	[km/h]
H 500 Y 20	D, O, TG	2,365	3,365	17,6	17,0
H 500 Y 25	D, O, TG	2,520	3,770	17,6	17,0
H 500 Y 30	D, O, TG	2,690	4,190	17,6	17,0
C 500 Y 40	D, O, TG	3,670	5,67	21	19
C 500 Y 50	D, O, TG	4,080	6,58	21	19
C 500 Y 60	D, O, TG	4,485	7,485	22	21
TM 10	E	2,39	3,39	12,5	10,8
TM 15	E	2,88	4,38	11,8	10,0

Tabelle 3: Gabelstapler-Programm der Firma CLARK (11/83)

STILL					
Typ	Antrieb	Eigen- masse	Gesamt- masse	max v ohne Last	max v mit Last
	D =Diesel O =Otto TG=Treibgas E =Elektro	[t]	[t]	[km/h]	[km/h]
EFG 1/5001	E	2,045	3,045	13,5	12,0
EFG 1/5003	E	2,400	3,600	13,0	11,0
EFG 1,5/5004	E	2,734	4,234	12,5	10,5
EFG 1,5/6001	E	3,036	4,536	17,0	15,0
EFG 2/6002	E	3,910	5,910	17,0	15,0
EFG 2,5/6003	E	4,33	6,830	17,0	14,0
EFG 3/6004	E	5,232	8,232	15,0	14,0
EFG 3,5/6005	E	5,677	9,177	15,0	13,0
EFG 4/6006	E	5,752	9,752	15,0	13,0
DFG 1,5/7001	D, TG	2,62	4,120	20,0	20,0
DFG 2/7002	D	3,35	5,350	22,0	22,0
DFG 2,5/7003	D	3,705	6,205	22,0	22,0
DFG 3/7004	D	4,700	7,700	22,0	22,0
DFG 3,5/7005	D	5,200	8,700	22,0	22,0
DFG 4/7006	D	5,600	9,600	22,0	22,0
DFG 5/3316	D	7,900	12,900	23,0	21,0
DFG 6/3317	D	8,700	14,700	23,5	23,0
DFG 8/3318	D	10,300	18,300	23,5	23,0

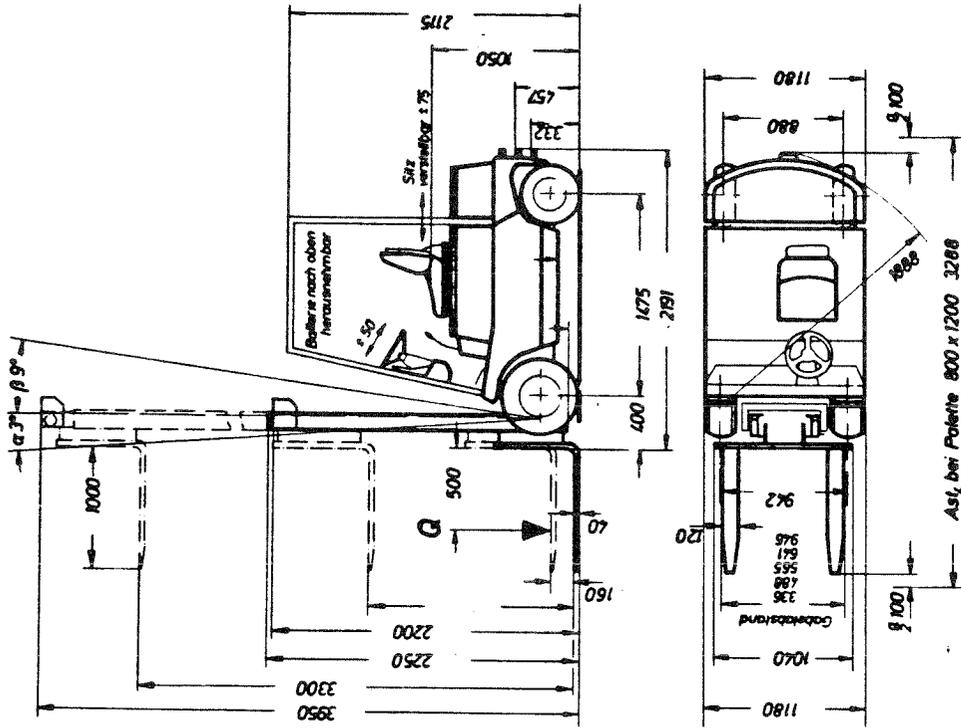
Tabelle 4: Gabelstapler-Programm der Firma STILL (11/83)



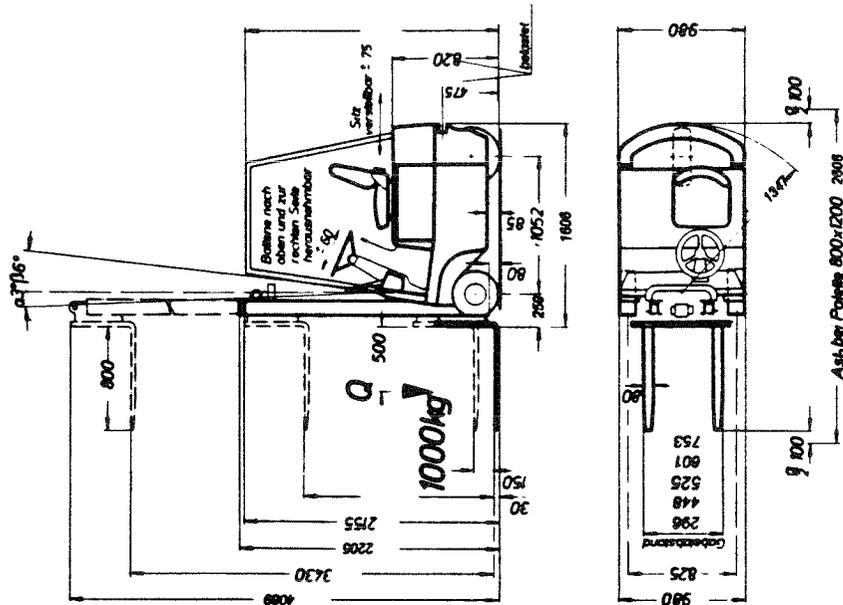
CLARK C500 Y40

CLARK TM 15

Bild 16: Gabelstapler, typische Formen und Abmessungen (11/83)



STILL EFG 2.5/6003



STILL EFG 1/5001

Bild 17: Gabelstapler, typische Formen und Abmessungen (11/83)

Die Bilder 16 und 17 zeigen einige typische Gabelstaplerformen. Hier interessiert insbesondere die Heckausbildung; wie man sieht, ist diese bei jedem Fahrzeug unterschiedlich ausgeformt. Unter Vernachlässigung der Anhängerkupplungen kann man jedoch einen mittleren Kreisbogen in die Fahrzeughecks einbeschreiben, dessen Durchmesser mit ca. 2,00 m ermittelt wurde; mit diesem Radius wurde die Auftrefffläche des Stoßkopfes abgerundet.

Infolge der Randbedingungen der Versuchsanlage ist der Durchmesser des Stoßkopfes auf ca. 20 cm begrenzt. Aus den Deformationen der Stahlblechtonnen war jedoch zu ersehen, daß diese Restriktion die Ergebnisse nicht maßgeblich beeinflusste.

Bild 18 zeigt zwei diesbezüglich ausgebildete Stoßmassen der Belastungseinrichtung nach Bild 19. Wie später im einzelnen noch erläutert werden wird, wurden nämlich zunächst Tastversuche mit unterschiedlichen Massen bei gleicher kinetischer Energie, d.h. unterschiedlichen Geschwindigkeiten eingesetzt, um die rechnerischen Untersuchungen im Abschnitt 5 auch experimentell zu überprüfen.

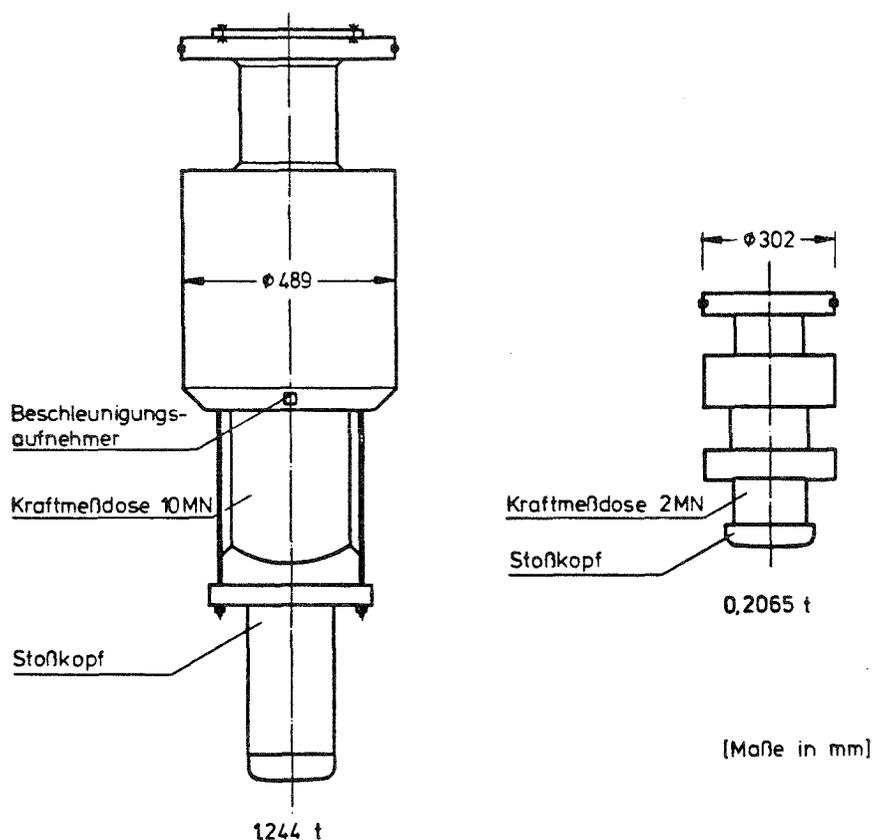


Bild 18: Stoßmassen

Aus den Bildern 16 und 17 läßt sich ebenfalls ableiten, daß bei einer freien Kraglänge der Stahlblechtonne von 80 cm der Stoß hinreichend genau als mittig angreifend, d.h. in einer Höhe von 40 cm wirkend angesehen werden kann.

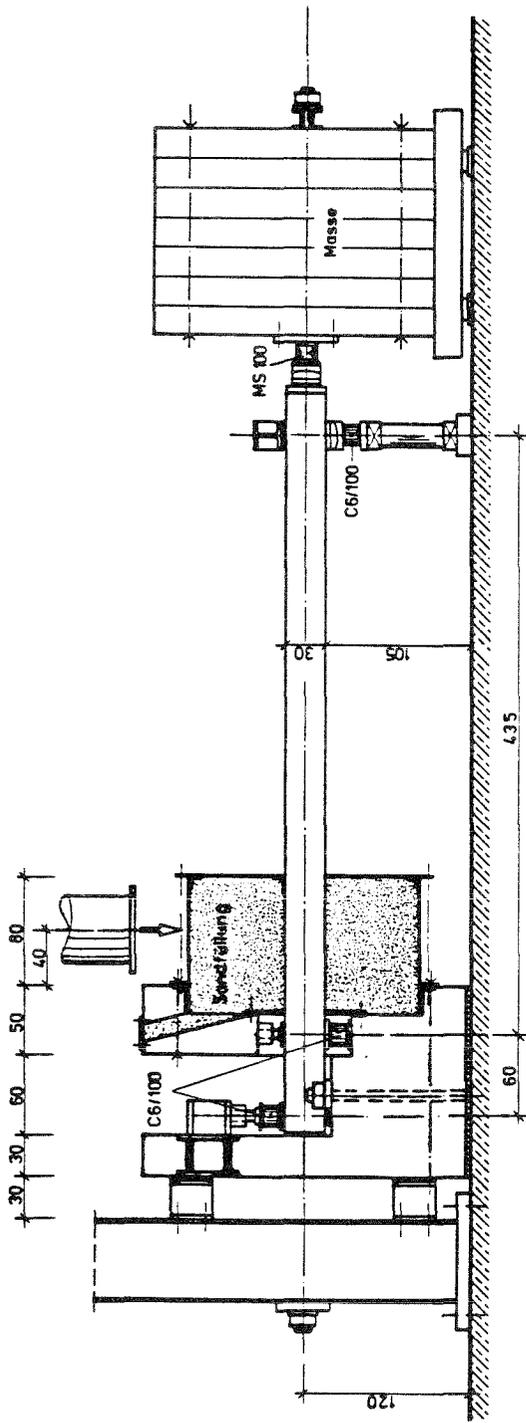
6.3 Versuchsanlage und Meßeinrichtung

Bild 19 zeigt die Versuchseinrichtung. Da der Stoß mit einer Fallgewichtsanlage aufgebracht wurde, mußten die Stützen liegend geprüft werden. Der in der Realität horizontale Querstoß erfolgt im Versuch also vertikal, die Längskraftbelastung horizontal. Um Mißverständnisse zu vermeiden, wird im erläuternden Text bei allen folgenden Orts- und Richtungsbeschreibung an der Stütze von der originalen, d.h. vertikalen Stabachsenrichtung ausgegangen.

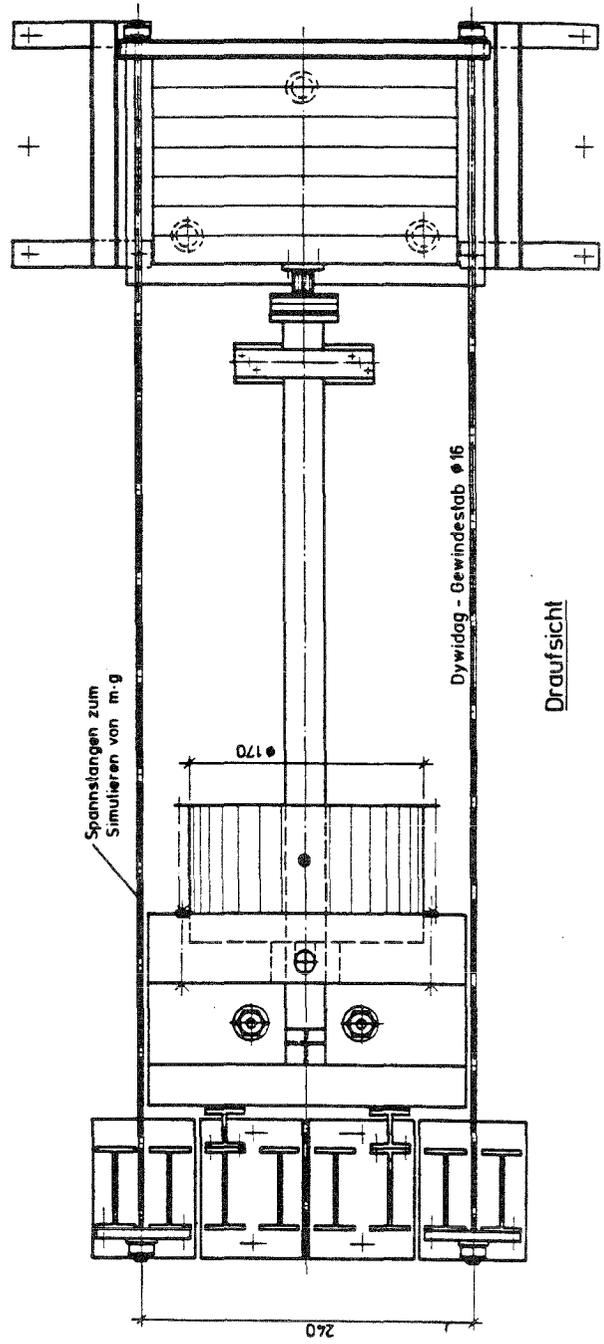
Die Stützen wurden am unteren Ende in einen Fundamentklotz eingespannt. Dieser Klotz war mit Spannstangen gegen den Hallenboden abgespannt und rechtwinklig dazu an steife Spannwände angekoppelt. Die Verschiebungen und Verdrehungen des Klotzes während des Stoßes waren, wie Kontroll-Messungen zeigten, vernachlässigbar.

Diese Trennung von Stütze und Fundament wurde vorgenommen,

- weil so die Auflagerkräfte direkt am Übergang Stütze/Fundament gemessen werden konnten;
- weil die Meßeinstrumentierung der Stützen bei fehlendem Fundamentklotz viel einfacher eingebaut werden konnte;
- weil eine mehrmalige Verwendung der Stahlblechtonnen durch Drehen möglich war;
- die Handhabung einfacher war
- und sich so Material- und Arbeitersparnis ergaben.



Seitenansicht



Draufsicht

Bild 19: Versuchseinrichtung

Problemlös konnten so Stützen unterschiedlicher Materialien und Abmessungen in den abschließenden Fundament-Klotz eingebaut werden. Nach dem Einbringen und Ausrichten der Stützen wurden die beiden Kraftmeßdosen im Klotz jeweils über mit PTFE-Zwischenlage versehene Gewindebolzen vorgespannt.

An die Stahlblechtonnen wurden Laschen angeschweißt, über welche die Tonne ebenfalls an den Klotz angespannt werden konnte. Diese Ausbildung simulierte in etwa die Originallagerung wie in Hamburg ausgeführt. Dort war durch satte Einbindung in die Bodenplatte ebenfalls eine volle Einspannung realisiert (s. Bild 2).

Diese Tonnen waren auswechselbar bzw. nach nur geringer Deformation durch Drehung erneut verwendbar. Über einen Übergangsring konnten unterschiedliche Durchmesser ≤ 170 cm studiert werden.

Zur Simulation der Stützenauflast wurde eine Betonmasse von 20 t verwendet, welche aus Herstellungs- und Transportgründen aus Einzelscheiben zusammengespannt war. Sie konnte auf drei PTFE-Lagern in Längsrichtung gleiten, während eine seitliche Führung, ebenfalls unter Verwendung von PTFE-Lagern, die Querbewegungen dieser Masse kontrolliert.

Die durch die auf die Masse wirkende Erdbeschleunigung hervorgerufene Normalkraft in Stabrichtung wurde mit Hilfe von Spanngliedern simuliert, d.h., die Betonmasse von 20 t wurde durch zwei Spannglieder mit einer Kraft $20 \cdot g \approx 200$ kN über die Stütze gespannt.

Am Stützenkopf wurden einseitig bewegliche Kalottenlager mit PTFE-Gleitschicht für die horizontale und vertikale Auflagerung angeordnet. Um negative Auflagerkräfte, die infolge von Trägheitswirkungen auftreten, messen zu können, wurde das in der Skizze rechte Auflager mit 200 kN gegen den Hallenboden abgespannt (s. Bild 19).

Bedingt durch die 90° -Drehung des Systems muß natürlich verhindert werden, daß der Sand vor dem Versuch aus der Tonne fließt; andererseits sollte eine möglichst geringe Störung des Originalzustandes, d.h. Behinderung des Sandaustritts beim Stoß erreicht werden. Dies wurde durch folgende Maßnahmen erreicht:

Die Sandtonne wurde durch einen Stahlblechdeckel geschlossen. Dieser Deckel war rückwärtig über Zugstangen an den Fundamentklotz angekoppelt. Die Zugstangen hatte Sollbruchstellen, die derart ausgelegt waren, daß sie gerade den seitlichen Druck der Sandfüllung vor dem Versuch aufnehmen

Konnten. Tritt durch den Stoß eine zusätzliche Horizontallast am Deckel auf, reißen die Sollbruchstellen, und der Deckel wird fortgeschleudert. Für den kurzen Zeitraum des Stoßes ist dabei die nun folgende Abwärtsbewegung des Sandes infolge Gravitation unerheblich.

Im Original treten während des Stoßes in den Gleitfugen des Sandes Reibungskräfte infolge der darunterliegenden Auflast auf. Diese Auflast resultiert aus der Eigenlast des über der Fuge liegenden Sandes und wird durch die dort wirkenden Trägheitskräften aktiviert. Die Eigenlast ist ziemlich gering, da die gesamte Sandfüllung der großen Tonne nur 33 kN wiegt und wurde näherungsweise durch die zusätzliche Zugstangenkraft bis zum Bruch simuliert. Die Trägheitskräfte wurden aber auch bei der um 90° gedrehten Versuchsanordnung wirklichkeitsnah geweckt.

Das zuverlässige und rechtzeitige Reißen der Sollbruchstellen wurde im Versuch durch Messen in den Zugstangenkräften kontrolliert (s. z.B. Anlage 6.16). Um die Trägheitskräfte des weggeschleuderten Deckels möglichst gleich denen der originalen Zink-Abdeckung zu halten, wurde die Masse des Deckels durch aufgeschweißte konzentrische Stege und Bemessung nahe der Fließgrenze der Originalabdeckung angenähert.

In allen Versuchen zeigte sich, daß der Deckel direkt nach dem Anprall abgesprengt wurde. Eine befriedigende Annäherung an den Originalzustand wurde somit erreicht.

Der Sand wurde vor dem Einbringen in die Tonne durch Ausbreiten getrocknet und anschließend lagenweise eingefüllt. Mit Außen- und Innenrüttlern wurde abschnittsweise verdichtet. Die im Fundamentklotz eingeplante Einfüllöffnung (s. Bild 19) erwies sich dabei als wenig hilfreich, so daß ab dem zweiten Versuch der Sand durch eine obere Öffnung in der Sandtonne eingefüllt und anschließend die Öffnung wieder zugeschweißt wurde.

Als Meßgrößen - alle in ihrer Veränderung über die Zeit - wurden erfaßt:

- Stoßkraft und teilweise Beschleunigung an der Stoßmasse
- Längskraft am Stützenkopf
- Auflagerkräfte
- Stabquerausbiegungen
- Dehnungen in der Stütze

- Verschiebung der aufliegenden Betonmasse
- Verdrehung des Fundamentklotzes
- Kräfte in den Spannstangen
- Geschwindigkeit der Stoßmasse
- Kräfte in den Zugstangen zur Deckelhaltung
- Temperatur an der Stoßstelle.

Dabei wurden die folgenden Meßwertaufnehmer eingesetzt:

- piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer Typ 808 A der Firma Kistler mit Ladungsverstärker Typ 5001
- Kraftaufnehmer auf Dehnungsmeßstreifenbasis
 - DZK 281/10 MN Brandt
 - C6/100 HBM
 - C6/200 HBM
 - MS 100 Walter
- Widerstandswegaufnehmer "Novotechnik" TLH 150, Meßweg 150 mm
- induktive Wegaufnehmer HBM
 - W 100 (mit speziell für hohe Beschleunigung ausgelegtem Kern)
 - W 5
 - W 1
- elektro-optisches Extensometer 200 x Fabrikat Zimmer 100 kHz/3 dB mit Optik ± 50 mm
- Dehnungsmeßstreifen
 - HBM 6/120 LD 20 (Hochdehnungsmeßstreifen)
 - TM2 FLA 10
 - HBM 6/120 RY 11 (Rosetten).

Die Verstärkung der Meßsignale erfolgte mit den nachstehend aufgeführten Geräten:

- 5 kHz Trägerfrequenzverstärker KWS 3073 (HBM), Grenzfrequenz ≈ 1 kHz,
- 5 kHz Trägerfrequenzverstärker KWS 3082 (HBM), Grenzfrequenz ≈ 1 kHz,
- 5 kHz Trägerfrequenzverstärker KWS 6E-5 (HBM), Grenzfrequenz ≈ 1 kHz,
- Gleichspannungsverstärker KWS 3020 C (HBM), Grenzfrequenz 100 kHz/3 dB,
- Gleichspannungsverstärker (Eigenbau), Grenzfrequenz 100 kHz/3 dB.

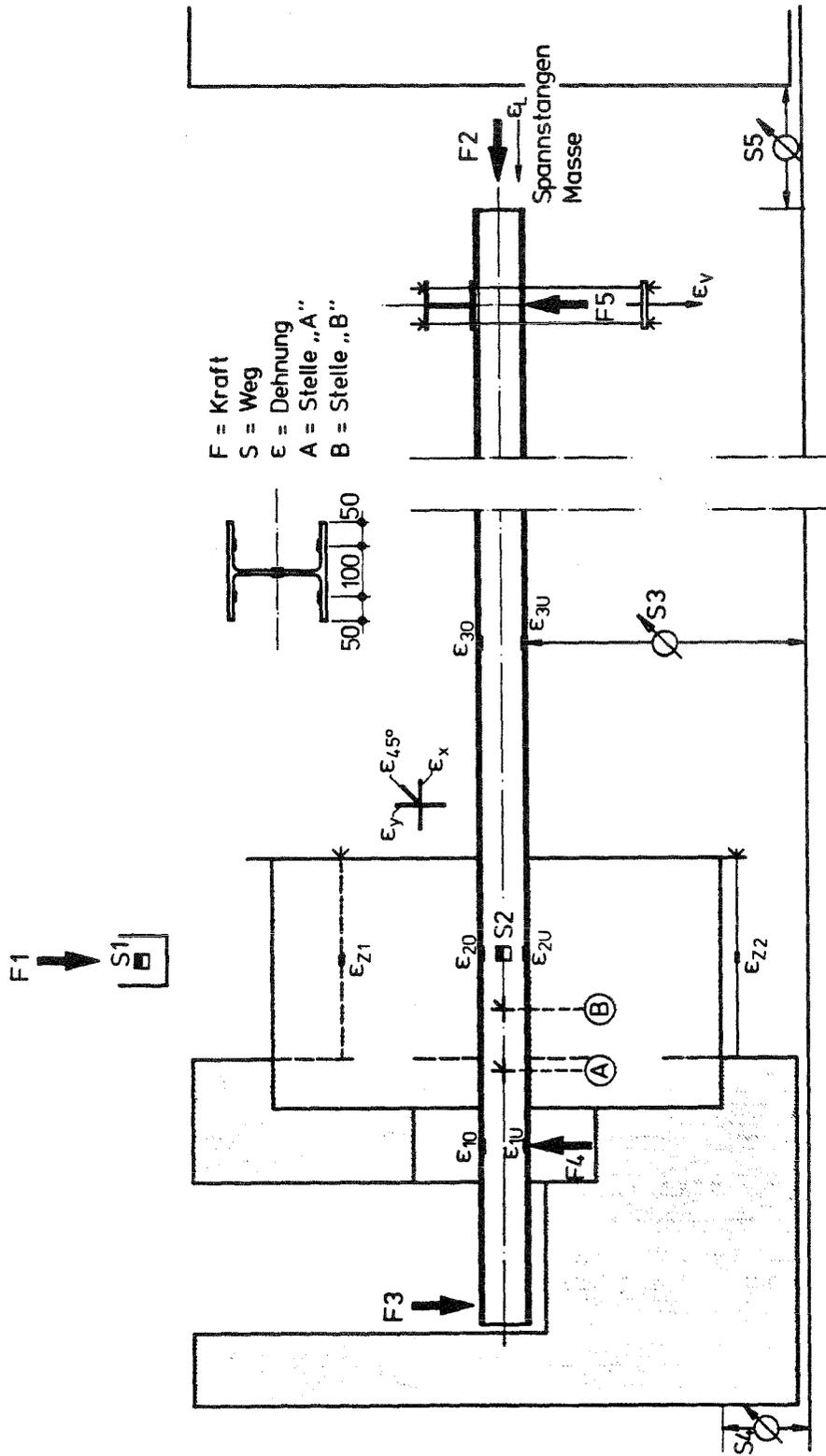


Bild 20: Meßinstrumentierung des Versuchsaufbaus

Registrierung der Meßwerte:

- Transientenrecorder Fabrikat Krenz mit 20 Kanälen, 10 Bit Auflösung, max. Abtastrate 200 kHz
- 14-kanaliges Magnetband CRP 4020, Fabrikat Bell and Howell.

Durch Ableitung der Meßgröße s_1 nach der Zeit konnte die Aufprallgeschwindigkeit bestimmt werden.

Mit Hilfe der beiden DMS-Rosetten im Trägersteg (Stelle A bzw. B) ist eine vollständige Beschreibung des Dehnungszustandes an diesen beiden Stellen möglich. Damit kann, wie in Abschnitt 7 noch näher erläutert wird, indirekt eine Aussage über die Kraft in der Kontaktfuge Sand/Stütze getroffen werden. Dieser Umstand erlaubte es, auf die direkte Messung dieser Kraft, die sehr aufwendig geworden wäre, zu verzichten.

Direkt nach dem Versuch wurden die Meßwerte auf die Institutsrechenanlage PDP 11/34 überspielt und für die Plot-Ausgabe vorbereitet.

Die Versuchsergebnisse wurden mit Hilfe der Karlsruher Universitäts-Rechenanlage Siemens 7881 dargestellt. Dabei wurden die Kurven teilweise leicht mit Spline-Funktionen geglättet, ohne die Signale jedoch unzulässig zu verfälschen.

Generell kann im Hinblick auf die Meßtechnik gesagt werden, daß bei stoßartigen Beanspruchungen im Vergleich mit statischen größere Schwierigkeiten zu bewältigen sind. Wegen der starken Zerstörungen speziell unmittelbar an der Lasteinleitungsstelle läßt sich der Ausfall einzelner Meßwertaufnehmer nicht immer vermeiden. Außerdem muß die ungefähre Größe der Meßsignale vor dem Versuch abgeschätzt werden, um einerseits die Meßbereiche nicht zu überschreiten, andererseits keine zu kleinen Signale zu erhalten, die zur Auswertung so verstärkt werden müßten, daß unerwünschte Störsignale auftreten. Die gleiche Sorgfalt ist auch für die Wahl der Meßwertaufnehmergröße vonnöten. Ein Wegaufnehmer, der während der Messung fast seinen gesamten Meßbereich durchfährt, wird ein weitaus besseres, deutlicheres Meßsignal produzieren, als ein Aufnehmer, der nur auf einem kleineren Abschnitt seiner zur Verfügung stehenden Meßlänge beansprucht wird, da durch die große Verstärkung des Meßsignals das Eigenschwingverhalten des Verstärkers nachteilig verändert wird.

6.4 Versuchsprogramm

Vor den eigentlichen Versuchen wurden Vorversuche durchgeführt, um die Grenzen der Versuchseinrichtung zu ertasten. Diese wurden einerseits durch die Tragfähigkeiten des Fundamentklotzes und der Stützen, andererseits durch die Bereichsgrenzen der Meßwertaufnehmer bestimmt.

Zu diesem Zweck wurde eine Kragstütze HE 200 B in den Fundamentklotz eingespannt und ohne Anprallschutz mit steigender Geschwindigkeit beschossen, wobei sich zeigte, daß die gewünschte Energie von ca. 25 kNm ohne Probleme aufgebracht werden konnte.

Anschließend wurden fünf dynamische Versuche am kompletten System und zwei statische Versuche an den Tonnen allein durchgeführt. Tab. 5 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm.

Zunächst wurden zwei Versuche mit einer kleinen Stoßmasse von 0,2065 t und daran anschließend drei mit einer größeren Stoßmasse von 1,244 t bei konstant gehaltener Stoßenergie durchgeführt. Damit sollte das in Abschnitt 5 theoretisch behandelte Problem des Maßstabes bei der Stoßaufbringung auch im Versuch untersucht werden. Falls es gelingt, auf Grundlage der Versuchsergebnisse eine Aussage zum Übergang von der kleinen zur großen Stoßmasse zu machen, kann auch auf die Original-Gabelstaplermasse extrapoliert werden.

Um für die in Abschnitt 8 beschriebene Näherungslösung mit Hilfe des Zweimassenschwingers Angaben über die Steifigkeit der Tonne zur Verfügung zu haben, wurde in statischen Versuchen außerdem die Kraft-Weg-Beziehung der leeren Tonne ermittelt. Dabei wurde die Tonne an einer noch unbeanspruchten Stelle mit demselben Stoßkopf wie im dynamischen Versuch statisch belastet, wobei die aufgebrachte Kraft und der an der Stoßstelle erzeugte zugehörige Weg gemessen wurde.

Versuch	Stützenprofil	Tonnendurchmesser	Stoßmasse	Stoßgeschwindigkeit	Belastungsgeschwindigkeit	Energie	Impuls	Längskraft in Ruhe ¹⁾	Versuchsergebnisse
		m	kg	m/s	mm/min	kNm	kNs	kN	Anlage
S1-	HE 200 B	ungeschützt	206,5	15,6	-	25,1	3,22	194	6.1 ÷ 6.7
S1+170	HE 200 B	1,70	206,5	15,6	-	25,1	3,22	199	6.20÷6.29
S2-	HE 200 B	ungeschützt	1244	6,4	-	25,5	7,96	200	6.8 ÷6.16
S2+170	HE 200 B	1,70	1244	6,4	-	25,5	7,96	202	6.30÷6.38
S2+110	HE 200 B	1,10	1244	6,4	-	25,5	7,96	188	6.39÷6.47
T 170	-	1,70	-	-	10	-	-	-	6.55
T 110	-	1,10	-	-	10	-	-	-	6.55

¹⁾ Angestrebt waren 196 kN

Tabelle 5: Versuchsprogramm

6.5 Materialkennwerte

Der für die Versuche verwendete Sand war handelsüblicher Betonzuschlag nach DIN 4226/1 (4/83), Korngruppe 0/1. Tab. 6 zeigt die Ergebnisse der Dichtebestimmungen, die am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, durchgeführt wurden. Die Materialkennwerte der beiden Stützenprofile HE 200 B (s. Tab. 6) wurden am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Massivbau, Universität Karlsruhe bestimmt.

Versuch			S1+170	S2+170	S2+110
Sandkörnung gemäß DIN 4226			0/1		
Kornform			kantig		
Korndichte gemäß DIN 18124/1 (3/73) [g/cm ³]			2,669		
Dichte bei lockerster Lagerung min φ_0 gemäß Vornorm DIN 18126 (3/81) [g/cm ³]			1,327		
Dichte bei dichtester Lagerung max φ_0 gemäß Vornorm DIN 18126 (3/81) [g/cm ³]			1,631		
Lagerungsdichte D gemäß DIN 18126 (3/81)			1) -	0,50 mitteldicht bis dicht	0,50 mitteldicht bis dicht
Blechdicke der Tonne [mm]			6		
Material der Tonne			ST 37		
Material der Stütze			ST 37		
Stütze	Re	[N/mm ²]	300	300	
	Rm	[N/mm ²]	391	391	
	A5	[%]	42,8	41,7	
	Ag	[%]	28,6	28,8	

1) Es liegen keine Ergebnisse vor

Tabelle 6: Materialkennwerte

6.6 Versuche S1

6.6.1 Der Stoß ohne Anprallschutz (Versuch S1-)

Die Meßergebnisse des Versuchs S1- sind in den Anlagen 6.1 bis 6.7 dargestellt. Anlage 6.1 zeigt die Stoßkraft an der Stoßmasse F_1 . Man erkennt die für einen harten Stoß typische, erste, scharfe Stoßkraftspitze von ca. 1500 kN. Nachfolgend treten nur noch ca. 400 kN auf, entsprechend der Fließlast der auf Biegung beanspruchten Stütze.

Die Meßgröße s_3 läßt eine plastische Mittenverformung von ca. 10 mm erkennen. Die plastische Verformung an der Stoßstelle (s_2) liegt bei etwa 24 mm.

Der Verlauf der Längskraft hat den schon in früheren Forschungsvorhaben beobachteten (s. [6]) und in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Verlauf. Die Längskraft fällt zunächst ab, weil der Stützenkopf von der aufliegenden Masse "wegfährt" und steigt dann über den Ruhezustand hinaus an, wenn die Masse den Stützenkopf eingeholt hat.

Anlage 6.2 zeigt die Kräfte F_1 , F_2 , sowie die Verschiebungen s_2 und s_3 über einen doppelt so großen Zeitraum wie in Anlage 6.1.

In Anlage 6.3 sind die drei Auflagerkräfte F_3 , F_4 und F_5 dargestellt. Bei F_4 wurde auf der Zugseite der Meßbereich überschritten, so daß die Schwingung bei ca. -80 kN gekappt ist.

Anlage 6.4 zeigt die Krümmungen κ_2 und κ_3 . Sie wurden aus den Flanschdehnungen ermittelt unter der Annahme, daß die Querschnitte eben seien.

Der Verlauf von κ_3 zeigt einen ersten Ausschlag in die positive Richtung, was negativen Momenten entspricht. Diese sind eine Folge der wellenförmigen Ausbreitung der Stoßbeanspruchung, wie schematisch in Bild 5 dargestellt. Zu Beginn wölbt sich die Stützenmitte nach oben; anschließend schlägt die Stütze dann nach unten durch, wie die nachfolgende negative Krümmung erkennen läßt.

Bei κ_2 ist der erste Spitzenwert sofort so groß ($\kappa_2 = 21$ [1000/m]), daß die Stütze an dem der Stoßmasse zugewandten Flansch gleich zu Beginn eine plastische Dehnung erfährt. Diese Spitzendehnung beträgt

$$\epsilon_{\max} = +4,0 \text{ } ^\circ/\text{oo}$$

und die bleibende plastische Flanschdehnung

$$\epsilon_{p1} = +1,7 \text{ } ^\circ/\text{oo}.$$

Dementsprechend zeigt die Krümmung κ_2 kaum Anteile mit umgekehrten Vorzeichen.

Die Vorspannkraft in Querrichtung am rechten Auflager V_V schwingt durch das Auf- und Niederschlagen des Stützenendes, wodurch die Spannstangen mehr oder weniger gedehnt werden.

Die Vorspannkraft der Masse V_L in Längsrichtung fällt mit dem Verfahren der aufliegenden Masse in Richtung der Stütze ab.

Anlage 6.5 zeigt die in der Stabachse an der Stelle "A" im Steg gemessenen Dehnungen ϵ_x und ϵ_y sowie die aus dieser und der unter 45° gemessenen Dehnung ϵ_{45} ermittelte Gleitung oder Schubverzerrung γ , Anlage 6.6 die aus den gemessenen Dehnungen errechneten Hauptdehnungen und den Winkel der Hauptdehnungen. Die Stütze erleidet starke plastische Verformungen. Der Winkel der Hauptdehnung α beträgt ziemlich genau 135° , d.h., die Hauptbeanspruchungen sind um 45° zur Stabachse geneigt.

Die vertikale Verschiebung des Fundamentklotzes s_4 (s. Anlage 6.7) liegt im Mikrometerbereich. Die Annahme einer vollen Einspannung des Auflagers ist also gerechtfertigt. Lediglich die Zusammendrückbarkeit der Kraftmeßdosen bauen den Einspanngrad etwas ab.

Die Betonmasse wandert während des Stoßes um ca. 1,4 mm nach innen (s. s_5) mit einem Verlauf von s_5 , der in etwa affin zum Verlauf des Vorspannkraftverlustes an den horizontalen Spannstangen (s. ΔV_L , Anlage 6.4) ist.

6.6.2 Der Stoß mit Anprallschutz (Versuch S1+170)

Anlage 6.8 zeigt wiederum die Stoßkraft F_1 an der Stoßmasse. Diese Stoßkraft ist jedoch nicht gleich der Kraft, die auf die Stütze wirkt, da ein erheblicher Anteil noch durch die Trägheit des dazwischengeschalteten Sandes aufgenommen wird.

Die Verschiebung s_3 läßt erkennen, daß die Stütze im elastischen Bereich verbleibt, da der maximale Ausschlag viel geringer ist als beim Versuch S1-.

F_2 zeigt zwar qualitativ denselben Verlauf wie bei dem ungeschützten Stoß, die Amplituden sind jedoch aufgrund der viel geringeren Querausbiegung wesentlich kleiner.

Auch alle übrigen Meßwerte (s. Anlagen 6.9 bis 6.15) sind deutlich kleiner als im Versuch S1- und vollkommen reversibel.

In Anlage 6.16 sind die Dehnungen der Zugstangen mit denen der Deckel rückwärtig verankert wurde, dargestellt. Dabei ist ϵ_{z1} die Dehnung einer der beiden obersten Stangen, ϵ_{z2} die der untersten Stange. Man erkennt, daß kurz nach Stoßbeginn die Dehnung ϵ_{z1} ansteigt, bis die Bruchspannung in der Sollbruchstelle erreicht ist. Die Stange reißt, die Spannung fällt ab und schwingt gegen den Nullzustand aus.

Die unteren Stangen rissen nicht; der Deckel öffnete sich jedoch im oberen Bereich, so daß die gewünschten Sandbewegungen stattfinden konnten.

6.6.3 Vergleich von S1- mit S1+170

In den Anlagen 6.17 bis 6.19 sind jeweils fünf charakteristische Meßwerte der Versuche S1- und S1+170 einander gegenübergestellt. Deutlich ist die große Abschirmwirkung der Schutzkonstruktion zu erkennen. In Anlage 6.19 unten sind die Dehnungen ϵ_I in unterschiedlichem Maßstab dargestellt, weil das ϵ_I der geschützten Konstruktion ansonsten fast nicht mehr zu erkennen wäre (s. Anlage 6.19 oben).

6.7 Versuche S2

6.7.1 Der Stoß ohne Anprallschutz (Versuch S2-)

Die Versuche S2 unterscheiden sich von den vorherigen dadurch, daß hier dieselbe Stoßenergie mit einer größeren Masse, dafür mit kleinerer Geschwindigkeit aufgebracht wurde. Die Meßwertamplituden blieben in etwa gleich groß, der Stoß wird jedoch länger (vgl. Anlagen 6.1 und 6.20).

Dieses Verhalten wurde bereits in Abschnitt 5 prognostiziert.

Zu den Anlagen 6.20 bis 6.28 gilt das in Abschnitt 6.6.1 Gesagte.

Zusätzlich wurde bei diesem Versuch die Temperatur in der Stütze direkt unter der Stoßmasse während des Stoßvorgangs gemessen. Dazu wurde ein Thermoelement bündig in eine kleine Bohrung an der Stoßstelle geklebt. Anlage 6.29 zeigt die gemessene Temperatur im zeitlichen Bezug zur Stoßkraft F_1 . Im oberen Diagramm erkennt man die Wiederholungstöße, die dadurch entstehen, daß die Masse nach dem Stoß wieder hochgeschleudert wird und erneute aus geringerer Höhe herabfällt.

Die Temperatur steigt um ca. 2 K an, und zwar mit einer gemessen an der Stoßdauer relativ großen zeitlichen Verzögerung. Die Oberschwingungen in der Kurve rühren dabei vom Meßsystem her.

6.7.2 Der Stoß mit großem Anprallschutz (Versuch S2+170)

Die Anlagen 6.30 bis 6.38 zeigen die Meßergebnisse des Stoßes mit großer Stoßmasse und großem Anprallschutz (Tabelle 5). Außer der größeren Stoßdauer sind keine signifikanten Unterschiede zum Versuch S1+170 zu erkennen.

6.7.3 Der Stoß mit kleinem Anprallschutz (Versuch S2+170)

In den Anlagen 6.39 bis 6.47 sind die Ergebnisse des Stoßes mit großer Stoßmasse und kleinem Anprallschutz dargestellt.

In Anlage 6.39 bezeichnet s_1 die Verschiebung der Stoßmasse. Da Stoßmasse und Blechzylinder sich nach dem Stoß wieder voneinander entfernen, kann aus dem abfallenden Ast von s_1 nicht auf eine bleibende Verformung der Tonne geschlossen werden. Die nach dem Versuch gemessene bleibende Deformation der Tonne betrug 91 mm.

6.7.4 Vergleich der Versuche S2-, S2+170, S2+170

In den Anlagen 6.48 bis 6.51 sind die Versuche S2- - ohne Anprallschutz - S2+110 - kleiner Anprallschutz - und S2+170 - großer Anprallschutz - vergleichend gegenübergestellt.

Die enorme Abschirmwirkung sowohl der großen wie auch der kleinen Tonne wird sehr deutlich. Erwartungsgemäß läßt die kleine Tonne jedoch etwas mehr Stoßenergie zur Stütze vordringen als die große (s. F_4 , Anlage 6.48; κ_1 , Anlage 6.49 unten; κ_2 , Anlage 6.50 unten; ϵ_I , Anlage 6.51 unten). Die Mehrbeanspruchungen für die Stütze bei kleinem Anprallschutz sind jedoch gering.

6.8 Vergleich der Versuche S1- und S2-

In den Anlagen 6.52 bis 6.54 sind jeweils einige signifikante Meßwerte der Versuche S1- und S2- einander gegenübergestellt. In beiden Versuchen wurde eine Stoßenergie von

$$E_{KIN} = 25 \text{ kNm}$$

aufgebracht,
jedoch einmal in der Konstellation

$$S1-: m_0 = 0,2065 \text{ t}, v_0 = 15,6 \text{ m/s},$$

das andere Mal mit

$$S2-: m_0 = 1,2445 \text{ t}, v_0 = 6,4 \text{ m/s}.$$

Wie schon in Abschnitt 5 diskutiert, ist theoretisch nur eine Streckung der Meßwertverläufe bei der großen Masse, aber keine Veränderung der Amplituden zu erwarten. Dabei kann diese Aussage aber, wie schon in Abschnitt 5 erläutert, nur für das globale Biegeschwingverhalten gelten; lokale Effekte, die durch Relativbewegungen der Stoßmasse und der gestoßenen Masse bestimmt werden, sind dabei nicht eingeschlossen.

In dem Rahmen der Genauigkeit für dynamische Stoßversuche wird diese Vorhersage durch die Versuche bestätigt. Das Plateau der Stoßkraft F_1 liegt bei beiden Versuchen bei etwa 400 kN (s. Anlage 6.52), nur ist es bei S2- zeitlich viel gestreckter. Die unterschiedlichen Kraftspitzen resultieren aus unterschiedlichem lokalem Verhalten.

Die maximalen Amplituden der Querausbiegungen s_3 sind praktisch gleich (s. Anlage 6.52), ebenso die der Auflagerkräfte F_4 (s. Anlage 6.53). Auch die Hauptzugdehnungen an der Stelle "A" (s. Anlage 6.54) zeigen fast dieselbe Amplitude; bei den Krümmungen κ_3 sind die Abweichungen größer.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß es durchaus möglich ist, Stöße einer für Versuchsbedingungen zu großen Masse durch eine kleinere Masse mit einer entsprechenden Erhöhung der Stoßgeschwindigkeit bei gleicher kinetischer Energie zu simulieren. Die Verletzung der Impulsbedingung (s. Abschnitt 5) resultiert in einer Verzerrung des Zeitverlaufs, die aber in der Regel in Kauf genommen werden kann.

6.9 Statische Versuche an den leeren Stahlblechtonnen

In Abschnitt 8 wird eine Näherungslösung für den stoßbeanspruchten Anprallschutz entwickelt. Das gestoßene System wird dabei als Zweimassenschwinger abgebildet. Um zutreffende Ergebnisse zu erhalten, ist es wichtig, die Kraft-Verformungs-Charakteristik der leeren Stahlblechtonnen zu kennen.

Dazu wurde je eine Stahlblechtonne $d = 170$ cm und $d = 110$ cm leer in dem Fundamentklotz eingespannt. Die Tonnen waren zuvor noch keiner Belastung ausgesetzt gewesen. Über einem Hydraulikzylinder wurden die Tonnen an derselben Stelle und in derselben Richtung wie in den Stoßversuchen statisch belastet. Auch dieselbe Lasteinleitungsplatte wie in den Stoßversuchen wurde benutzt. Der Versuch erfolgte weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 1 cm/min. Gemessen wurde die aufgebrachte Kraft und der erzeugte Weg der Lasteinleitungsplatte.

Anlage 6.55 zeigt die Ergebnisse der beiden Versuche. Man erkennt, daß die Tonne mit dem Durchmesser 110 cm wegen ihrer größeren Krümmung eine deutlich höhere Traglast aufweist als die Tonne mit dem Durchmesser 170 cm.

Der Übergang in einen abfallenden Ast erfolgt bei $d = 110$ cm nach einer größeren Durchbiegung als bei $d = 170$ cm.

Beide Kraft-Verformungs-Charakteristiken können mit ausreichender Genauigkeit durch ein ideal elastisch / ideal plastisches Gesetz angenähert werden (s. Bild 23).

7. Die Abschirmwirkung

In den Abschnitten 6.6.3 und 6.7.4 wurden bereits Meßergebnisse jeweils mit und ohne Anprallschutz einander vergleichend gegenübergestellt. Die Abschirmwirkung kann damit aber nur in ihrer Auswirkung auf verschiedene Stützenreaktionen beurteilt werden. Eine direkte Beurteilung wäre durch den Vergleich der auf die Stütze ausgeübten Stoßkraft jeweils mit und ohne Anprallschutz möglich. Beim ungeschützten Stoß kann diese Kraft an der Stoßmasse gemessen werden. Beim Stoß mit Anprallschutz sind aber die Stoßkraft an der Stoßmasse und die auf die Stütze einwirkende Kraft verschieden voneinander, weil ein nicht unerheblicher Teil der Kraft unter der Stoßmasse durch Trägheitskräfte des Sandes und Biegesteifigkeit der Tonne aufgenommen wird und die Stütze gar nicht erst erreicht.

Zunächst wurde erwogen, die Kraft direkt in der Kontaktfuge Sand/Stütze zu messen.

Einigermaßen zutreffende Ergebnisse wären aber nur mit flachen Kraftmeßplatten auf Quarzbasis zu erzielen gewesen, von denen jedoch wegen der großen Lastfläche (ca. 0,20 x 1,00 m) eine große Anzahl erforderlich gewesen wäre; dies hätte den finanziellen Rahmen weit überschritten. Von einer direkten Messung in der Kontaktfuge wurde deshalb Abstand genommen.

Stattdessen wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

Die Stahlstützen blieben bei den Versuchen mit Anprallschutz alle im elastischen Bereich. Es bereitete also keine Schwierigkeiten, die Stützen relativ zutreffend mit Finiten Elementen abzubilden. In dieser FE-Rechnung wurde nun eine dynamische Last derart aufgebracht, daß die Stützenreaktionen (Durchbiegungen, Krümmungen, Kräfte) zutreffend wiedergegeben wurden. Diese so ermittelte Last kann mit ausreichender Genauigkeit als die im Versuch zwischen Sand und Stütze auftretende Kraft angesehen werden.

Beim Ansetzen des zeitlichen Verlaufs dieser Kraft in der Rechnung wurde angenommen, daß die Kraft affin zum zeitlichen Verlauf der Hauptdruckspannung an der Stoßstelle ist. Diese Hauptdruckspannungen wurden zuvor im Versuch gemessen, so daß der zeitliche Verlauf der Kraft für die

Rechnung vorlag. Mit Hilfe einer Rechnung unter Einheitslast mit eben diesem Kraft-Zeit-Verlauf konnte durch Vergleich der Stützenreaktionen (Durchbiegungen, Krümmungen, Kräfte) die Lastamplitude bestimmt werden, so daß die gesuchte Beanspruchung in Größe und zeitlichem Verlauf ermittelt war. Die Verteilung der Last wurde als gleichmäßig und konstant über die Kontaktfuge Sand-Stütze angenommen.

Bild 21 zeigt die normierten Hauptspannungsverläufe aus dem Versuch und die normierte Lastapproximation - die Eingabe - für die Rechnung.

Mit diesen Approximationen wurden folgende Amplituden mit gut übereinstimmendem zeitlichen Verlauf ermittelt:

$$\begin{aligned} S1+170 &: 100 \text{ kN} \\ S2+170 &: 80 \text{ kN} \\ S2+110 &: 108 \text{ kN.} \end{aligned}$$

Die Größenordnung der oben ermittelten Werte kann zusätzlich durch folgende Rechnung bei Vernachlässigung von Trägheitseinflüssen überprüft werden. Es gilt:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot t}$$

$$\tau = \gamma \cdot G$$

mit τ = Schubspannung
 Q = Querkraft
 S = statischem Moment
 J = Trägheitsmoment
 G = Schubmodul
 t = Dicke an der untersuchten Stelle.

Daraus folgt:

$$Q = \frac{\gamma \cdot G \cdot J \cdot t}{S}$$

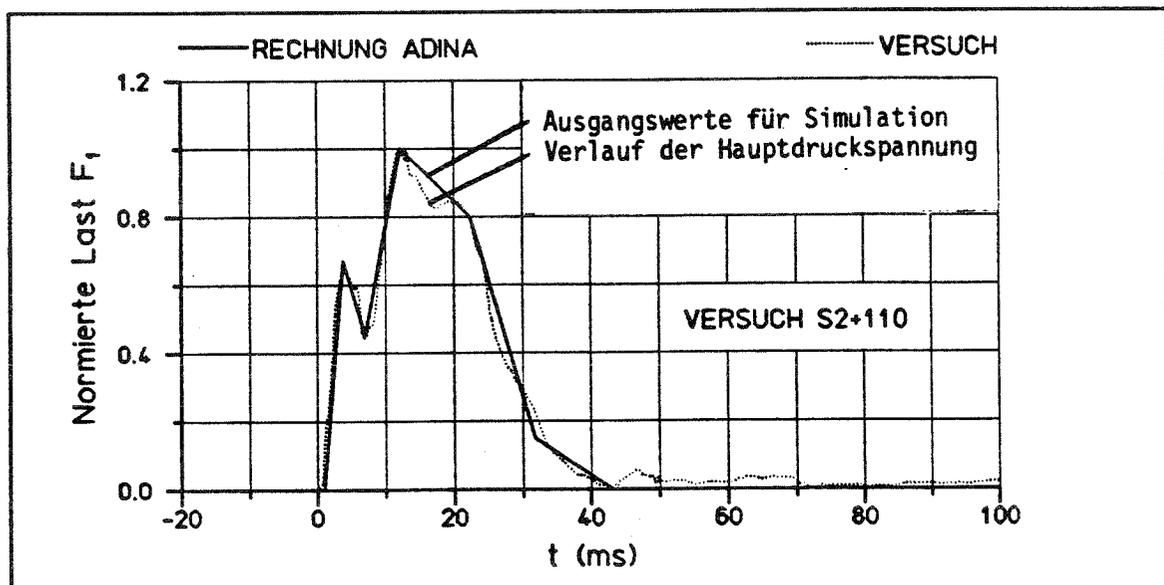
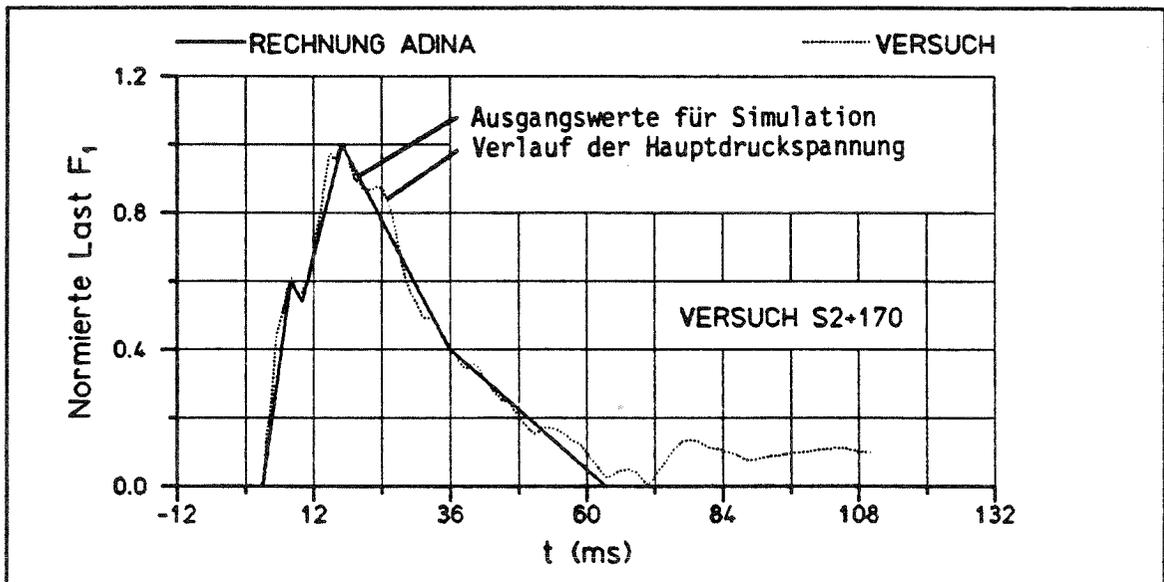
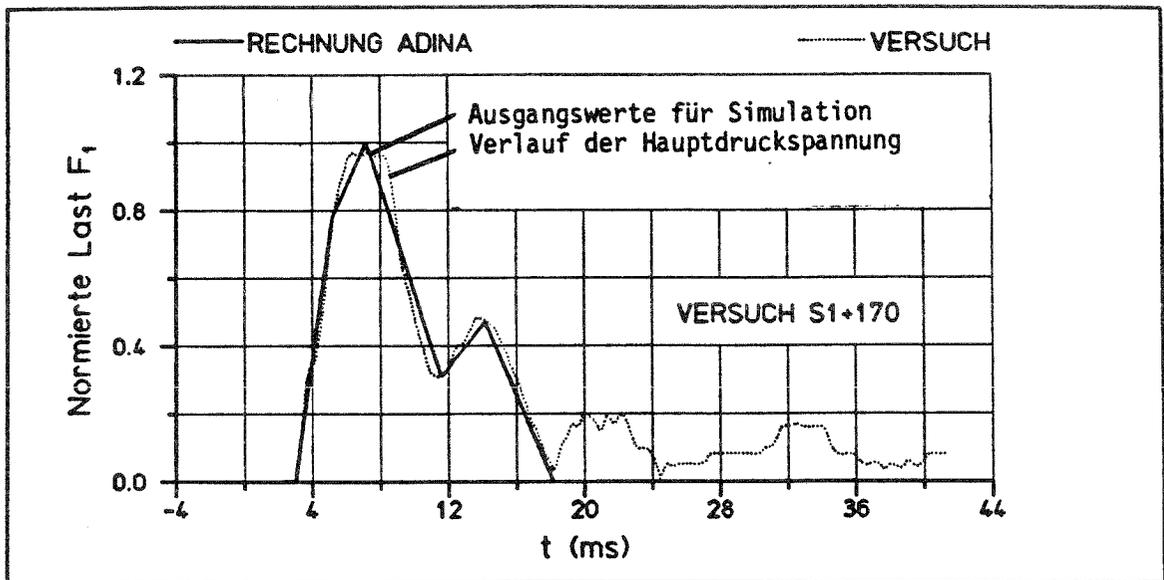


Bild 21: Normierte Hauptspannungsverläufe und Approximationen

Einsetzen ergibt für die Querkraft an der Stelle "B":

$$S1+170 : Q(B) = \frac{0,45 \cdot 8,08 \cdot 5700 \cdot 0,9}{321} = 58 \text{ kN}$$

$$S2+170 : Q(B) = 0,384 \cdot 129 = 50 \text{ kN}$$

$$S2+110 : Q(B) = 0,576 \cdot 129 = 74 \text{ kN}$$

Da die Stelle "B" in etwa in der Mitte der Lasteinzugsfläche liegt, kann die maximale resultierende Stoßlast in etwa abgeschätzt werden mit

$$F \approx 2 \cdot Q(B)$$

$$S1+170 : F = 116 \text{ kN}$$

$$S2+170 : F = 100 \text{ kN}$$

$$S2+110 : F = 148 \text{ kN.}$$

Man erkennt, daß das Verhältnis der Kräfte zueinander in etwa gleich dem der durch die Iteration am FE-Modell ermittelten Kräfte ist. Die globale Abweichung von ca. 26 % ist unter anderem durch die ungleichmäßige Lastverteilung, den Einfluß des umgebenden Sandes und durch Trägheitseinwirkungen zu erklären.

Der Vergleich der Stützenreaktion aus Rechnung und Versuch (hier die Durchbiegung s_3 und die Krümmung κ_3) sind in den Anlagen 7.1, 7.2 und 7.3 einander gegenübergestellt. Man erkennt die gute Annäherung, die erzielt wurde.

Damit sind nun Last-Zeit-Funktionen für den Stoß mit Anprallschutz bekannt, die mit den Funktionen aus den Versuchen ohne Anprallschutz verglichen werden können.

Des weiteren wurde in der Rechnung die mittlere Verschiebung der Stoßstelle bestimmt. Bildet man das Integral der Kraft zwischen Stütze und Sand über diese Durchbiegung, so erhält man die in die Stütze eingeleitete Energie.

In den Anlagen 7.4 bis 7.9 sind für die drei Versuche S1+170, S2+170, S2+110 die Kraft-Zeit-Funktion, die Verschiebungs-Zeit-Funktion, die Kraft-Verschiebungs-Funktion und die Energie-Zeit-Funktion aufgetragen. Dabei erkennt man, daß nach Ende des Stoßvorganges Energie in den Stützen verbleibt (s. Anlagen 7.5, 7.7, 7.9). Da die Rechnungen wegen der geringen auftretenden Beanspruchungen mit linear-elastischem Stoffgesetz durchgeführt wurden, ist diese in der Stütze verbleibende Energie keine plastische Deformation, sondern ausschließlich kinetische Energie, mit der die Stütze nach Beendigung des Stoßvorganges weiterschwingt. Im Versuch wird die Ausschwingamplitude hingegen durch die Energiedissipation im umgebenden Sand vermindert, so daß kleinere Rückschwingamplituden auftreten als nach der Größe der verbleibenden kinetischen Energie bei elastischem Verhalten zu erwarten sind (s. Anlagen 7.5 und 6.8).

Nachfolgend sind für die Stöße mit und ohne Anprallschutz die in die Stütze eingeleiteten Energien zusammengestellt, wobei für die Stöße ohne Anprallschutz die Eingangsenergie der Stoßmasse angegeben ist.

Versuch	Energie [kNm]
S1-	25,1
S1+170	0,099
S2-	25,5
S2+110	0,15
S2+170	0,064

8. Näherungslösung mit Hilfe des Zweimassenschwingers (ZMS)

Eine "exakte" rechnerische Vorhersage, in welcher Größe Kontakt-Stoßkräfte beim Anprall auf die Sandtonne auftreten, gestaltet sich sehr schwierig. Blechtonne, Sand und Stütze müßten räumlich mit Finiten Elementen abgebildet und dynamisch untersucht werden, ein Aufwand, der für die Praxis unvertretbar ist.

Hier wurde deshalb der Versuch unternommen, mit einem stark vereinfachten Modell dem Geschehen zumindest näherungsweise gerecht zu werden.

Dabei wurden folgende Überlegungen angestellt (s. Bild 22):

Die Stoßmasse m_0 stößt auf den gefüllten Blechbehälter. Der Stoßmassenbewegung wird dabei von den folgenden Komponenten Widerstand entgegengesetzt:

- von der in den Fundamentklotz eingespannten Tonne
- von dem komprimierten Sand
- von der Reibung in den Scherfugen
- von der Trägheit des Teils des Sandes, der in Bewegung versetzt wird.

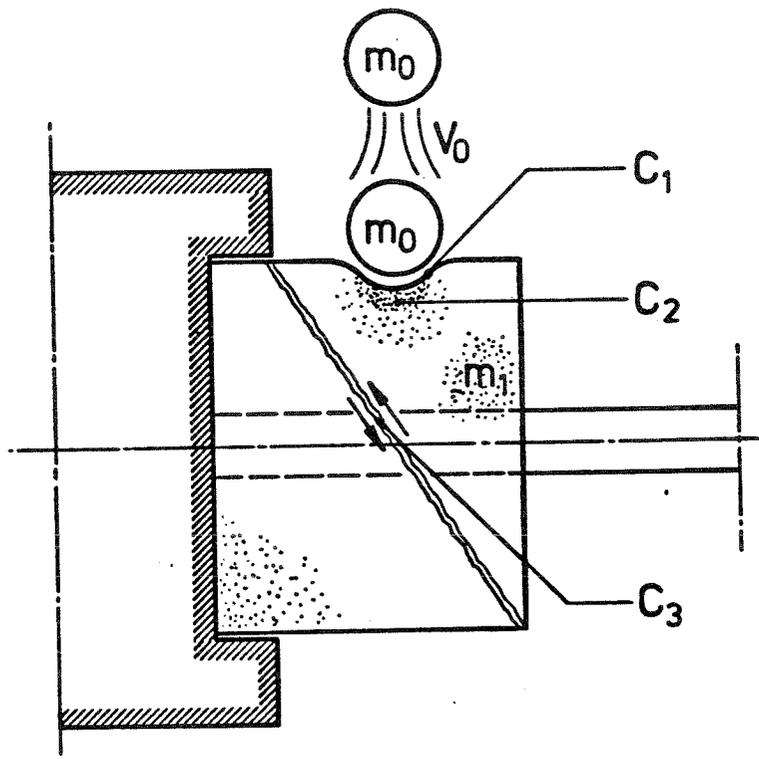


Bild 22: Prinzipielles Verhalten der Sandtonne

Der Einfluß der Stütze wird dabei vernachlässigt, d.h., sie wird als unendlich starr vorausgesetzt, was im Vergleich zu den auftretenden Verformungen der Tonne und des Sandes sicher gerechtfertigt ist.

Unter diesen Voraussetzungen kann man die gestoßene Sandtonne als Zweimassenschwinger abbilden (s. Bild 23).

Die Masse m_1 charakterisiert dabei die Masse des in Bewegung gesetzten Sandes, c_1 den Widerstand der Stahltonne, c_2 und c_3 die Eindrückung des Sandes und dessen Reibungswiderstandes in den Scherfugen.

Für die Masse m_1 wurde unter Annahme einer Scherfuge nach Bild 22 näherungsweise die halbe Gesamtsandmasse angesetzt. Die Feder c_1 wurde an den leeren Tonnen $\emptyset 170$ und $\emptyset 110$ experimentell bestimmt (s. Anlage 6.55) und durch jeweils eine elasto-plastische Feder idealisiert (s. Bild 23).

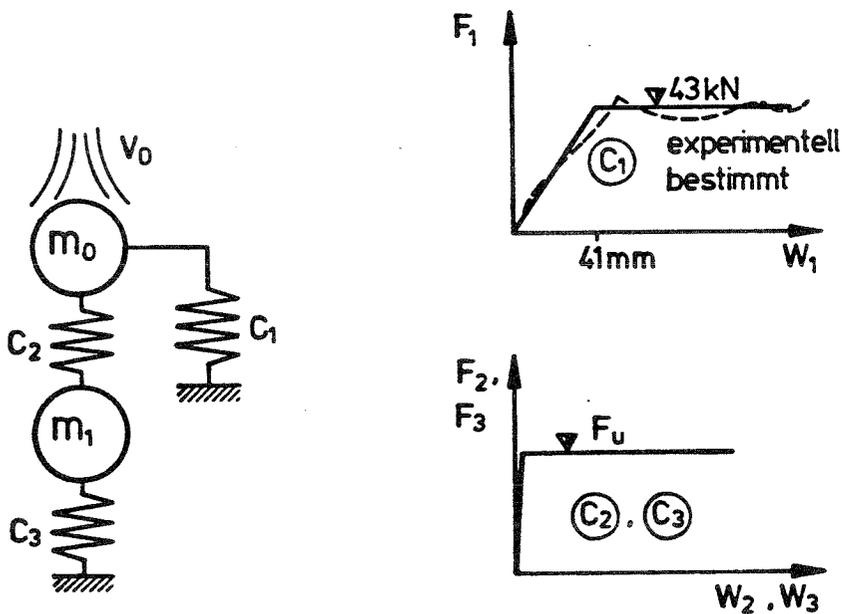


Bild 23: System zur näherungsweisen Berechnung des Stoßvorganges, Federcharakteristiken

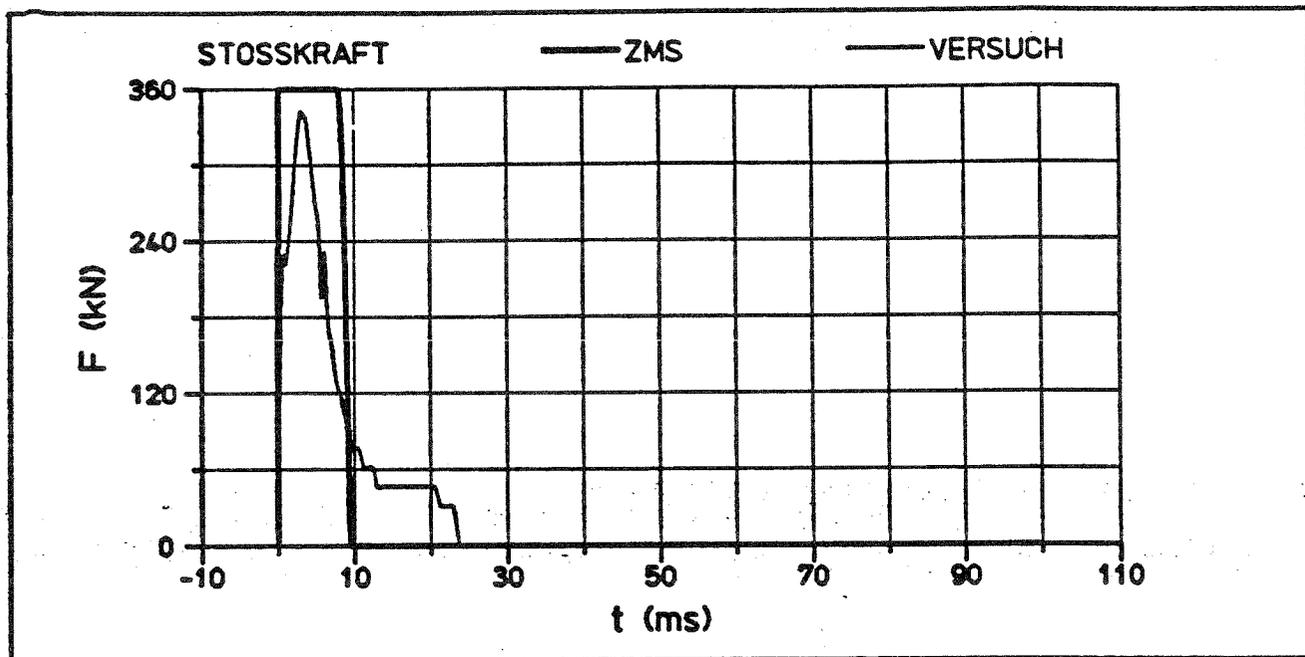
Die Federn c_2 und c_3 wurden als starr-elastisch/plastische Federn angesetzt. Sodann wurde die maximale Last F_u variiert, da hierzu keine experimentellen Aussagen vorlagen.

Die Kraft in der Feder c_2 ist die auftretende Stoßkraft, die mit der gemessenen verglichen werden kann (s. Bilder 24, 25 und 26). Dabei zeigte sich, daß beim kurzen Stoß mit kleiner Masse (S1+170) ein höheres F_u einzuführen ist als bei den beiden langen Stößen.

In die Rechnung wurden der Einfachheit halber zug- und druckfeste Federn c_1 , c_2 und c_3 eingeführt, was natürlich nicht der Wirklichkeit entspricht.

Da aber die Zustände nach der maximalen Annäherung der Massen hier nicht mehr interessieren, konnte die Darstellung des gerechneten Stoßkraftverlaufes beim ersten Nulldurchgang vor dem Auftreten der ersten Zugkräfte abgebrochen werden. Somit ist der angegebene Verlauf bis zum Trennen der beiden Massen auch mit dieser Vereinfachung korrekt wiedergegeben.

Die Bilder 24, 25 und 26 zeigen eine befriedigende Übereinstimmung der Verläufe zwischen Rechnung und Versuch, wenn eine Eichung der Berechnung wie beschrieben an Hand der gemessenen Stoßkraft erfolgt. Deutlich läßt sich ein Trend erkennen, wonach F_u stärker von der Stoßgeschwindigkeit abhängt als vom Sandtonnendurchmesser.



NÄHERUNGSLÖSUNG MIT HILFE DES ZWEIMASSENSCHWINGERS
VERSUCH S1+170
 $m_0 = 0.207t$, $v_0 = 15.6 \text{ m/s}$, $m_1 = 1.750 t$
 $F_{10} = 43 \text{ kN}$, $F_{20} = F_{30} = 360 \text{ kN}$, $k_1 = 1050 \text{ kN/m}$

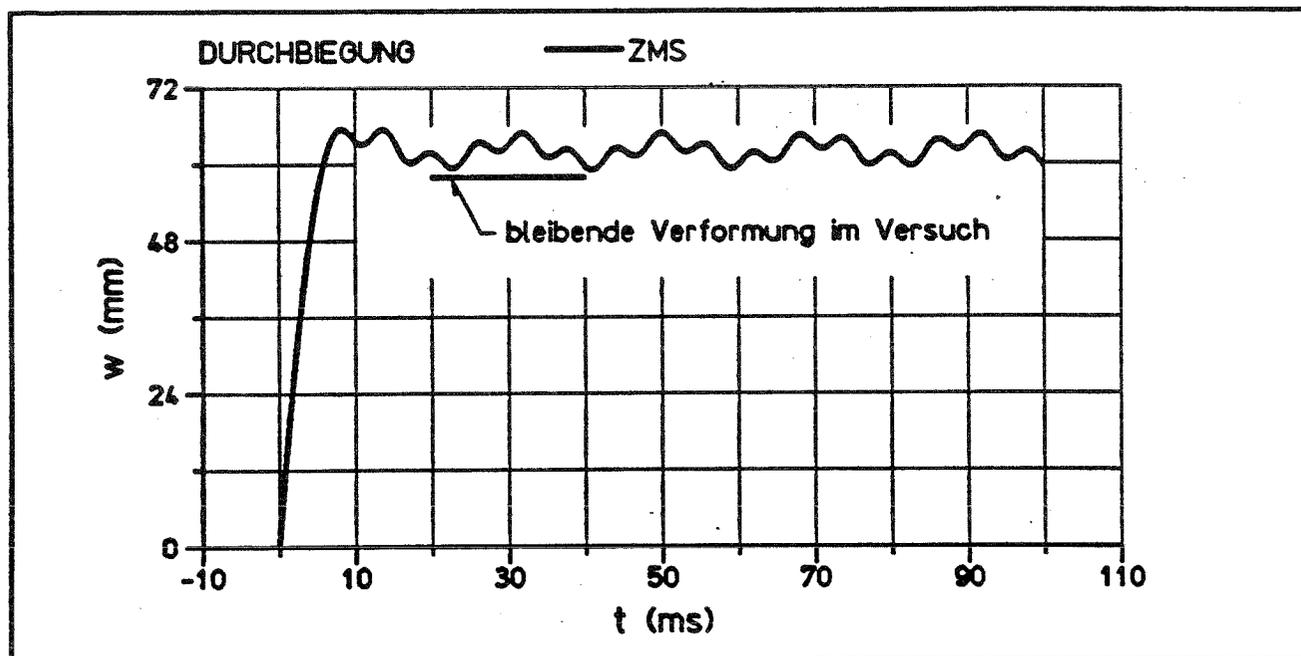


Bild 24: Versuch S1+170, Vergleich der Näherungslösung
 - Zweimassenschwinger (ZMS) - mit den Versuchsergebnissen

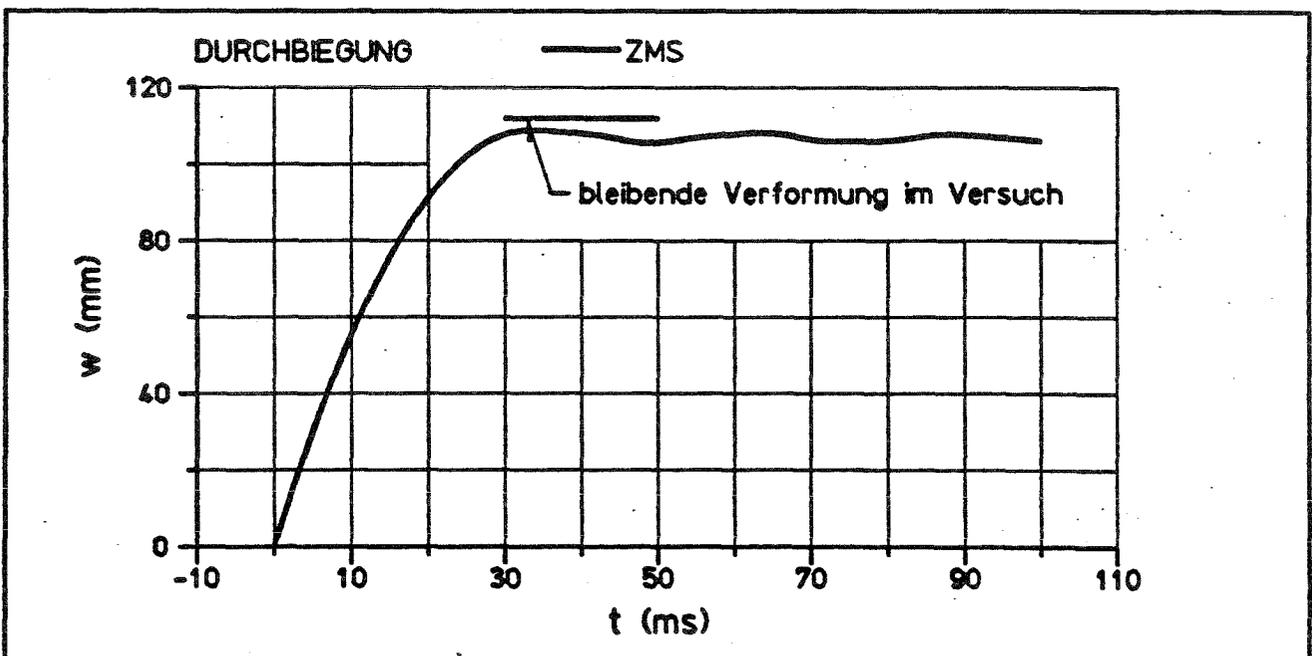
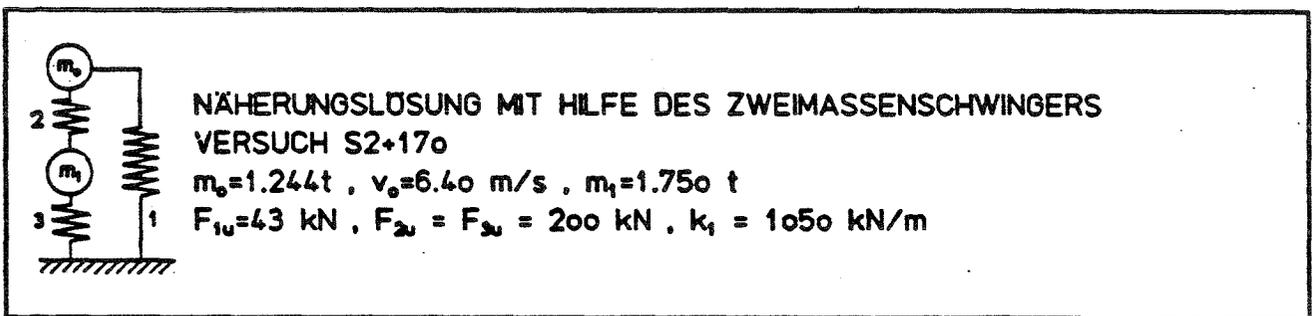
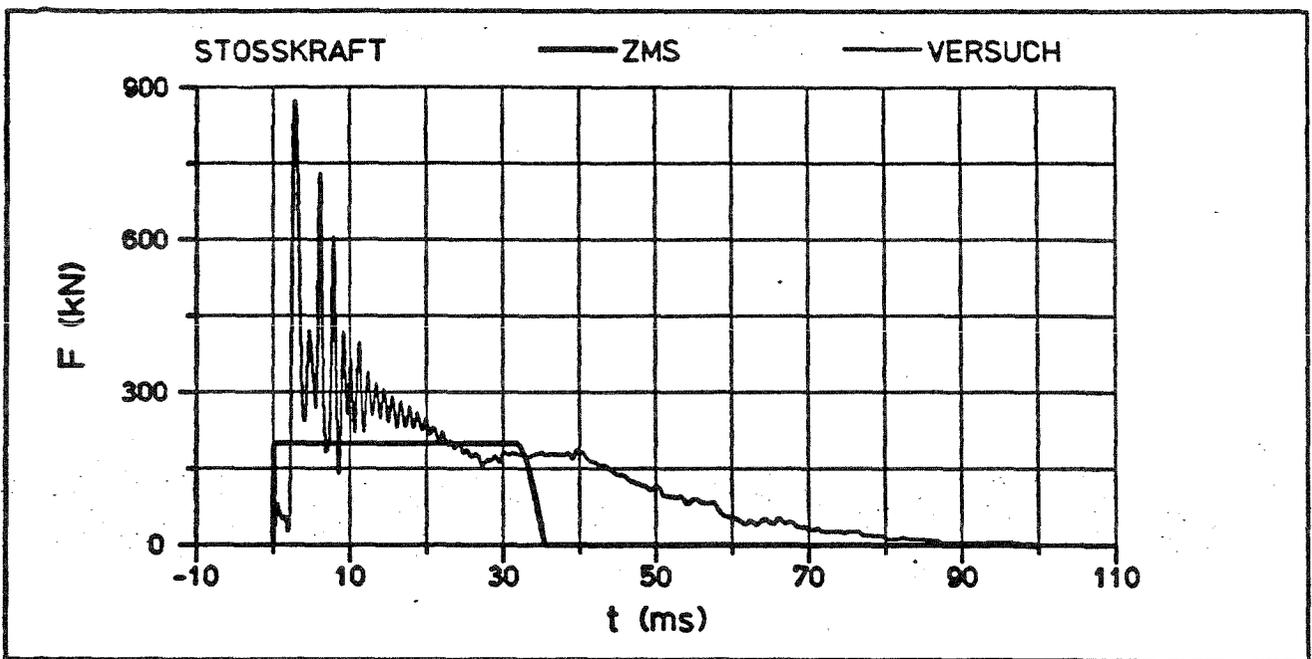
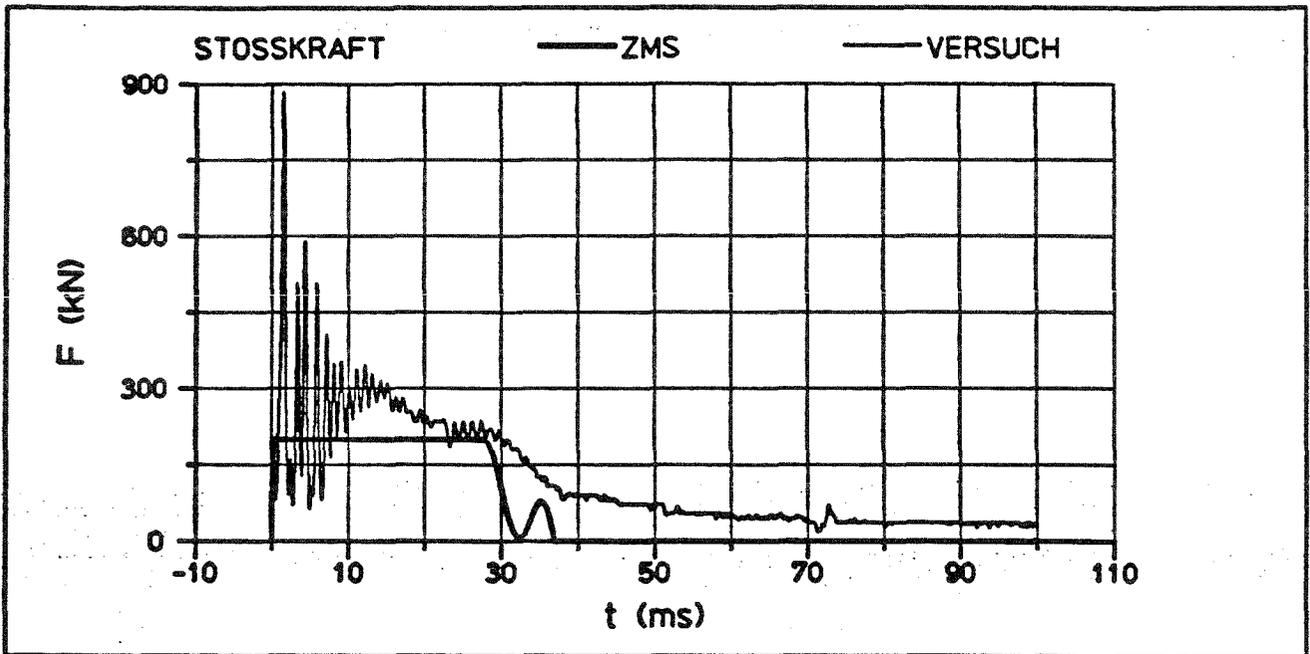


Bild 25: Versuch S2+170, Vergleich der Näherungslösung
 - Zweimassenschwinger (ZMS) - mit den Versuchsergebnissen



NÄHERUNGSLÖSUNG MIT HILFE DES ZWEIMASSENSCHWINGERS
VERSUCH S2+110
 $m_0 = 1.244t$, $v_0 = 6.40$ m/s , $m_1 = 0.675$ t
 $F_{1u} = 75$ kN , $F_{2u} = F_{3u} = 200$ kN , $k_1 = 1470$ kN/m

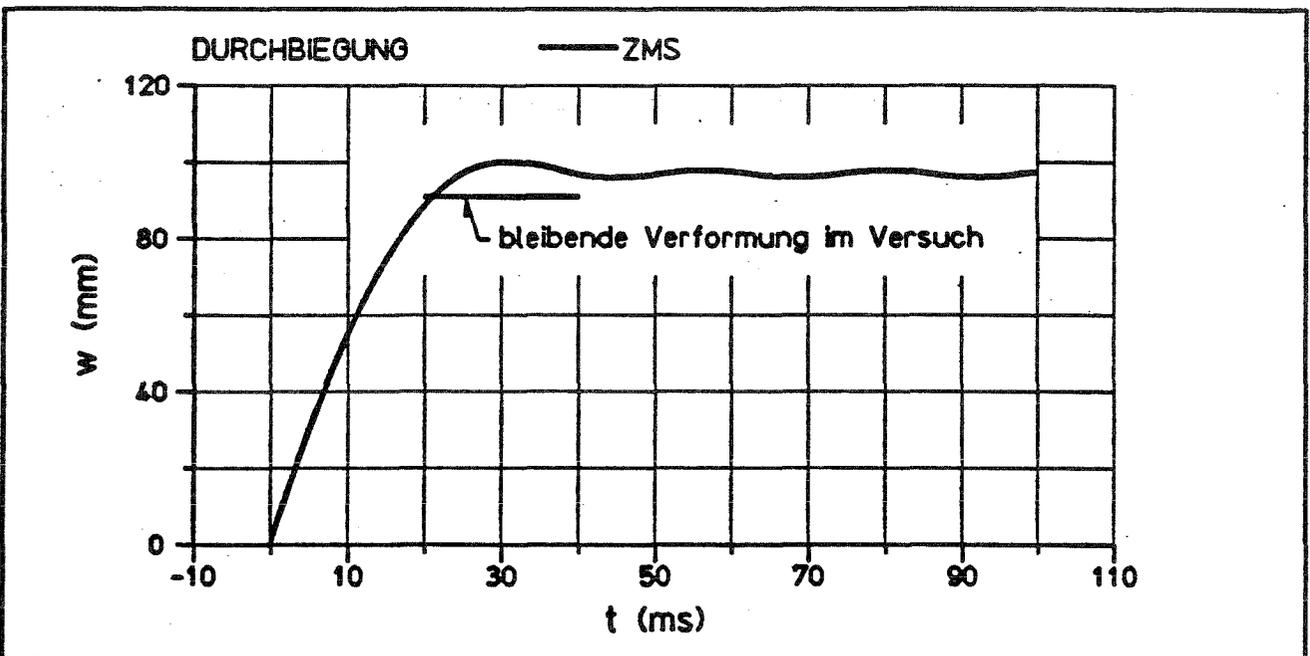


Bild 26: Versuch S2+110, Vergleich der Näherungslösung
- Zweimassenschwinger (ZMS) - mit den Versuchsergebnissen

9. Konstruktive Gesichtspunkte

9.1 Allgemeines

Im folgenden sollen einige Gesichtspunkte zur konstruktiven Ausbildung des Sandtonnen-Anprallschutzes gegeben werden, soweit dies beim derzeitigen Wissensstand möglich ist.

9.2 Das Einfüllmaterial

Für die Versuche wurde Betonzuschlag nach DIN 4226/1 der Korngruppe 0/1 verwendet, weil dieser in der gesamten Bundesrepublik problemlos zu beziehen ist und damit als repräsentatives Material betrachtet werden kann. Es wurde die kleinste verfügbare Korngruppe gewählt, weil durch die große bezogene Oberfläche ein hoher Reibungsenergieverzehr zu erwarten ist. Laut Untersuchungsbericht des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, war die vorhandene Kornform "kantig".

Wichtig bei der Herstellung des Anprallschutzes ist, daß der Sand trocken eingefüllt wird, damit er in den Scherfugen gut gleiten kann. Der angelieferte Betonzuschlag ist in der Regel noch zu feucht. Er kann durch lagenweises Ausbreiten in Schichtdicken von ca. 2 cm und eventuelles einmaliges Wenden getrocknet werden. Bei Neubauten ist dies in der Regel gut in dem noch leeren Gebäude auf dem Hallenboden möglich.

Im Versuch wurde der Sand während des Einfüllens mit Innenrüttlern verdichtet. Dabei wurde eine Lagerungsdichte $D = 0,5$ d.h. mitteldicht bis dicht erzielt. Dies war wichtig, weil wegen der horizontalen Lage der Tonne ansonsten die Gefahr von Hohlräumen unter den Stützenflanschen bestanden hätte. Diese hätten vermutlich durch Absacken des Materials im Zeitraum zwischen Einfüllen und Versuch zu einem Hohlraum an der höchsten Stelle, der Stoßstelle geführt, was unter Umständen vermieden werden mußte.

Bei der Anwendung in der Praxis ist eine Verdichtung nicht unbedingt erforderlich, wenngleich sie durch Klopfen an den Behälter oder durch Innenrüttler leicht herzustellen ist. Inwieweit eine geringere Lagerungsdichte als $D = 0,5$ die Schutzfunktion verändert, ist nicht untersucht worden.

9.3 Der Behälter

Im Versuch wurden die Behälter aus Stahlblechtafeln $t = 6 \text{ mm}$ der Stahlsorte St 37 gefertigt, dessen gutes plastisches Arbeitsvermögen für einen Anprallschutz dieser Art von Vorteil ist. Außerdem kann bei diesem Material problemlos geschweißt werden.

Mit Tonnen dieser Art können auch bestehende Hallen nachgerüstet werden, wie im nachfolgenden noch weiter erörtert werden wird.

Unabdingbar ist eine horizontale Halterung des Behälters am Behälterfuß. Bei einem Neubau kann dies durch Einlassen des Behälters in die Bodenplatte geschehen. Beim Nachrüsten bestehender Hallen bietet sich eine Halterung mittels im Boden verankerter Stahllaschen an, die am unteren Behälterrand sowohl innen wie auch außen angeschweißt werden können. Eine Untersuchung der Tragfähigkeit von horizontalen Halterungen allein mit Stahllaschen ist im Versuch allerdings nicht erfolgt.

Der Einbau der Tonnen kann bei einem Neubau durch Überstülpen der fertigen Tonnen bzw. im Falle einer Nachrüstung durch Zusammenschweißen aus zwei Hälften vor Ort erfolgen. Wie die Versuche zeigten, ist bis zu dem getesteten Beanspruchungsgrad kein nachteiliges Verhalten beim Stoß auf die Schweißnaht zu befürchten. Im Versuch befand sich an der Stoßstelle die durch Schweißen wieder verschlossene Einfüllöffnung, ohne daß dies in einem der Versuche eine nachteilige Wirkung auf die Schutzfunktion gehabt hätte.

Zur Verhinderung einer Sandstaubentwicklung sollte eine dünne Metallabdeckung vorgesehen werden. Erhält dieses Blech Aufkantungen an den Rändern, kann es auch das unbeabsichtigte Feuchtwerden des Sandes in Betrieben, in denen mit offenem Wasser gearbeitet wird, verhindern.

Im Versuch wurden die Tonnendurchmesser 1,70 m und 1,10 m getestet. Beide zeigten ein enormes Absorptionsvermögen im Vergleich zum ungeschützten Stoß, so daß zugunsten einer besseren Flächenausnutzung der Durchmesser wahrscheinlich noch verkleinert werden kann. Hierzu wären allerdings weitere Versuche erforderlich.

10. Wertung des geprüften Anprallschutzes

Der im vorliegenden Forschungsvorhaben geprüfte aus einer mit Sand gefüllten Blechtonne bestehende Anprallschutz (s. Bild 1) weist bei einem Anprall einer undeformierbaren Masse ein sehr starkes Absorptionsvermögen auf. Die Anlagen 6.17 bis 6.19 und 6.48 bis 6.51 zeigen die Bauteilreaktionen vergleichend mit und ohne Anprallschutz.

Die Vorrichtung erfüllt ihre Funktion sehr gut, d.h. Stützen, die damit geschützt sind, brauchen nicht weiter auf Fahrzeuganprall bemessen werden. Es werden keine nennenswerten Stoßkräfte von Gabelstaplern ausgeübt. Einmal in Anspruch genommen, weist diese Schutzkonstruktion je nach Stärke des Anpralls mehr oder weniger starke plastische Verformungen auf. Bei starken Deformationen ist eine Wiederherstellung in einfacher Weise dadurch möglich, daß der deformierte Bereich herausgeschnitten und durch ein neues Blechteil ersetzt wird.

Ein für manche Betriebe entscheidender Nachteil ist im damit bedingten Verlust an Nutzfläche begründet. Er kann auch bei prinzipiell anderen Lösungen nur bedingt reduziert werden.

Die Ausführungskosten sind relativ niedrig.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird über die Untersuchung eines speziellen Anprallschutzes von Hallenstützen bei Gabelstaplerstoß berichtet. Dieser Schutz besteht aus einem am unteren Ende der Stütze angeordneten Stahlblechzylinder, der mit Sand gefüllt ist (Bild 2). Mit Rücksicht auf einen leichteren rechnerischen Nachvollzug der Versuchsbeobachtungen wurden für die Untersuchungen Stahlstützen verwendet.

Nach experimenteller und theoretischer Klärung von Maßstabsfragen wurden Anprallsicherungen des in Frage stehenden Typs im Maßstab 1:1 mit geringfügig gegenüber der Wirklichkeit verkürzten Stahlstützen und aufliegender Masse experimentell geprüft. Die Beanspruchung erfolgte über eine "Beschußvorrichtung" mittels einer mit Preßluft beschleunigten Masse. Die Stütze wurde dabei liegend angeordnet, um für den Beschuß mit einer schweren Masse die Schwerkraft nutzen zu können. Die Masse zur Simulation der Last am Kopf der Stütze wurde entsprechend der Erdbeschleunigung horizontal gegen das Stützenfundament vorgespannt.

Da die Masse der Beschußanlage auf 1 t begrenzt war, wurde nach den erwähnten Voruntersuchungen diese Masse auf eine Geschwindigkeit entsprechend der kinetischen Energie der in Frage kommenden Gabelstapler beschleunigt.

Umfangreiche Nachrechnungen erlaubten es, die Stoßkraftverhältnisse wenigstens annähernd zutreffend nachvollziehen.

Es kann festgestellt werden, daß die geprüfte Anprallsicherung die Stützen von Stoßbeanspruchungen weitgehend frei hält. Eine besondere Bemessung auf Anprall ist nicht notwendig.

Dennoch haben diese Studien nur einen ersten Einblick in ein sehr schwieriges und komplexes Stoßproblem gegeben. Eingehender studiert werden sollte mit Rücksicht auf den hohen Platzbedarf der erforderliche Minstdurchmesser der Schutzkonstruktion.

Das vorliegende Vorhaben hat gezeigt, daß eine Reduzierung von 1,70 m auf 1,10 m noch keine signifikante Reduzierung der Abschirmwirkung zur Folge hat.

Mögliche Alternativen, die studiert werden sollten, wären:

distanzpostierte Spundwände mit unterer Einspannung (siehe Bild 27), bei denen ein Teil der aufgebrachten Stoßenergie durch plastische Deformation an der Einspannstelle aufgenommen wird. Solche Abschirmvorrichtungen wurden bereits auf Veranlassung des Erstverfassers ausgeführt.

- distanzpostierte Betonringe (Bild 27), die auf Grund ihrer Masse die an die Stütze weitergegebene Stoßkraft reduzieren. Diese können gegebenenfalls zusätzlich mit Sand gefüllt werden.

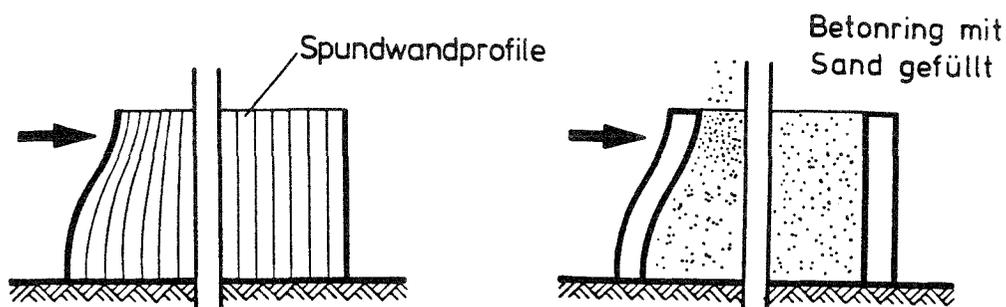
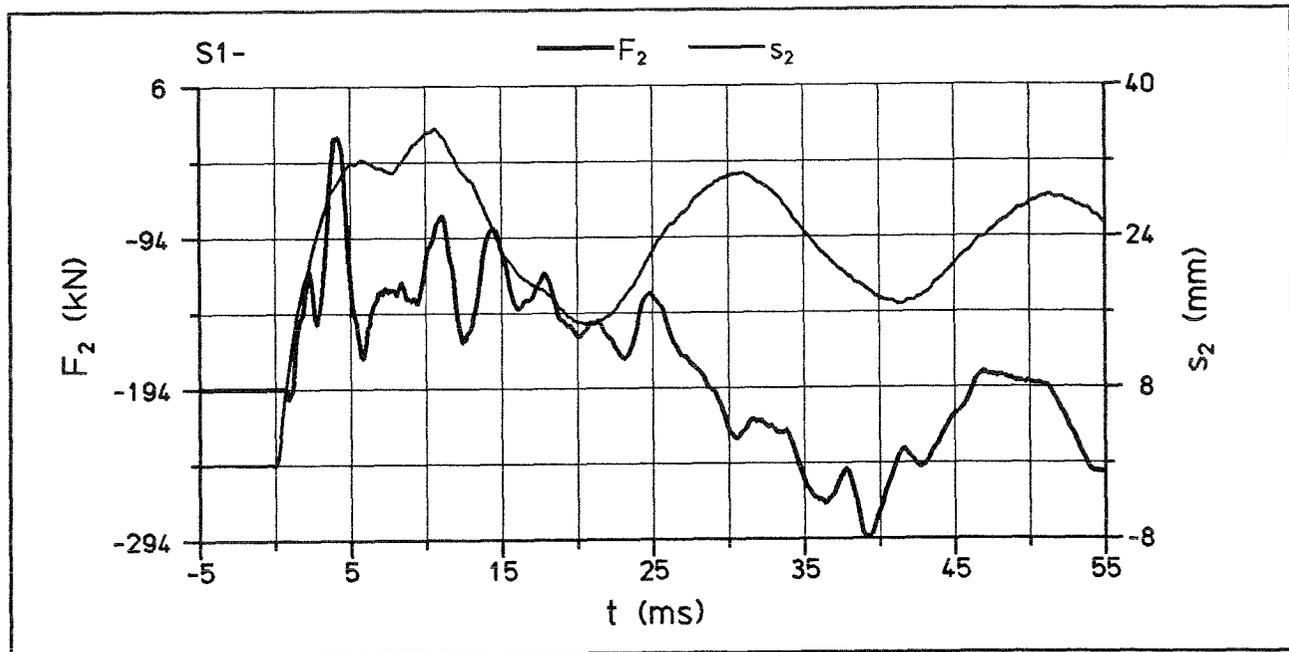
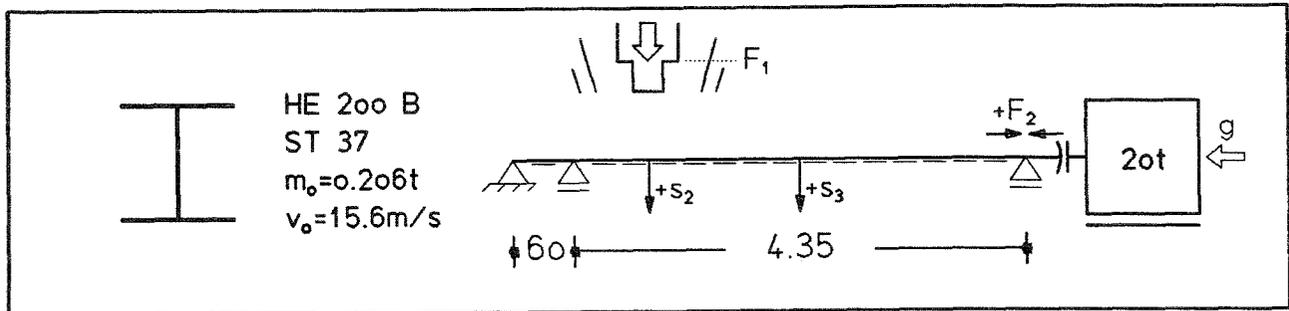
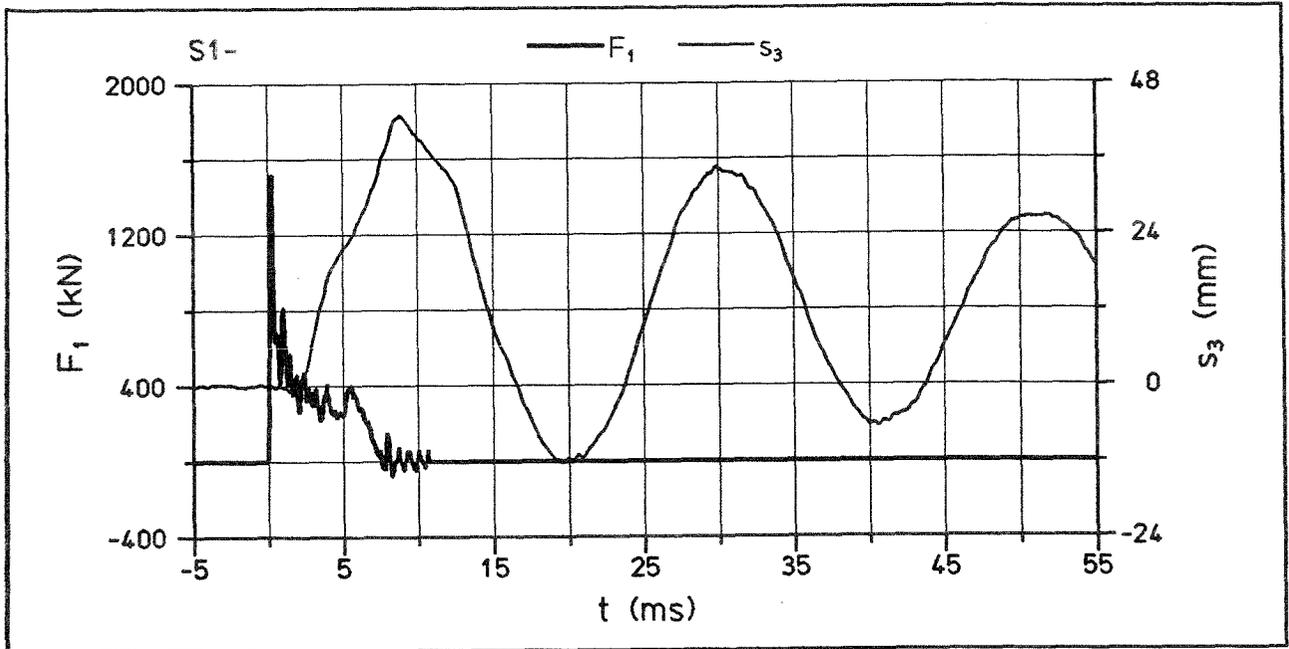


Bild 27: Alternative Schutzmaßnahmen

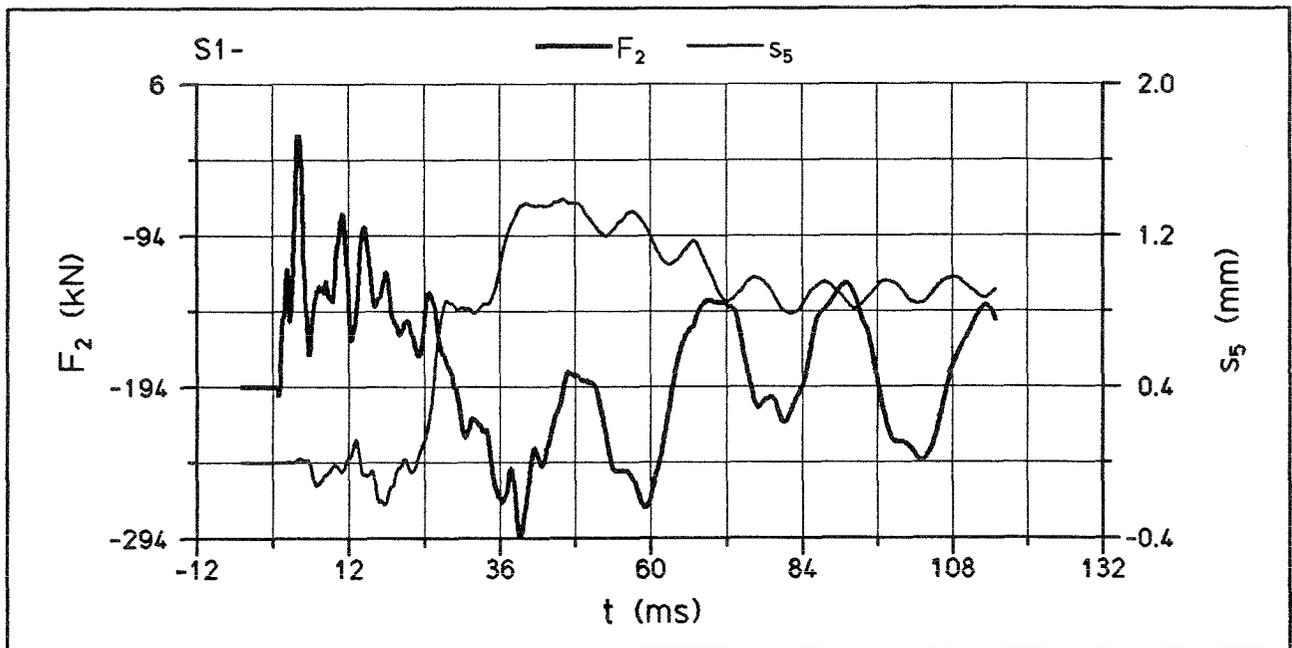
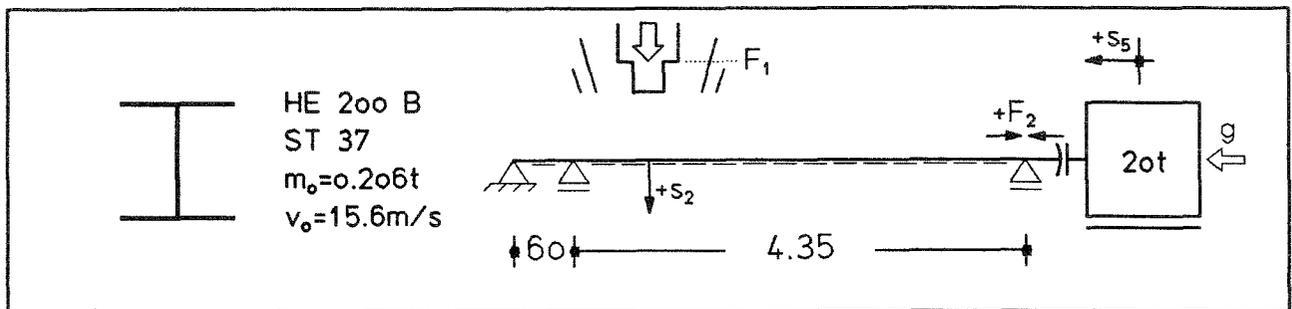
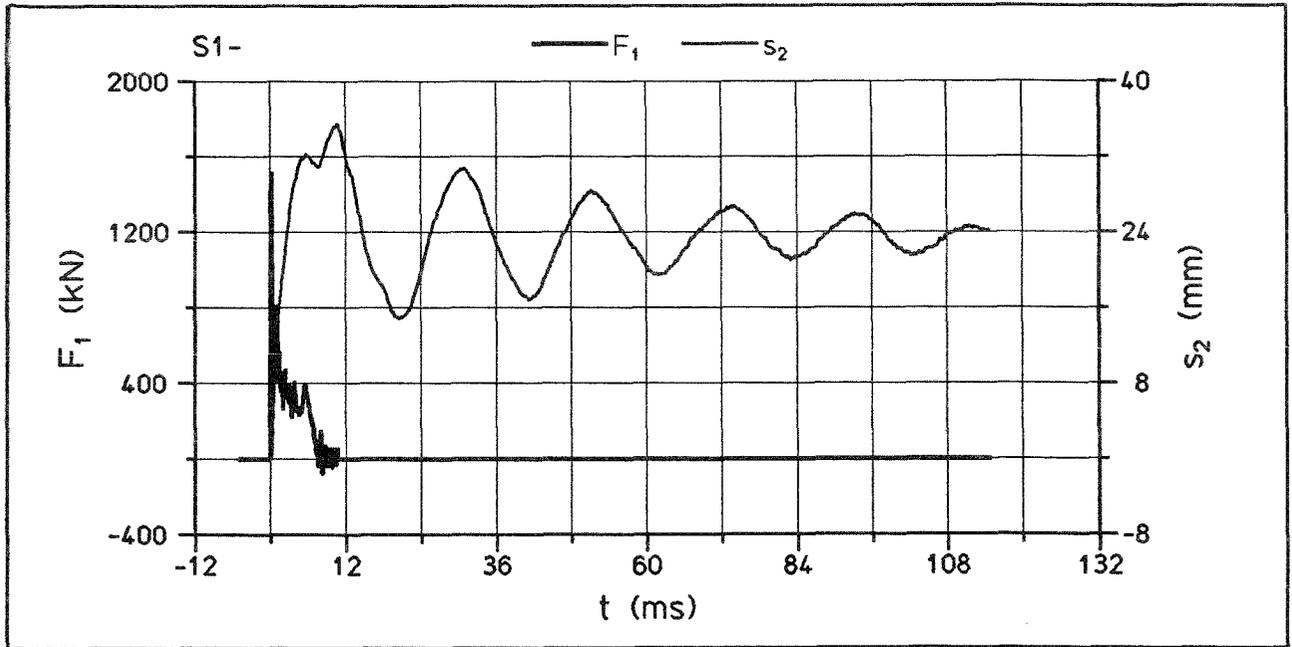
12. Literatur

- [1] Seiffert, U.: Probleme der Automobilsicherheit, Dissertation, Berlin 1974
- [2] Yamanaka, A., Nagaike, N.: The Crash Test of Medium Duty Truck
17. Intern. Congr. Fisita, Budapest, 4.-10. Juni 1978, Bd. 3, Pap. 21.2, S. 1499-1520
- [3] Chiapetta, R.L., Costello, J.F.: Automobile Impact Forces on Concrete Walls. Transactions of the 6th Int. Conf. on SMIRT, Paris, 17.-21. Aug. 1981, Vol. J(b), paper J8/8
- [4] Feyerabend, M.: Der harte Querstoß auf Stützen aus Stahl und Stahlbeton. Dissertation, in Vorbereitung
- [5] Perry, S.H., Dinic, G.: Fender layer protections of sub-surface concrete caissons. Behaviour of Offshore Structures, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 1985
- [6] Eibl, J., Feyerabend, M.: Stoßbelastung von normalkraftbeanspruchten stabförmigen Tragwerksteilen aus Stahl, Holz und Stahlbeton. Abschlußbericht, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abt. Massivbau, Universität Karlsruhe, Dezember 1984
- [7] Popp, C.: Untersuchung über den Stoßverlauf beim Aufprall von Kraftfahrzeugen auf Stützen und Rahmenstiele aus Stahlbeton. DAFStb, Heft 172, Berlin 1965

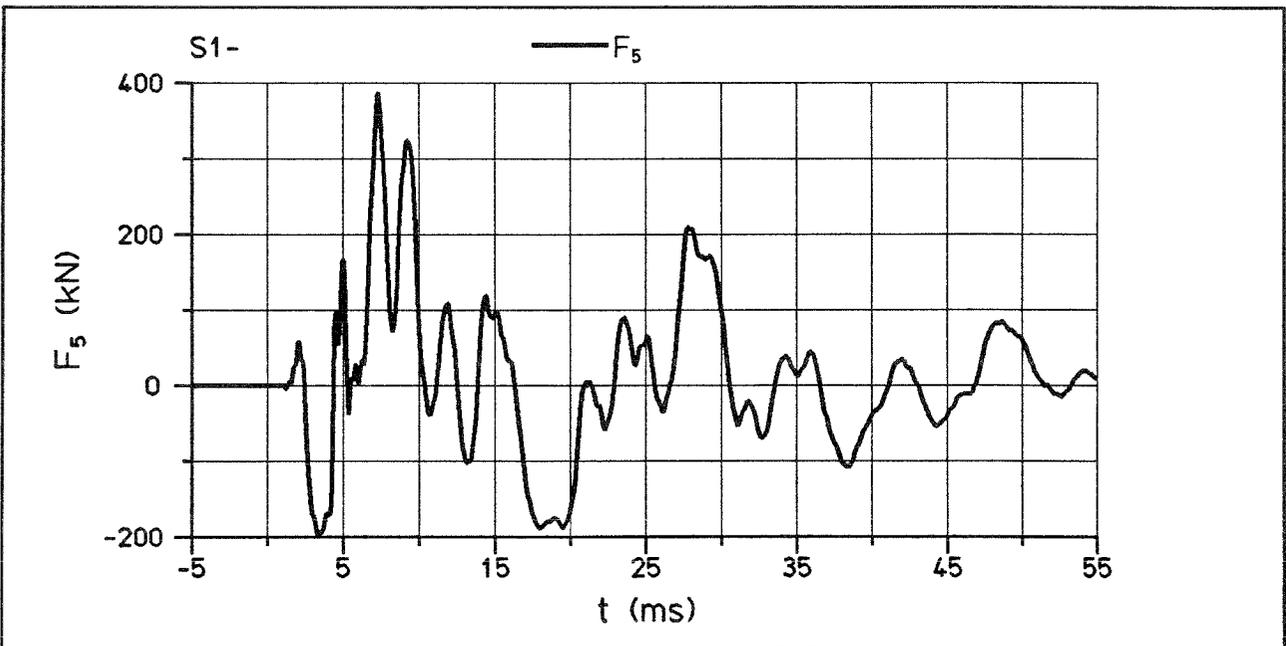
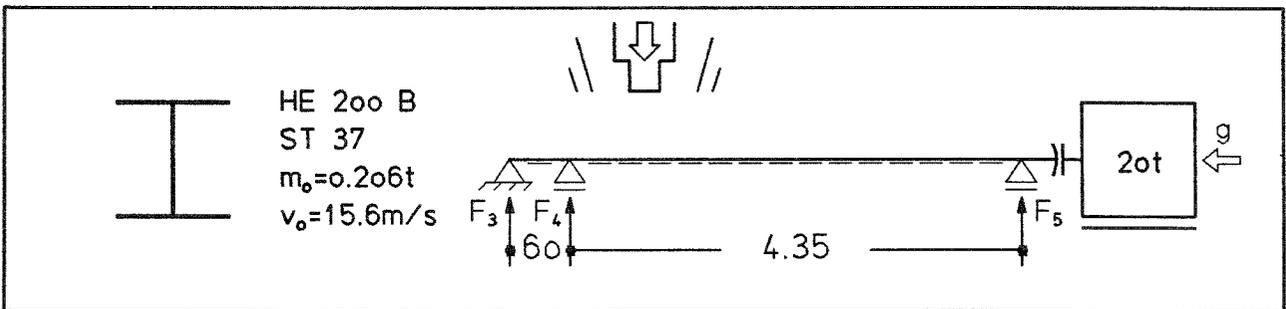
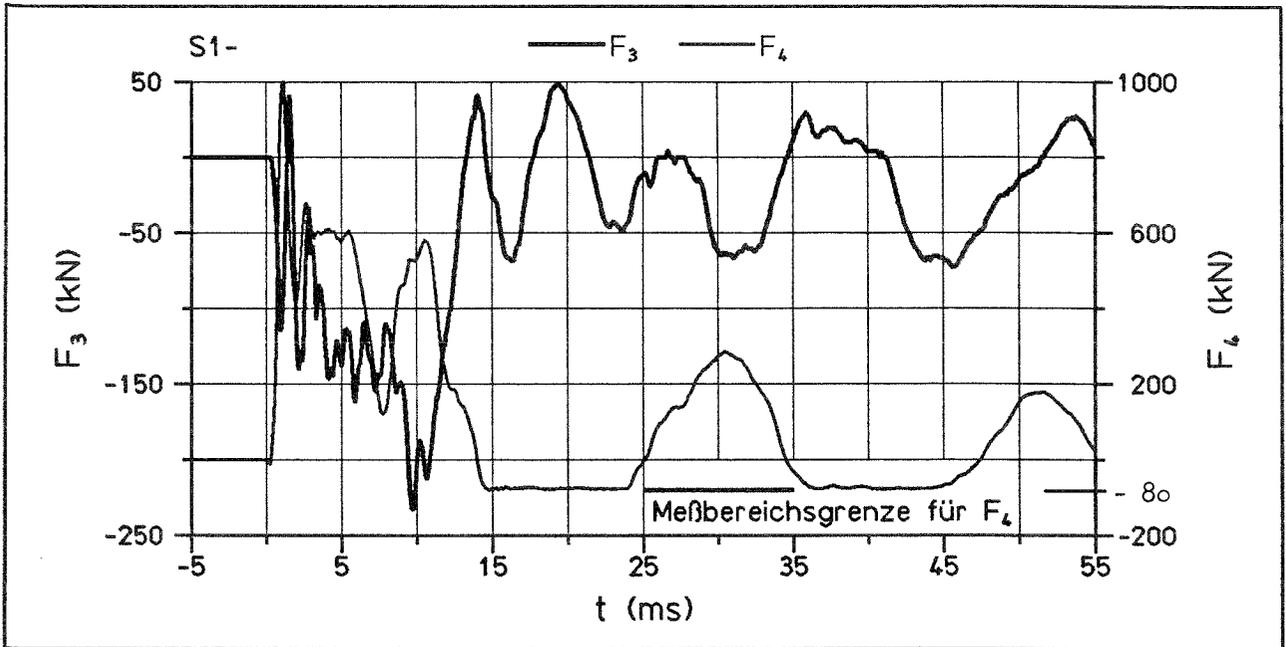
- [8] Popp, C.: Untersuchung über den Querstoß beim Aufprall von Kraftfahrzeugen auf Gründungspfähle aus Stahlbeton und Stahl.
DAfStb, Heft 246, Berlin 1974
- [9] Block, K.: Der harte Querstoß - Impact - auf Balken aus Stahl, Holz und Stahlbeton.
Dissertation, Dortmund 1983
- [10] Eibl, J. u.a.: Impact on concrete structures.
Proceedings of the international symposium on Intense Dynamic Loading and its effects.
Beijing, China: Science Press, 1986
- [11] Eibl, J.,
Block, K.: Zweischalige Wandkonstruktionen aus Stahlbeton unter "weicher" Stoßbeanspruchung - Flugzeugabsturz -
Beton- und Stahlbetonbau 2/82, S. 44-48
- [12] Eibl, J.: Design of concrete structures to resist accidental impact.
The Structural Engineer, Jan. 1987,
Vol. 65 A, No. 1
- [13] Eibl, J.: Soft and hard impact.
The first international conference on concrete for hazard protection.
Edinburgh, Sept. 1987
- [14] Davis, G.A.O.,
Morton, J.,
[Hrsg.]: Structural Impact and Crashworthiness.
Volume 1: Keynote Lectures
Volume 2: Conference Papers
Elsevier Applied Science Publishers, London,
1984



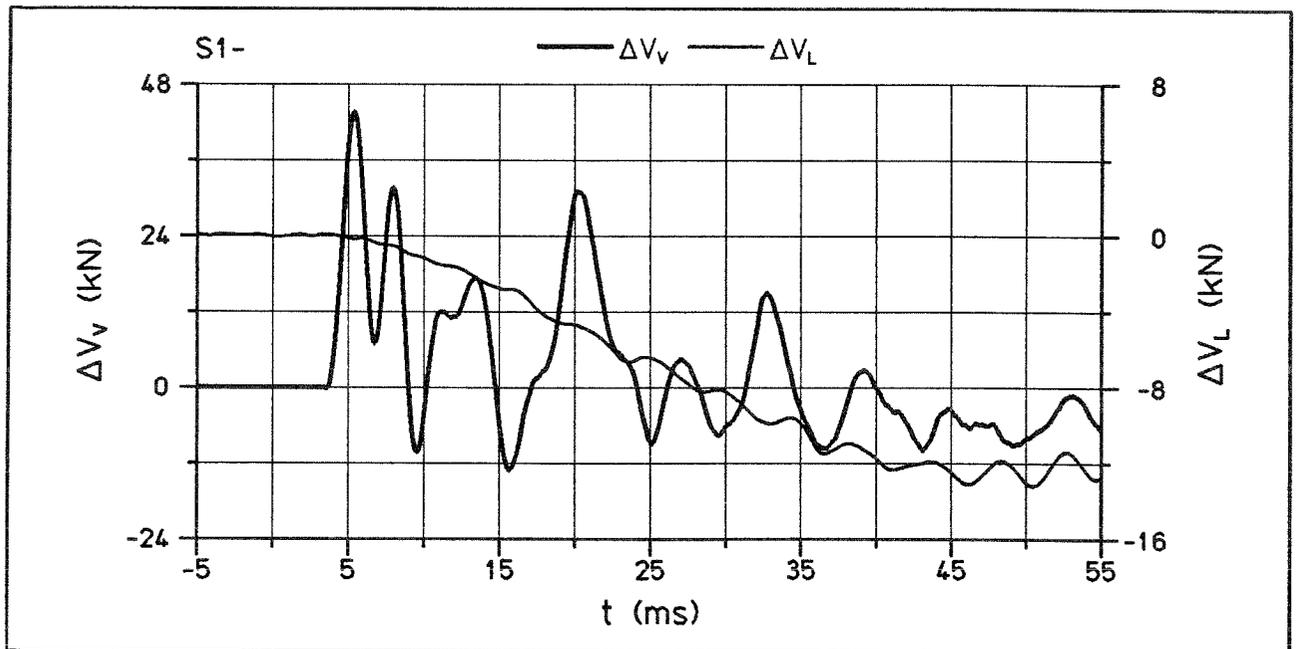
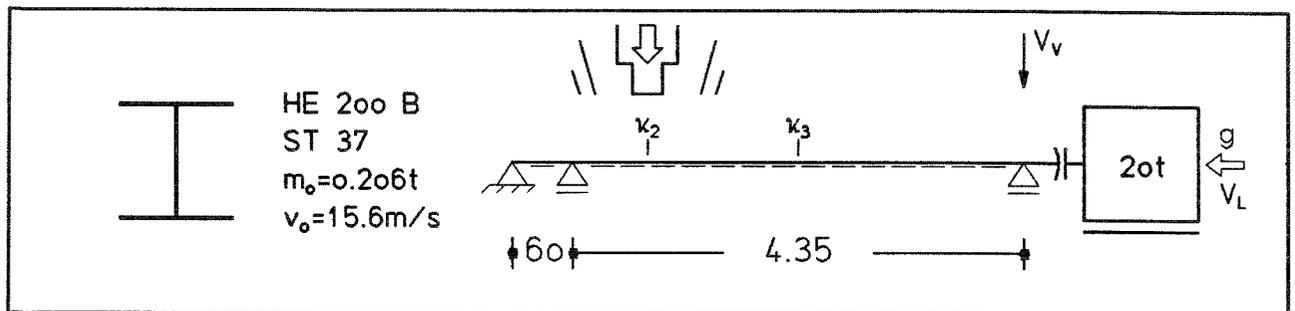
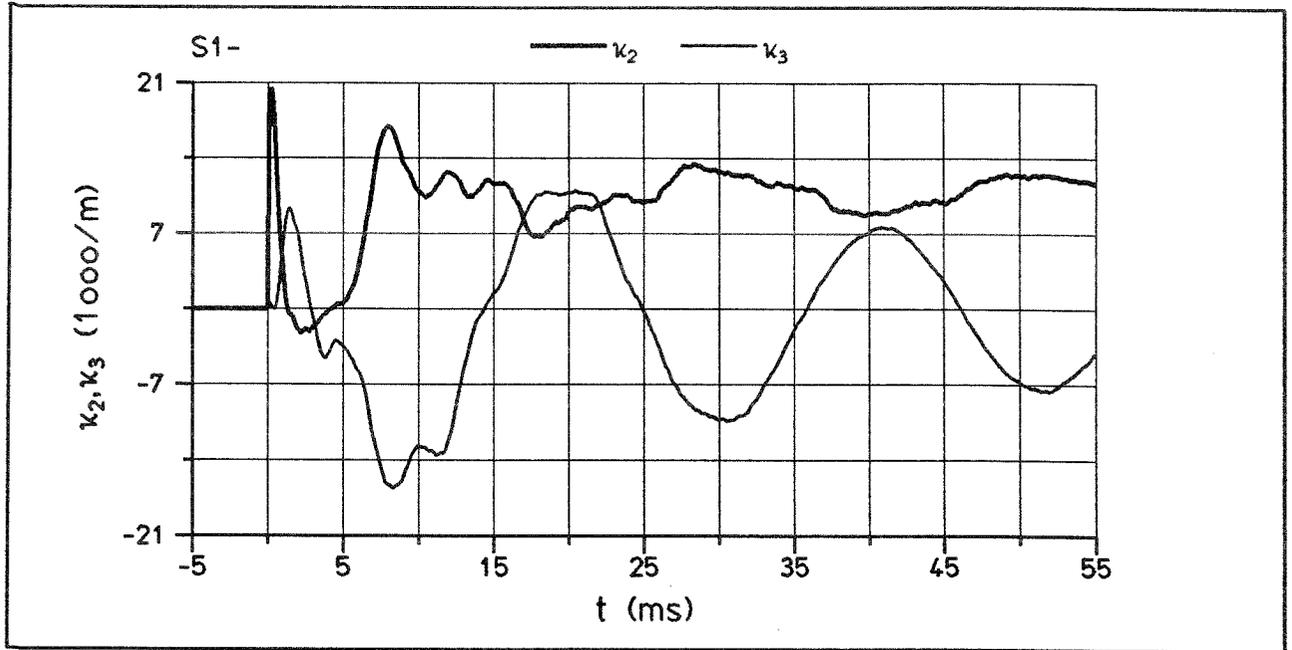
Anlage 6.1: Versuch S1- - ohne Sandtopf -
 Stoßkraft F_1 , Stablängskraft F_2 , Verschiebungen s_2 und s_3



Anlage 6.2: Versuch S1- - ohne Sandtopf -
 Stoßkraft F_1 , Stablängskraft F_2 , Verschiebungen s_2 und s_5

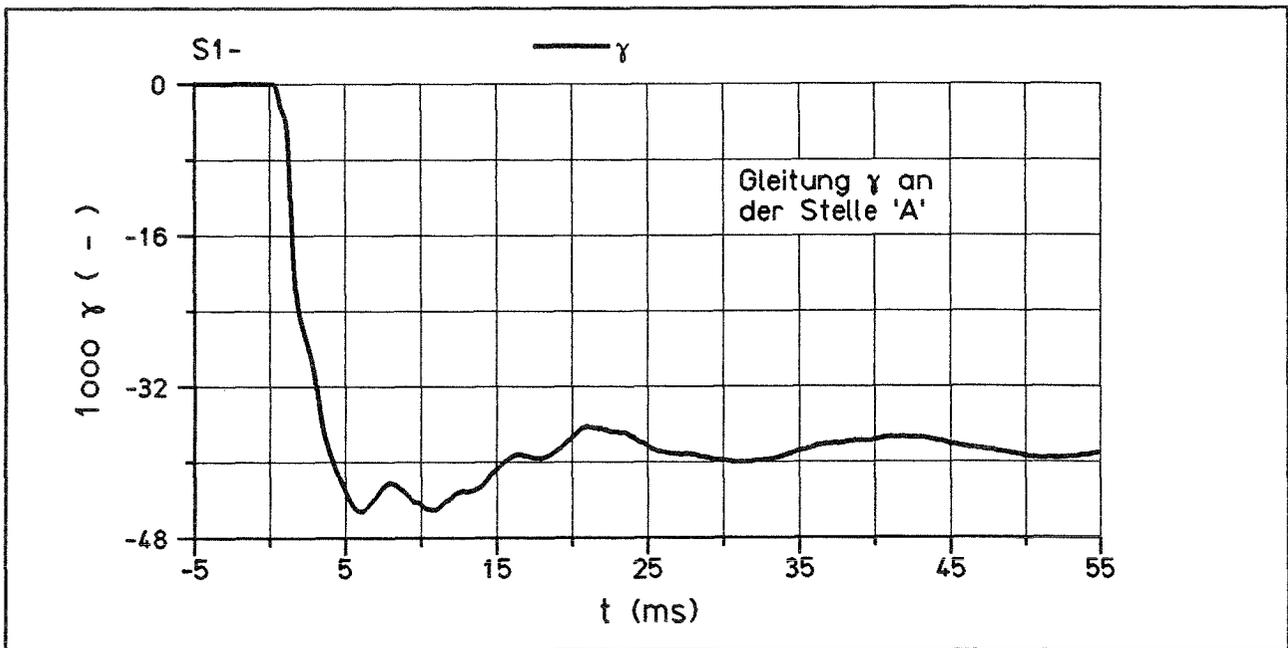
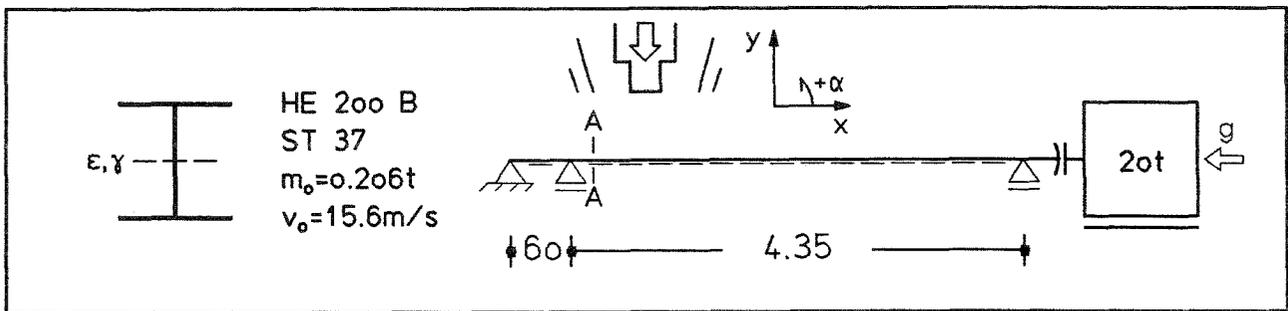
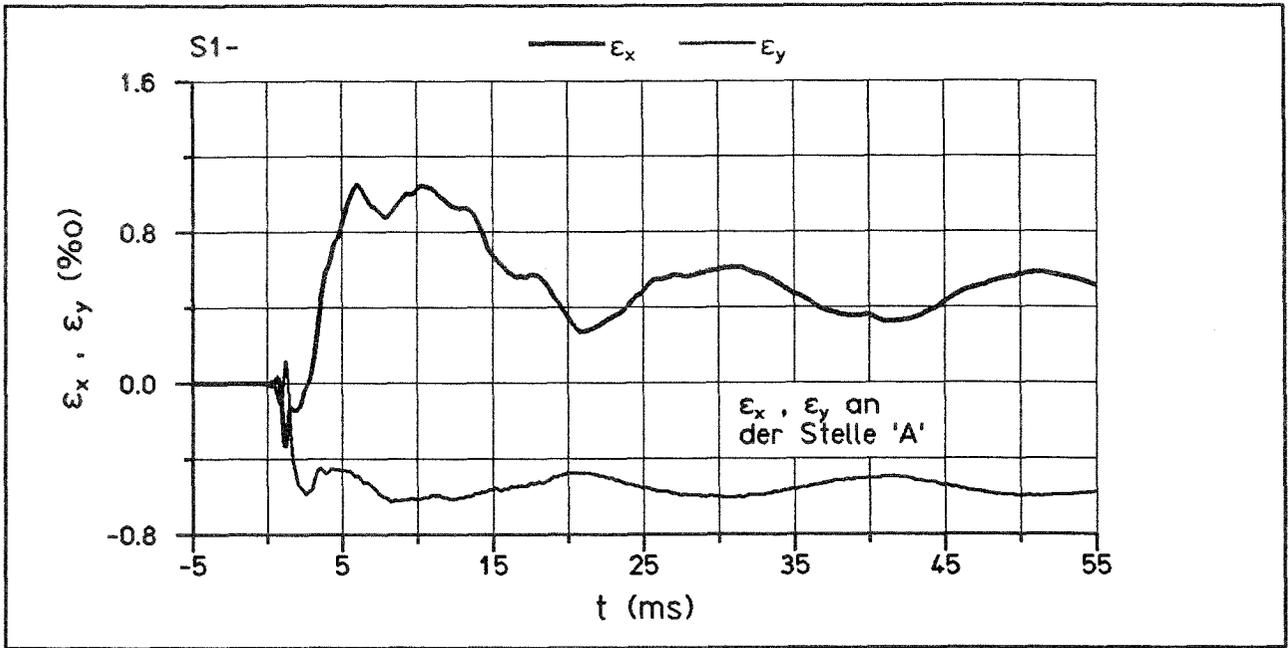


Anlage 6.3: Versuch S1- - ohne Sandtopf -
 Auflagerkräfte F_3 , F_4 , F_5



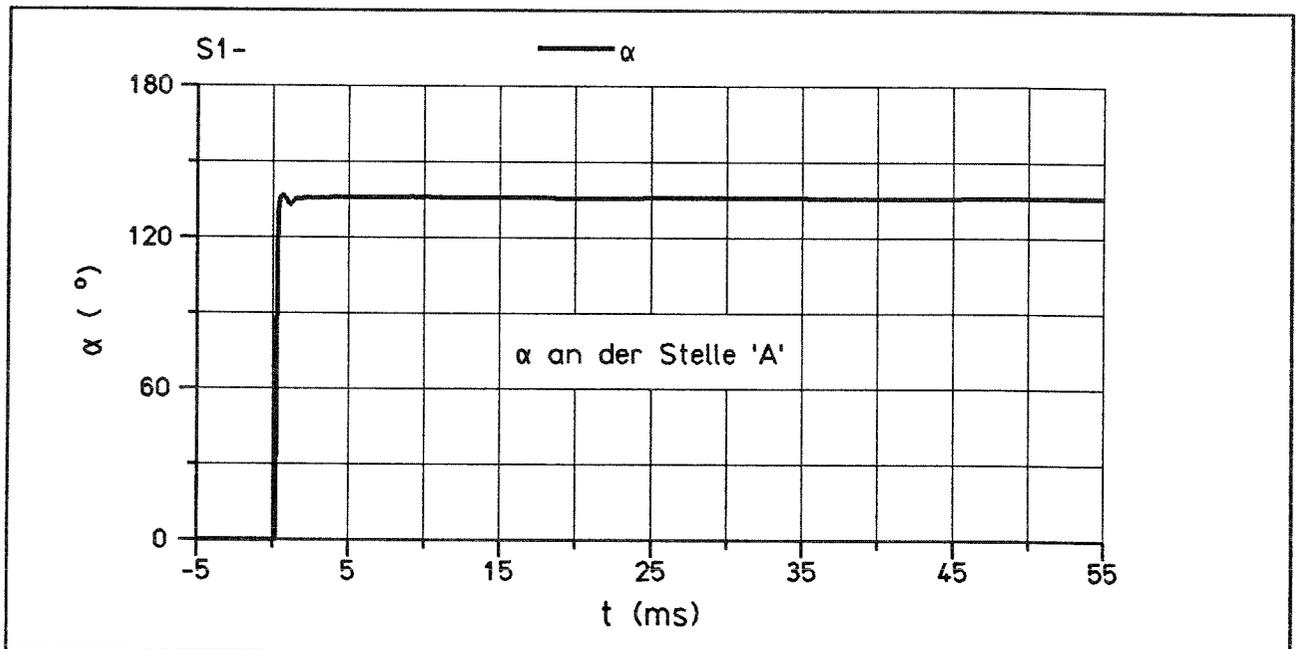
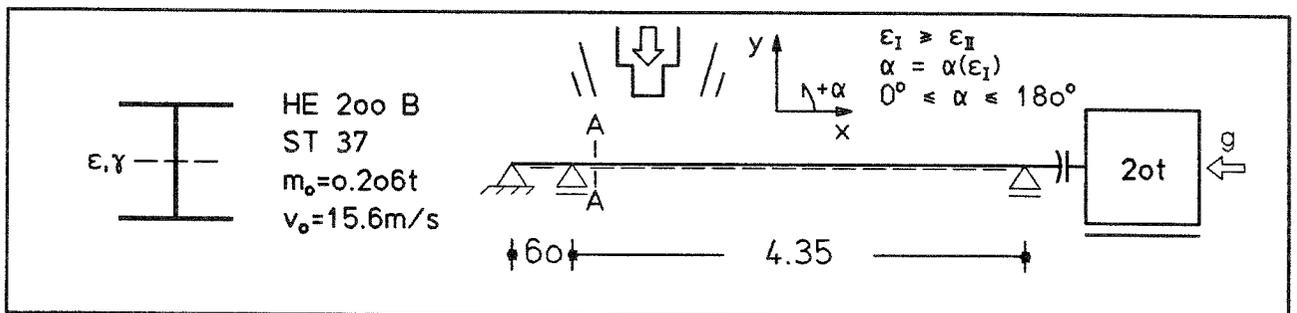
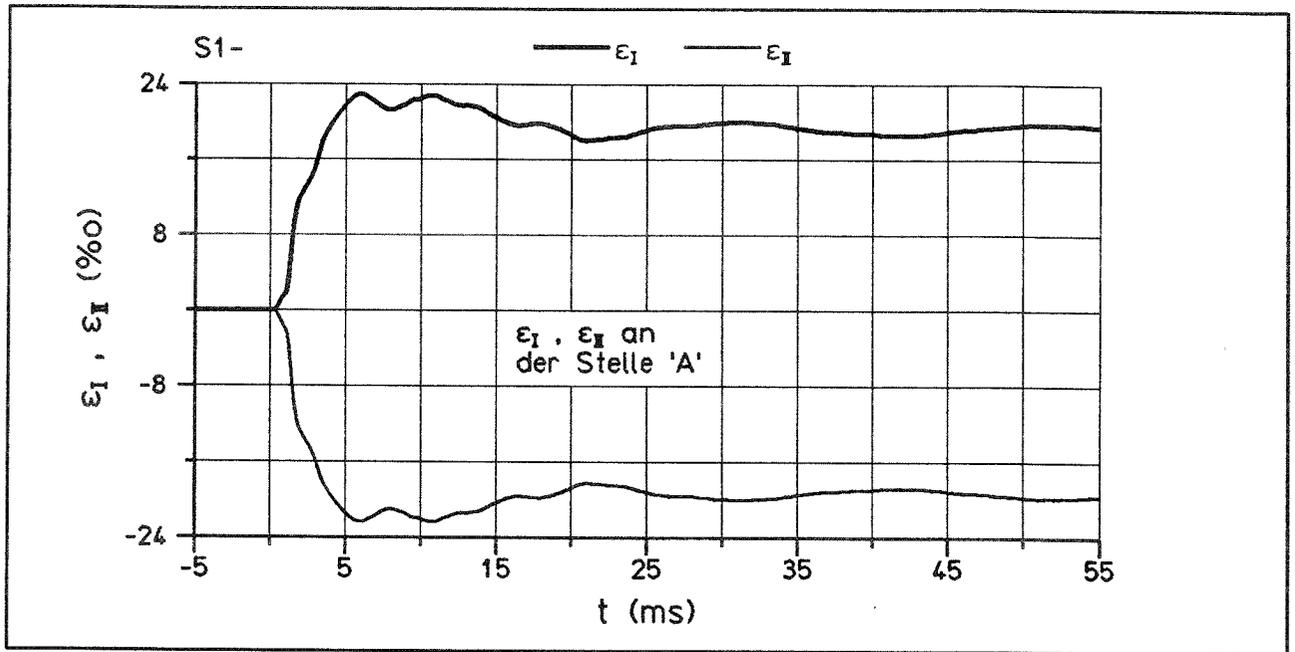
Anlage 6.4: Versuch S1- - ohne Sandtopf -

Krümmungen κ_2 , κ_3 , Differenz der Vorspankräfte ΔV_V und ΔV_L
(negativ = Vorspankraftverlust)

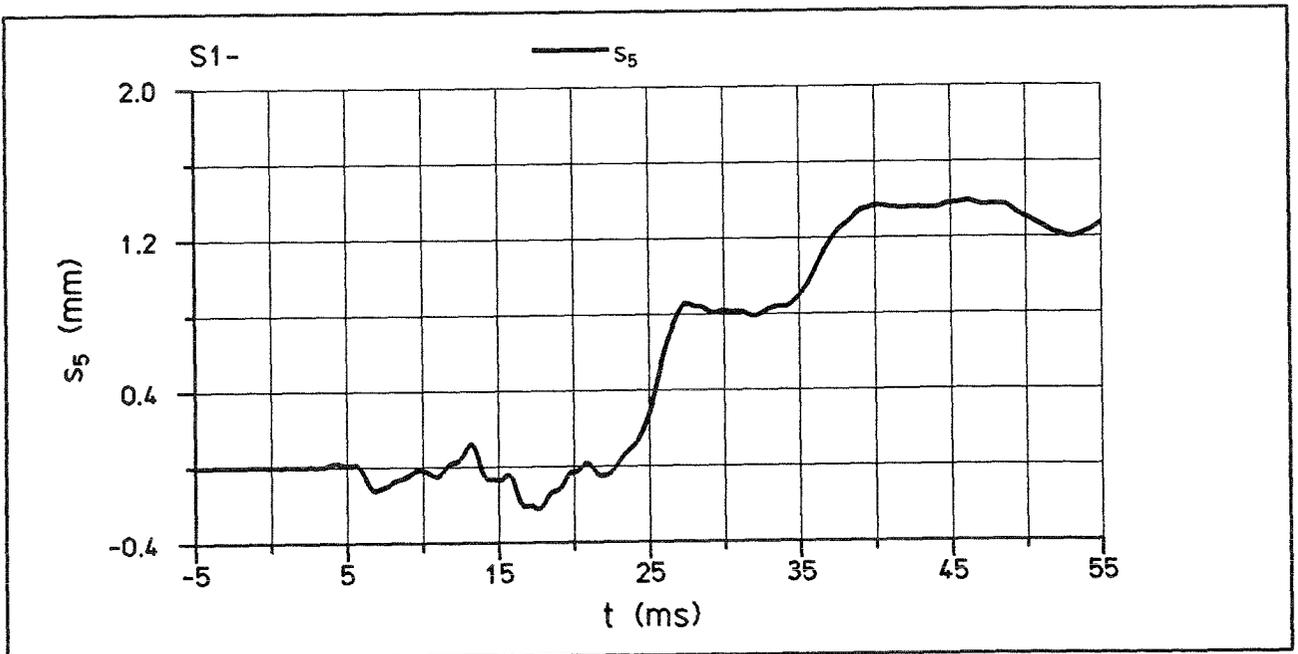
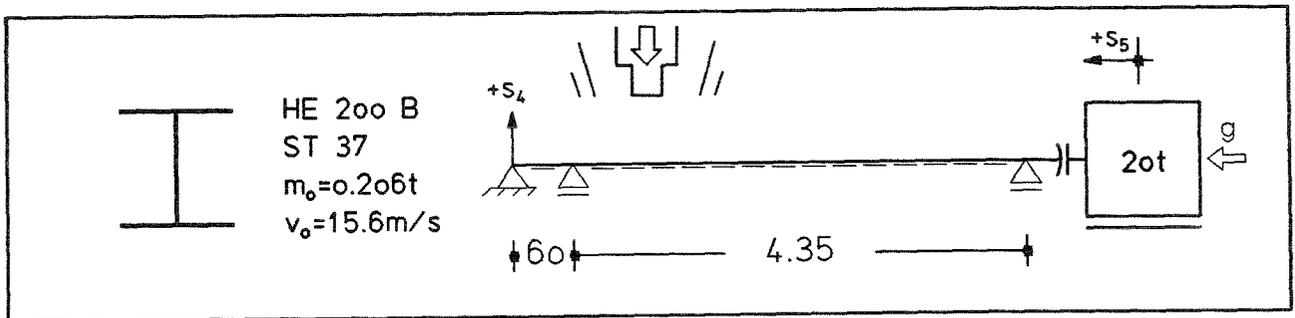
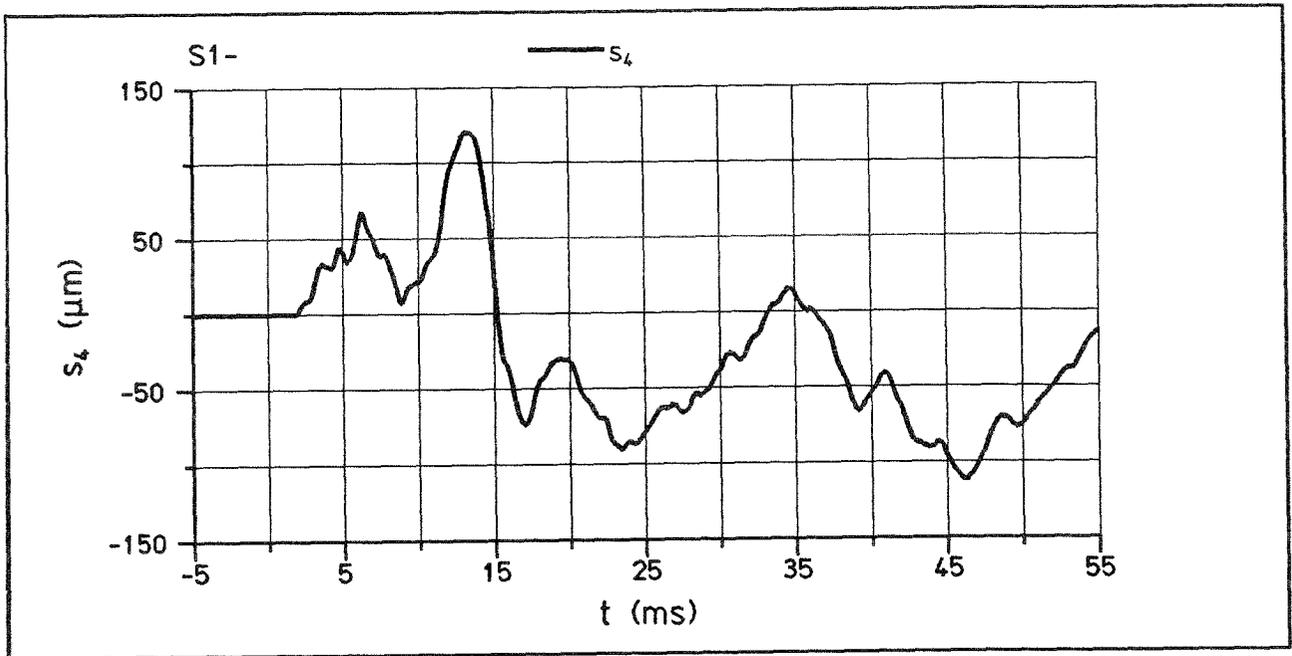


Anlage 6.5: Versuch S1- - ohne Sandtopf -

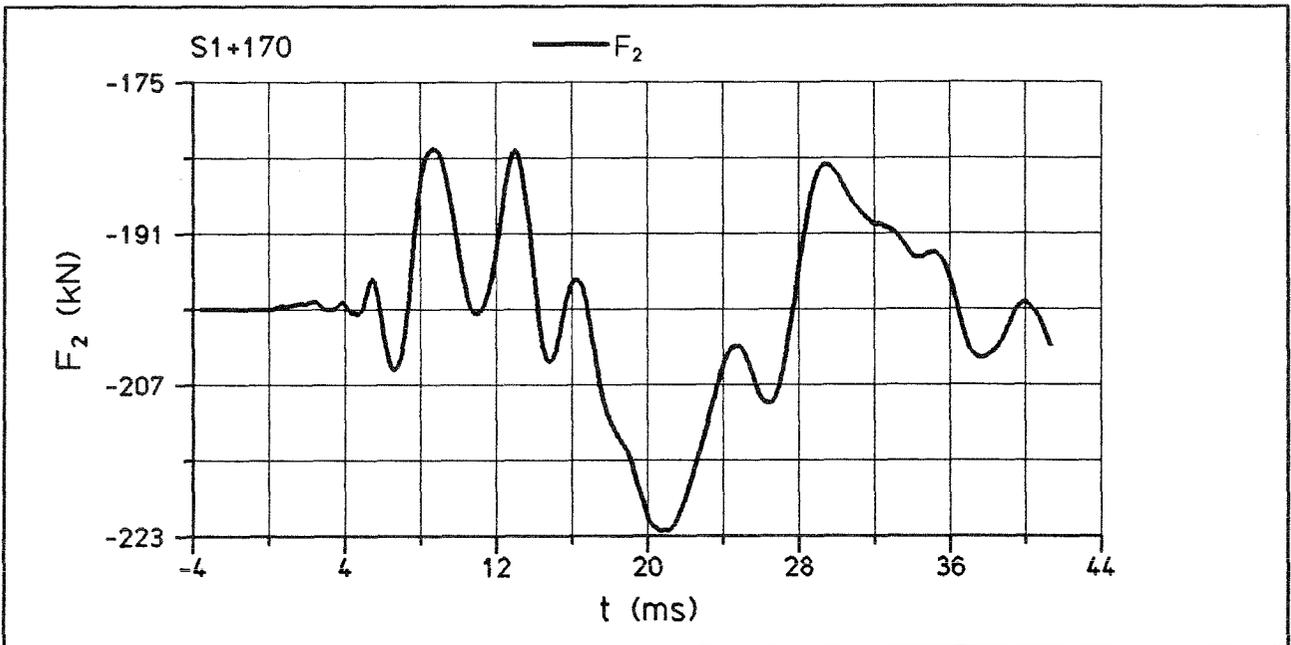
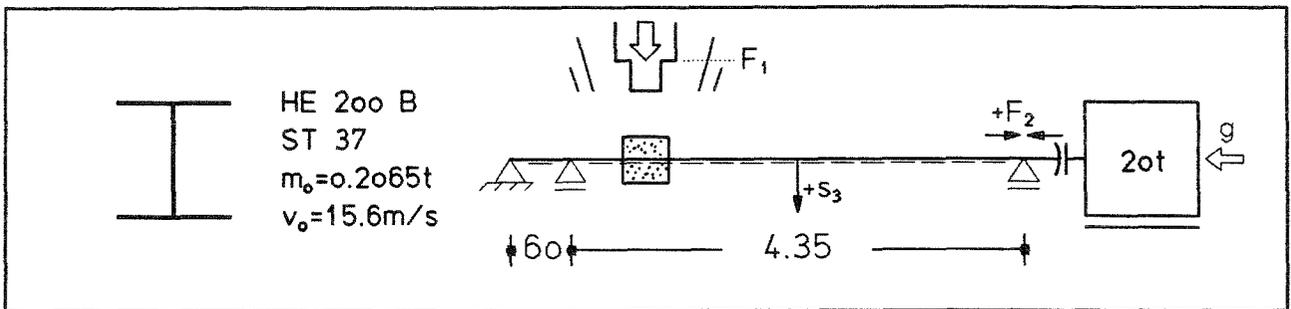
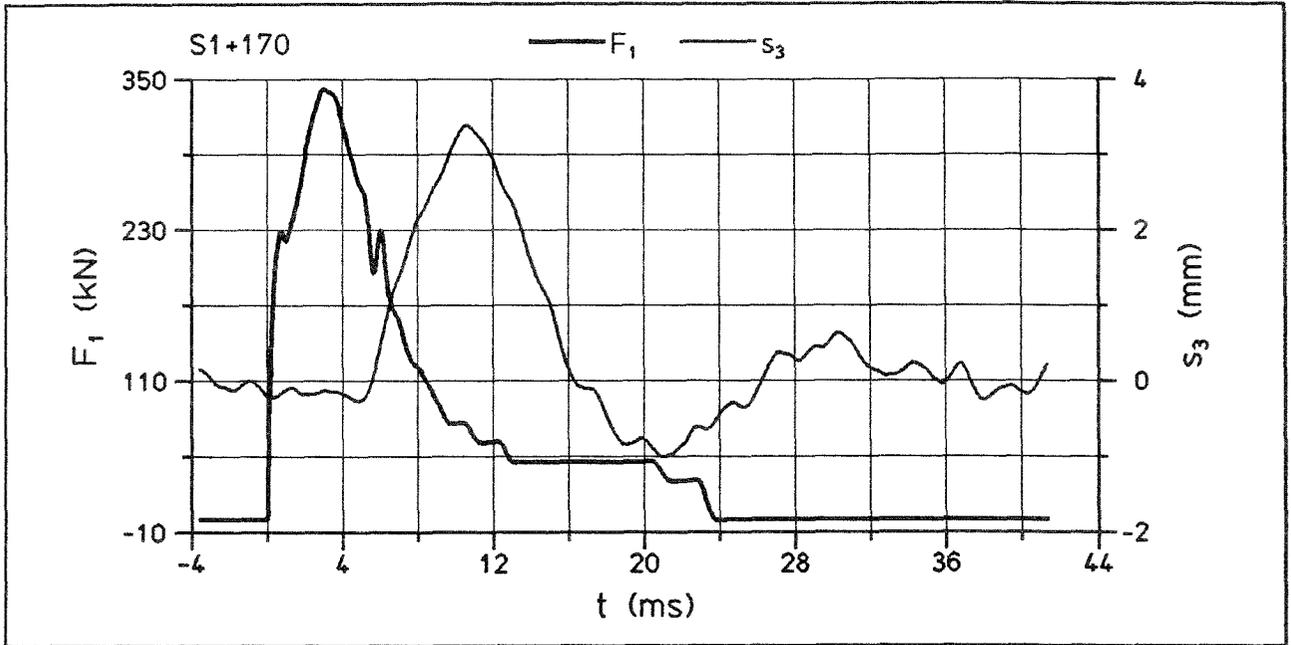
Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stabachse an der Stelle "A"



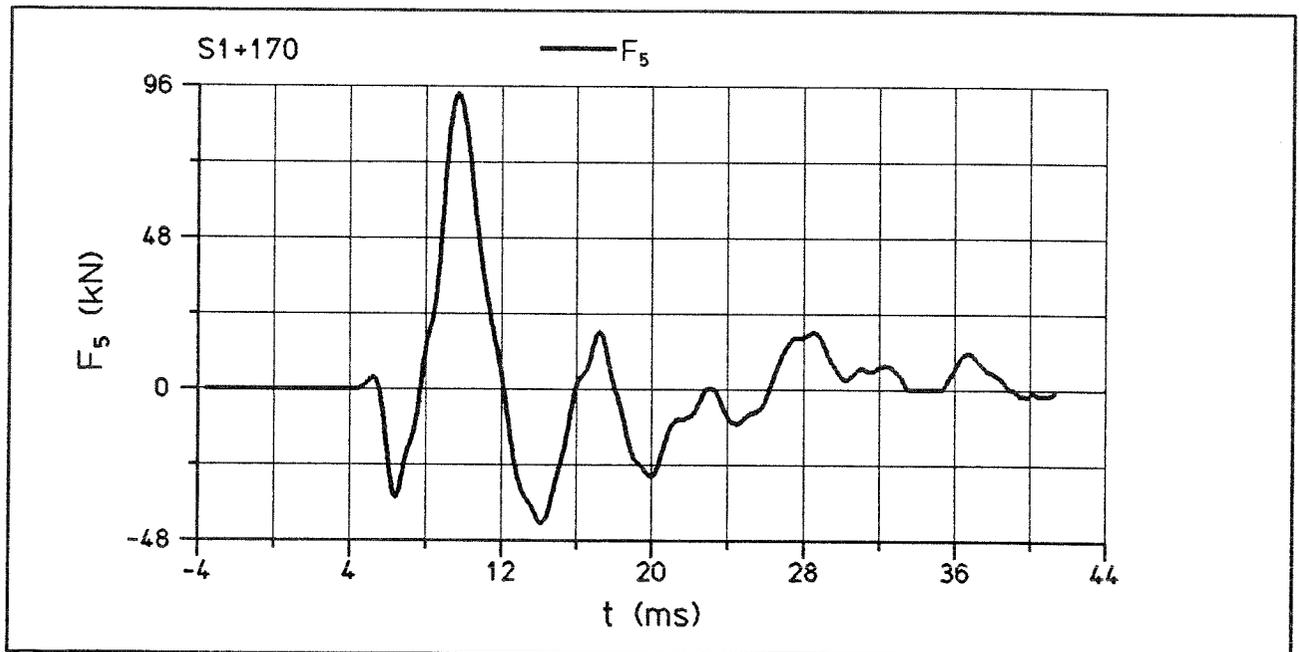
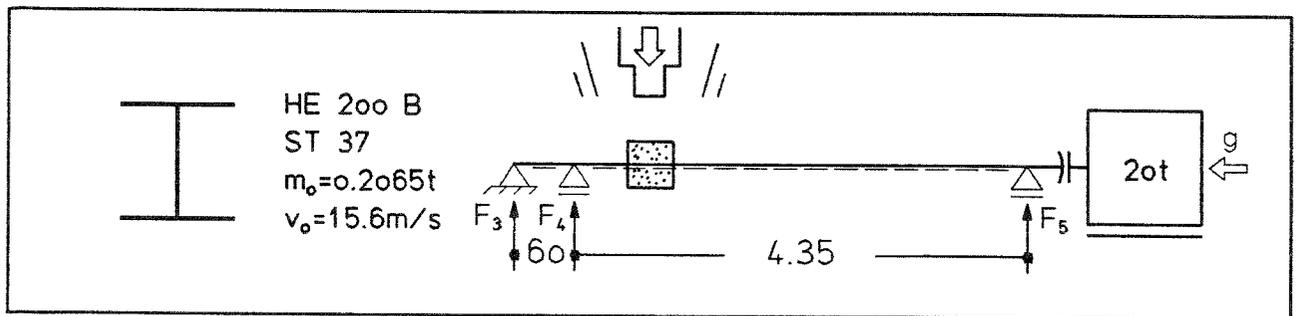
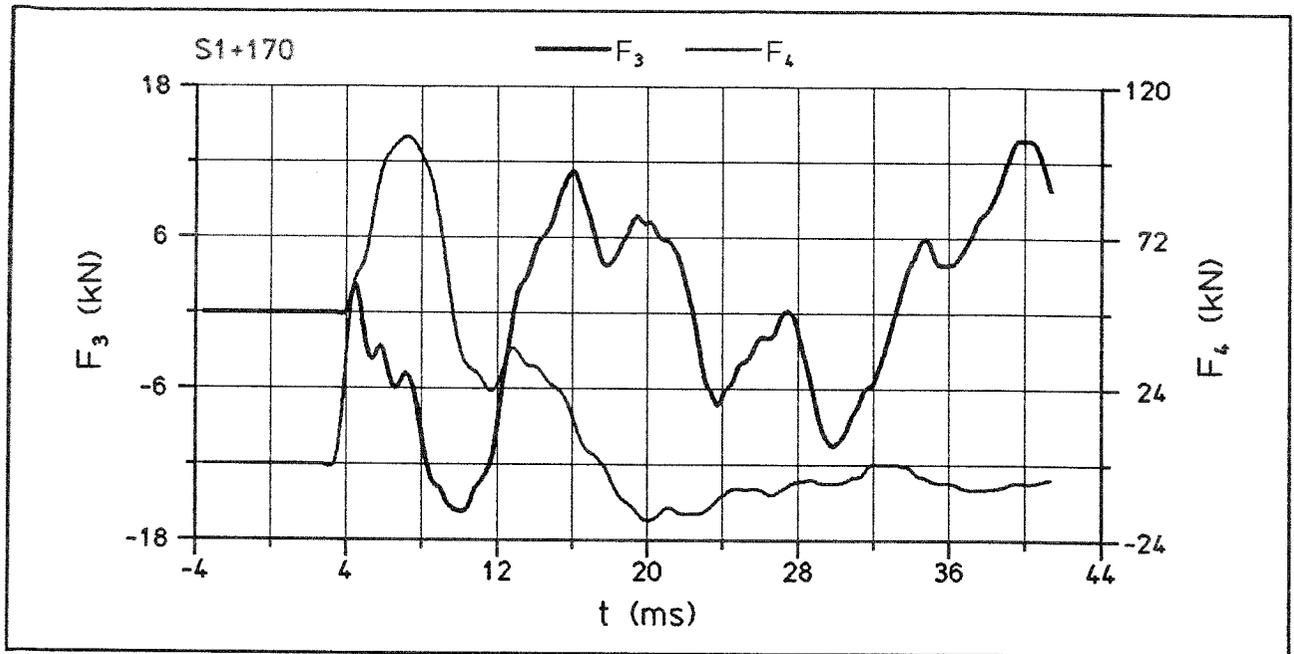
Anlage 6.6: Versuch S1- - ohne Sandtopf -
Hauptdehnungen $\epsilon_I, \epsilon_{II}$, Richtung der Hauptzugdehnung α
in Stabachse an der Stelle "A"



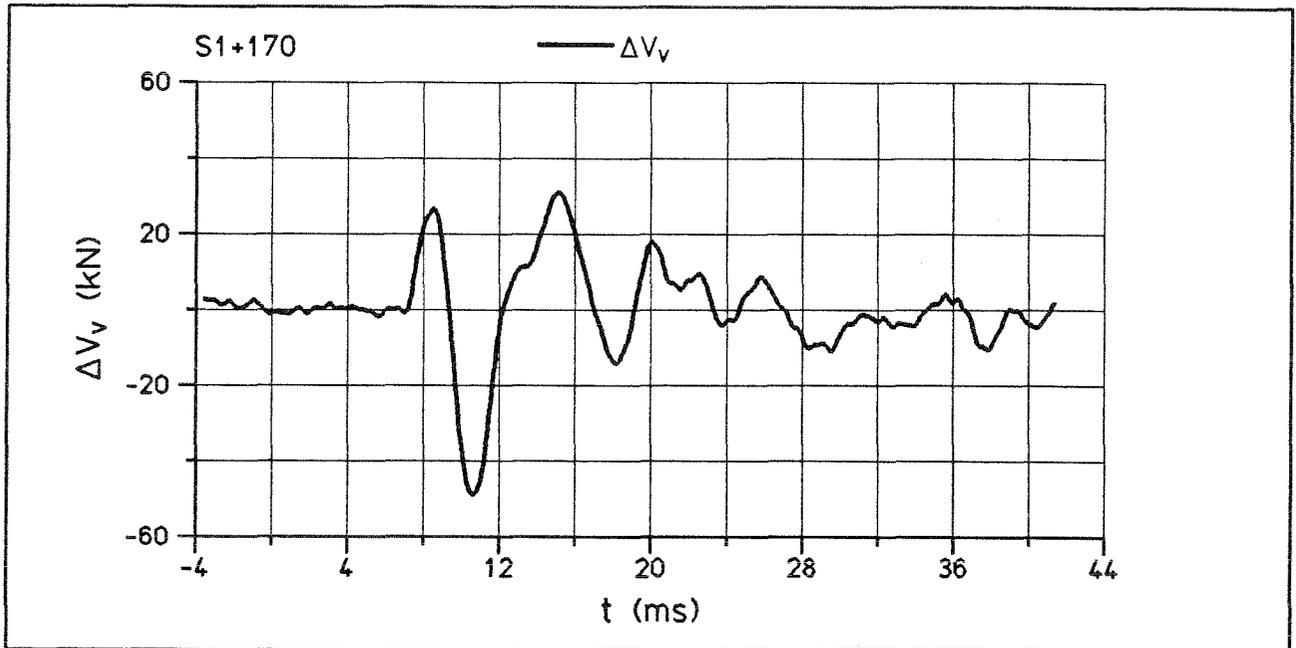
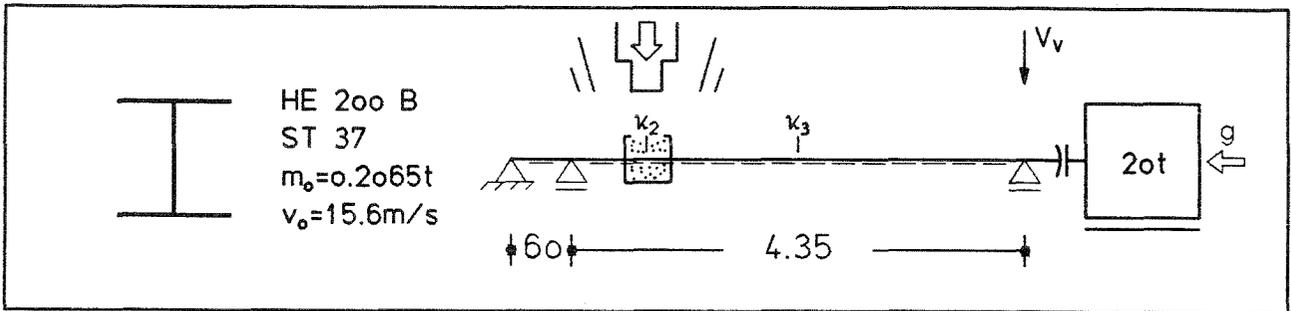
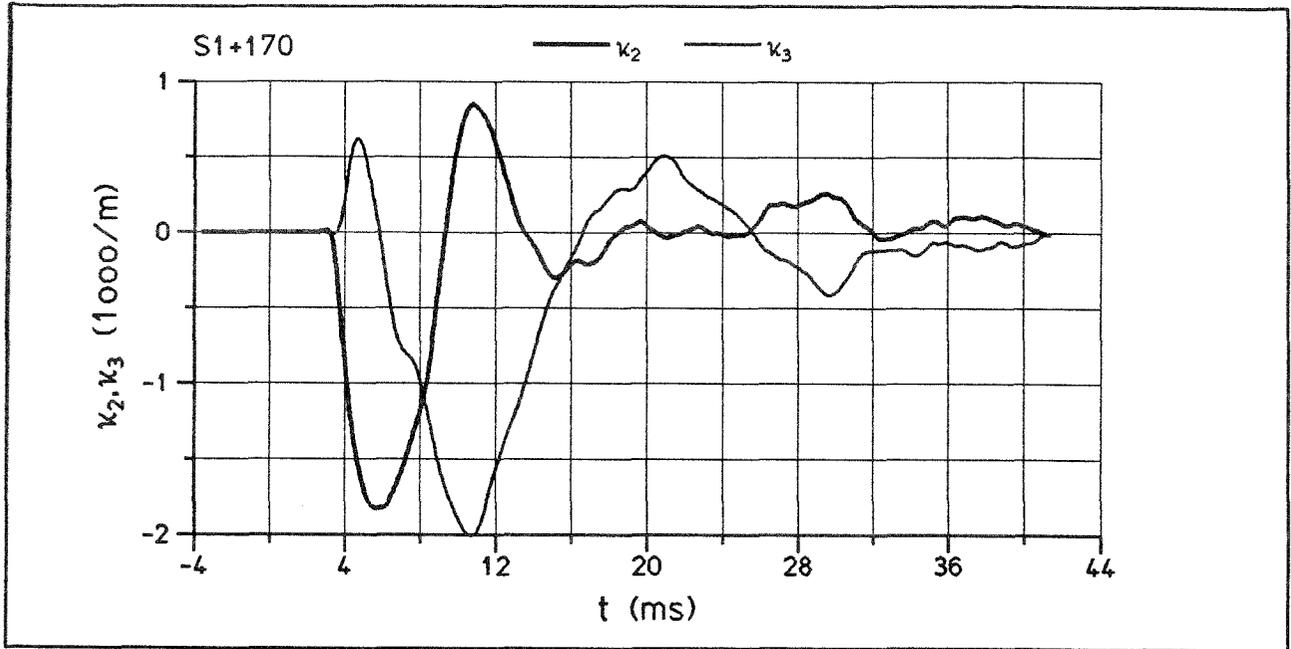
Anlage 6.7: Versuch S1- - ohne Sandtopf -
Verschiebungen s_4 , s_5



Anlage 6.8: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -
Stoßkraft F_1 , Stablängskraft F_2 , Verschiebung s_3

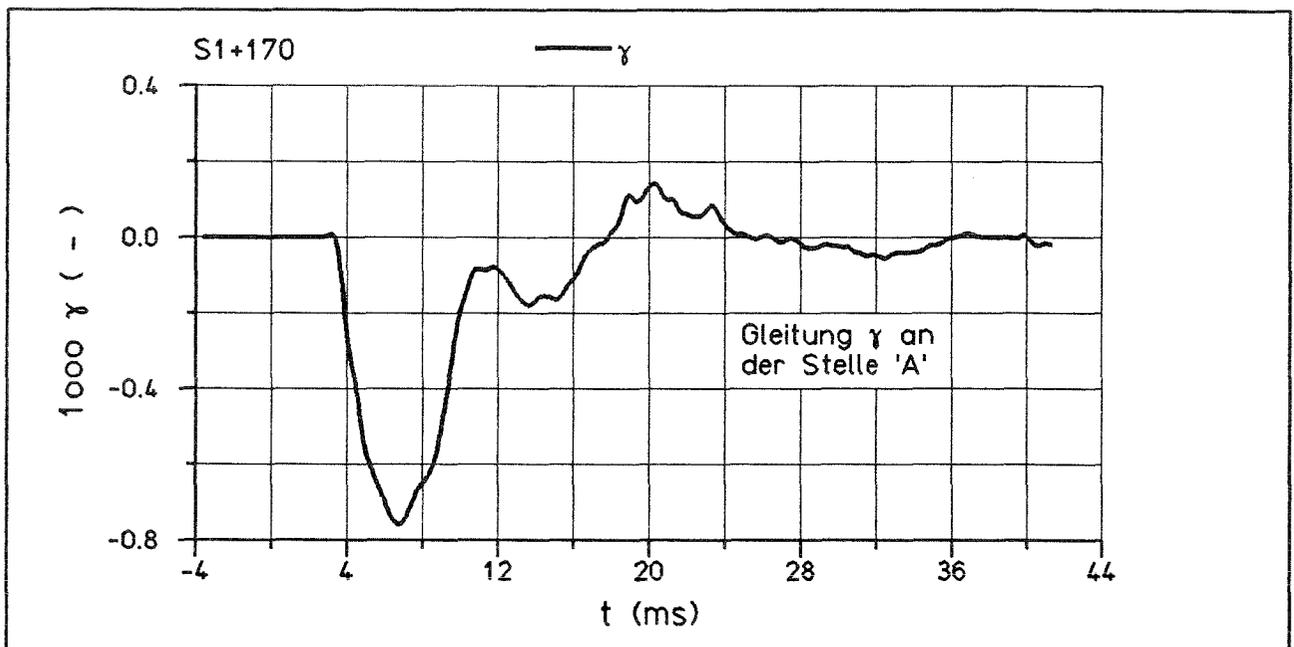
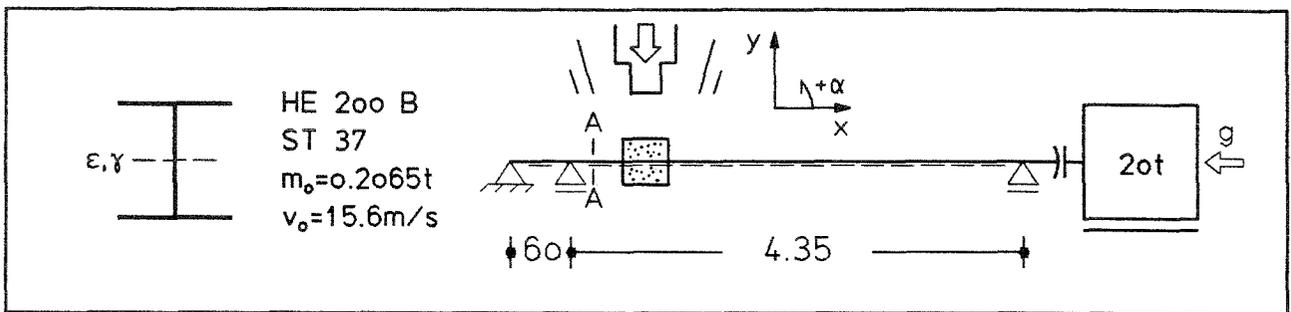
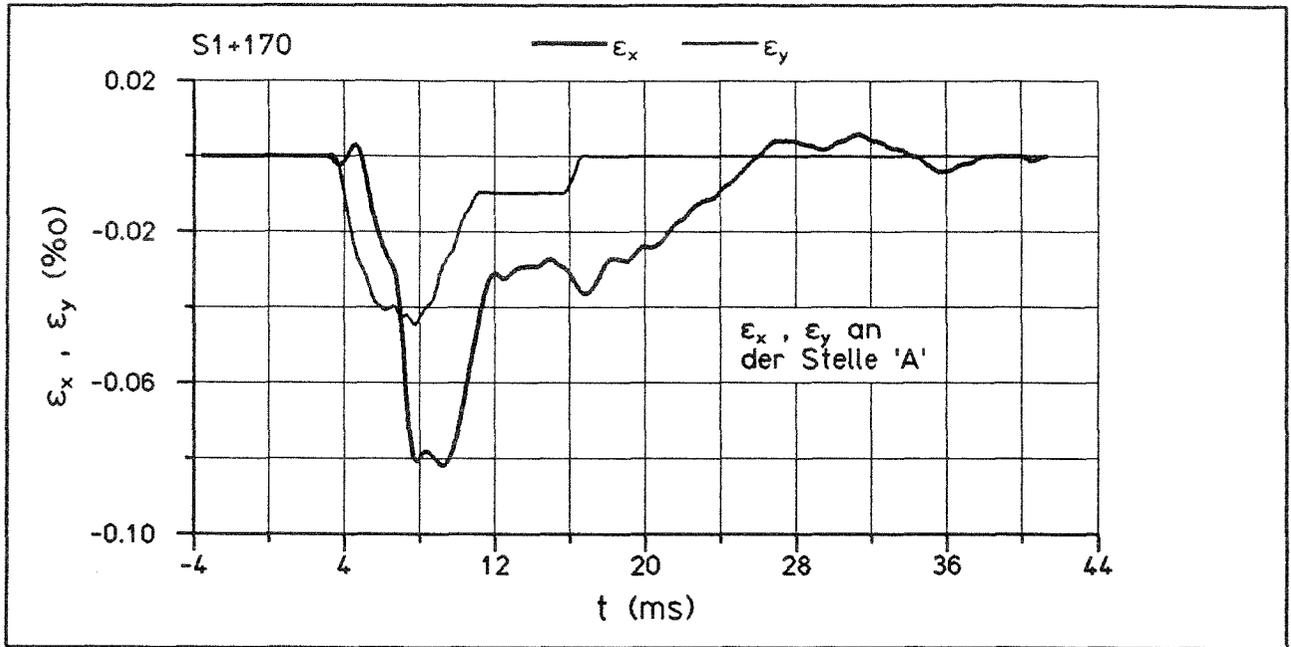


Anlage 6.9: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -
Auflagerkräfte F_3 , F_4 , F_5



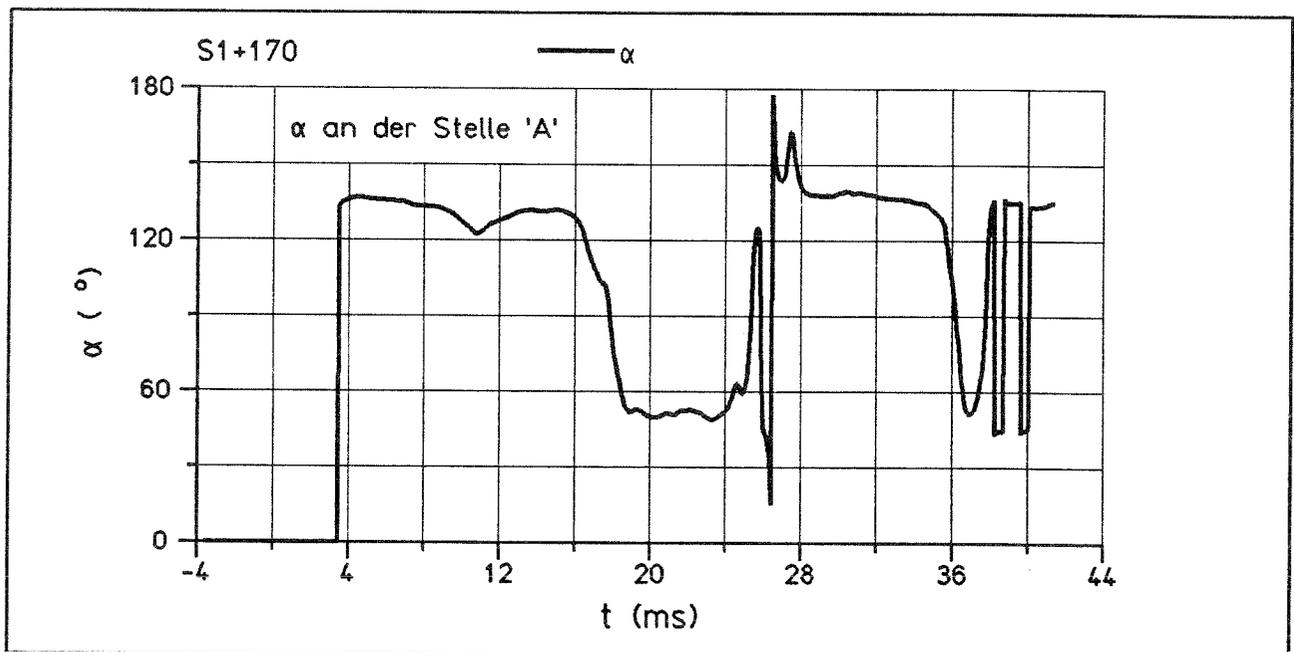
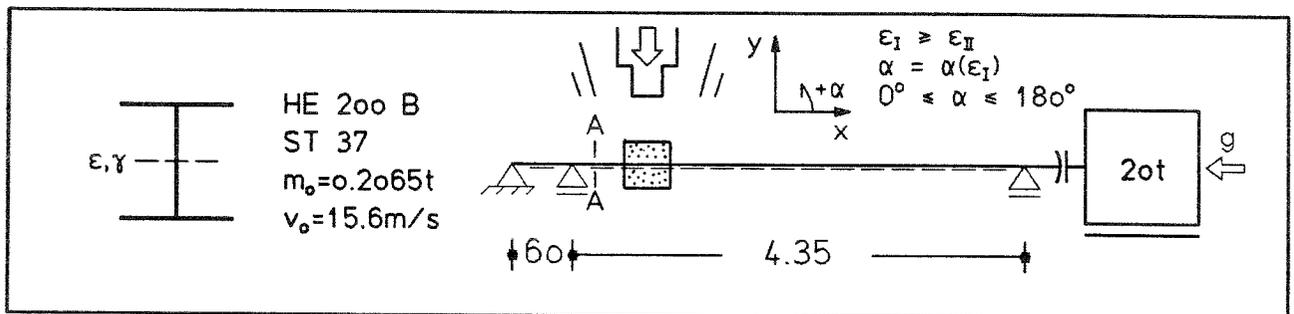
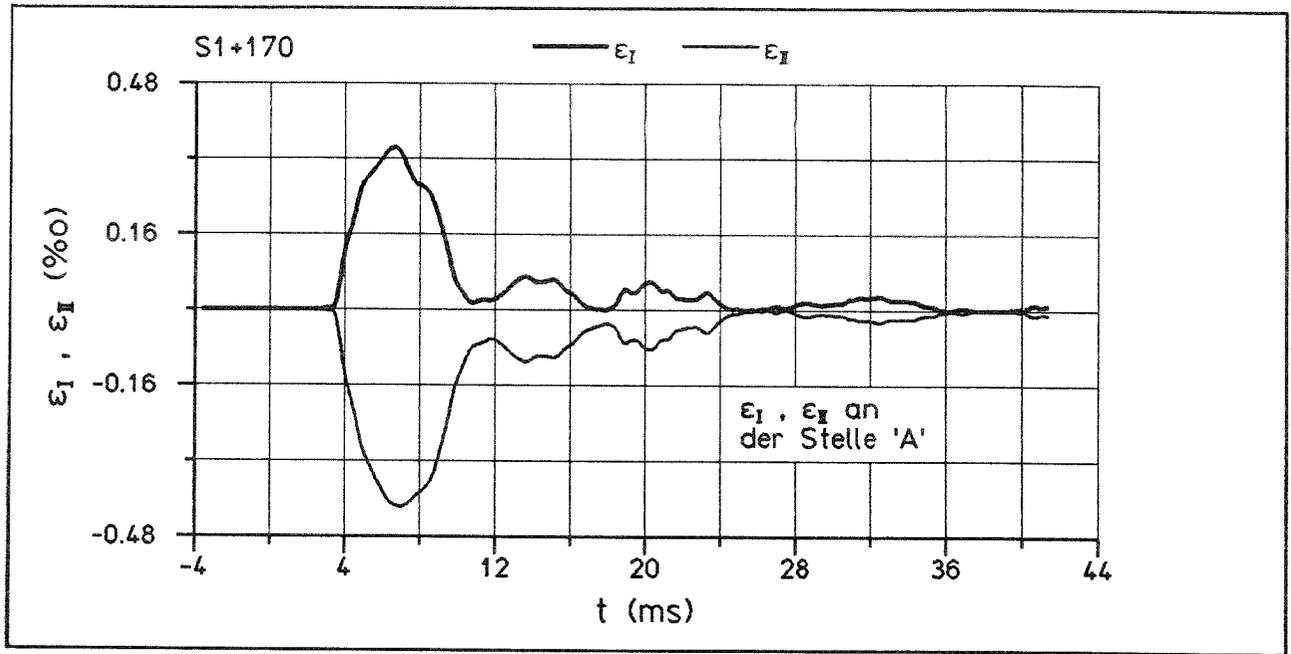
Anlage 6.10: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -

Krümmungen κ_2 , κ_3 , Differenz der Vorspankräfte ΔV_V
(negativ = Vorspankraftverlust)

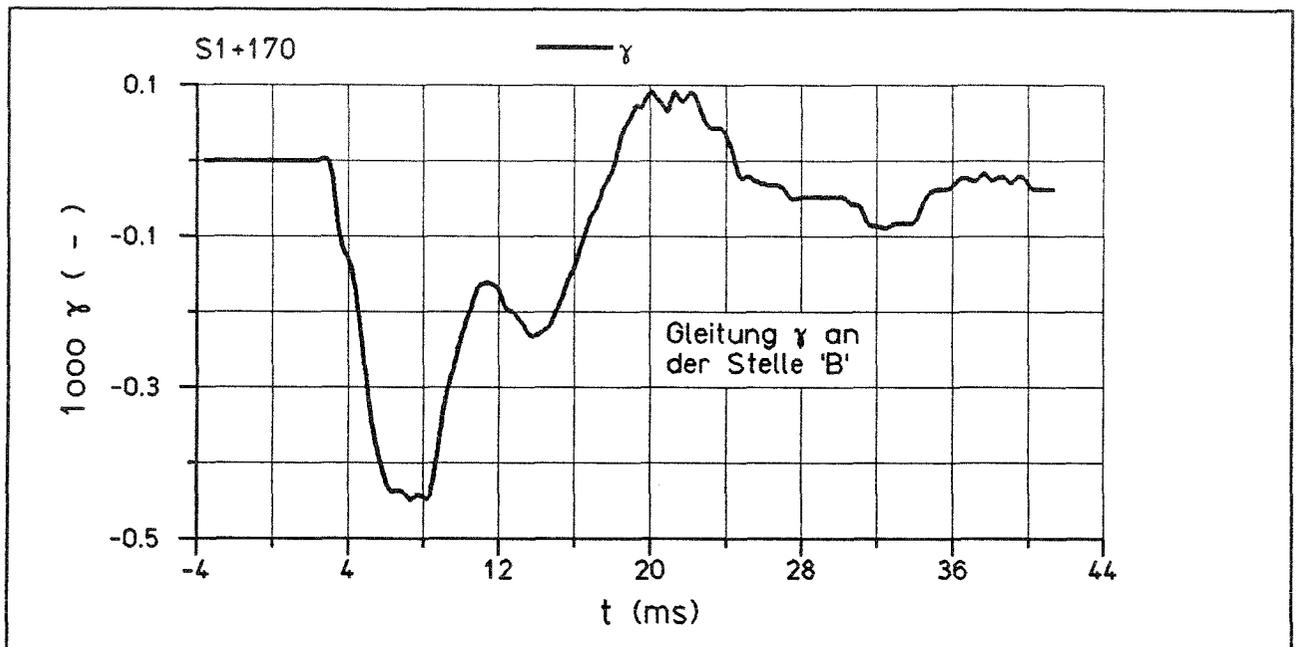
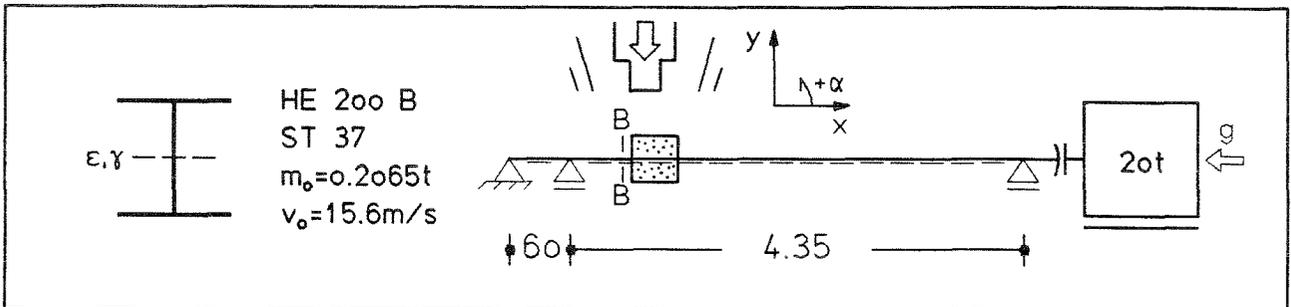
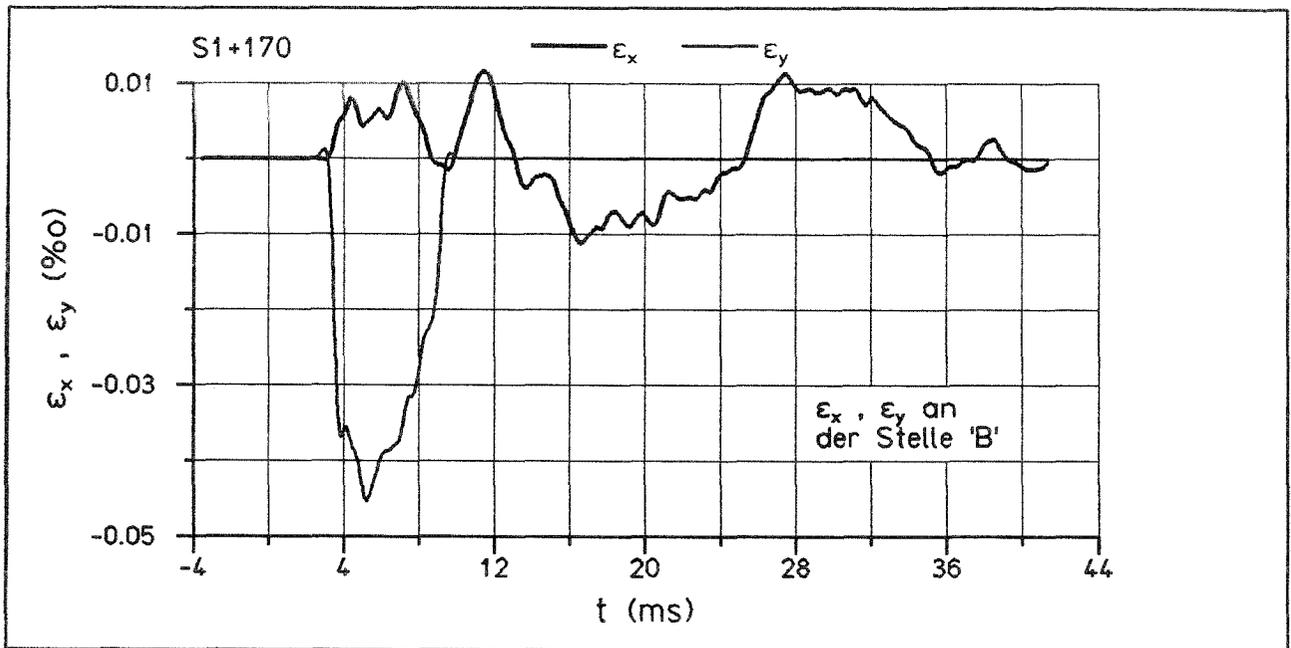


Anlage 6.11: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -

Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stabachse an der Stelle "A"

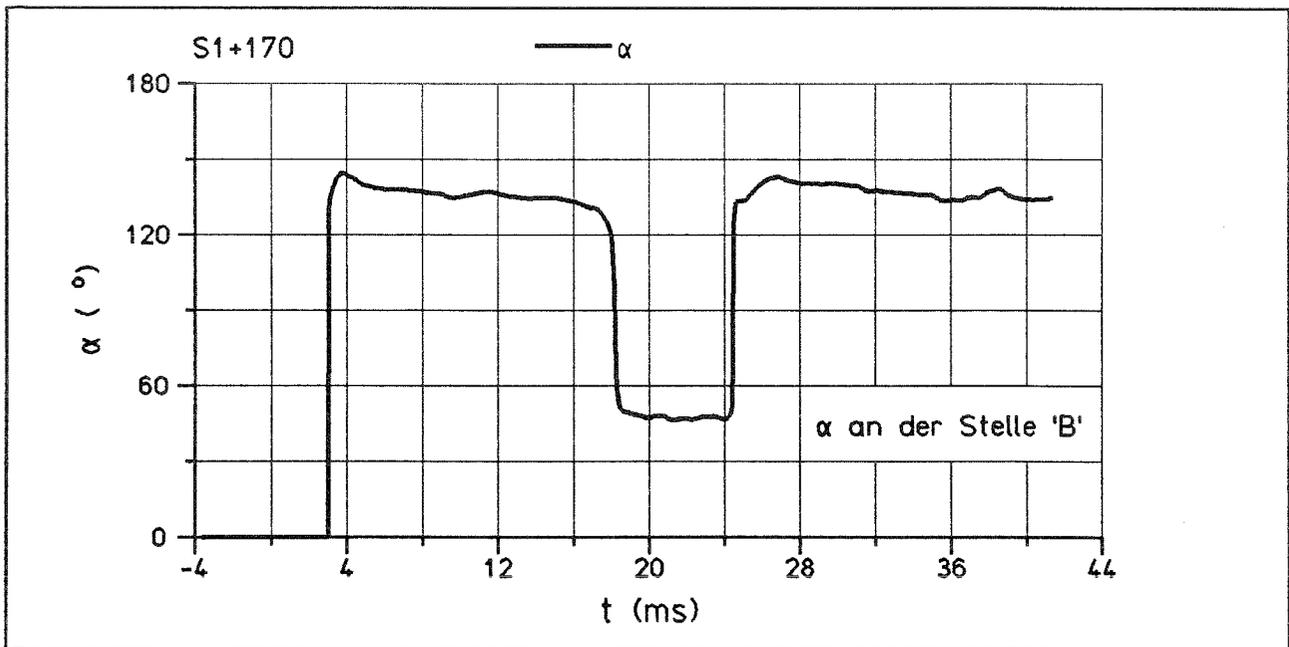
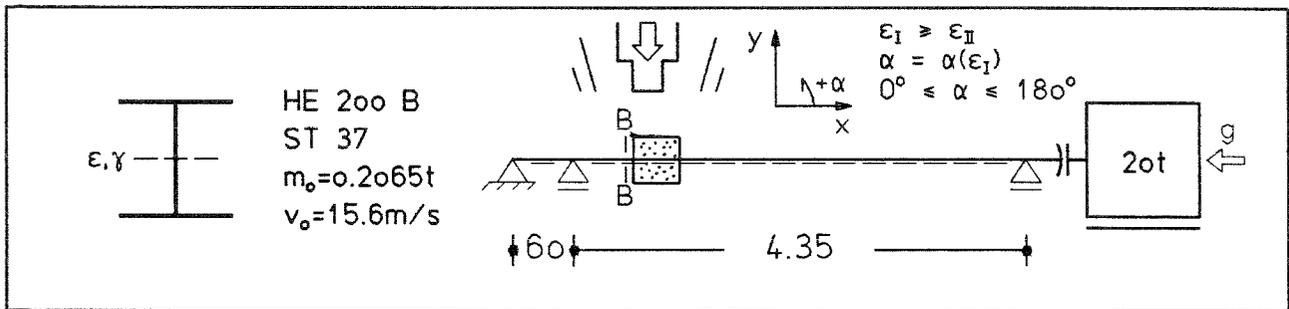
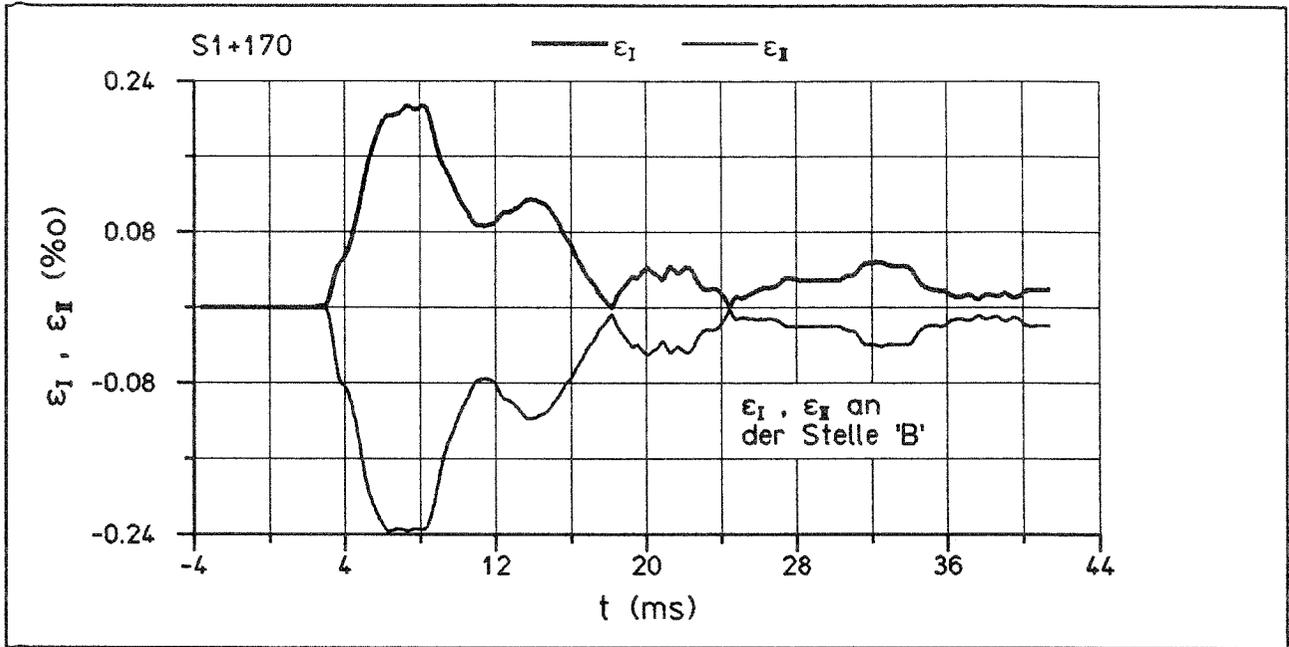


Anlage 6.12: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -
Hauptdehnungen $\epsilon_I, \epsilon_{II}$, Winkel der Hauptzugdehnung α
in Stabachse an der Stelle "A"



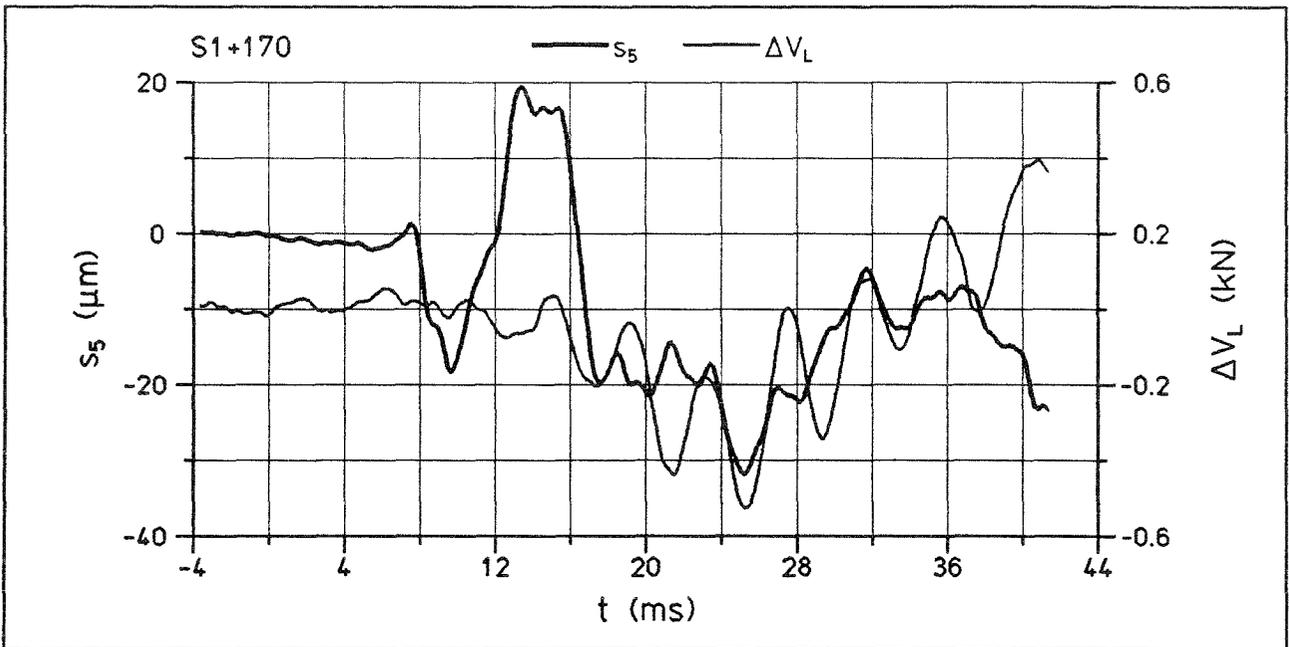
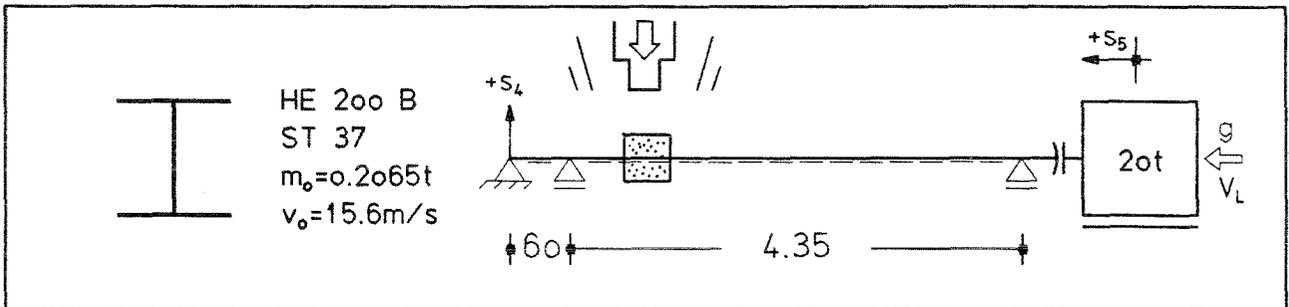
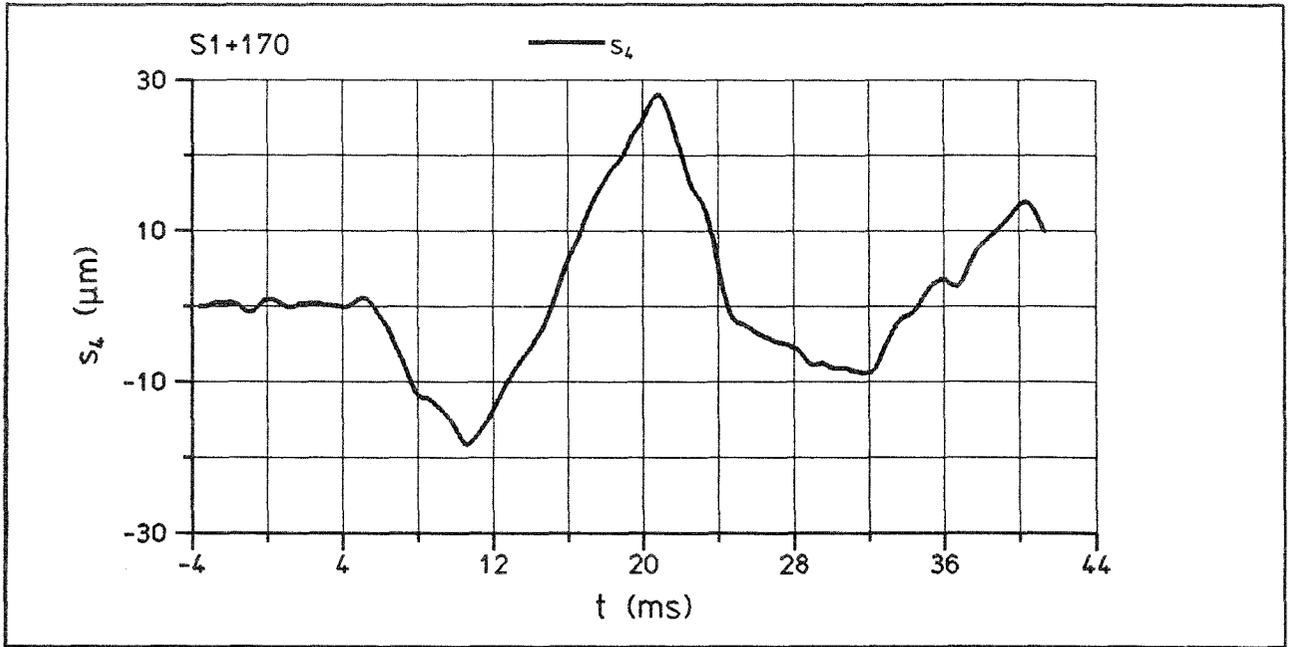
Anlage 6.13: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -

Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stabachse an der Stelle "B"

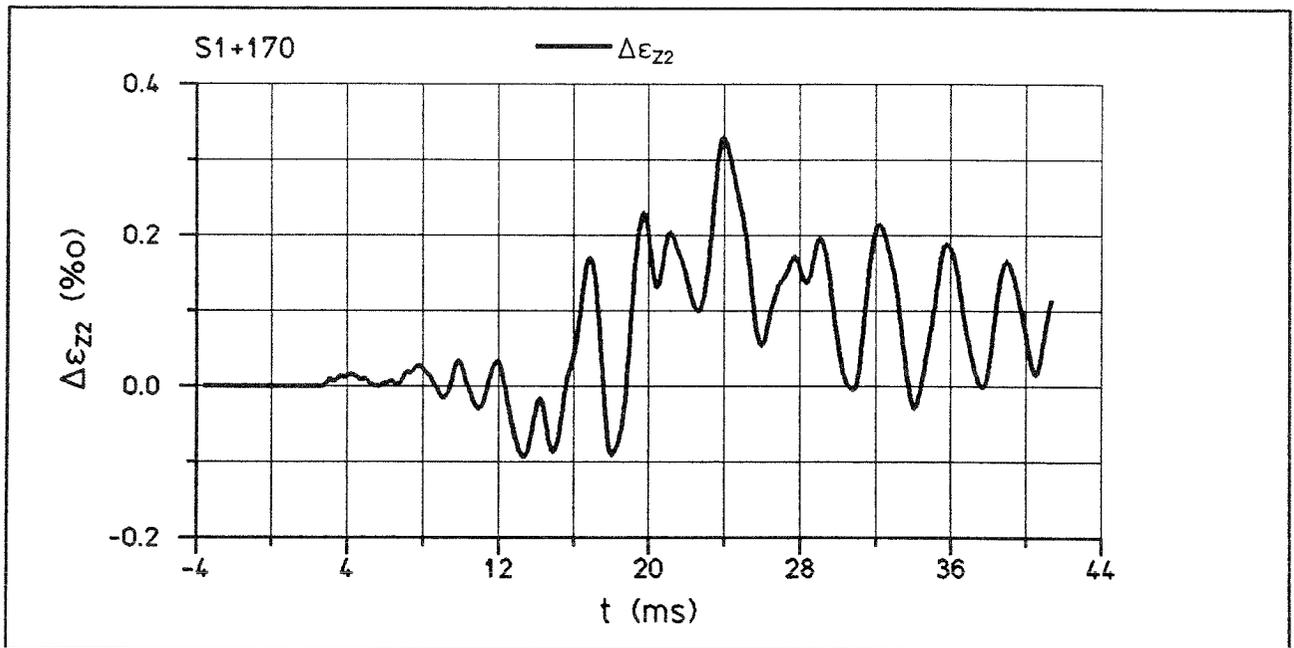
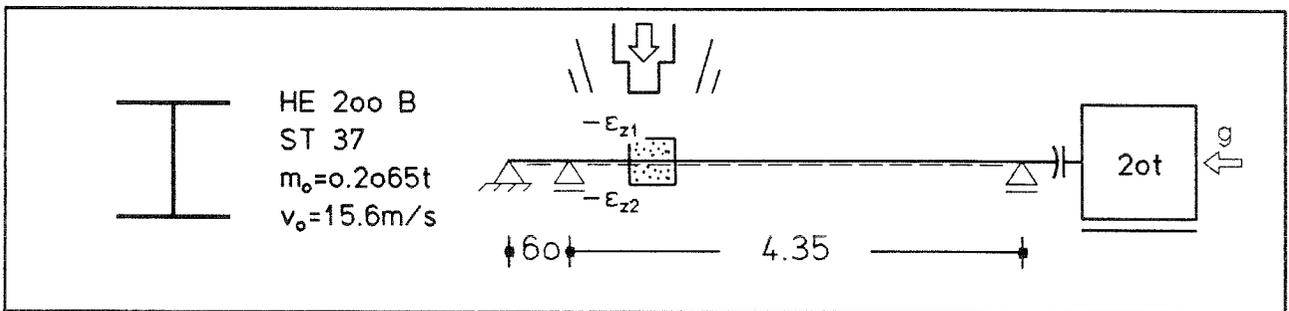
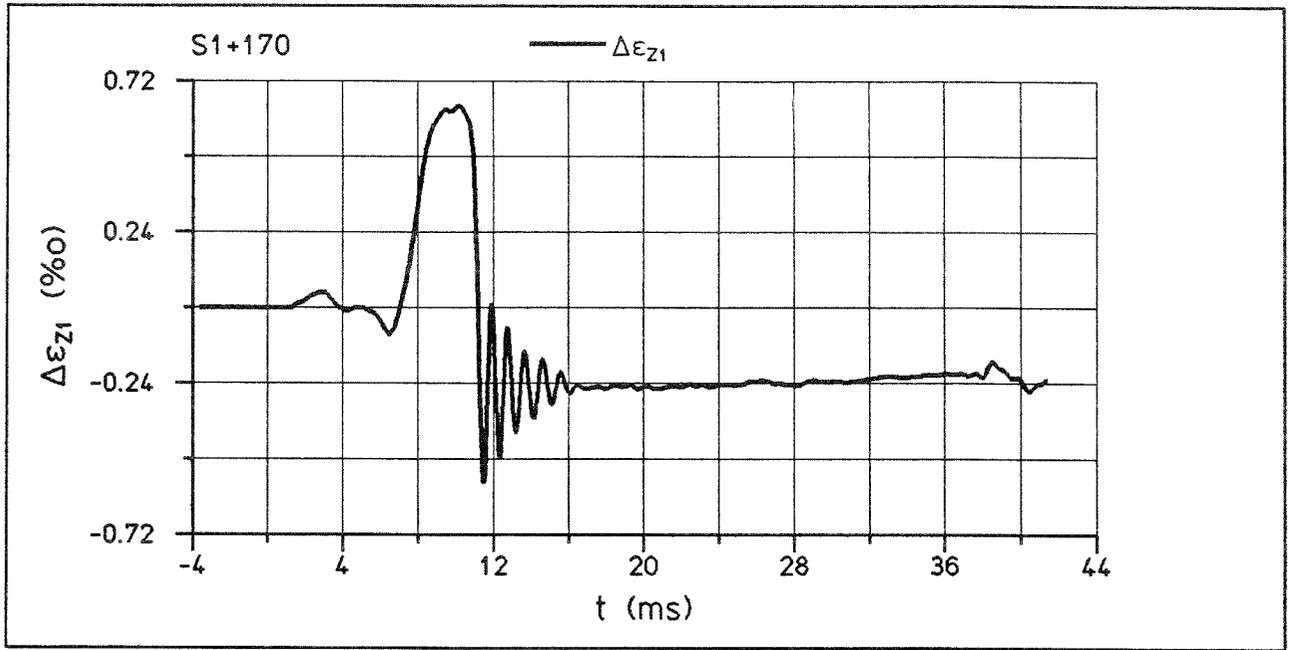


Anlage 6.14: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -

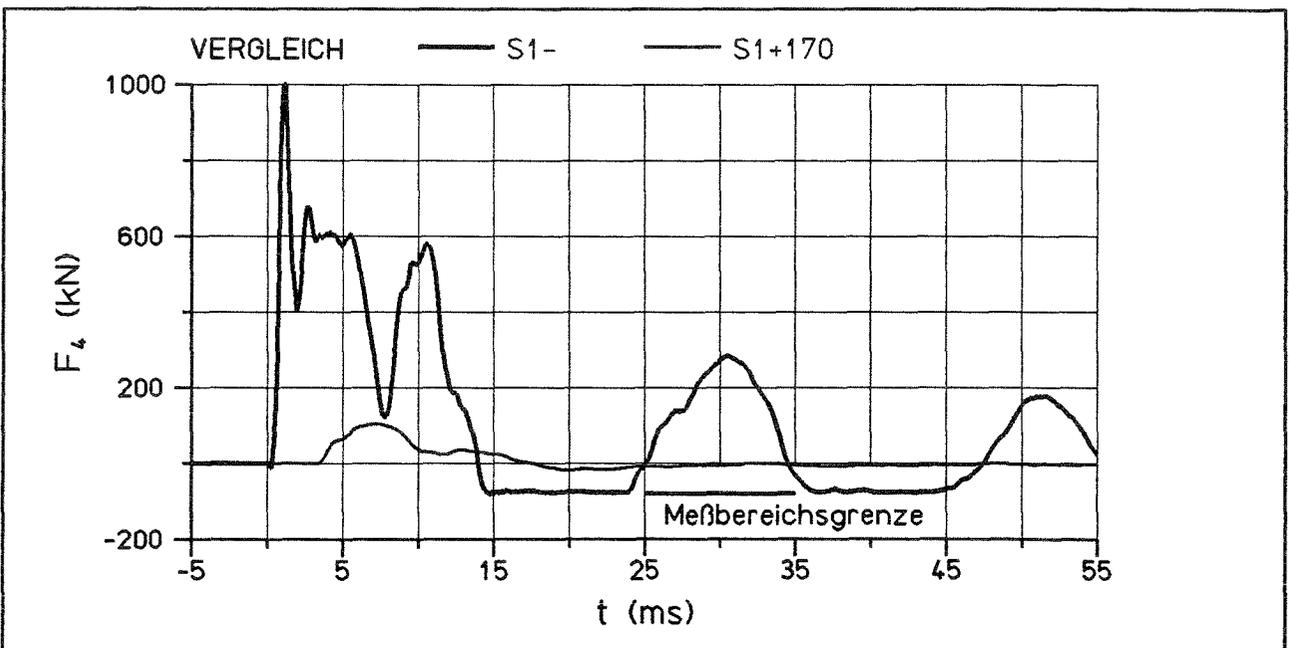
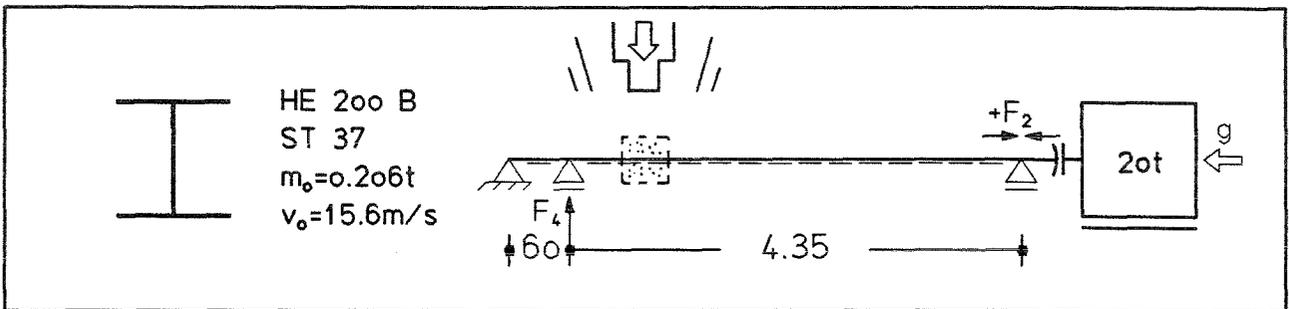
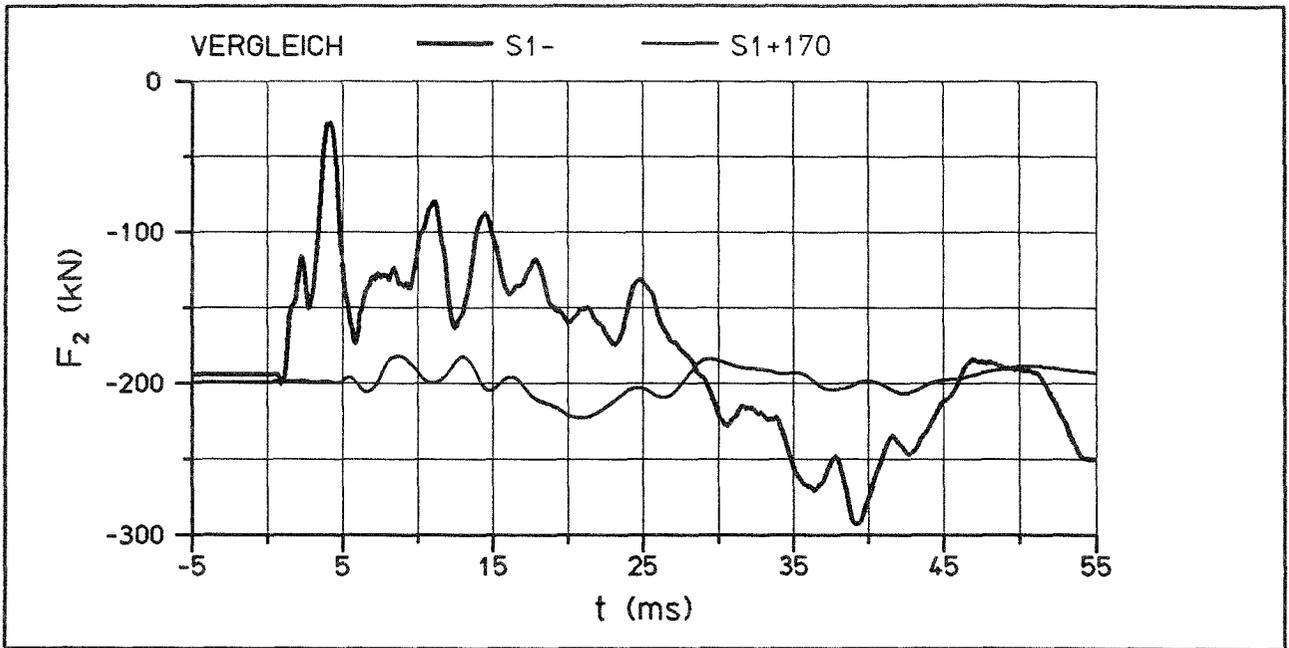
Hauptdehnungen $\epsilon_I, \epsilon_{II}$, Winkel der Hauptzugdehnung α
in Stabachse an der Stelle "B"



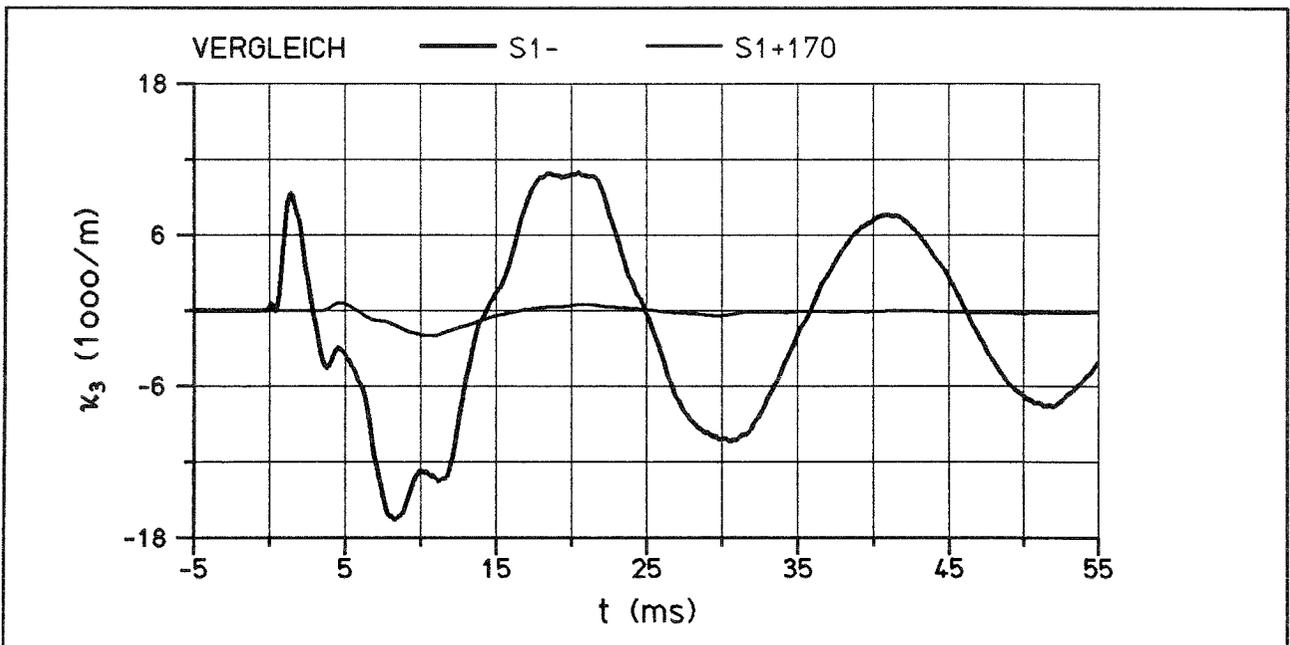
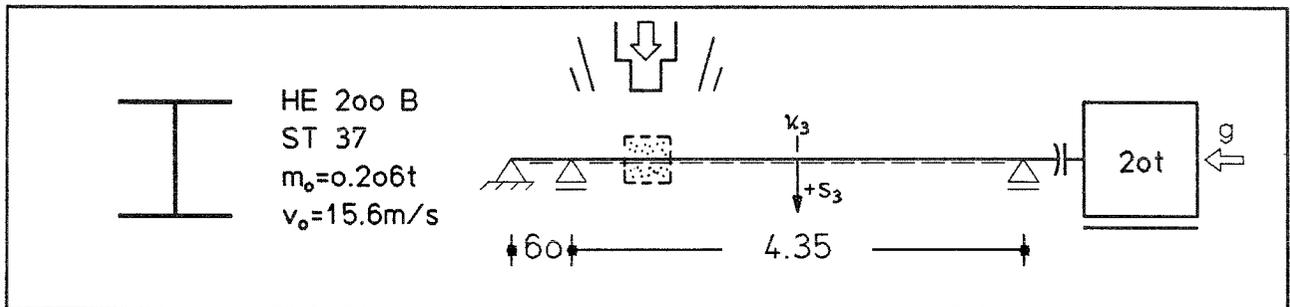
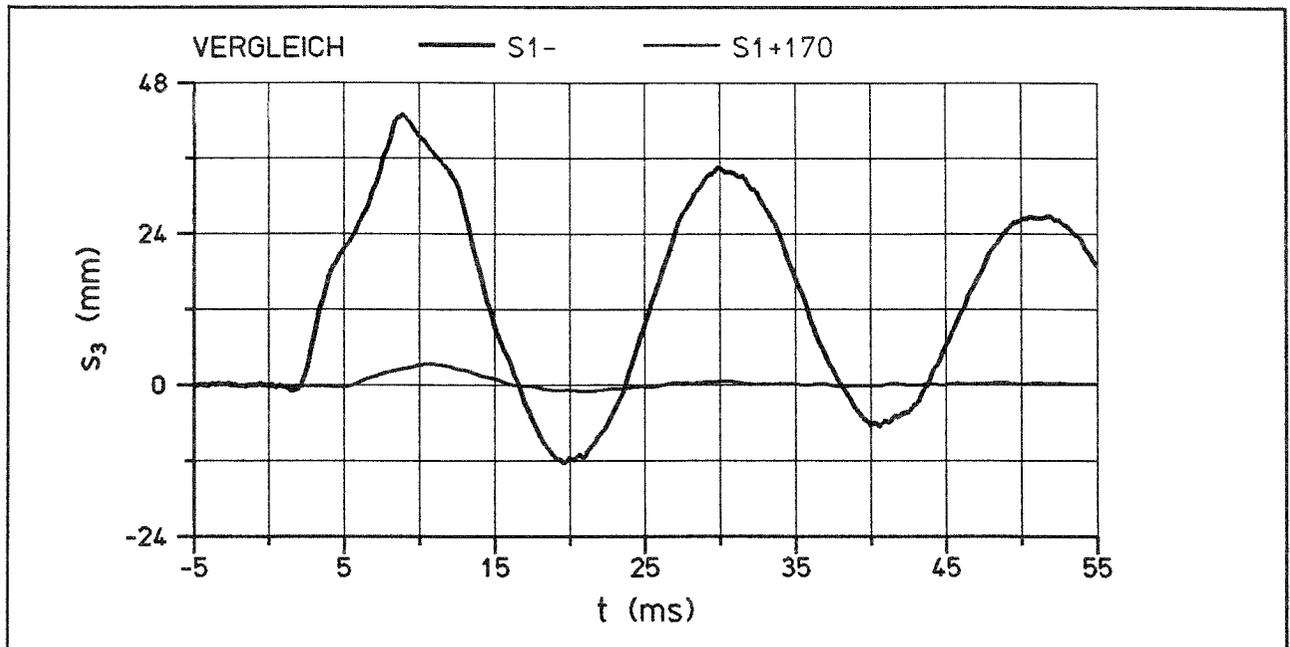
Anlage 6.15: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -
Verschiebungen s_4 , s_5



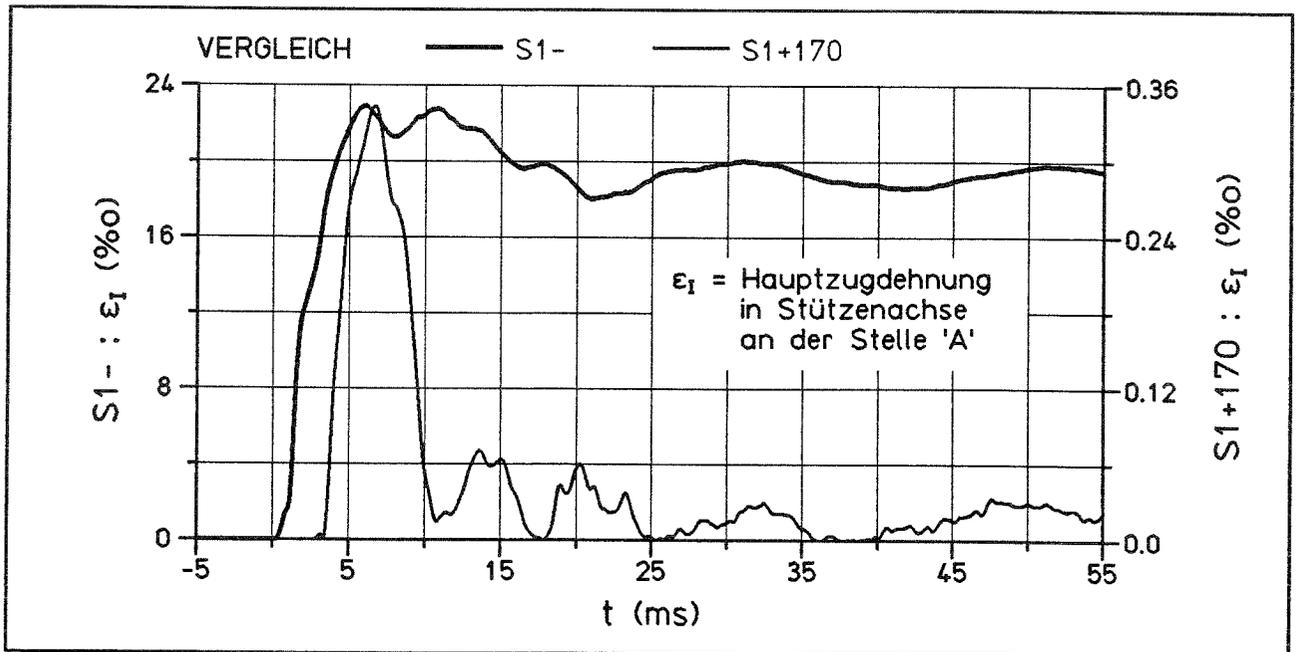
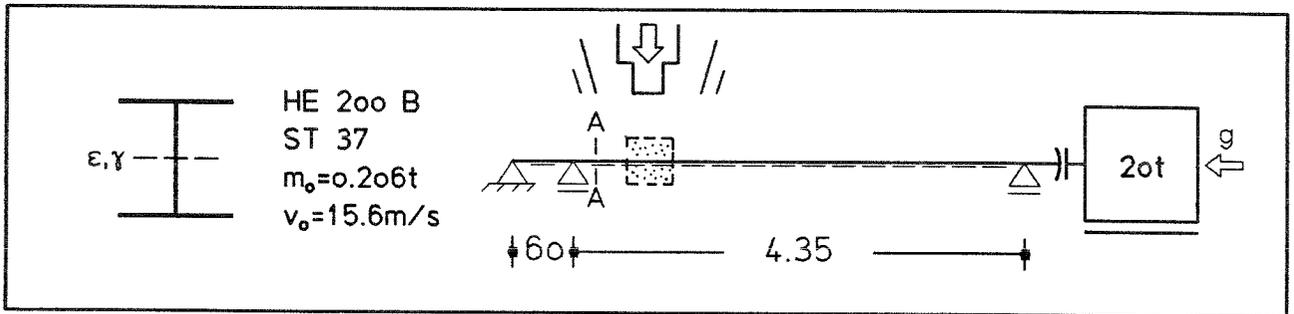
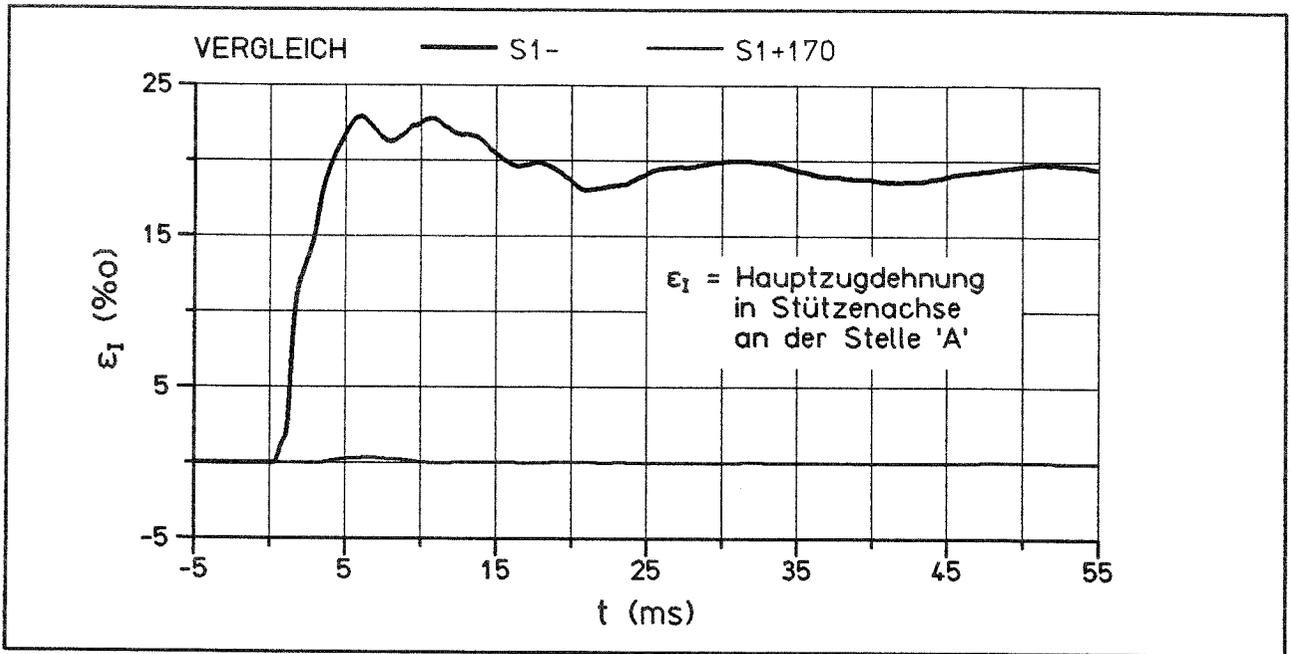
Anlage 6.16: Versuch S1+170 - mit Sandtopf -
Differenz der Zugstangendehnungen ϵ_{z1} , ϵ_{z2}
(negativ = Vorspannkraftverlust)



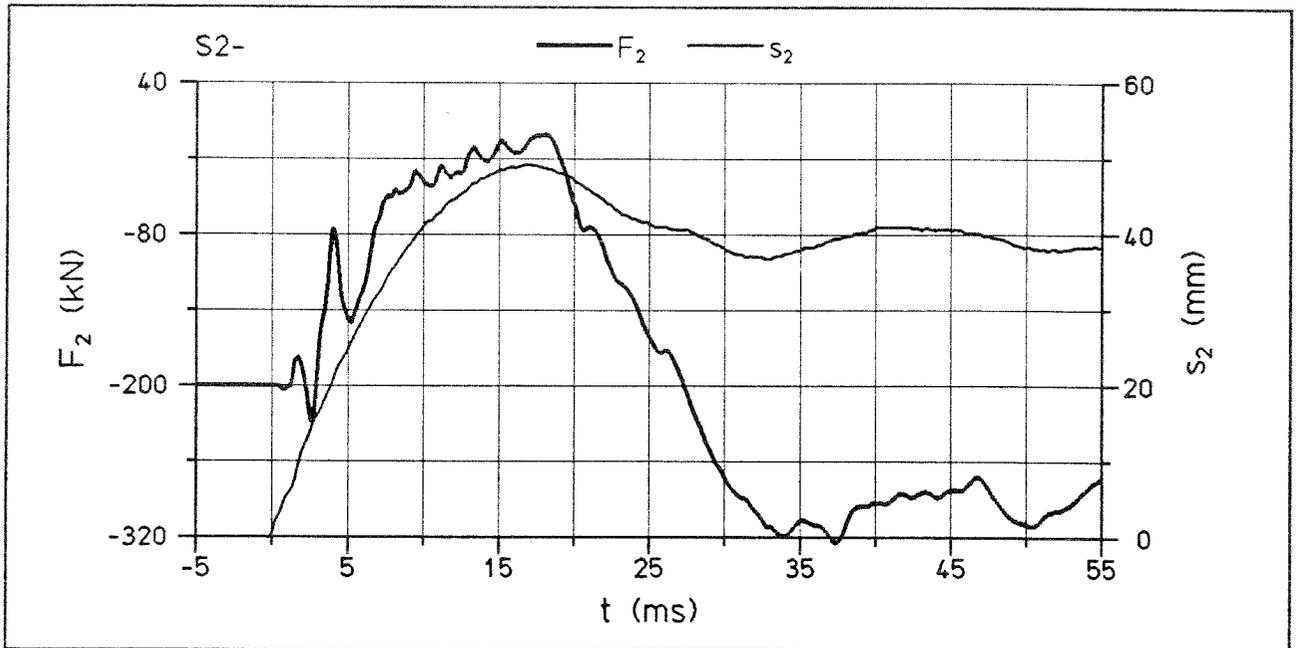
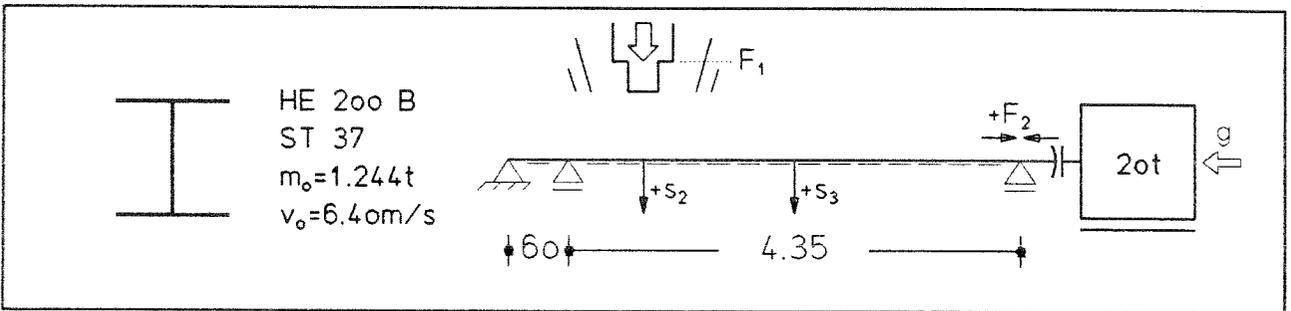
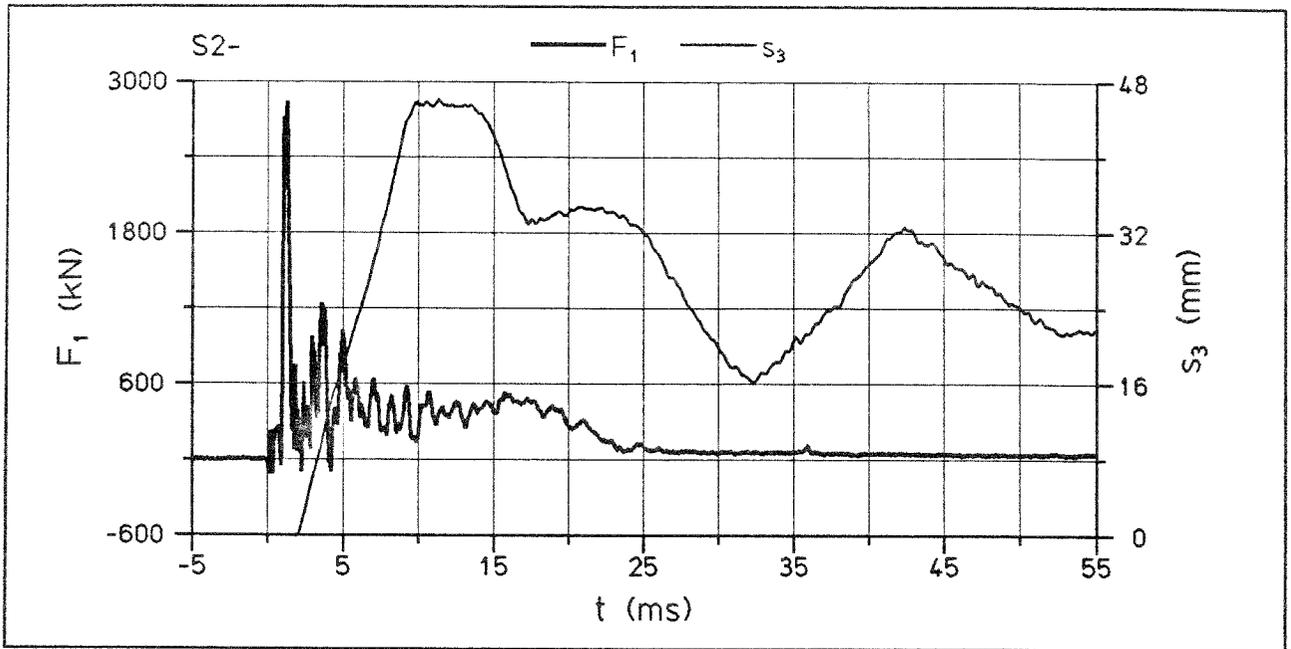
Anlage 6.17: Versuche S1-, S1+170 - mit Sandtopf -
Stablängskräfte F_2 , Auflagerkräfte F_4



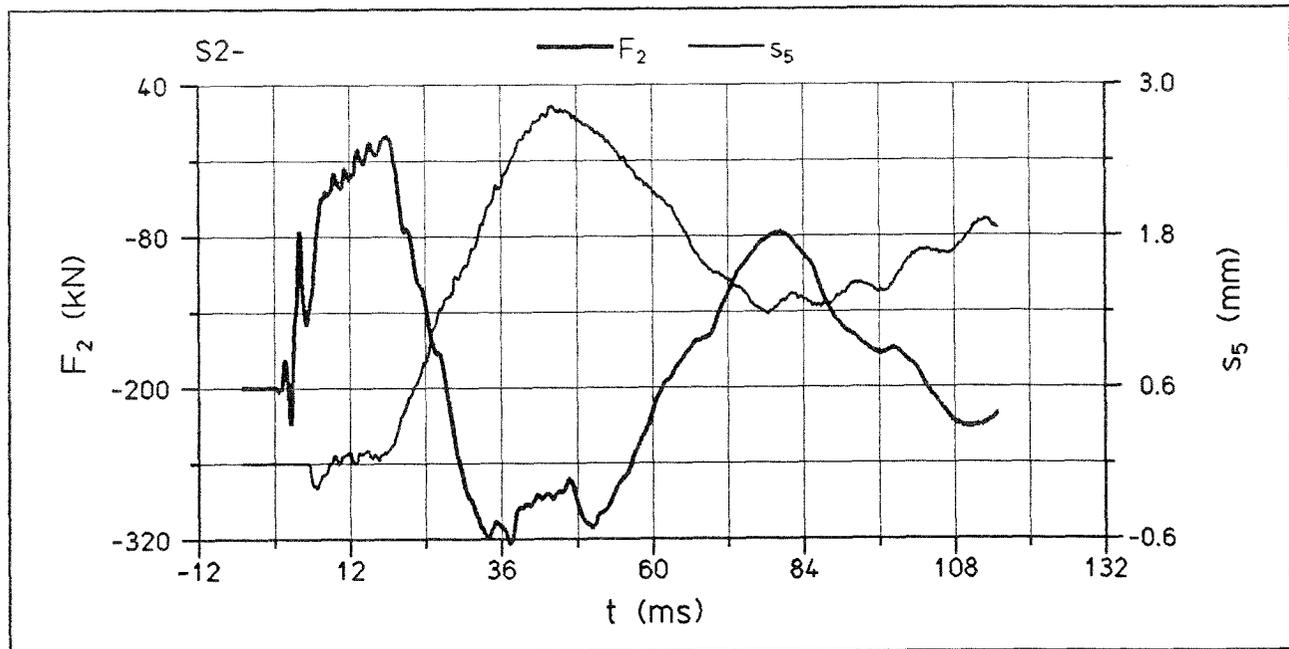
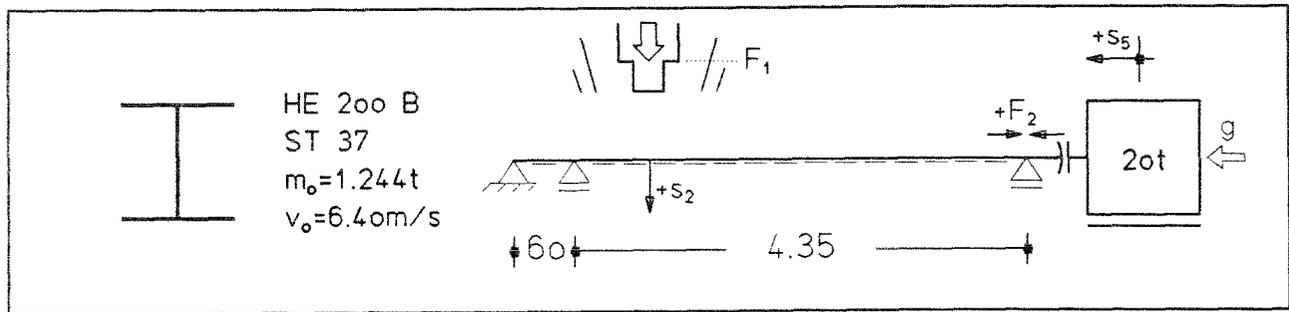
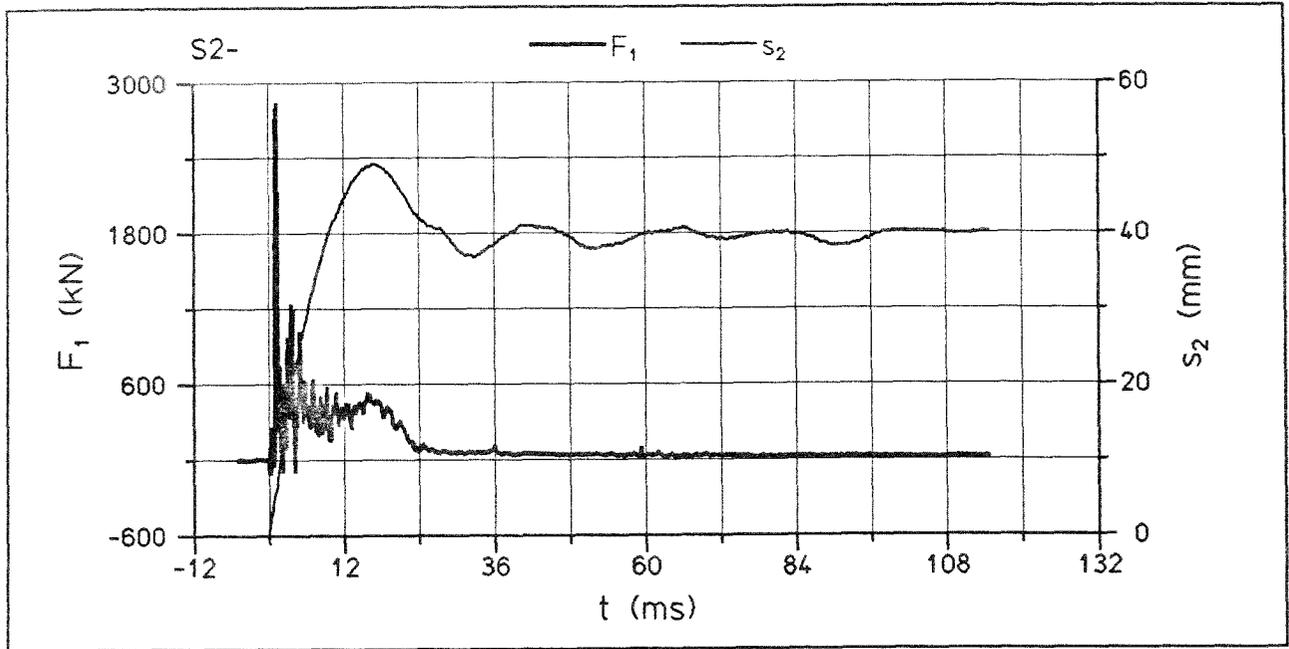
Anlage 6.18: Versuche S1-, S1+170 - mit und ohne Sandtopf -
Verschiebungen s_3 , Krümmungen κ_3



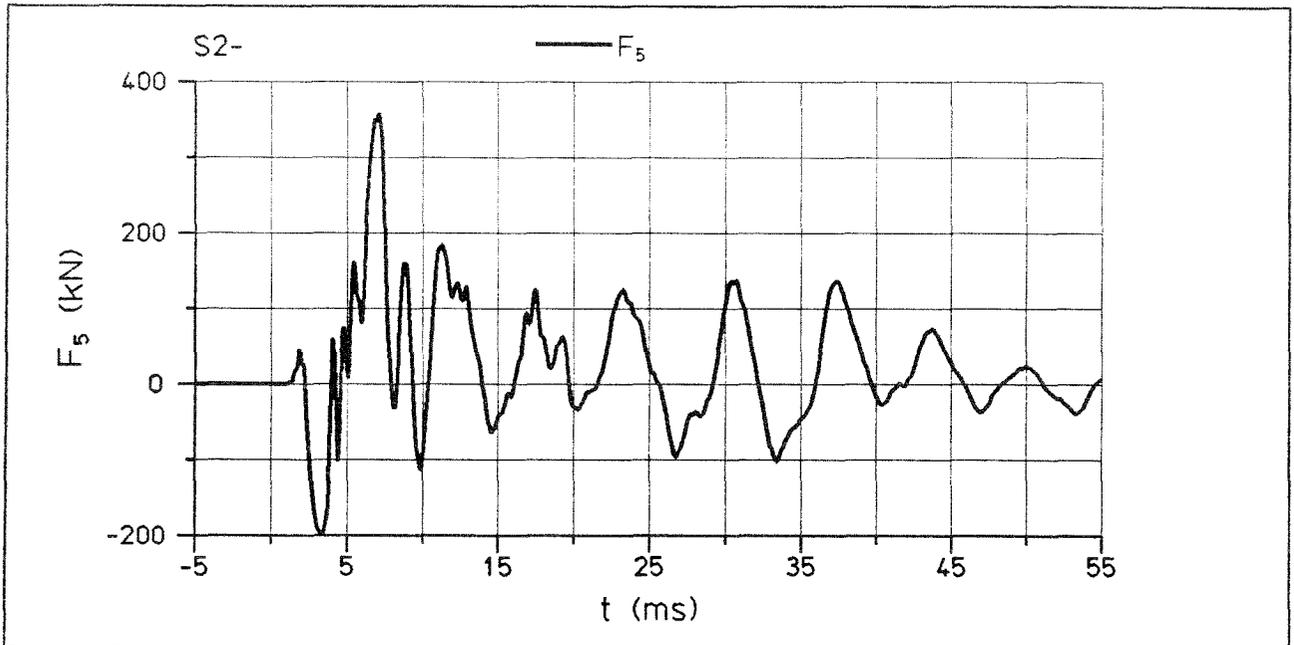
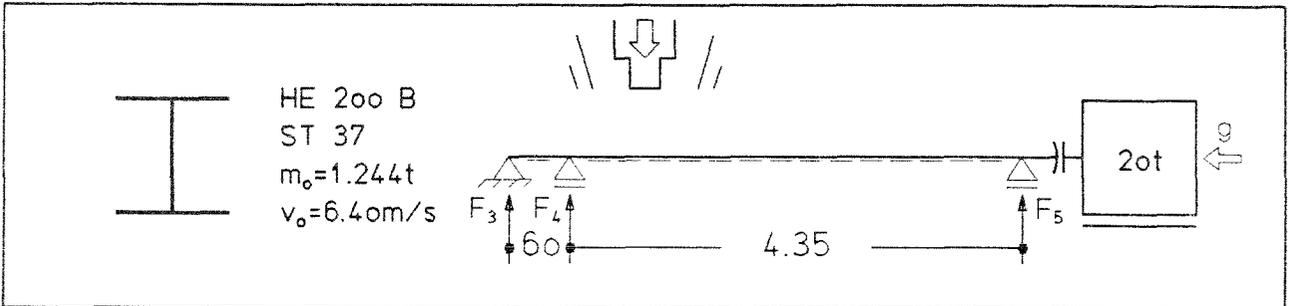
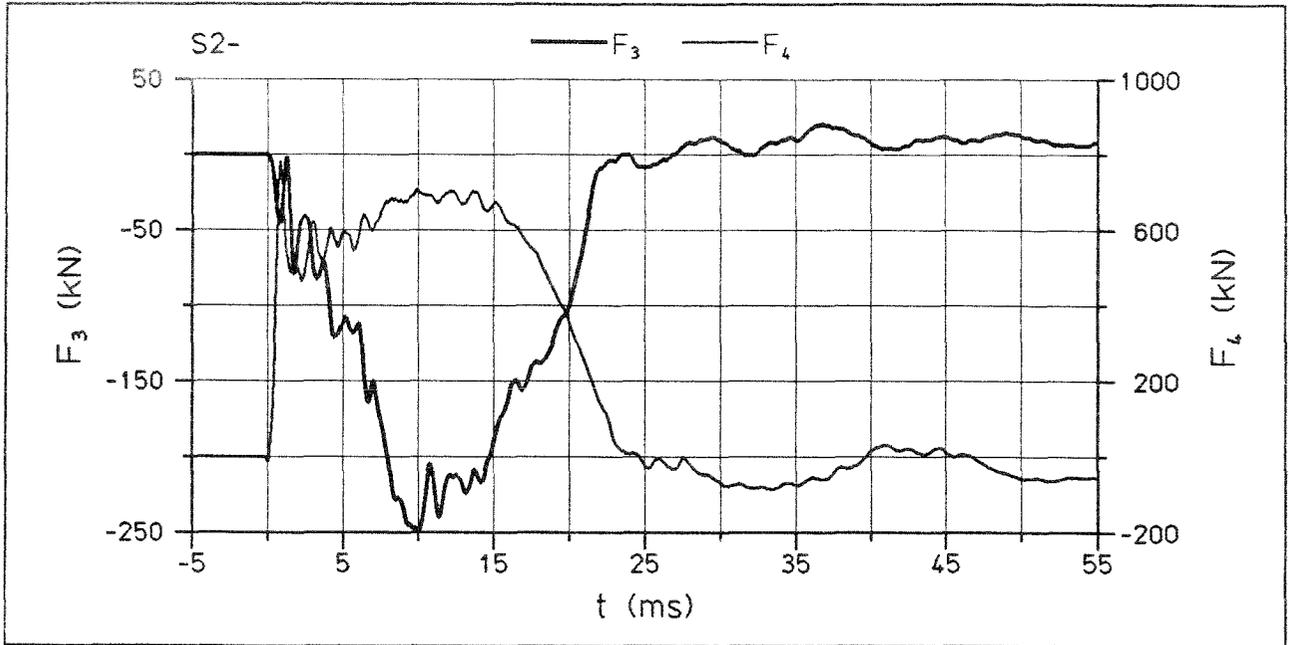
Anlage 6.19: Versuche S1-, S1+170 - mit und ohne Sandtopf - Hauptzugdehnungen ϵ_I



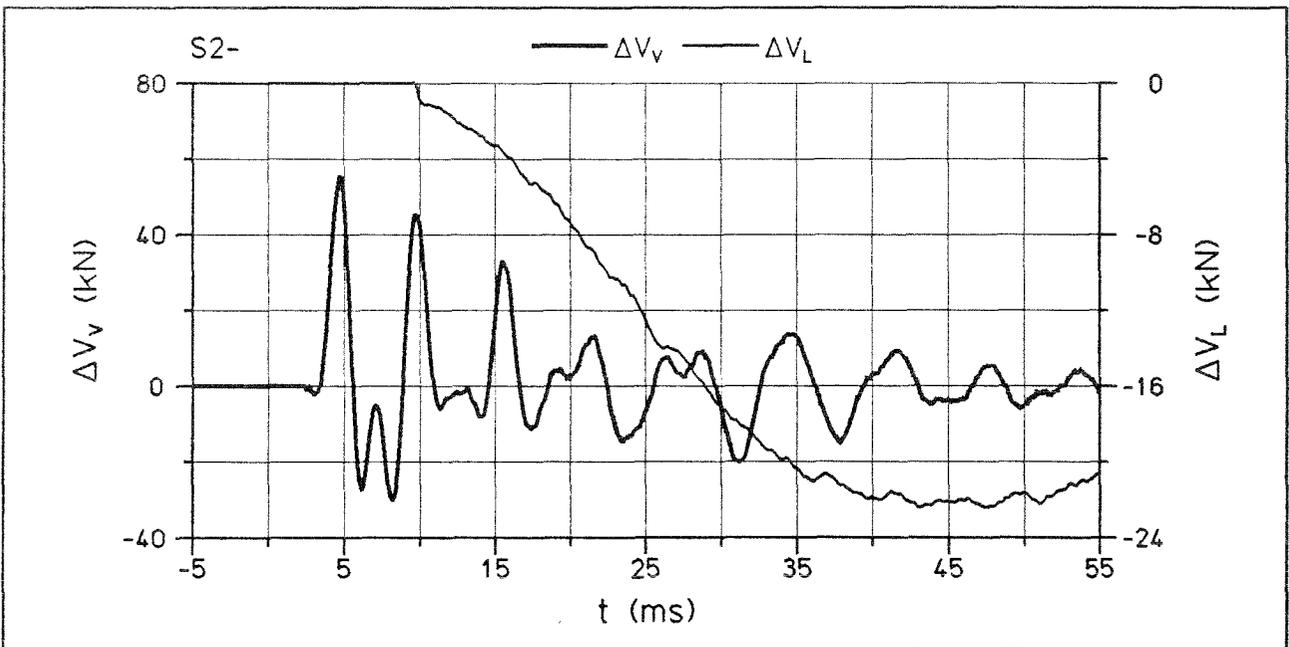
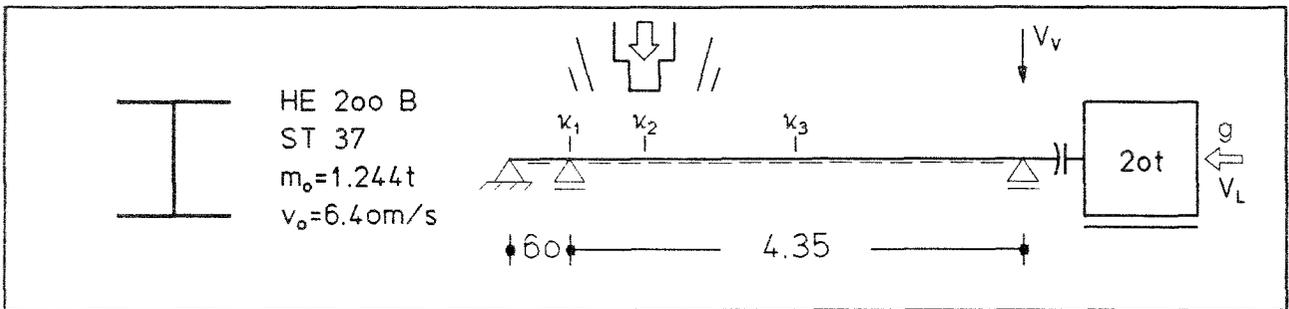
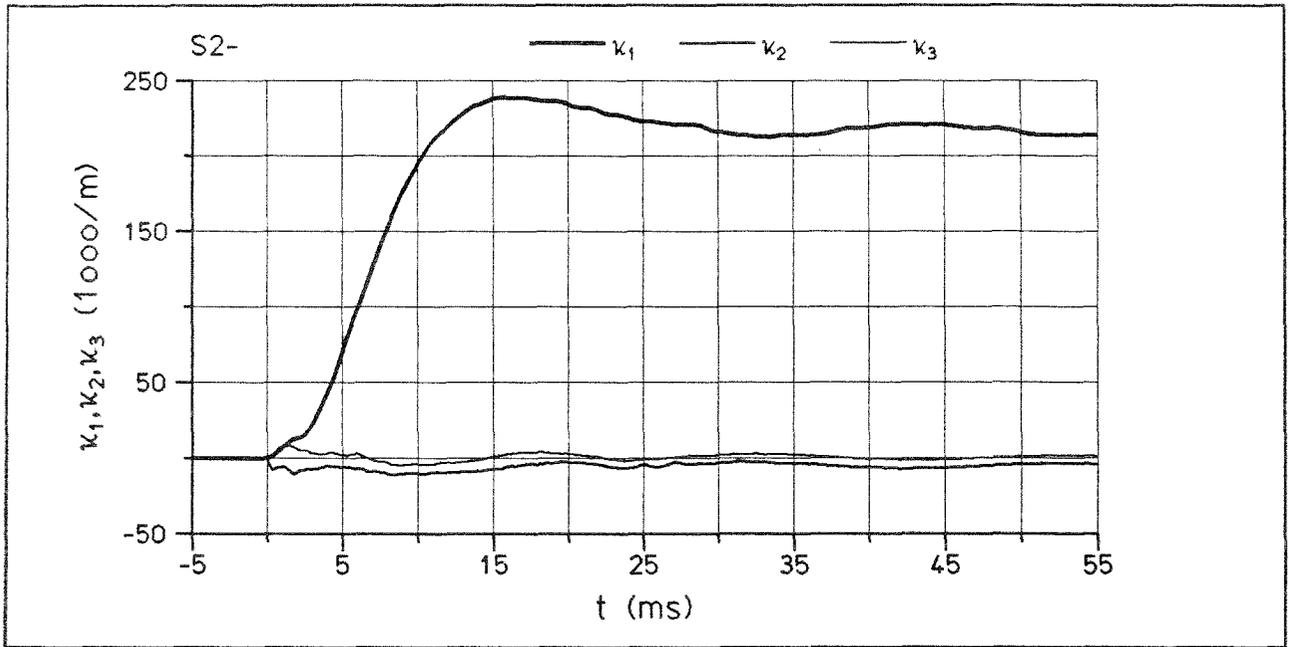
Anlage 6.20: Versuch S2- - ohne Sandtopf -
 Stoßkraft F_1 , Stablängskraft F_2 , Verschiebungen s_2, s_3



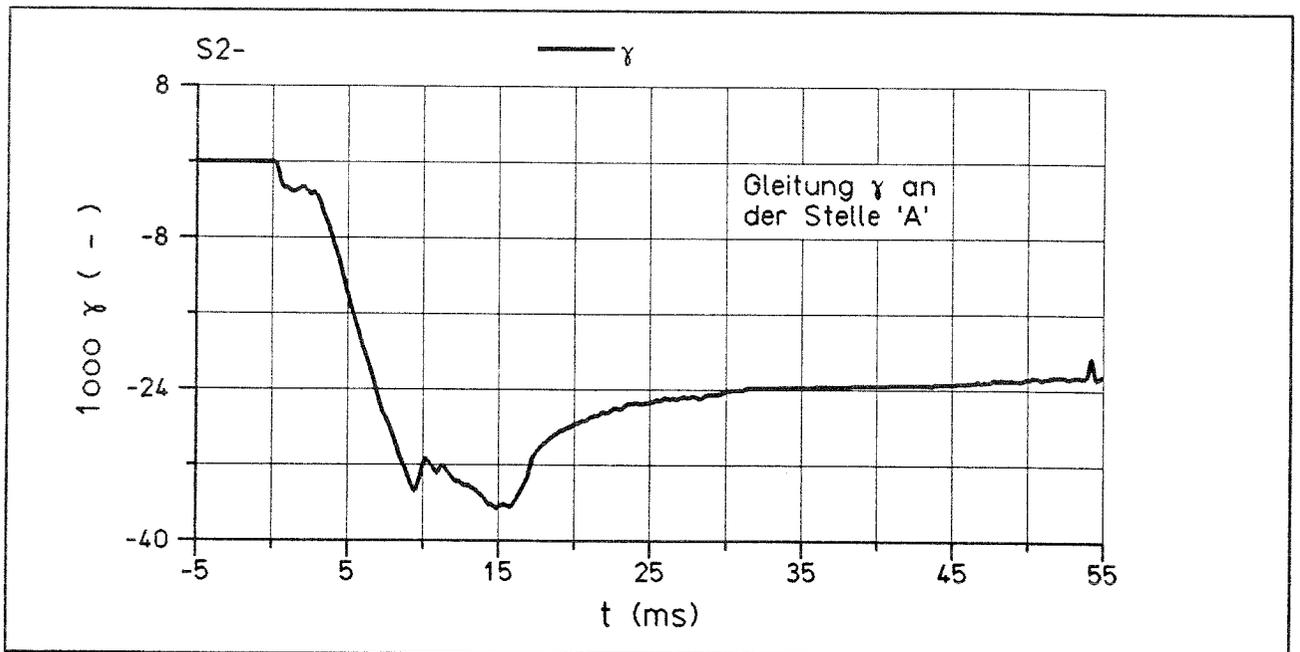
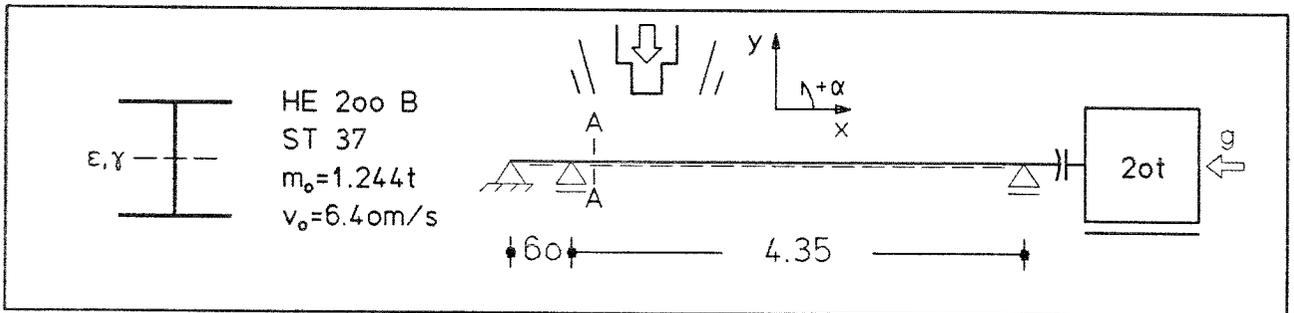
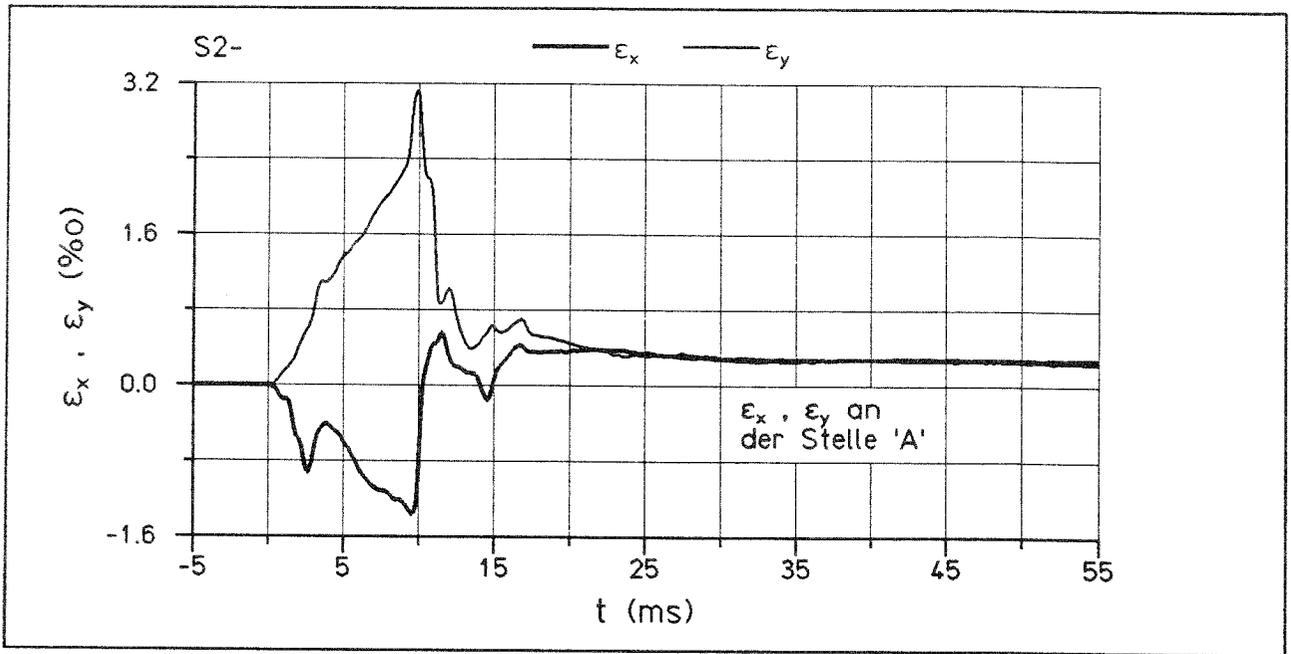
Anlage 6.21: Versuch S2- - ohne Sandtopf -
 Stoßkraft F_1 , Stablängskraft F_2 , Verschiebungen s_2 , s_5



Anlage 6.22: Versuch S2- - ohne Sandtopf -
Auflagerkräfte F_3 , F_4 , F_5

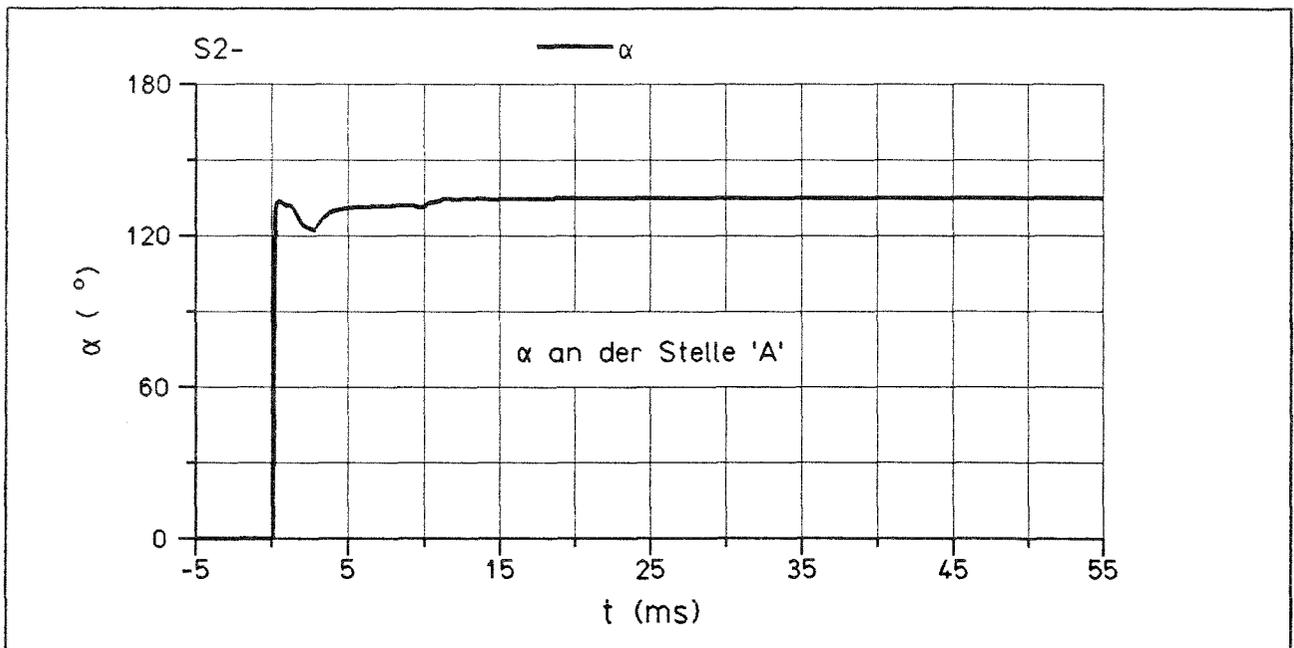
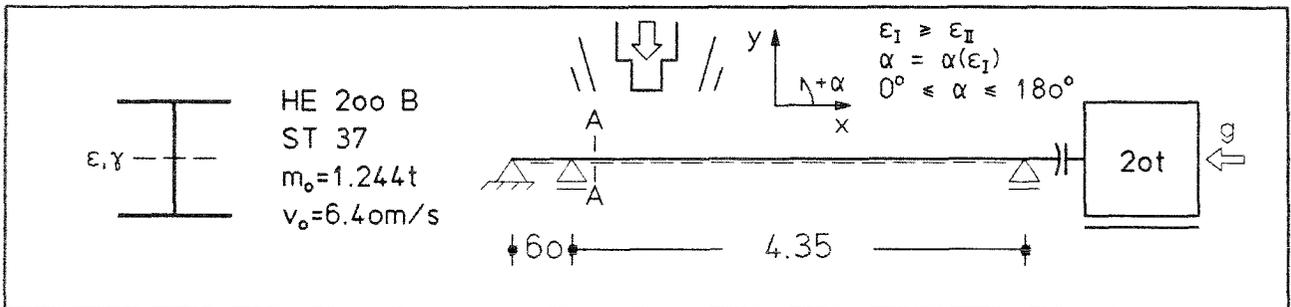
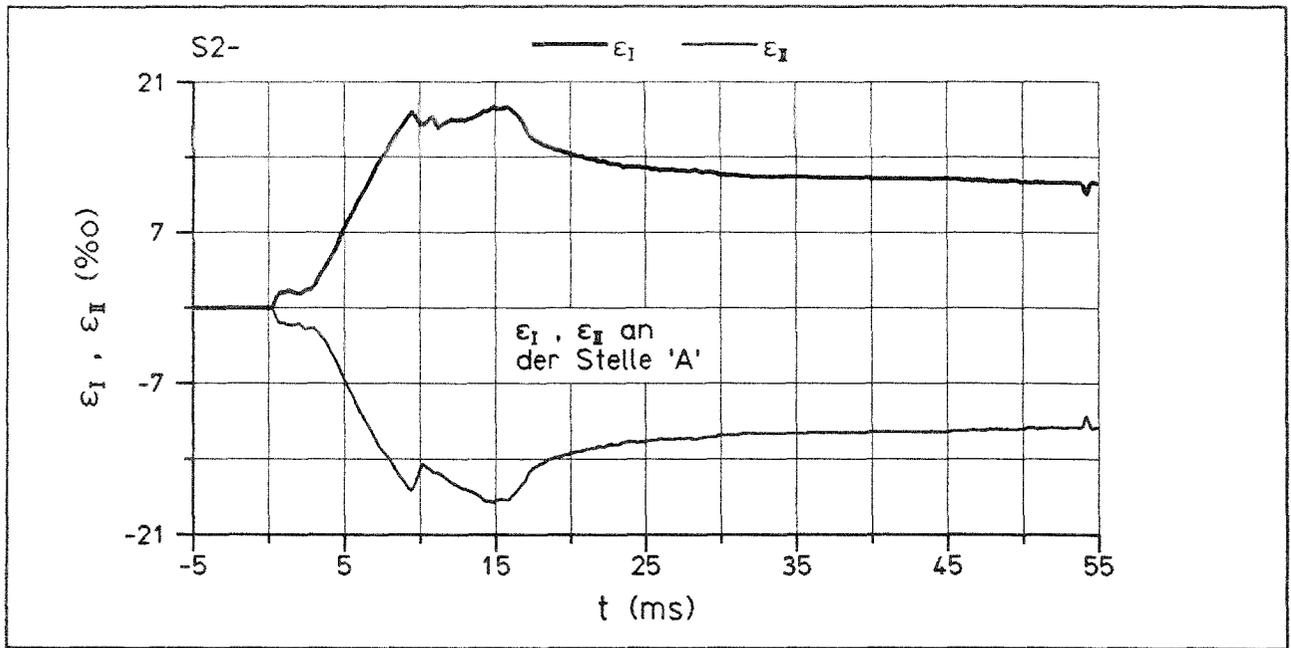


Anlage 6.23: Versuch S2- - ohne Sandtopf -
 Krümmungen $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$, Differenz der Vorspannkraften $\Delta V_V, \Delta V_L$
 (negativ = Vorspannkraftverlust)



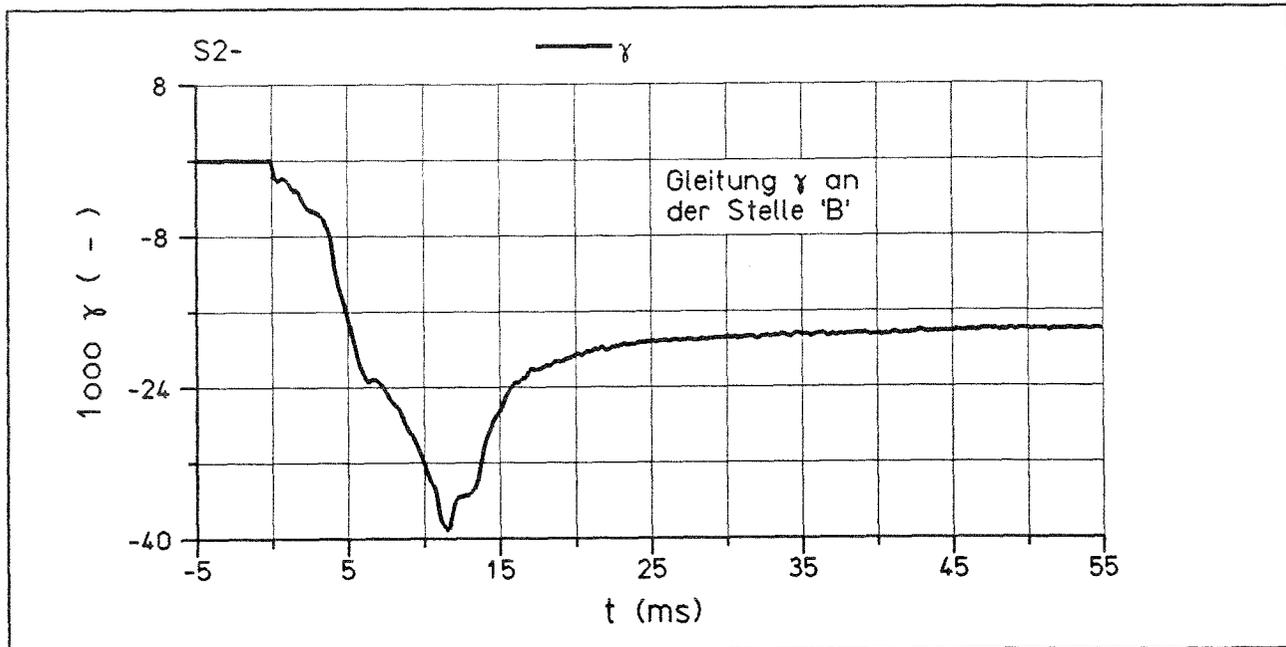
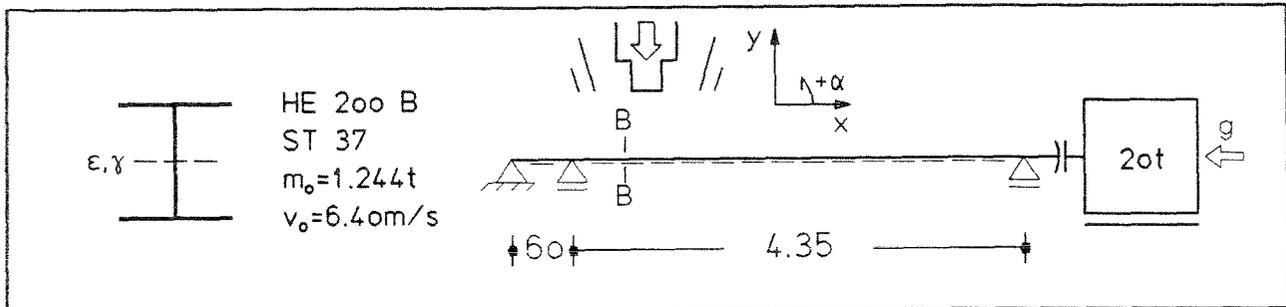
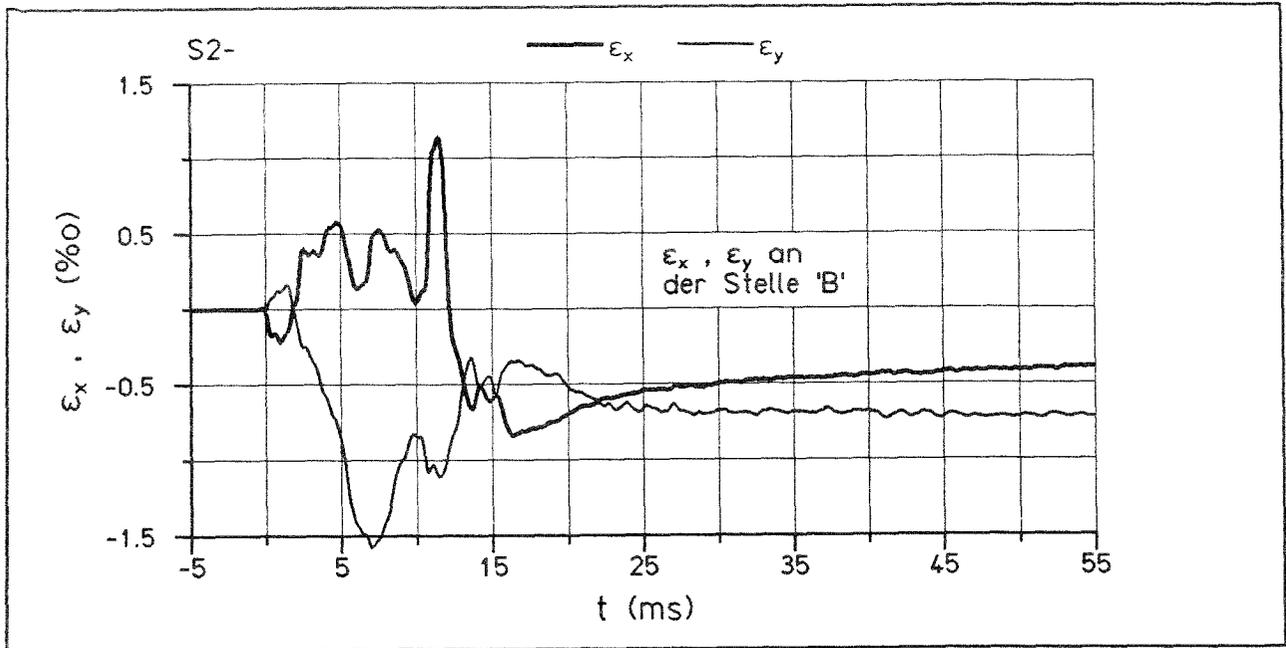
Anlage 6.24: Versuch S2- - ohne Sandtopf -

Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stabachse an der Stelle "A"



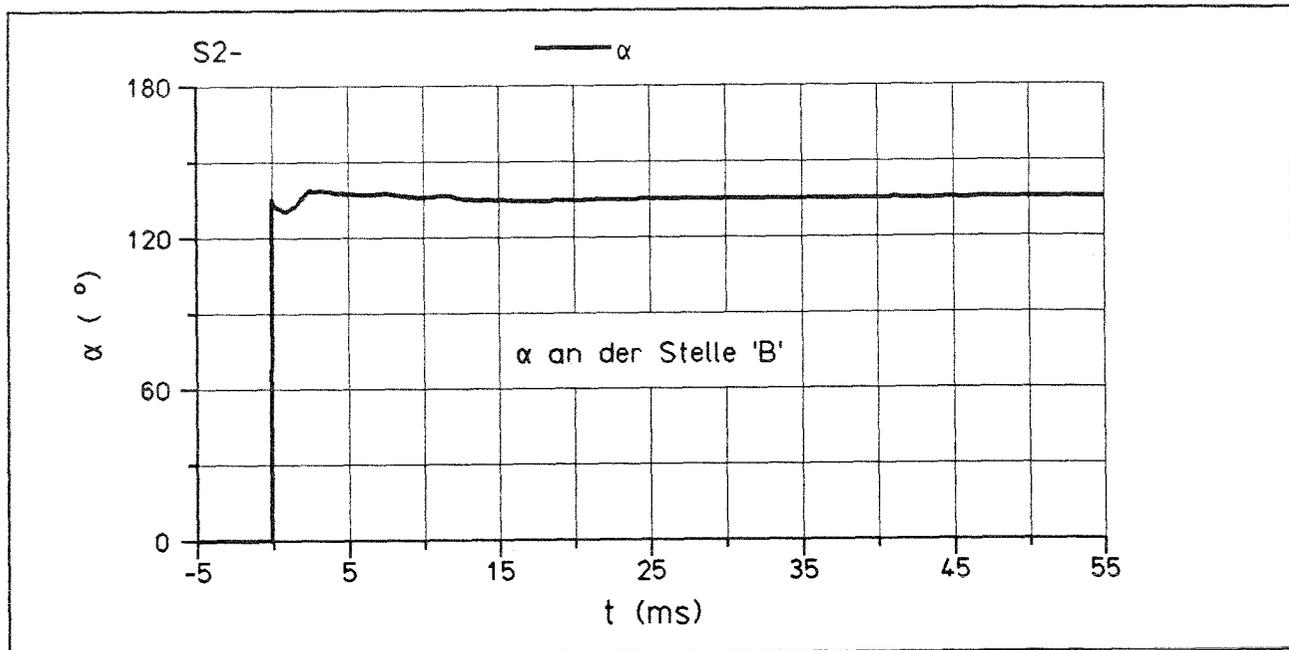
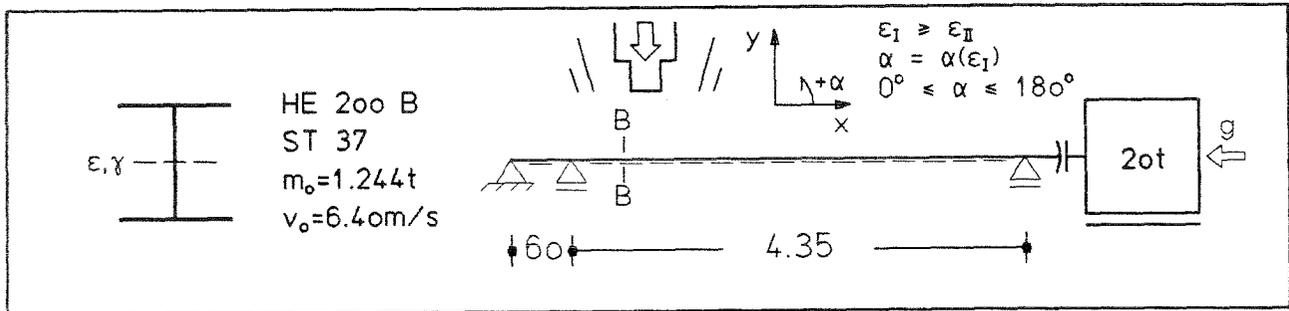
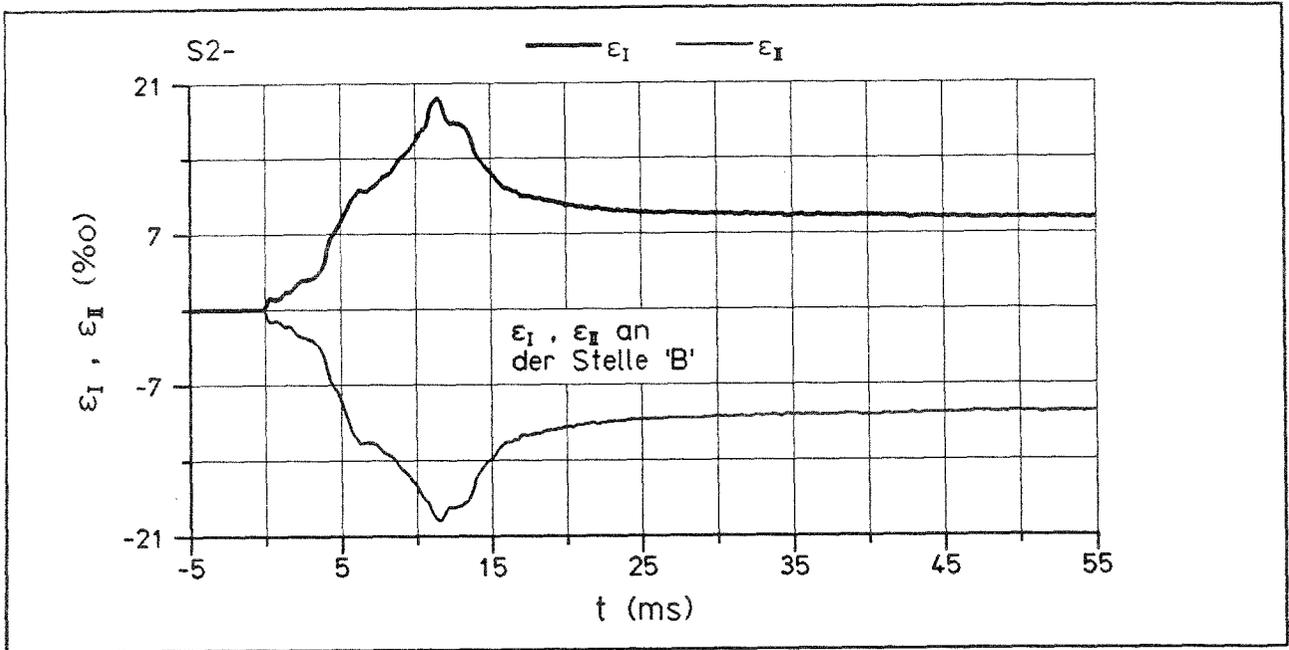
Anlage 6.25: Versuch S2- - ohne Sandtopf -

Hauptdehnungen $\epsilon_I, \epsilon_{II}$, Winkel der Hauptzugdehnung α
in Stützenachse an der Stelle "A"

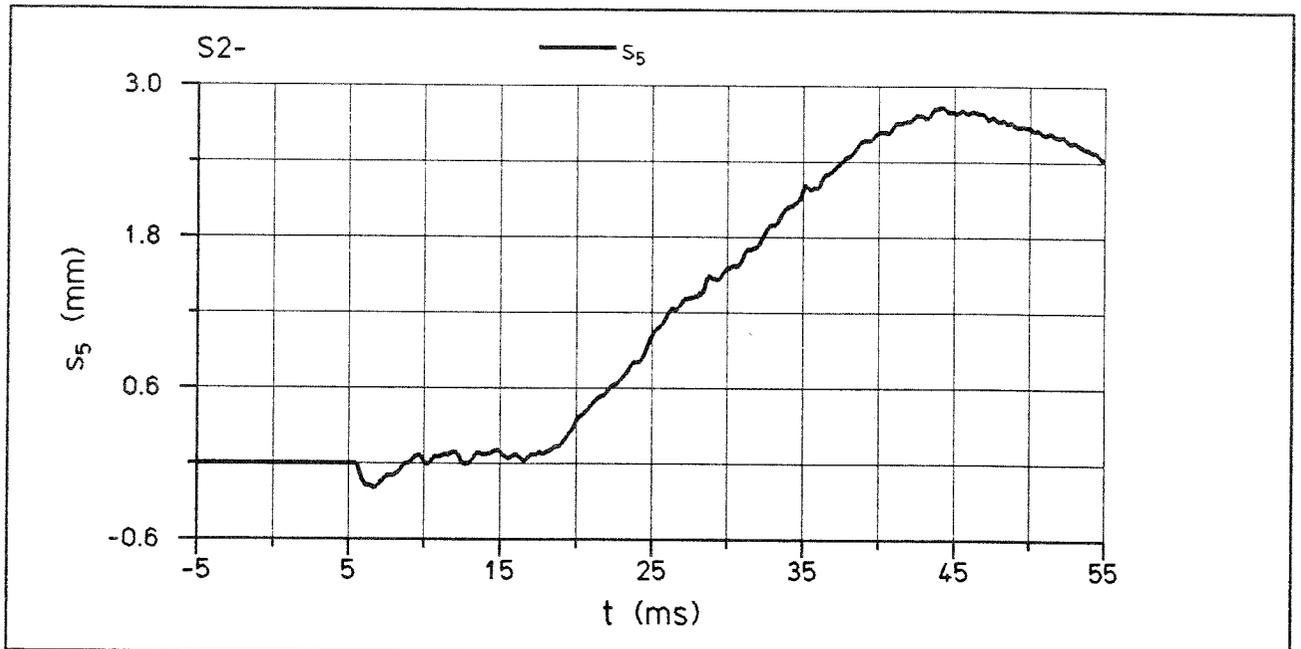
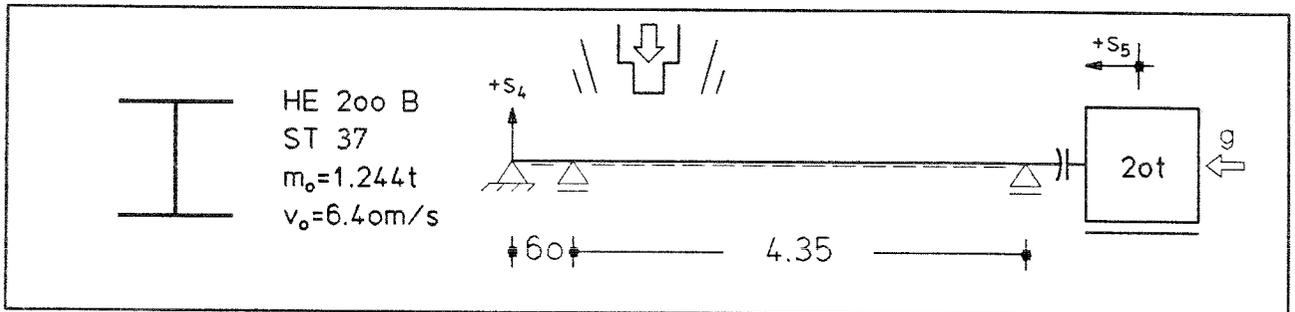
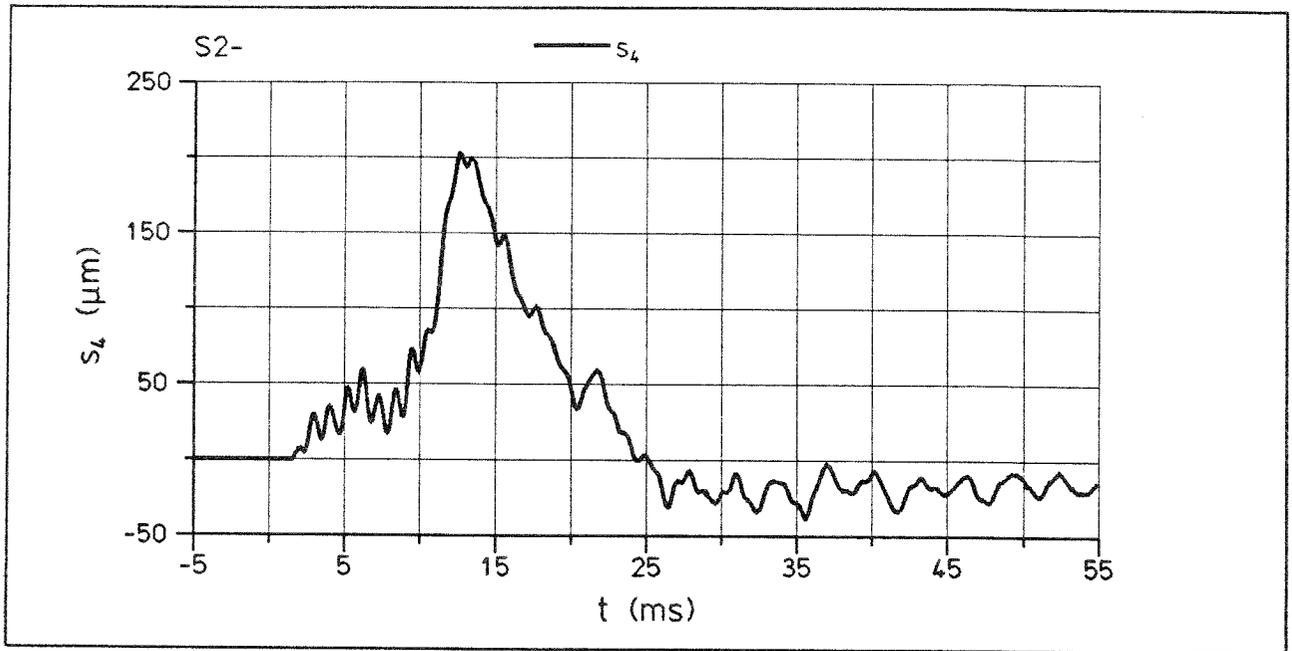


Anlage 6.26: Versuch S2- - ohne Sandtopf -

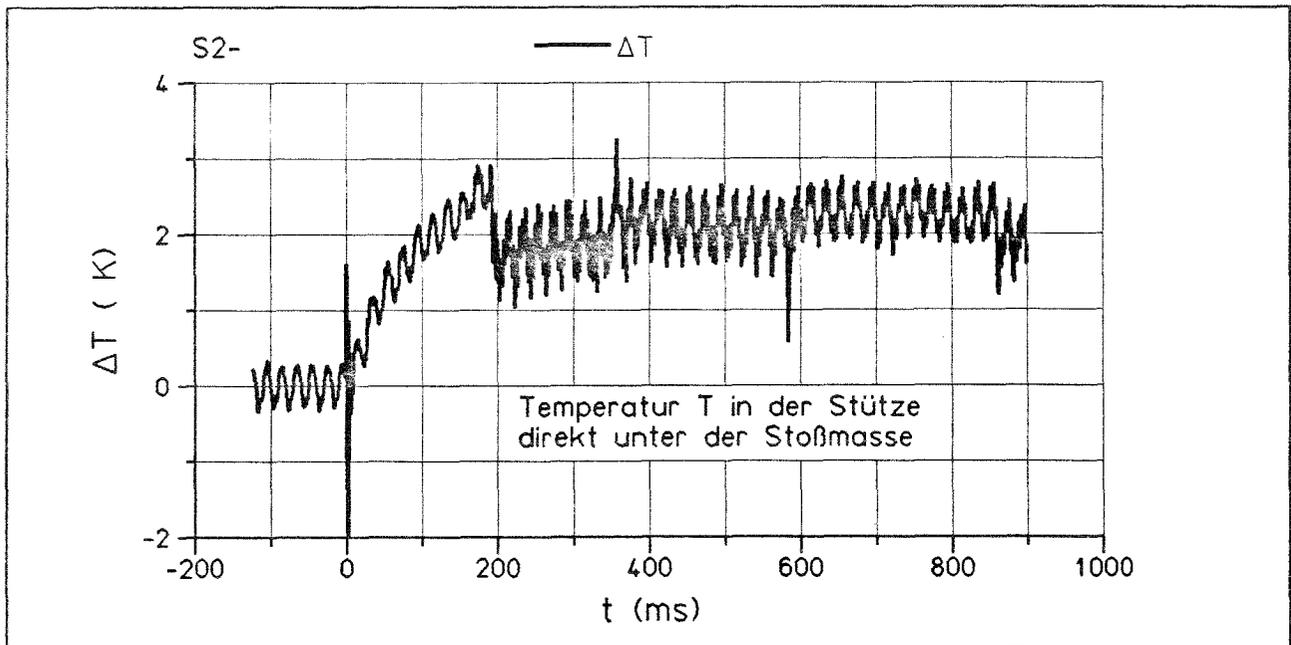
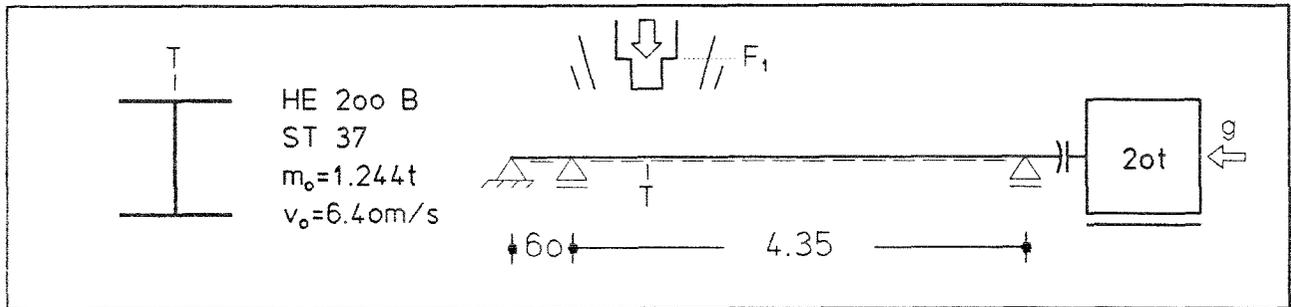
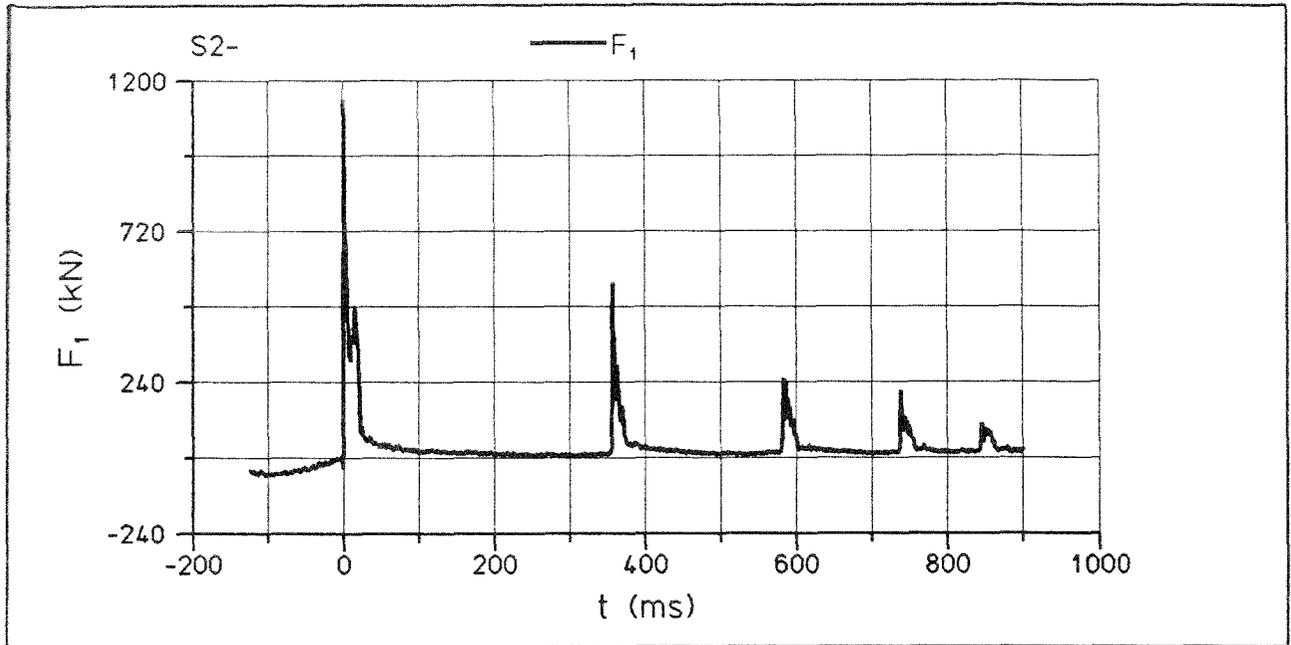
Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stützenachse an der Stelle "B"



Anlage 6.27: Versuch S2- - ohne Sandtopf -
Hauptdehnungen $\epsilon_I, \epsilon_{II}$, Winkel der Hauptzugdehnung α
in Stützenachse an der Stelle "B"

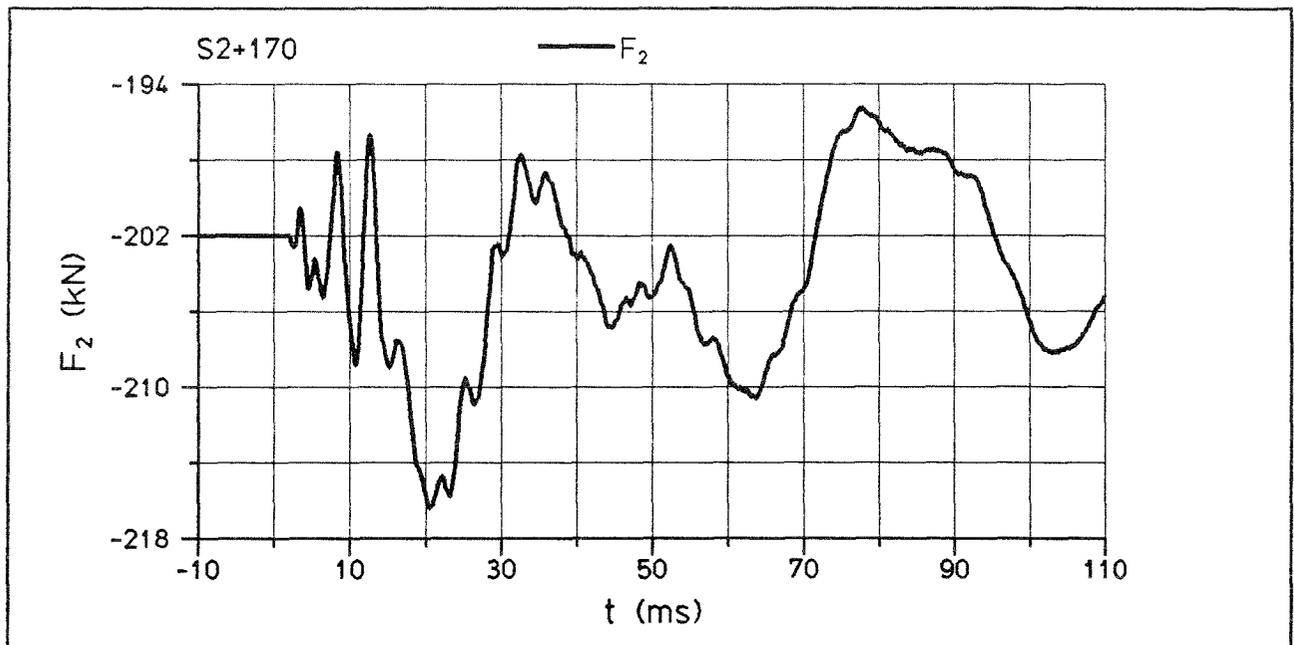
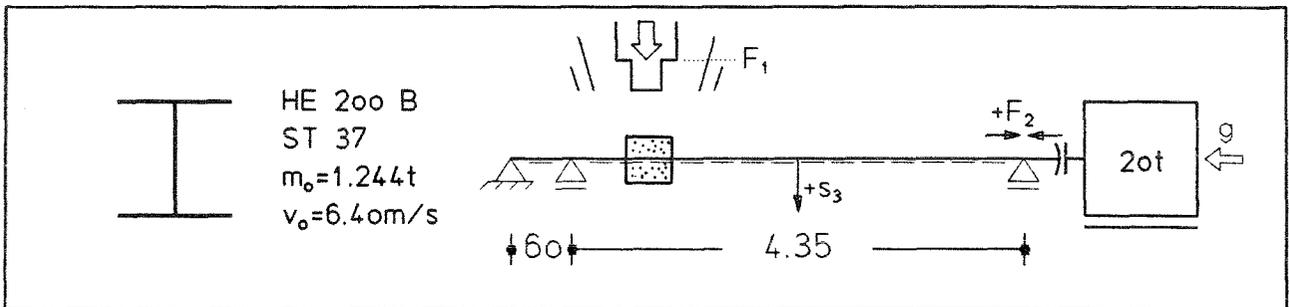
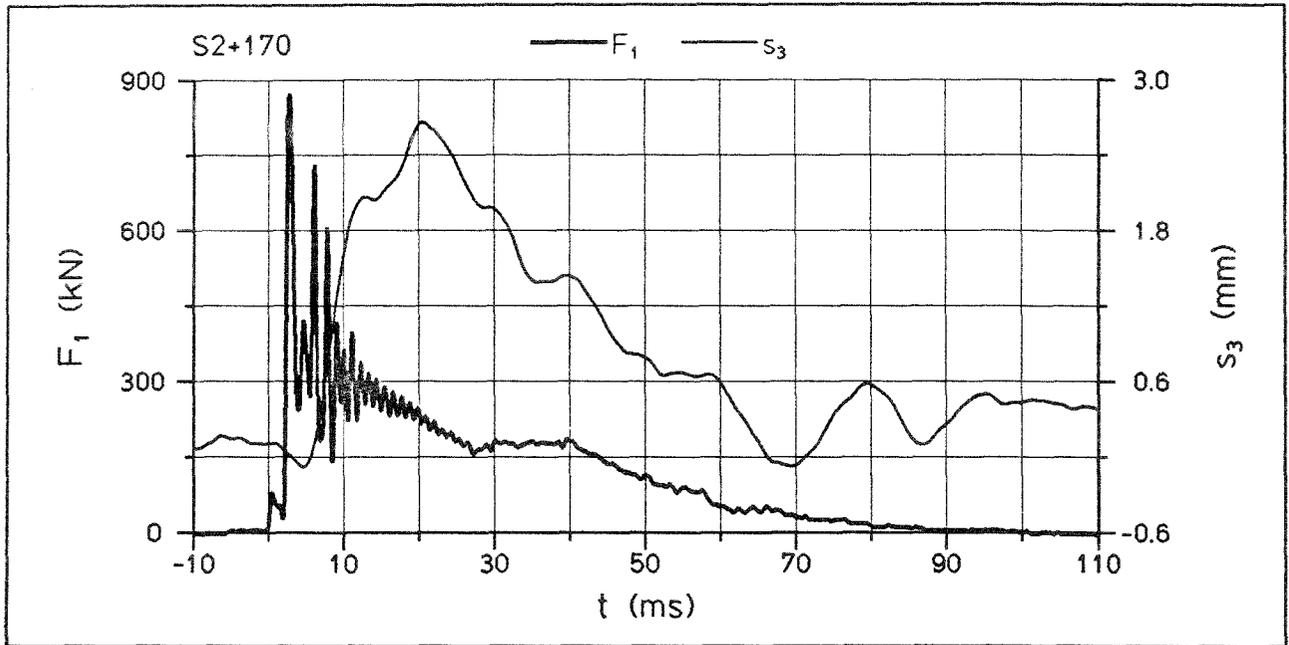


Anlage 6.28: Versuch S2- - ohne Sandtopf -
Verschiebungen s_4 , s_5

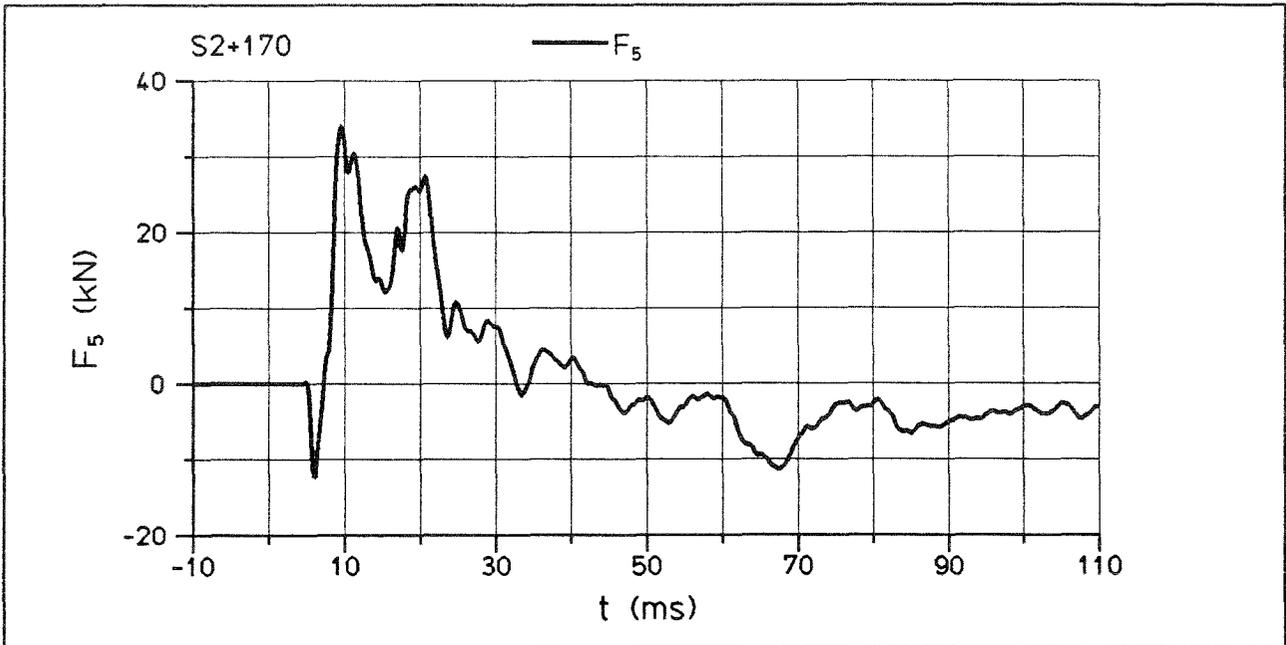
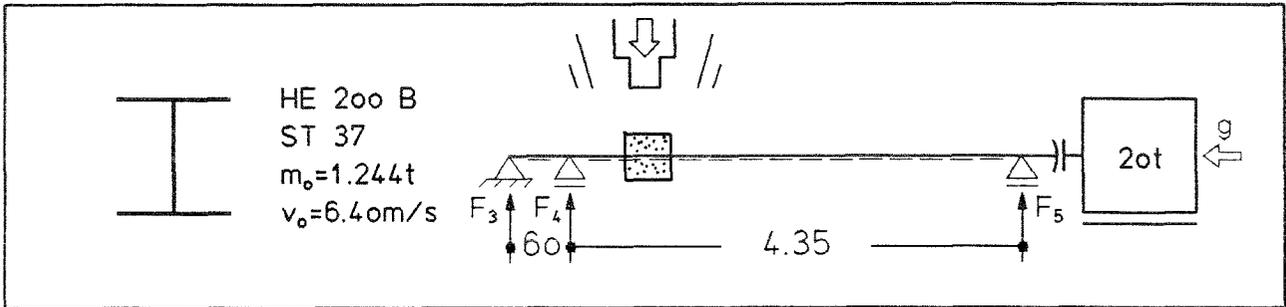
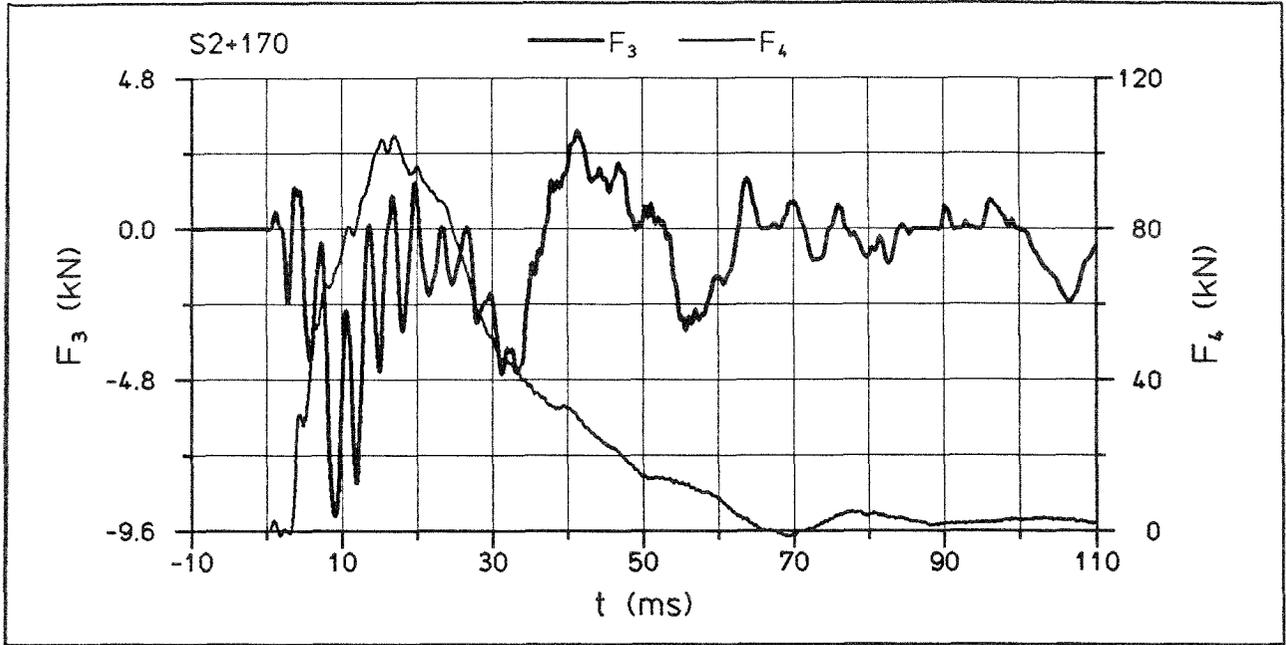


Anlage 6.29: Versuch S2- - ohne Sandtopf -

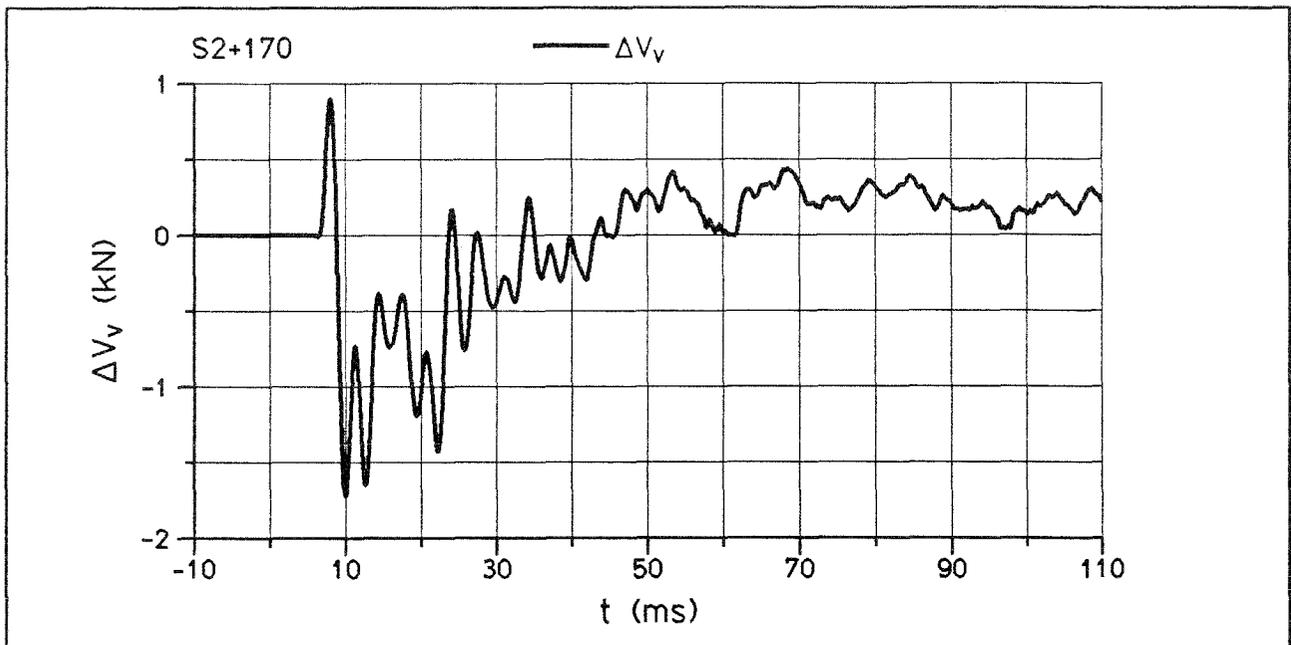
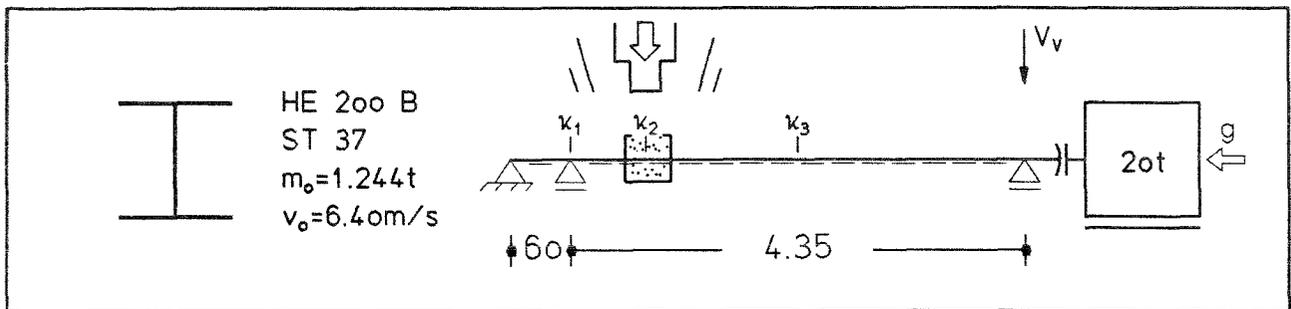
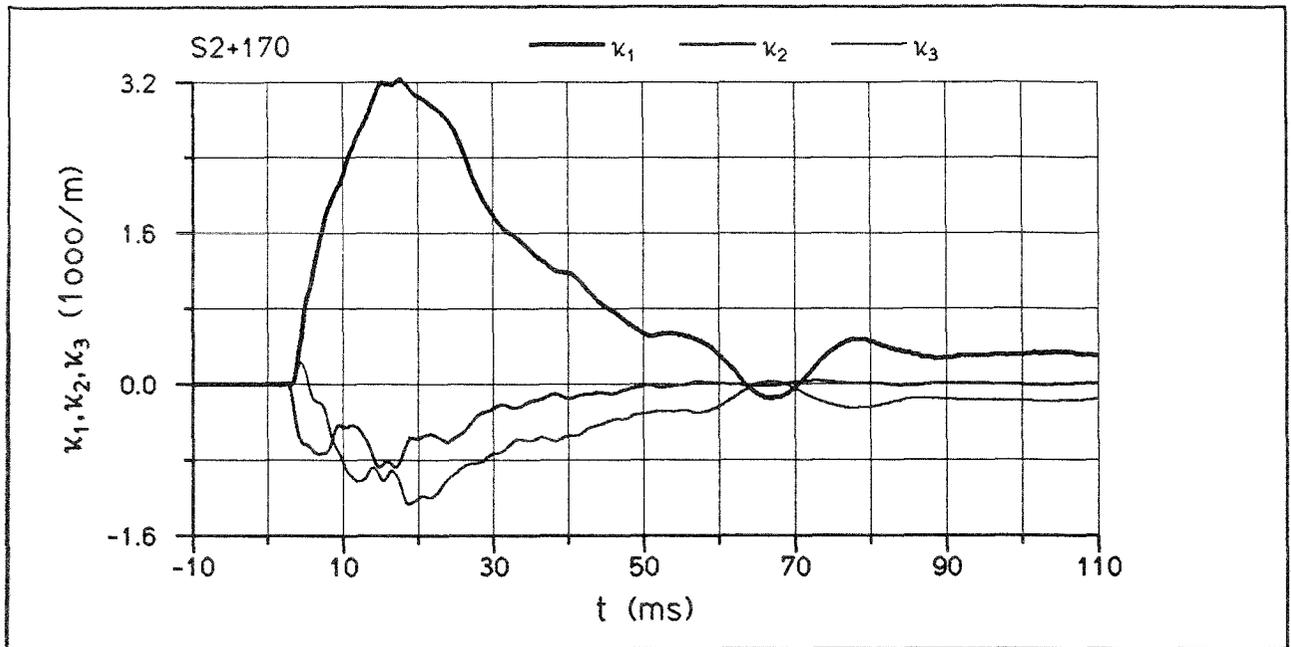
Stoßkraft F_1 , Temperaturdifferenz ΔT in der Stütze
unter der Stoßmasse



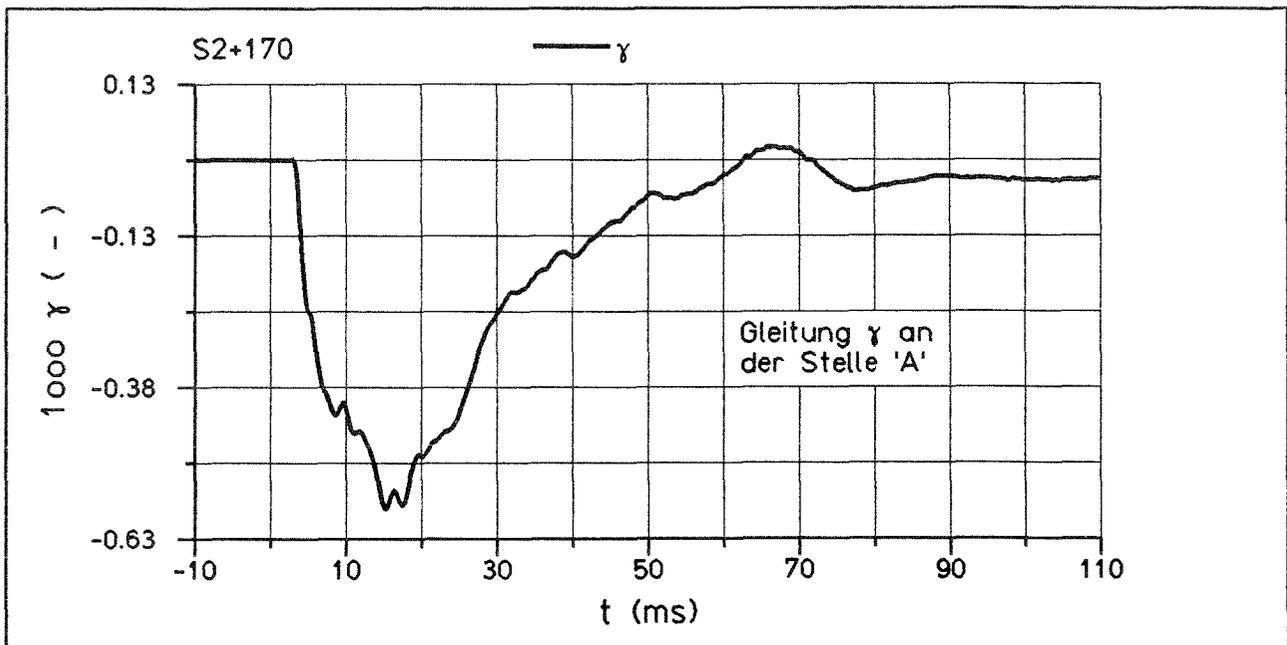
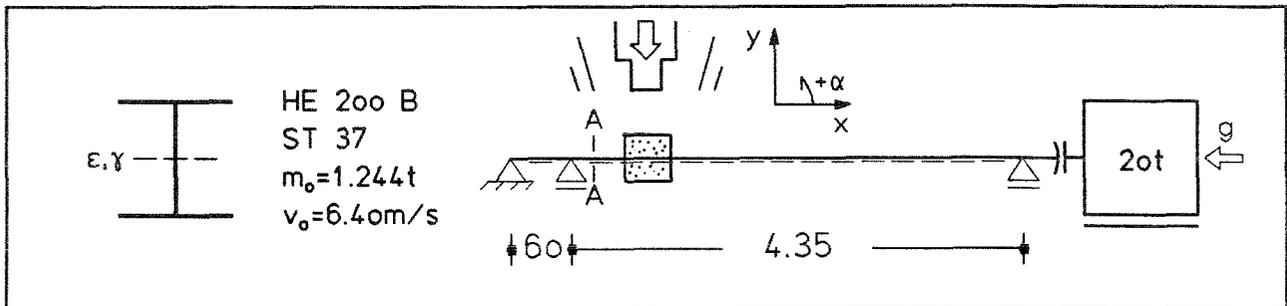
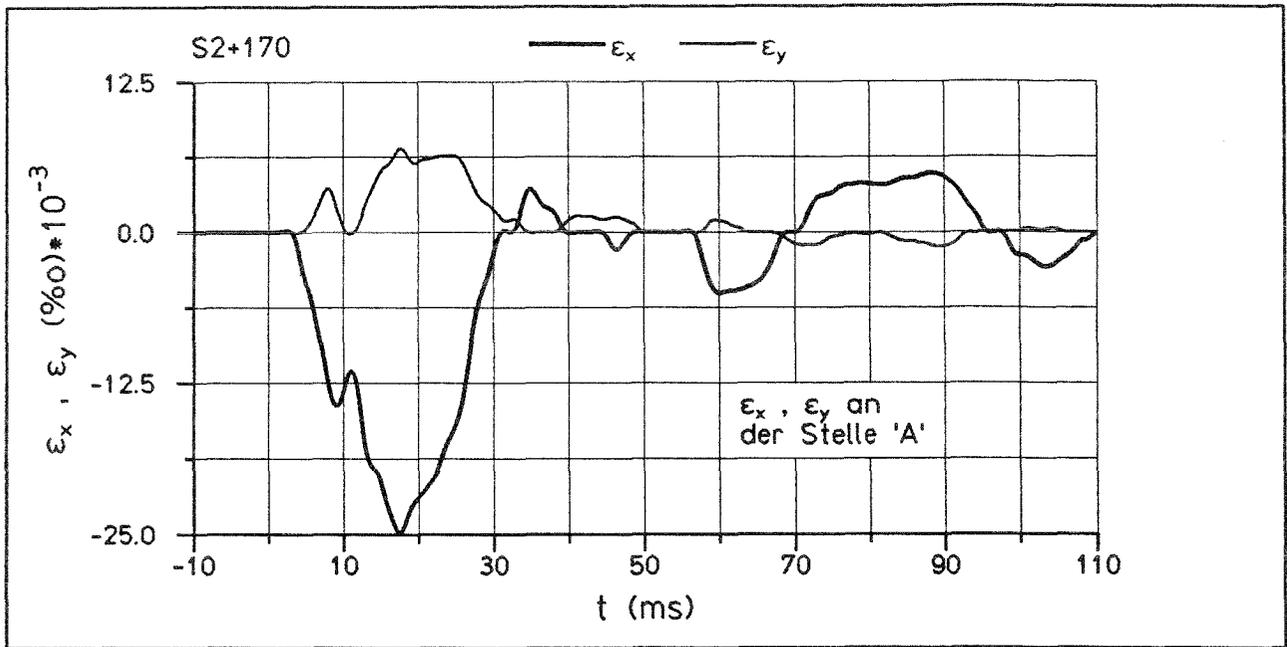
Anlage 6.30: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -
Stoßkraft F_1 , Stablängskraft F_2 , Verschiebung s_3



Anlage 6.31: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -
Auflagerkräfte F_3 , F_4 , F_5

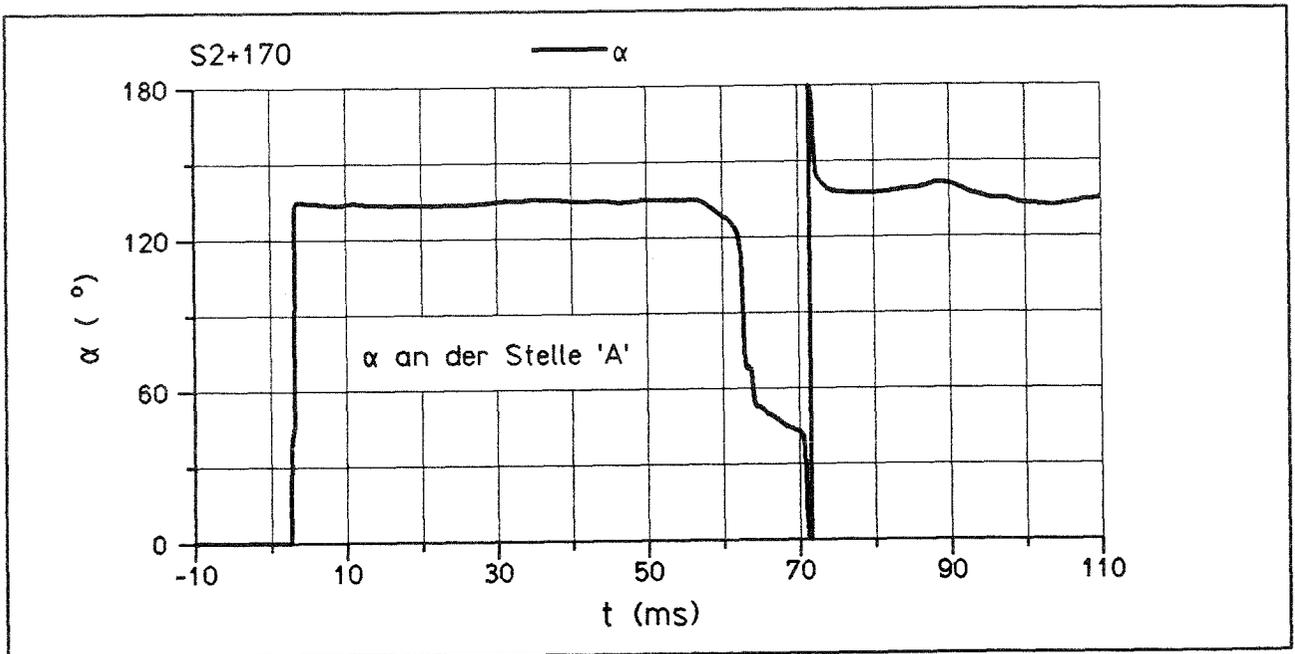
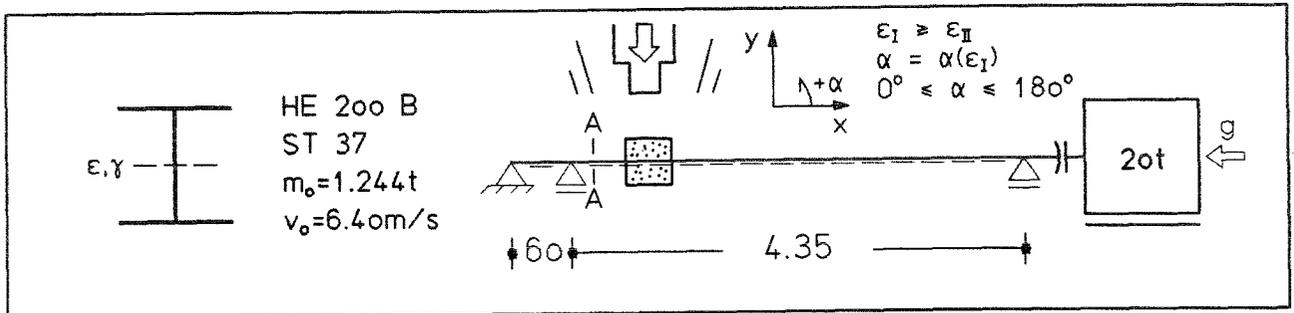
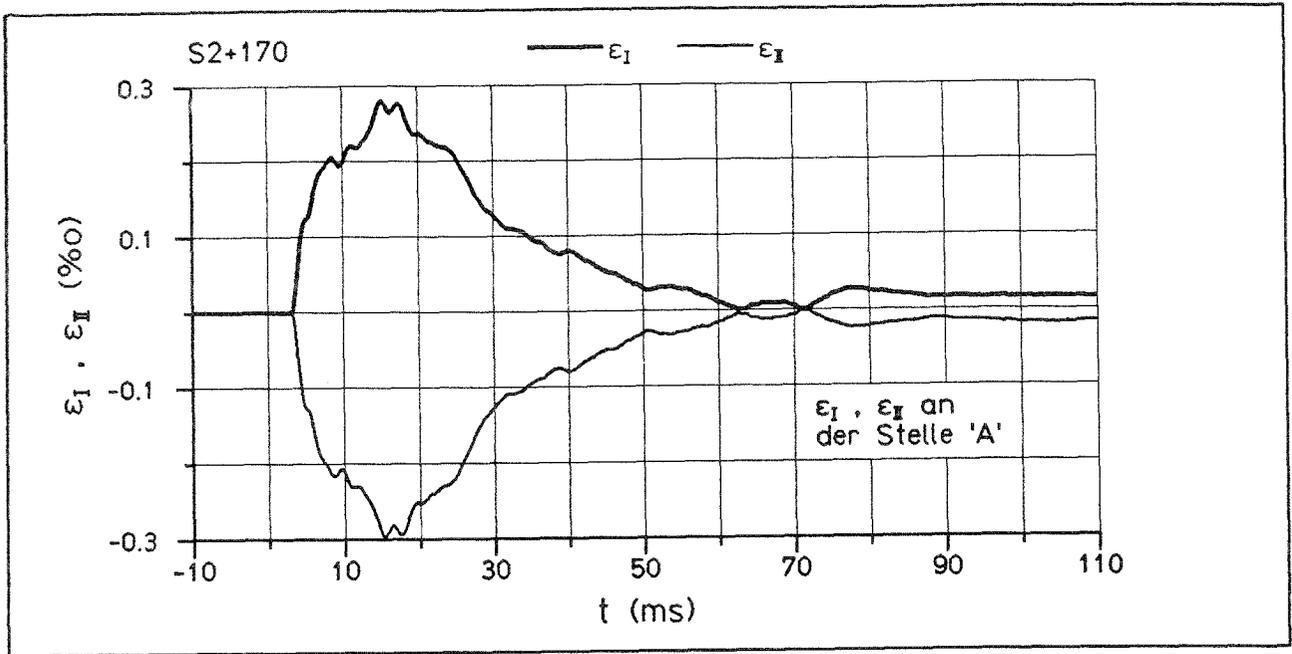


Anlage 6.32: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -
Krümmungen $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$, Differenz der Vorspankräfte ΔV_V
(negativ = Vorspankraftverlust)



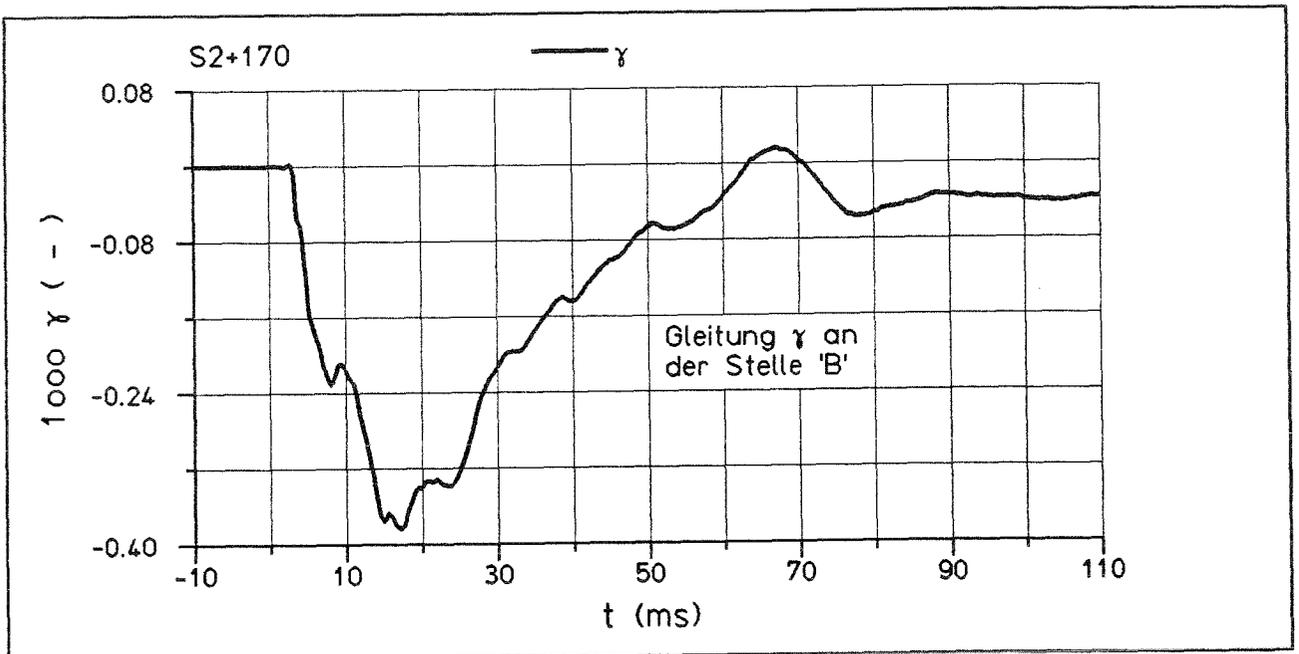
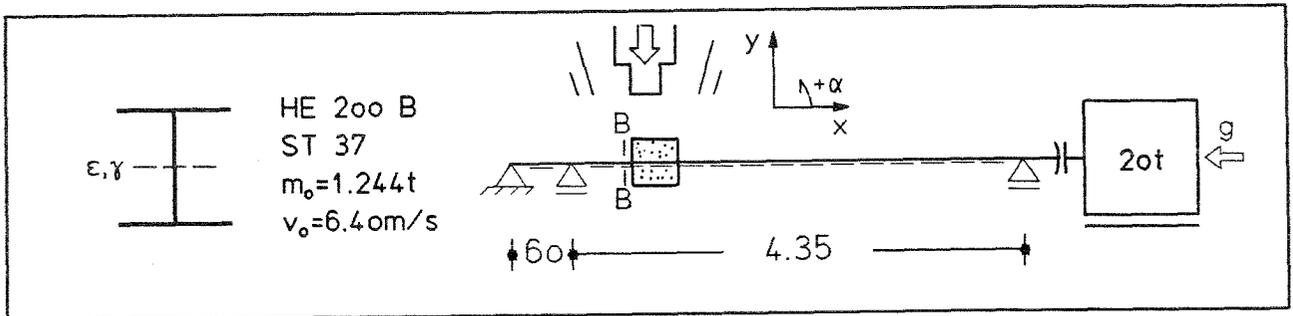
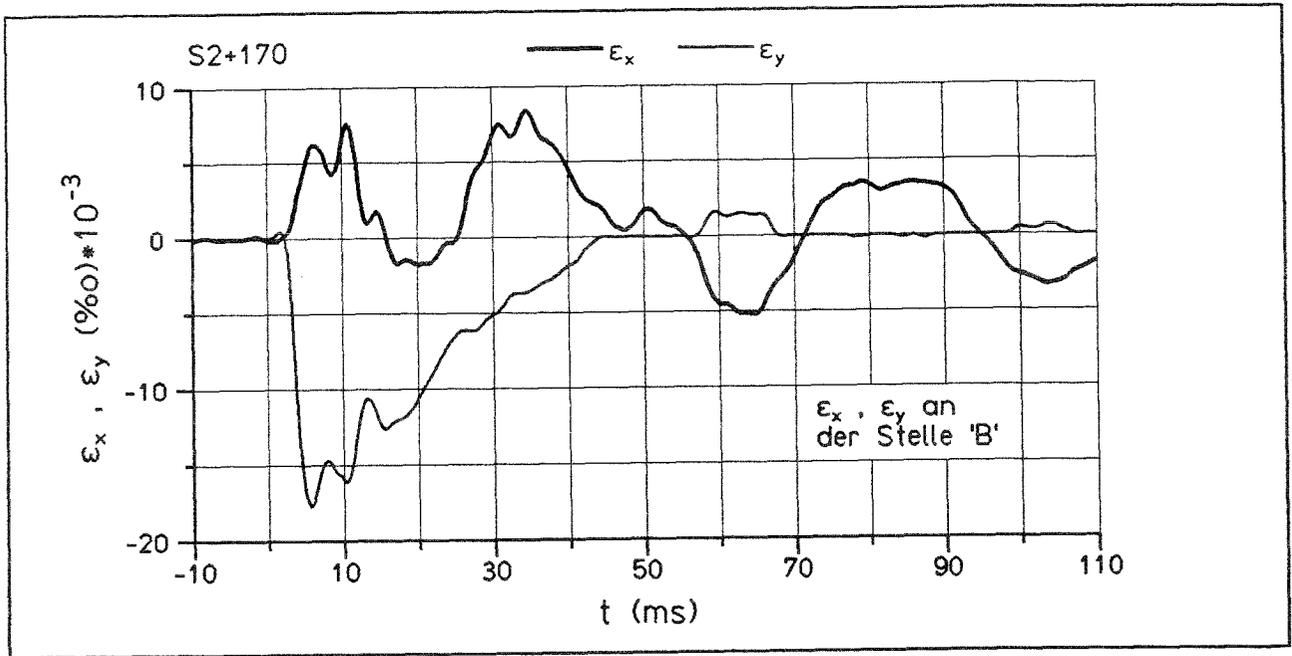
Anlage 6.33: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -

Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stützenachse an der Stelle "A"



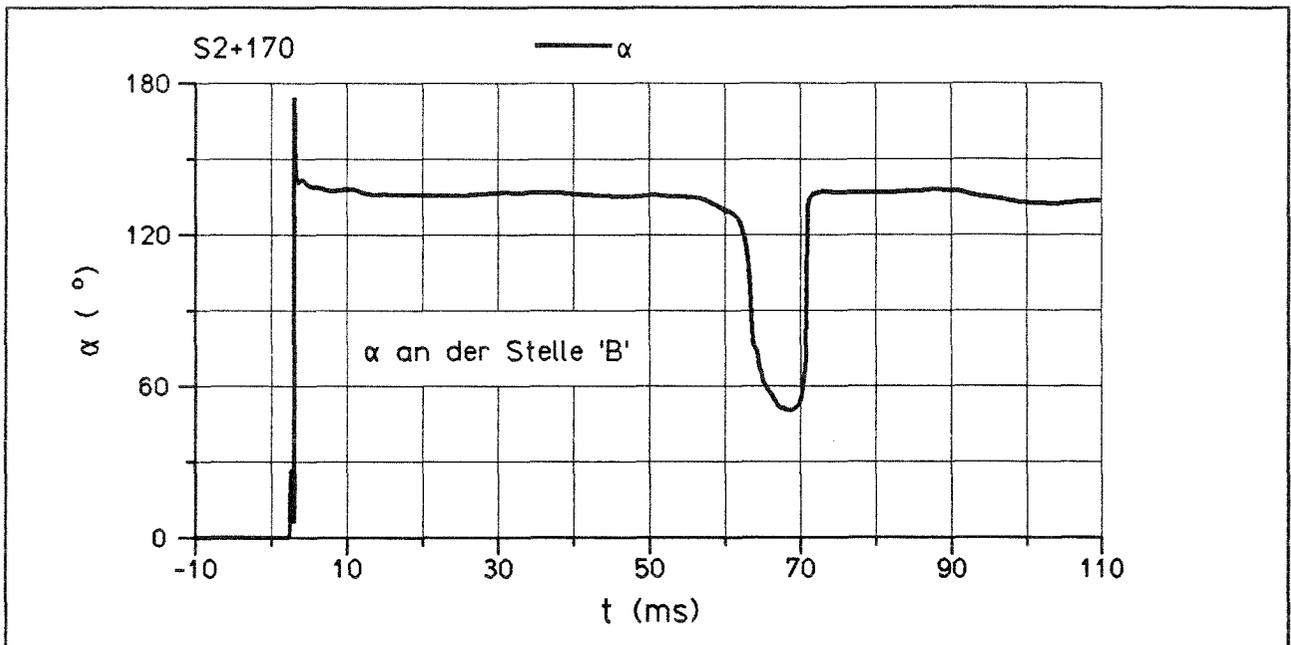
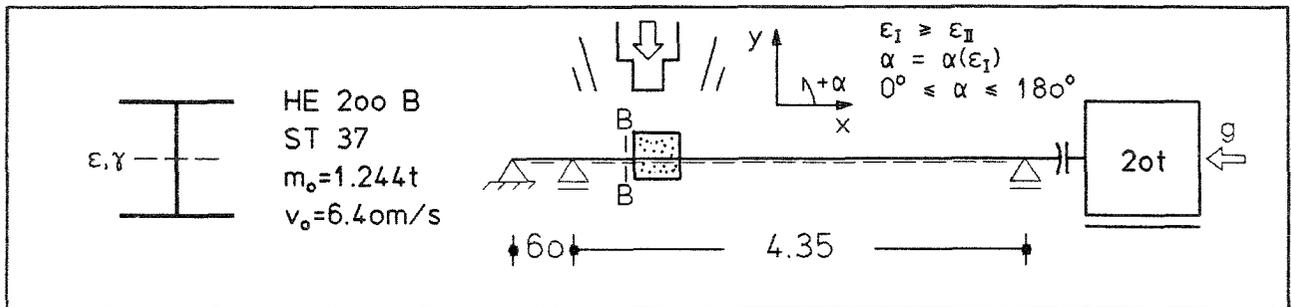
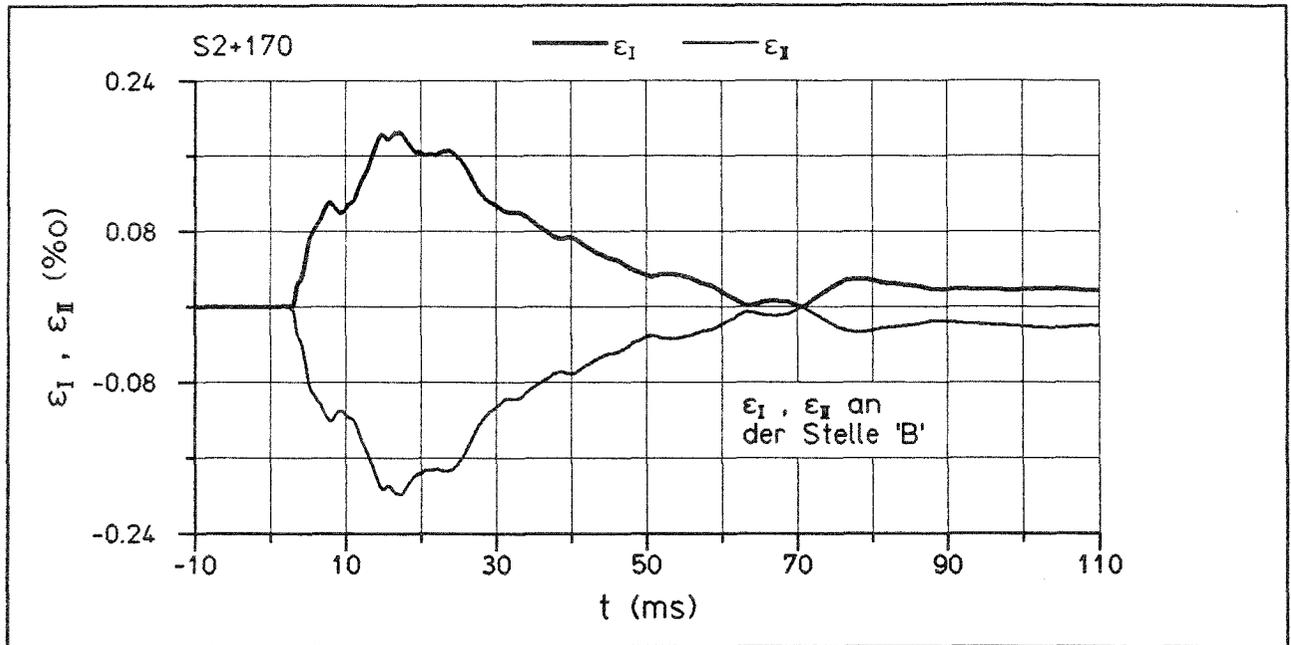
Anlage 6.34: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -

Hauptdehnungen $\epsilon_I, \epsilon_{II}$, Winkel der Hauptzugdehnung α
in Stützenachse an der Stelle "A"



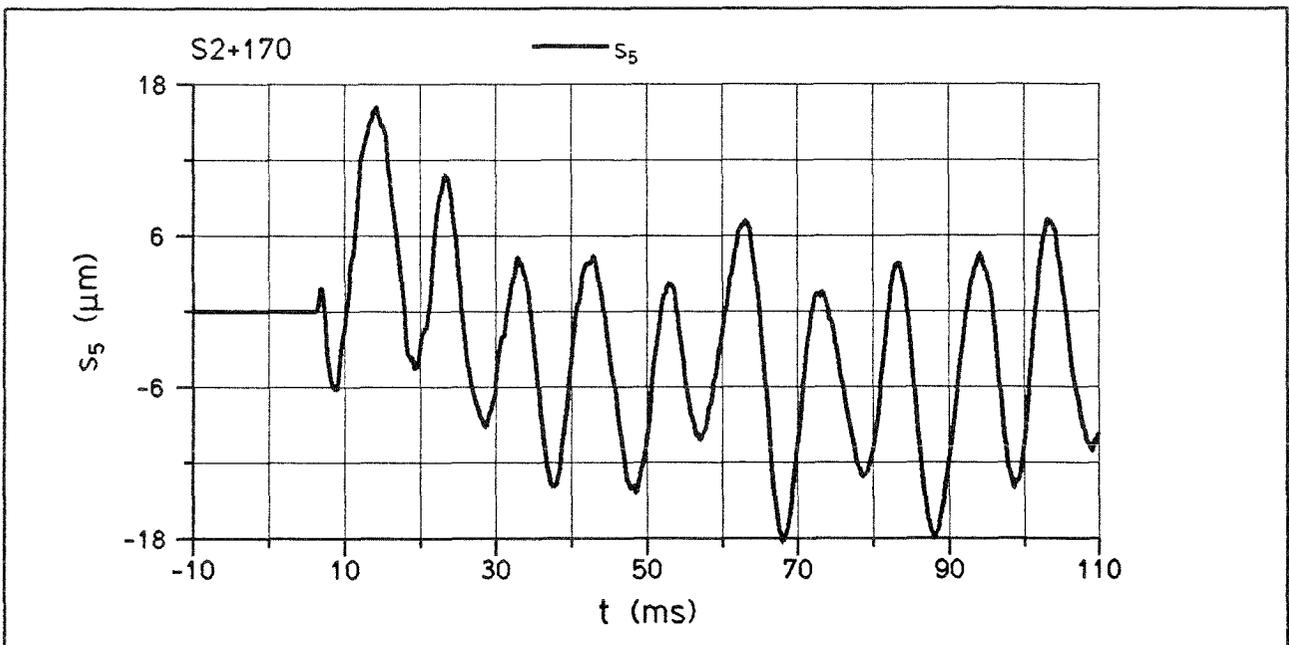
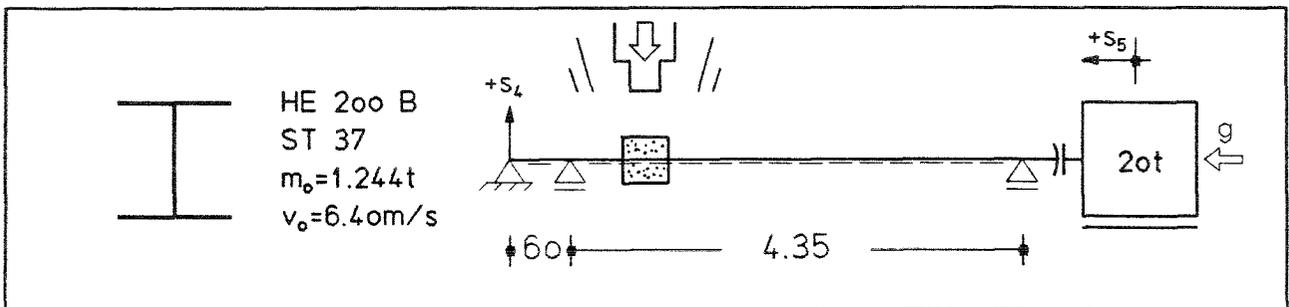
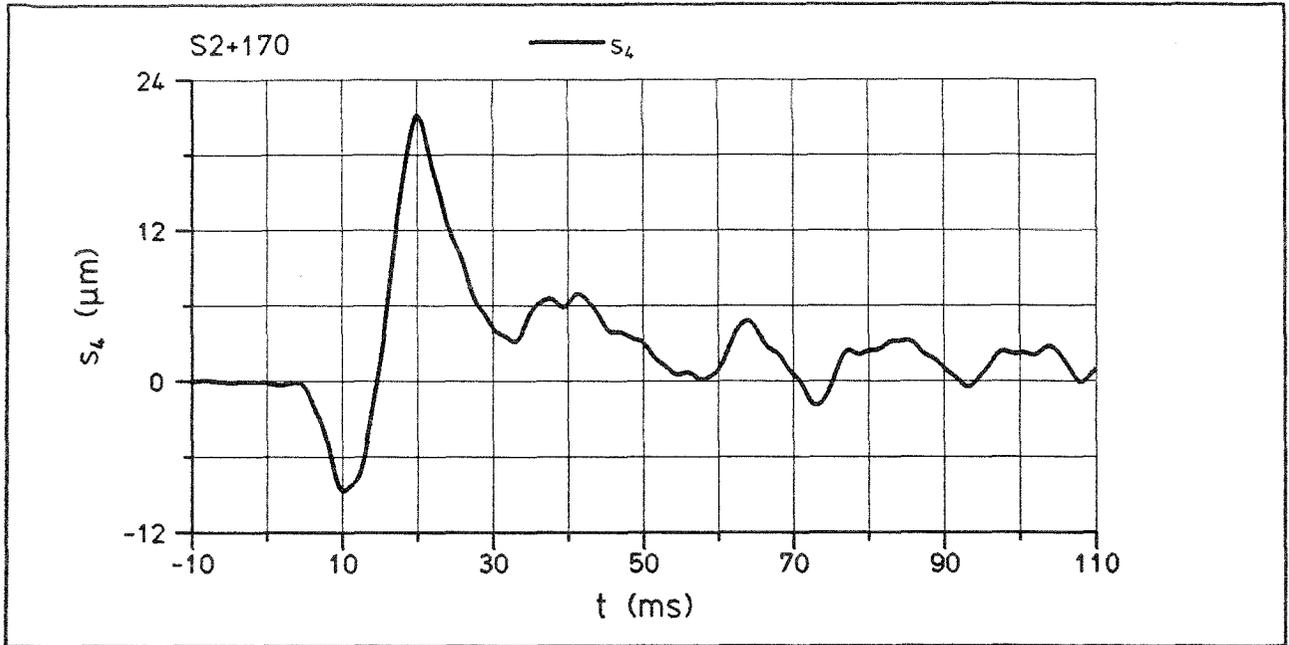
Anlage 6.35: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -

Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stützenachse an der Stelle "B"

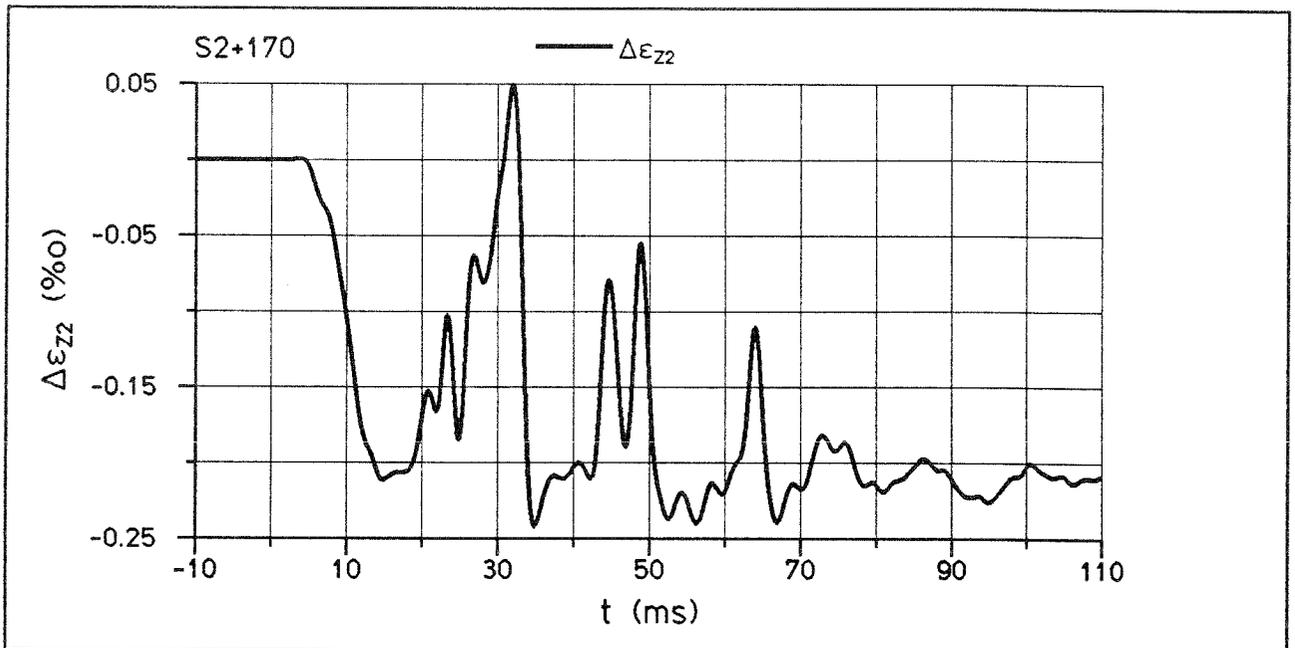
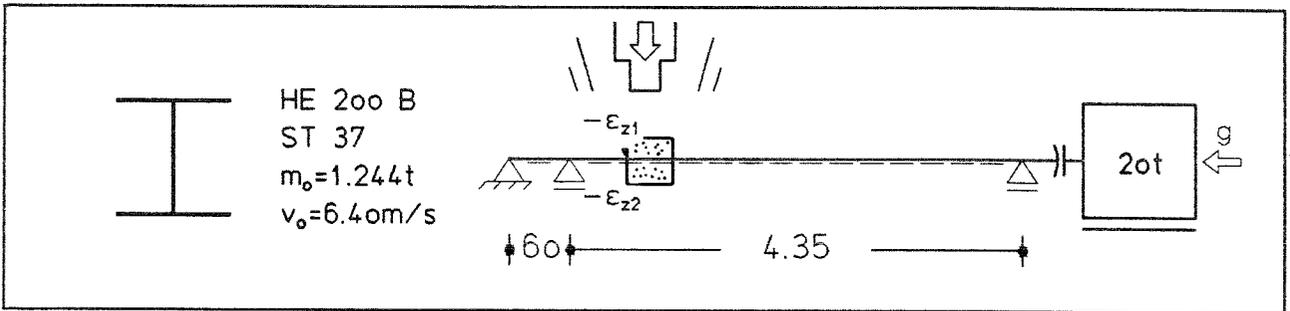
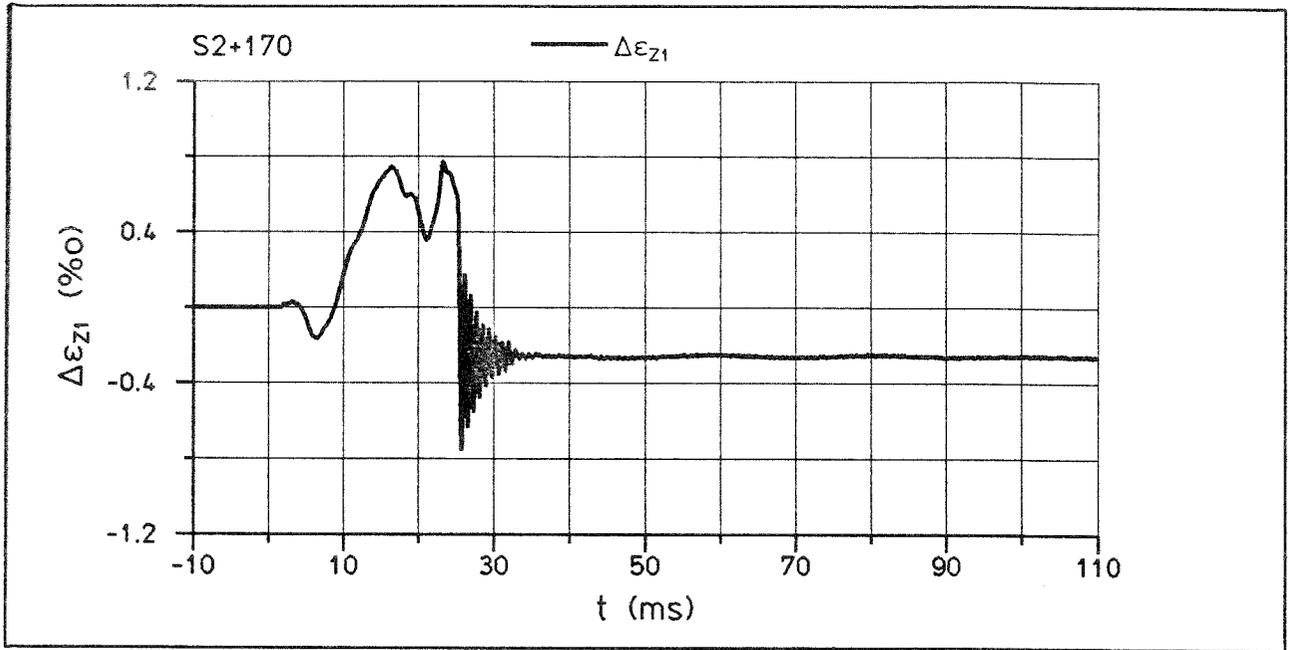


Anlage 6.36: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -

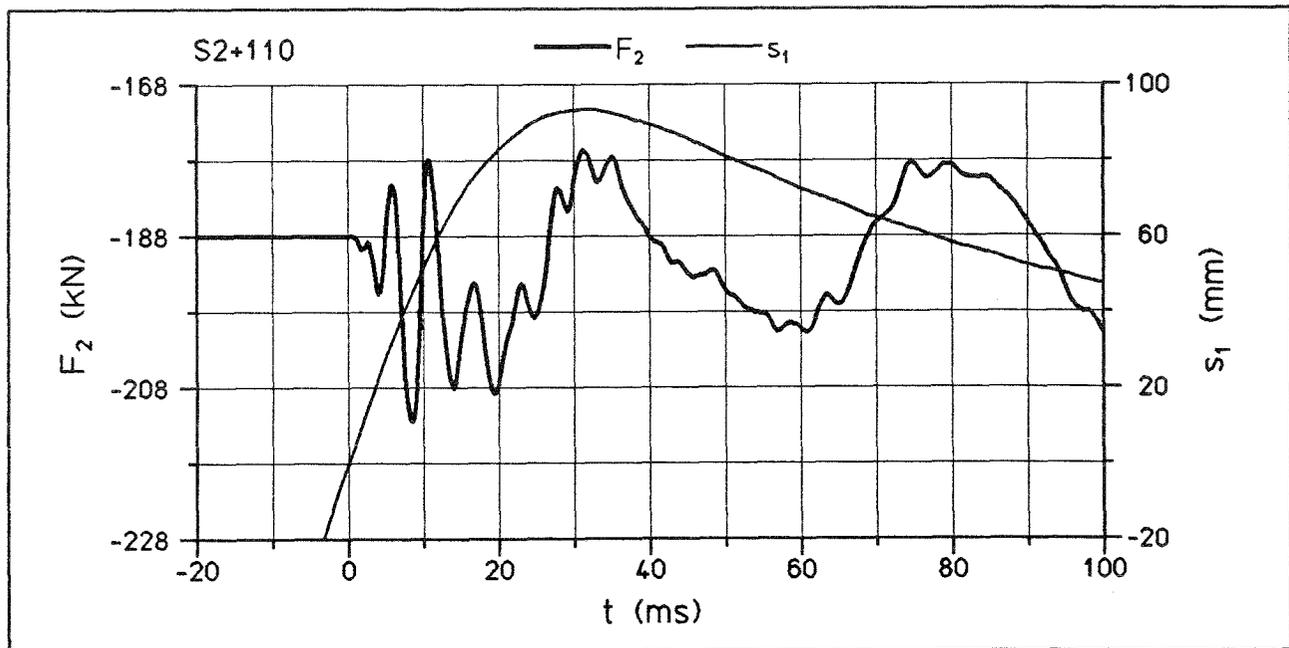
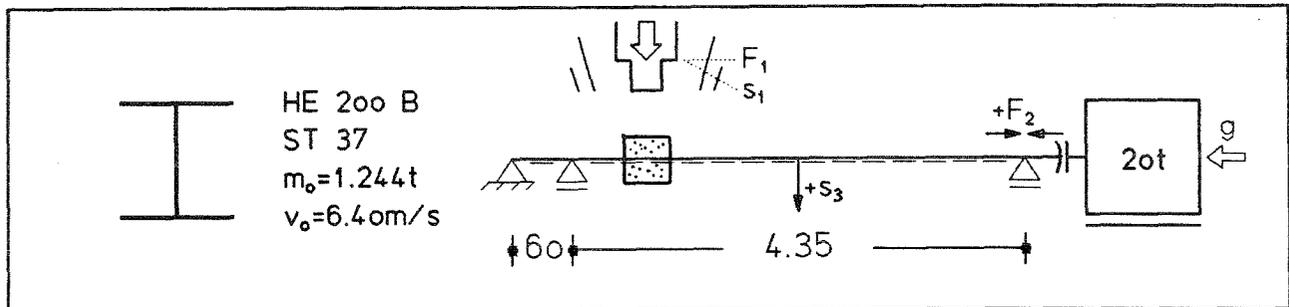
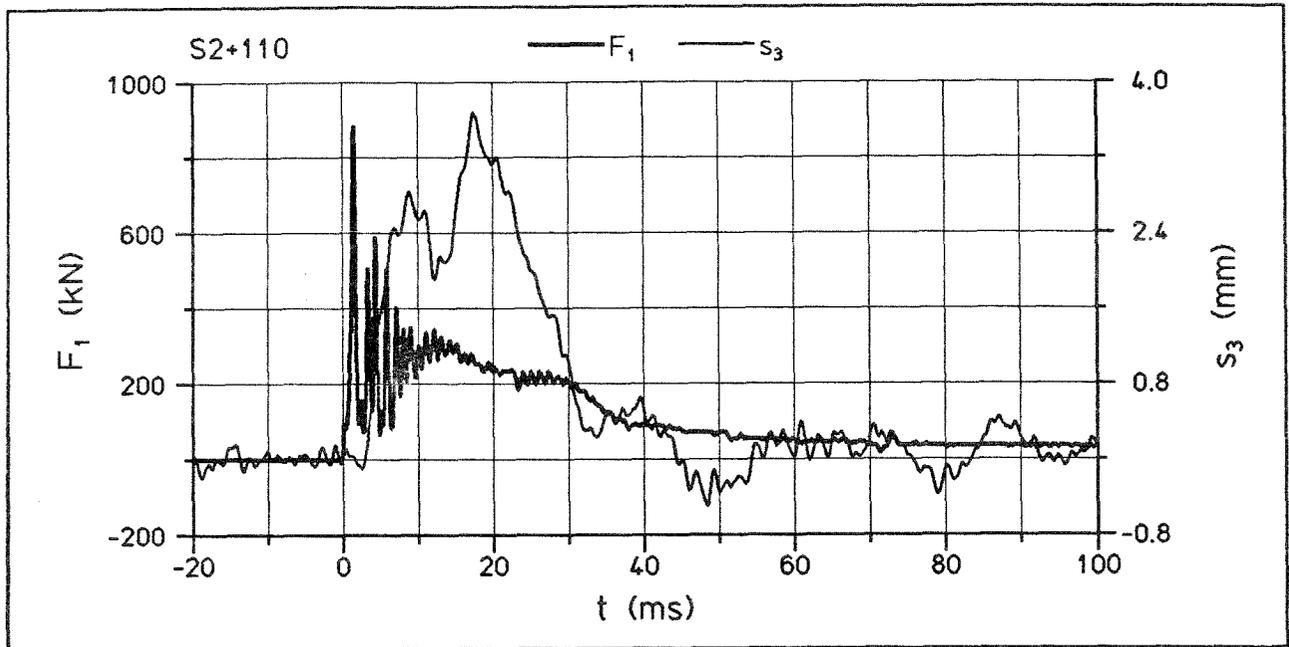
Hauptdehnungen $\epsilon_I, \epsilon_{II}$, Winkel der Hauptzugdehnung α
in Stützenachse an der Stelle "B"



Anlage 6.37: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -
Verschiebungen s_4 , s_5

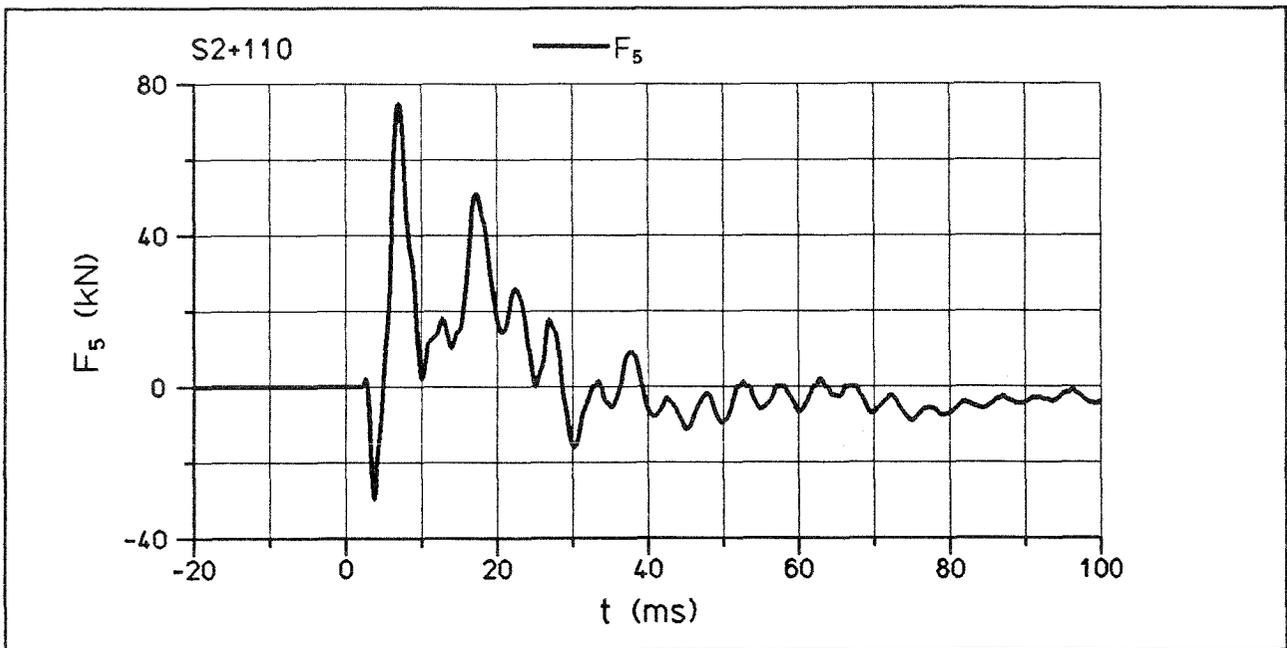
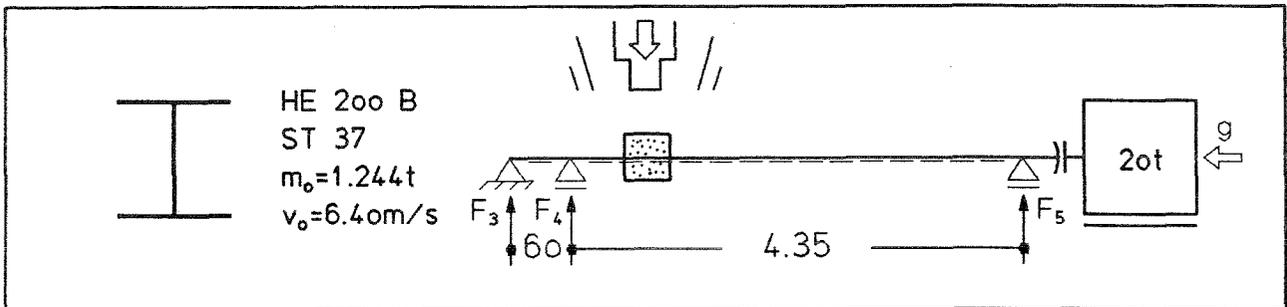
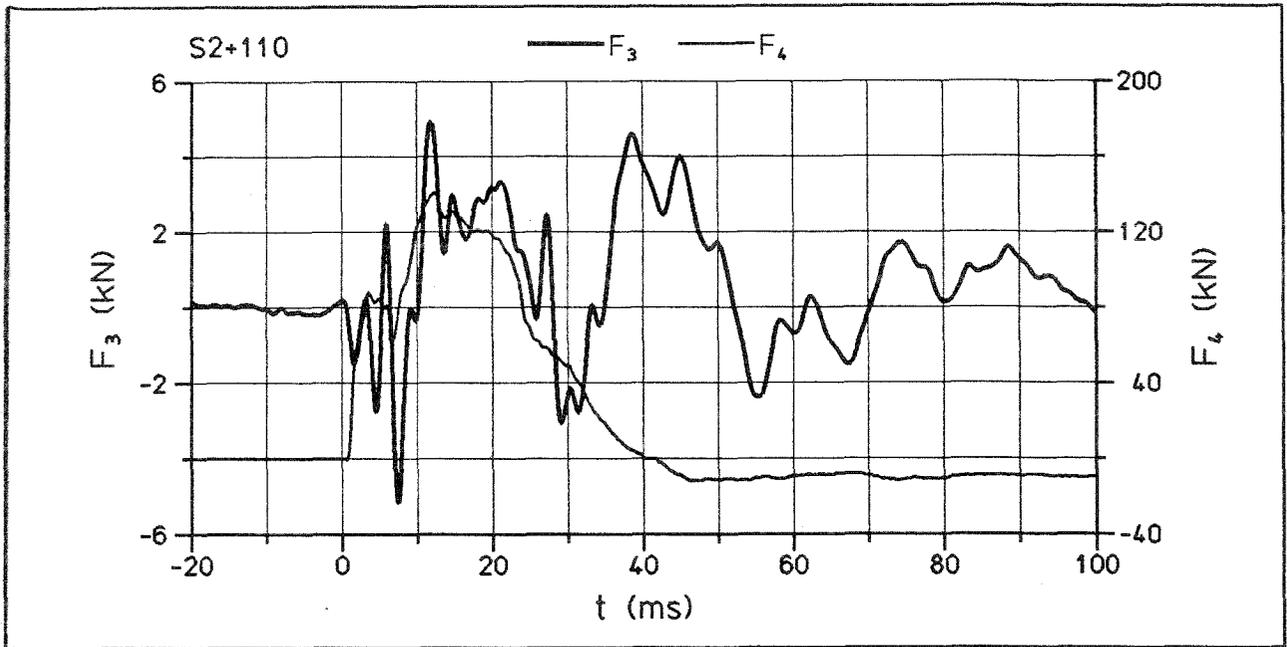


Anlage 6.38: Versuch S2+170 - mit Sandtopf -
Differenz der Zugstangendehnungen ϵ_{z1} , ϵ_{z2}
(negativ = Vorspannkraftverlust)

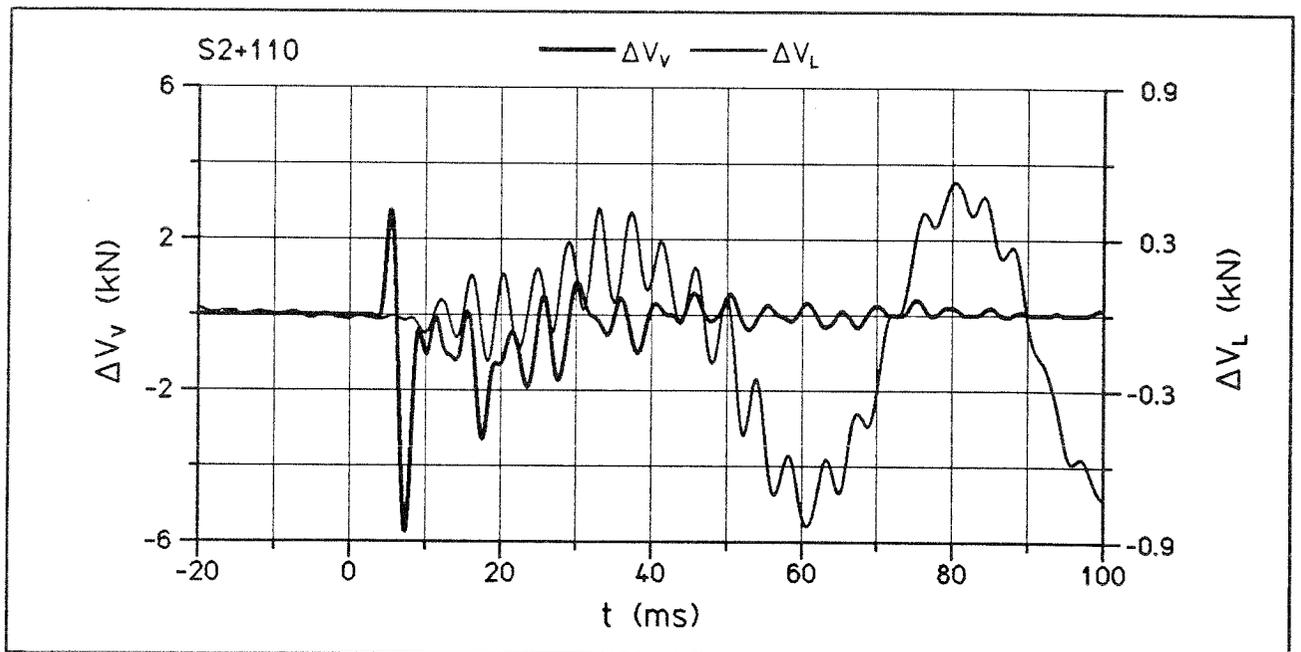
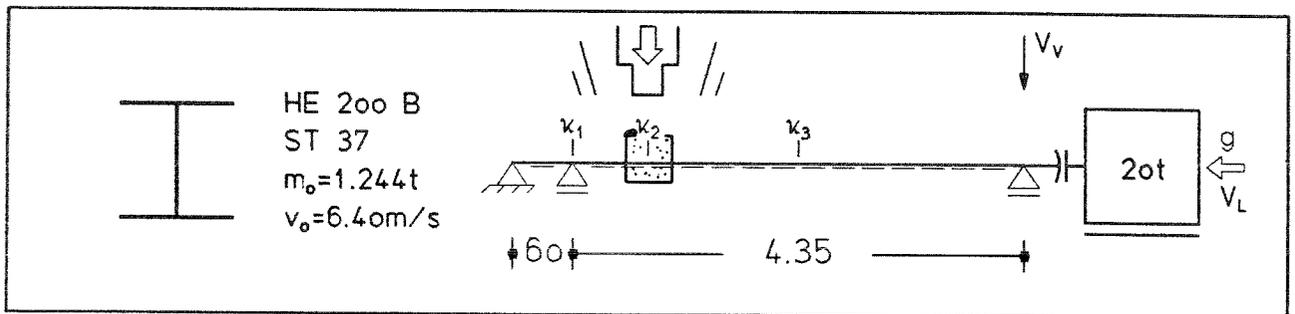
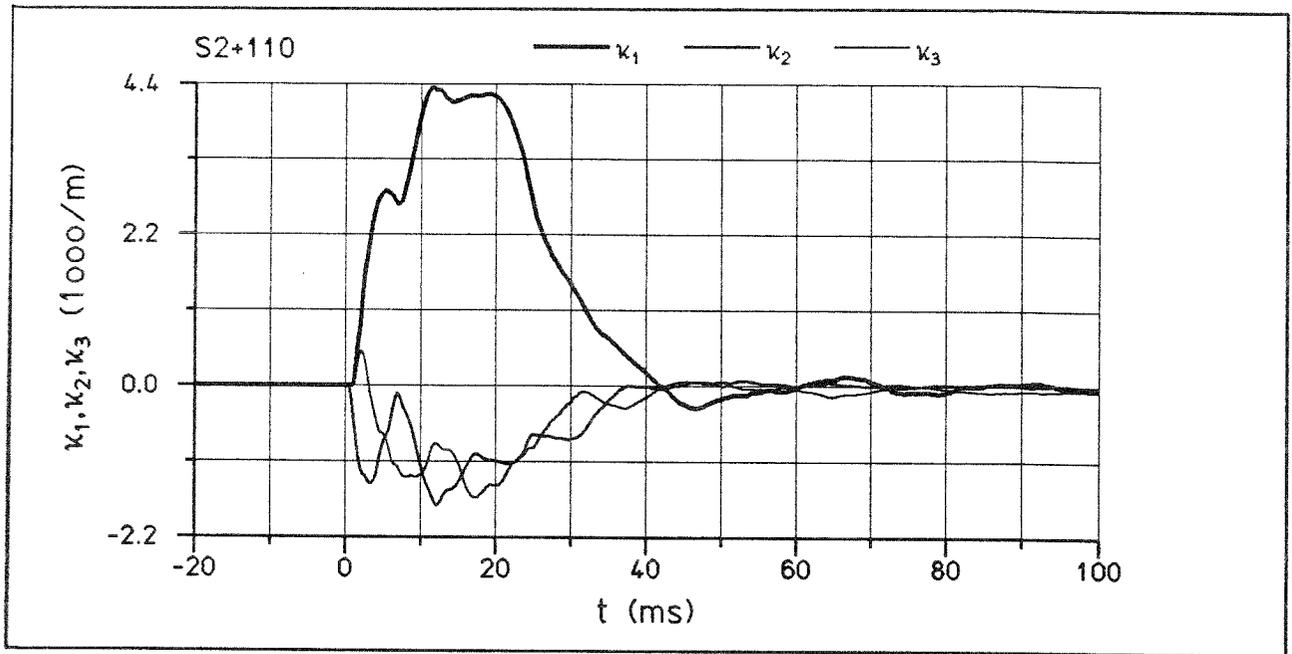


Anlage 6.39: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -

Stoßkraft F_1 , Stablängskraft F_2 , Verschiebungen s_1 , s_3

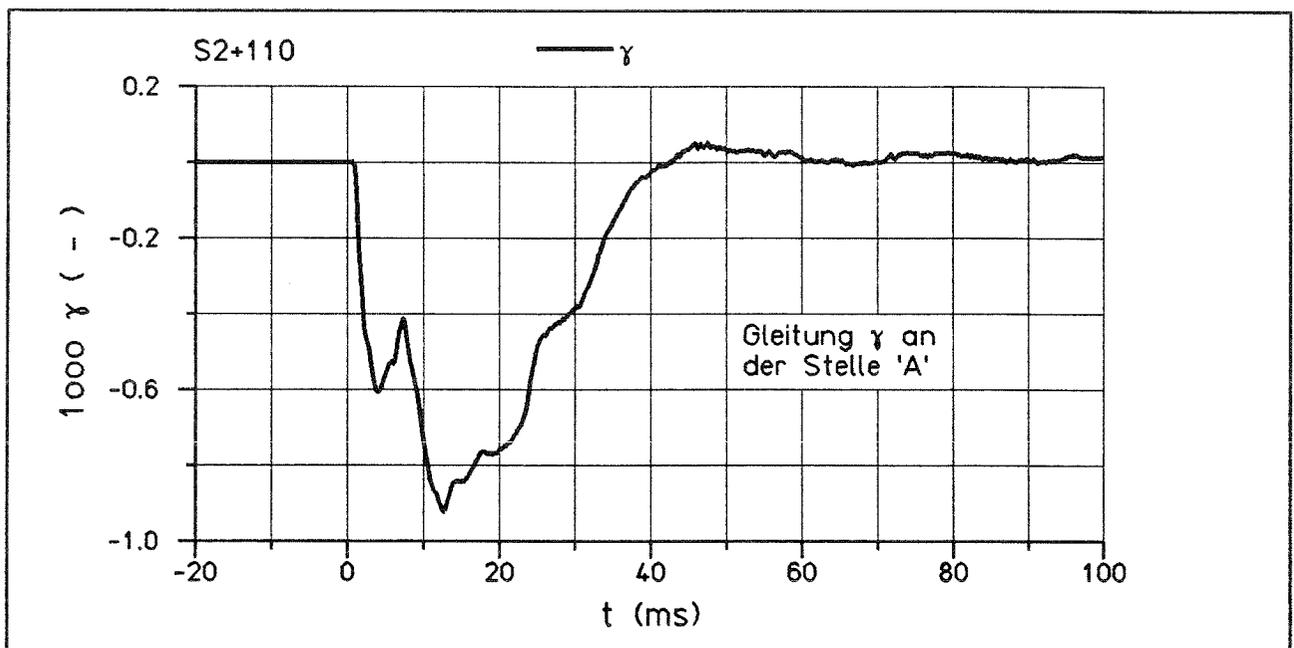
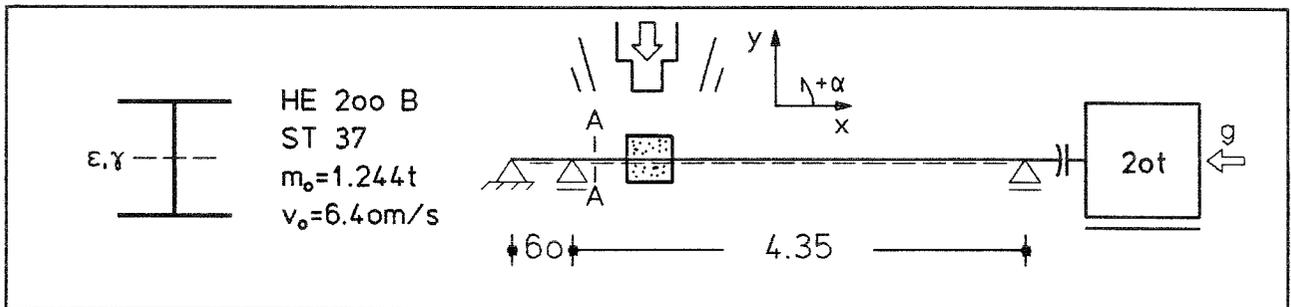
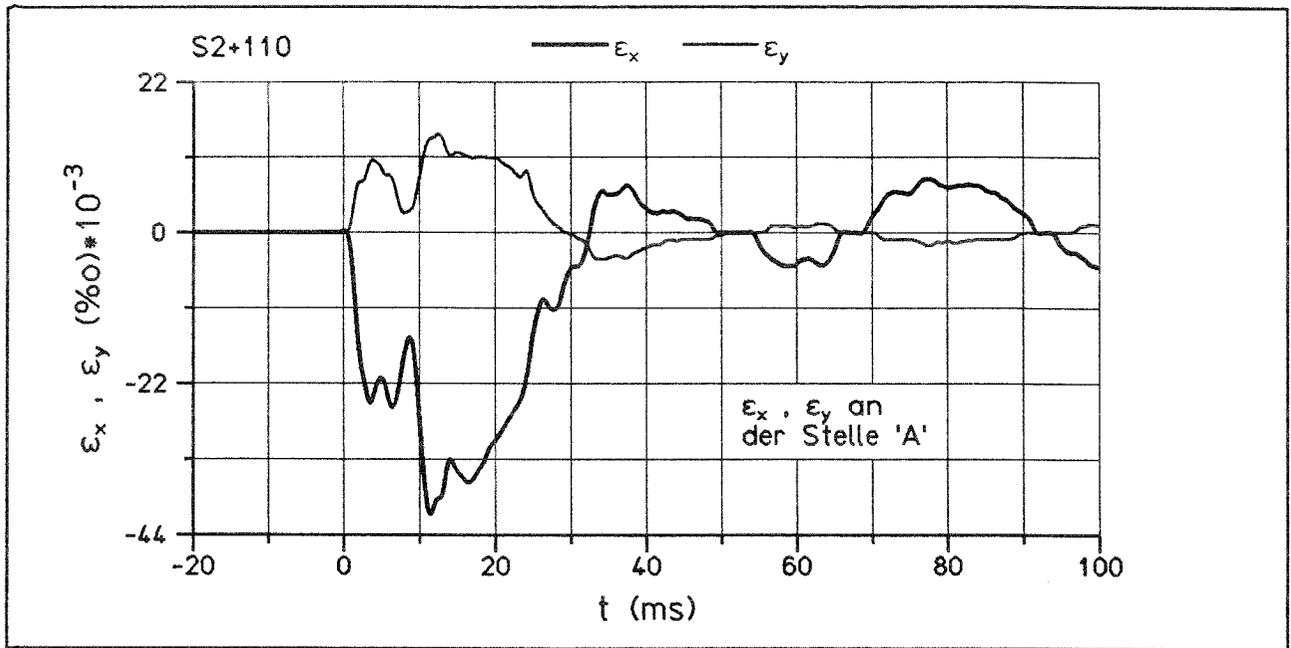


Anlage 6.40: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -
Auflagerkräfte F_3 , F_4 , F_5



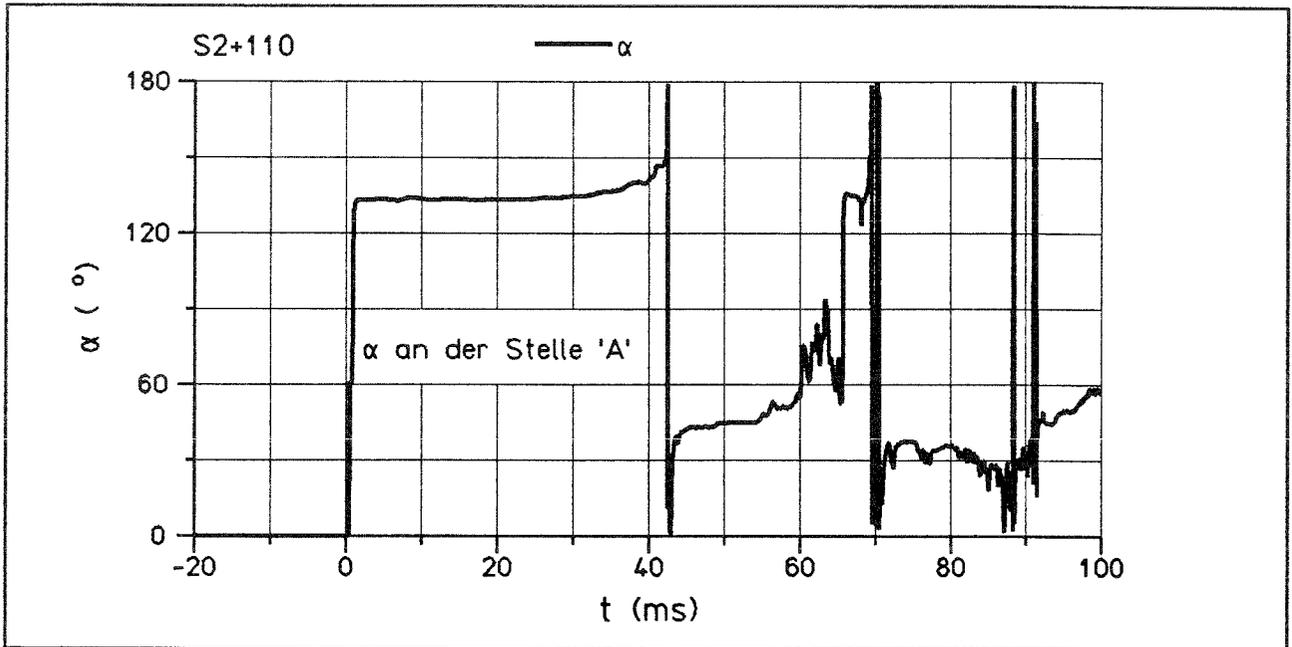
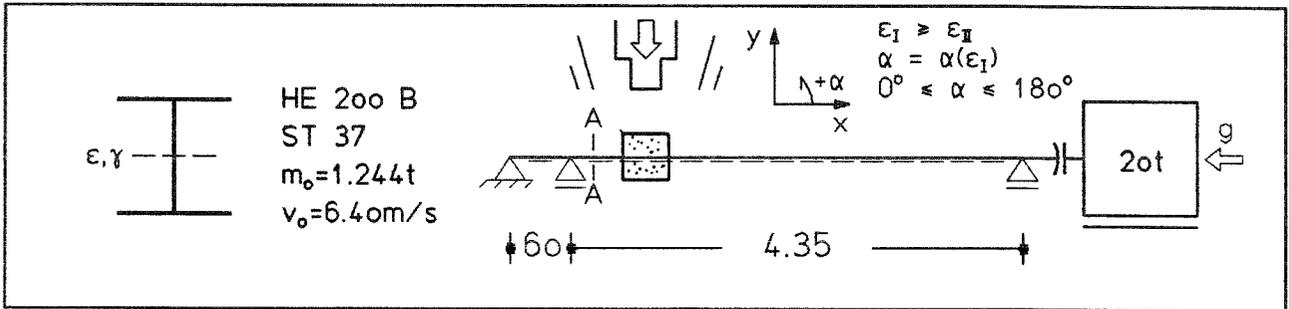
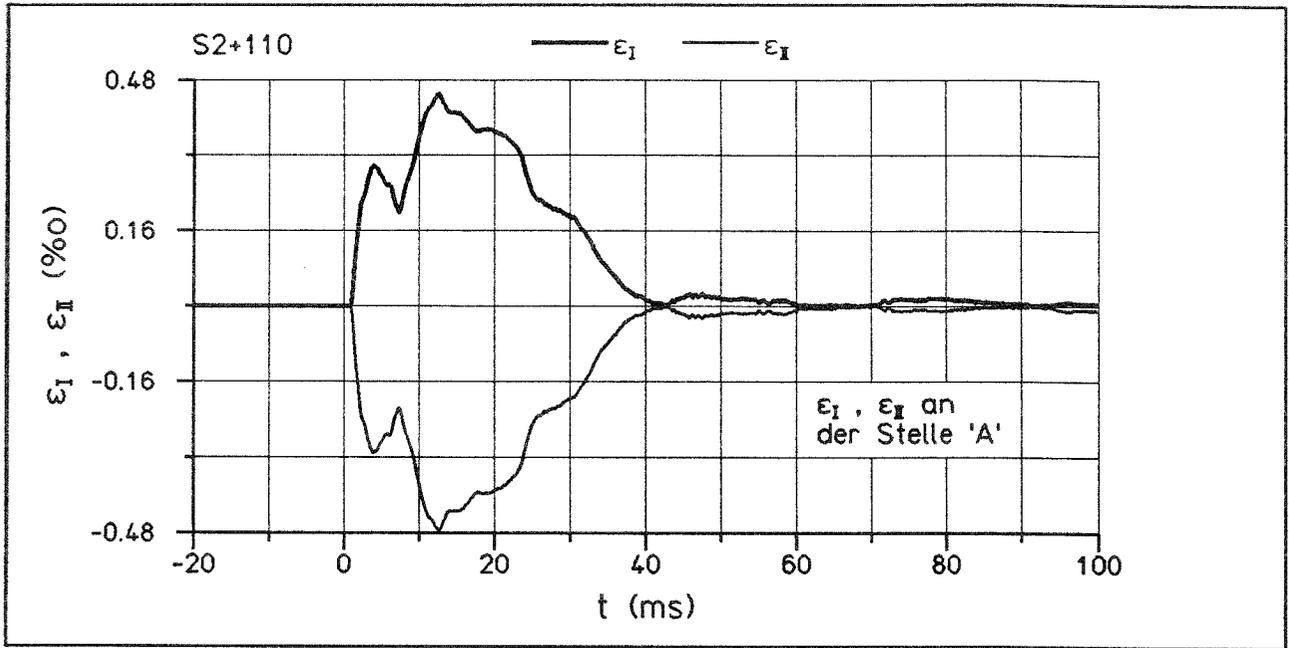
Anlage 6.41: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -

Krümmungen κ_1 , κ_2 , κ_3 , Differenz der Vorspannkraften ΔV_V , ΔV_L
(negativ = Vorspannkraftverlust)

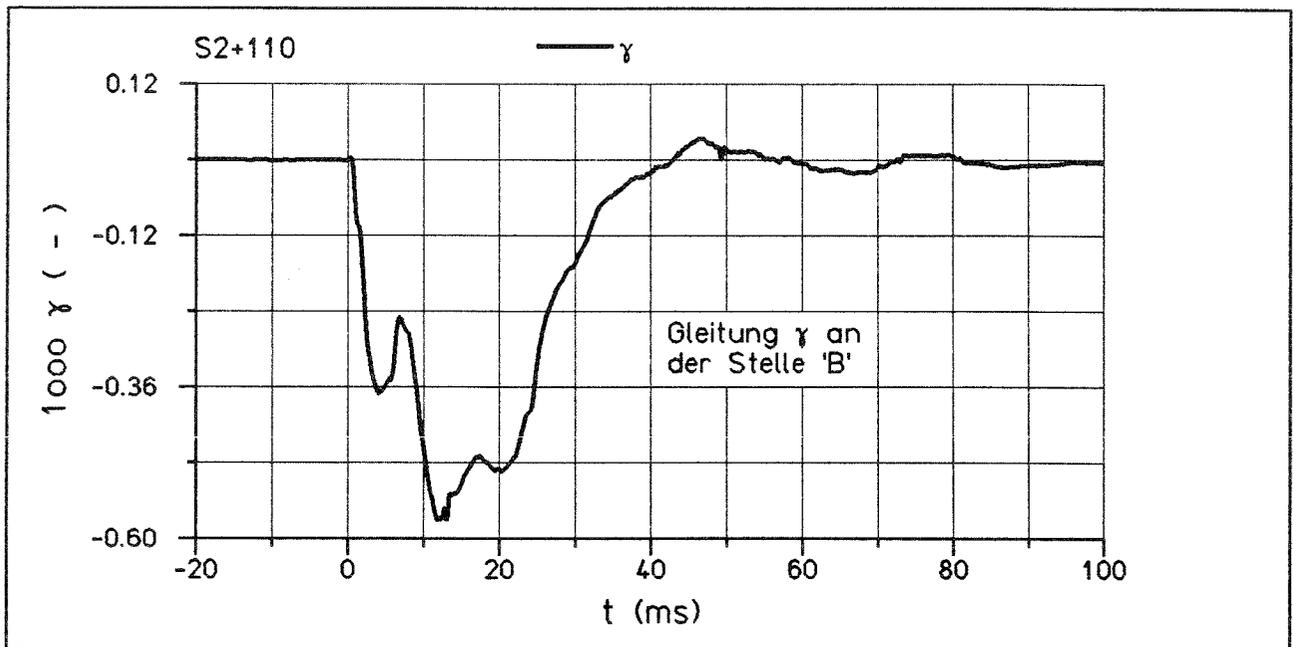
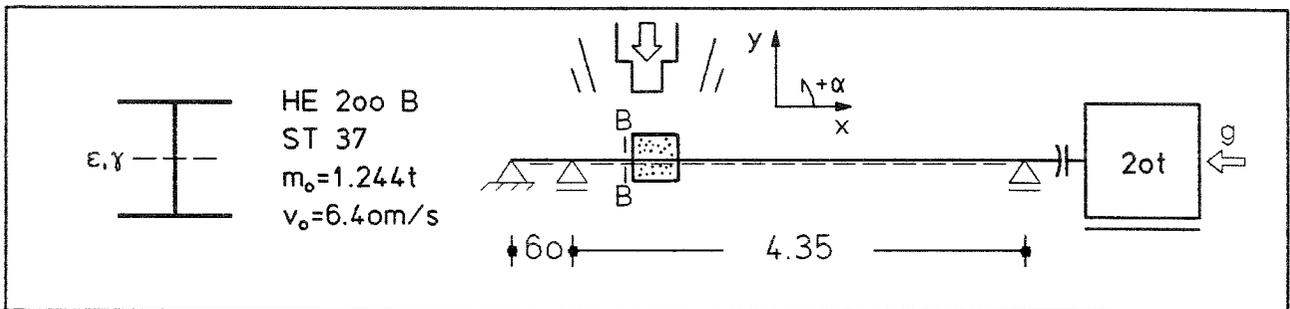
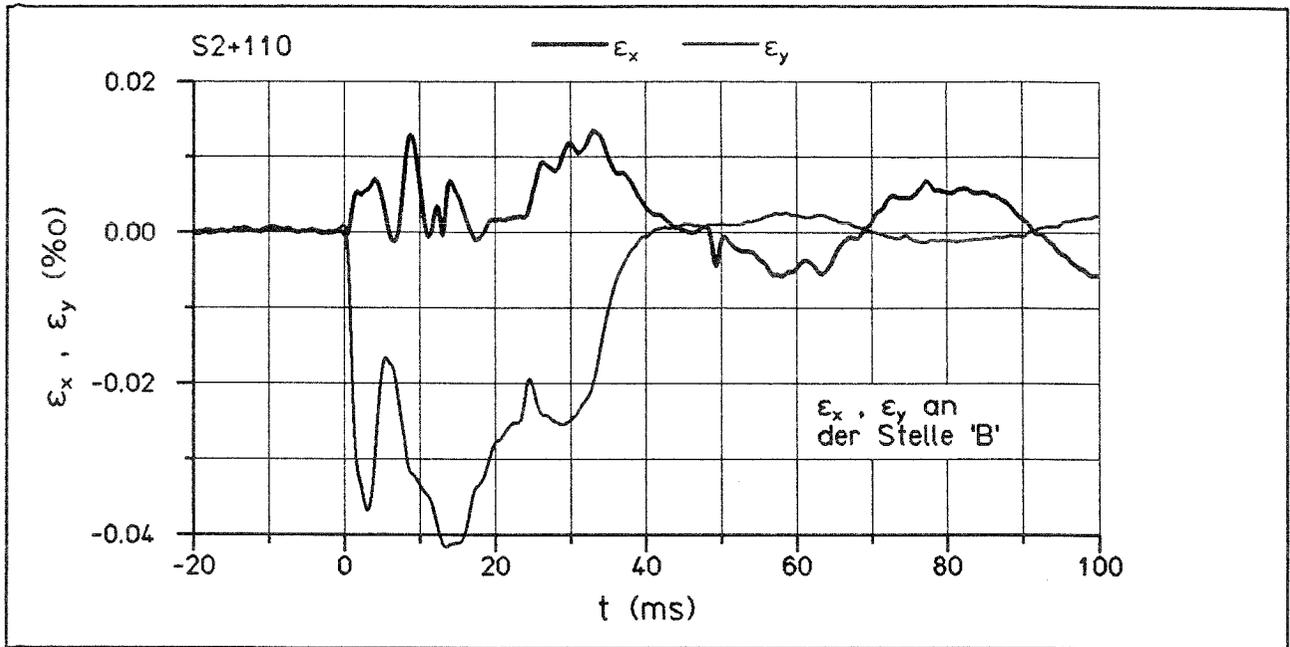


Anlage 6.42: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -

Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stützenachse an der Stelle "A"

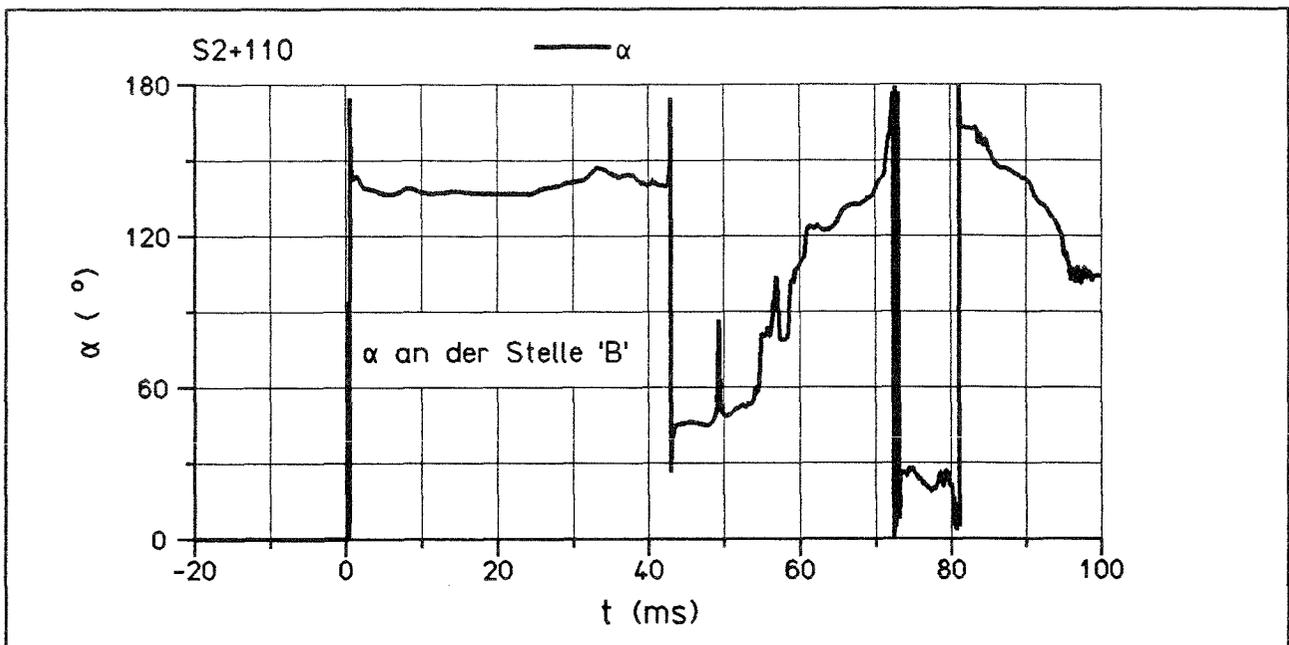
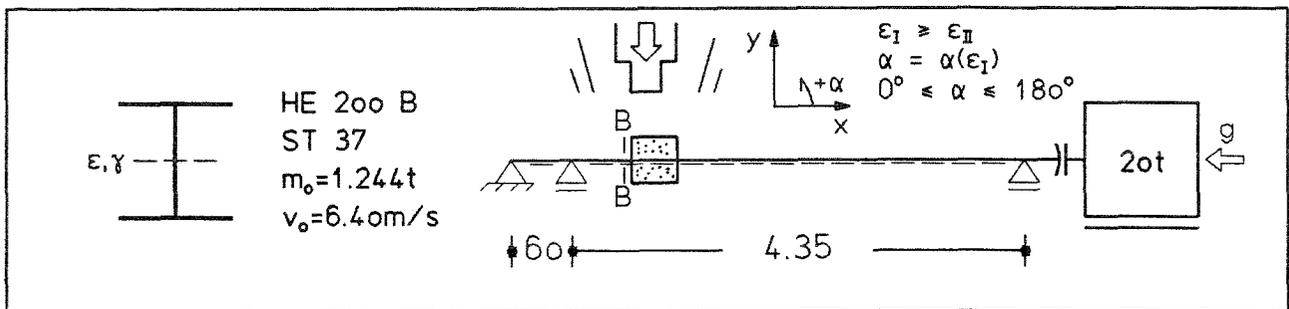
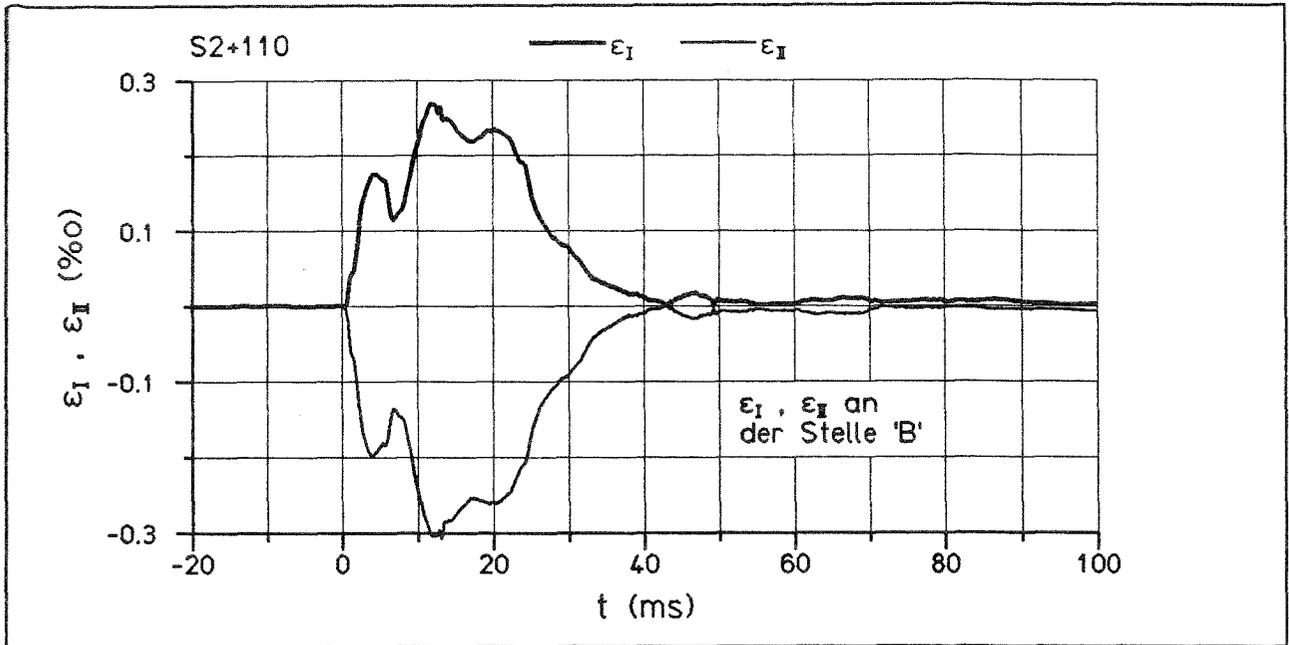


Anlage 6.43: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -
 Hauptdehnungen ϵ_I , ϵ_{II} , Winkel der Hauptzugdehnung α
 in Stützenachse an der Stelle "A"



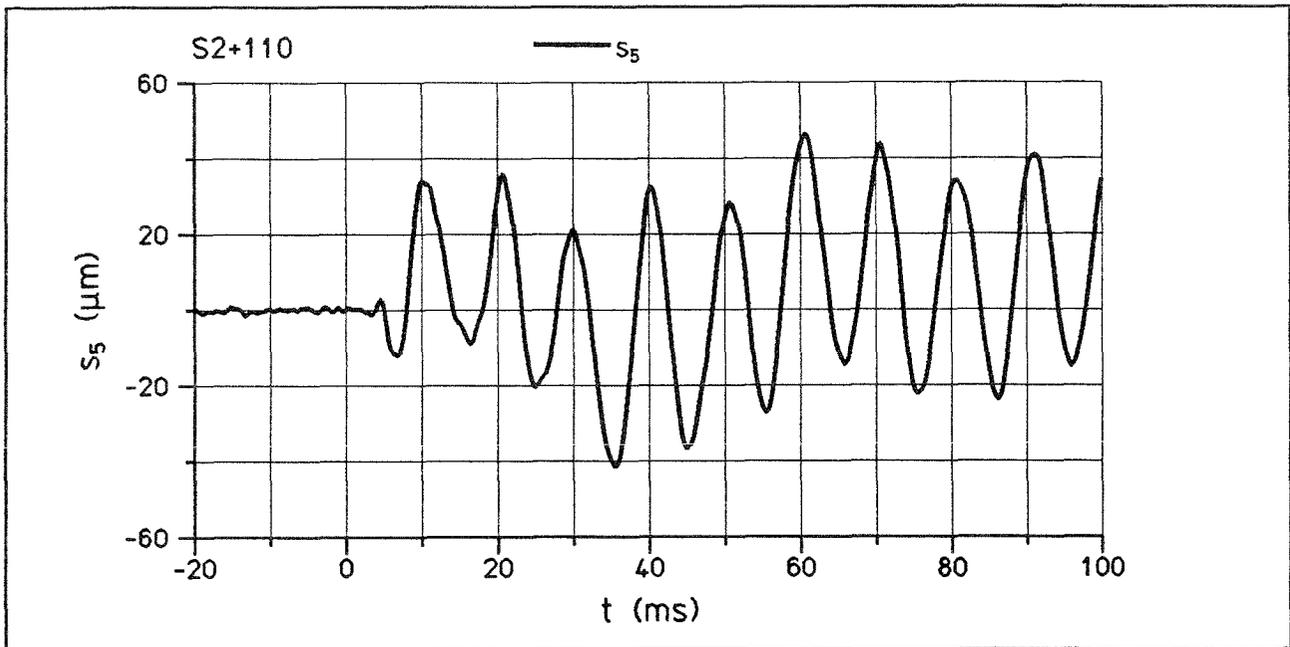
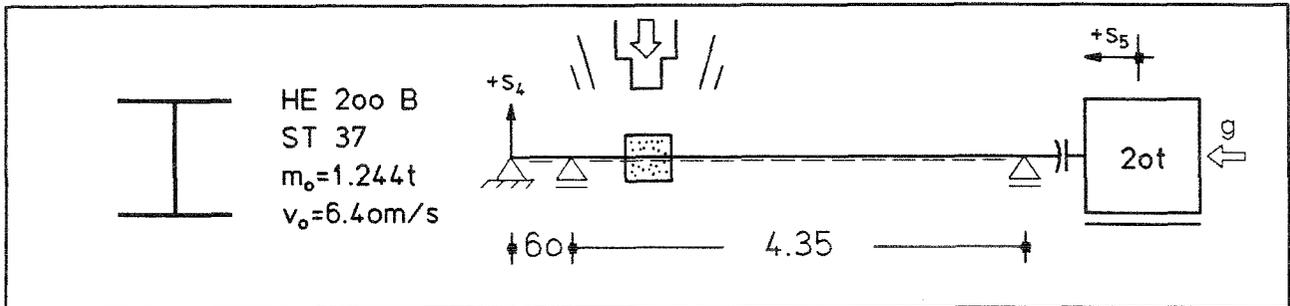
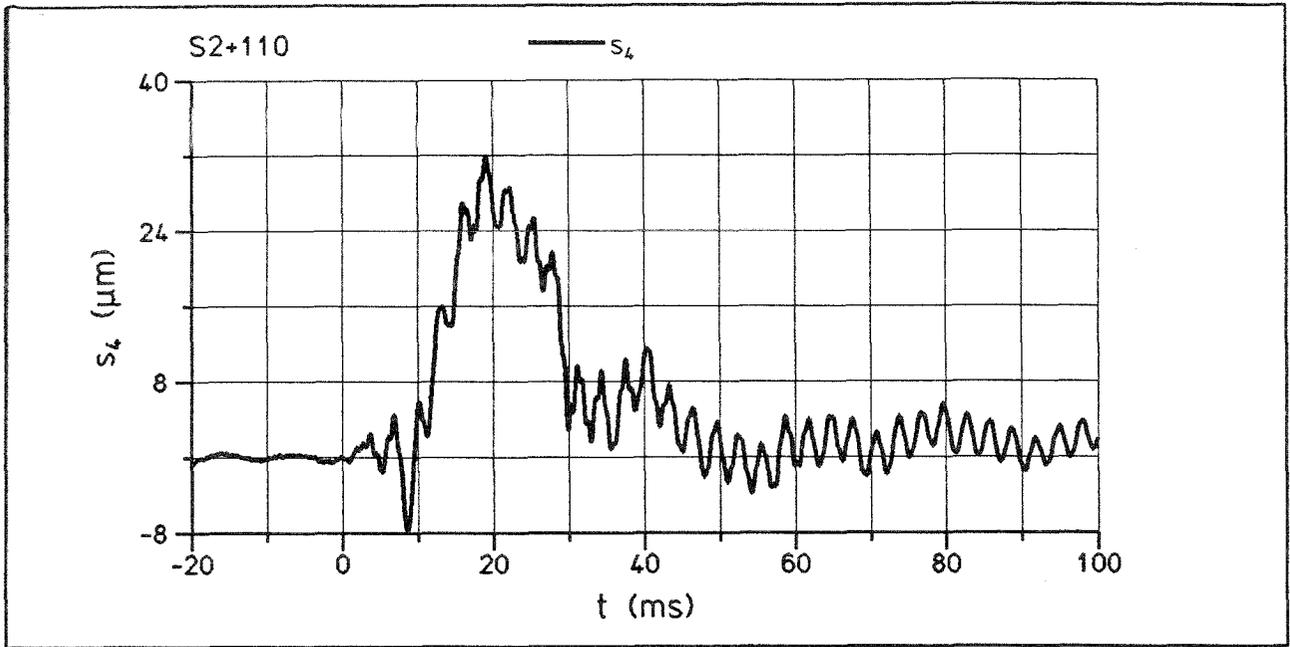
Anlage 6.44: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -

Dehnungen ϵ_x, ϵ_y , Gleitung γ in Stützenachse an der Stelle "B"

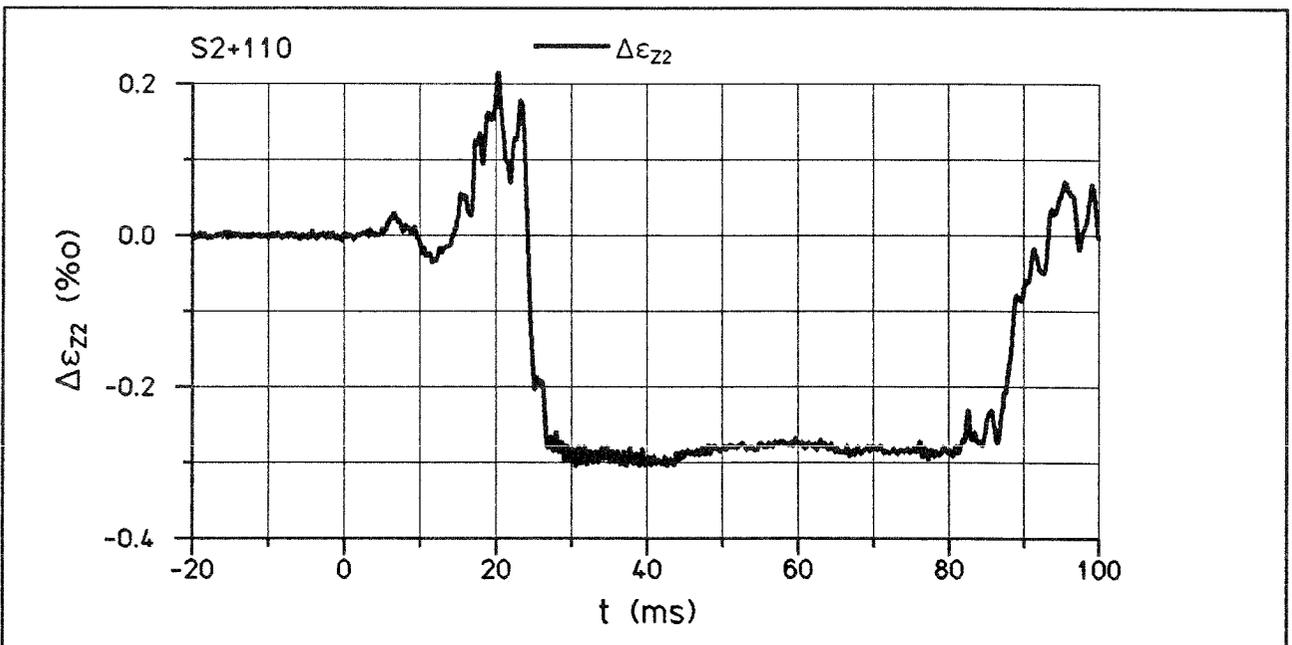
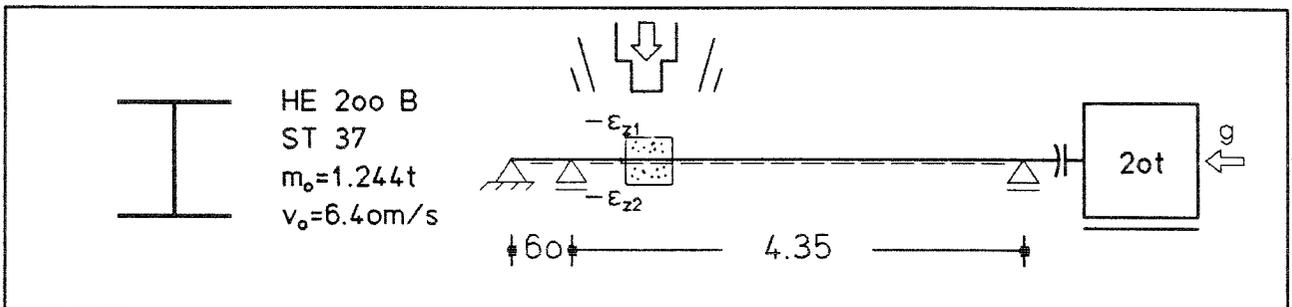
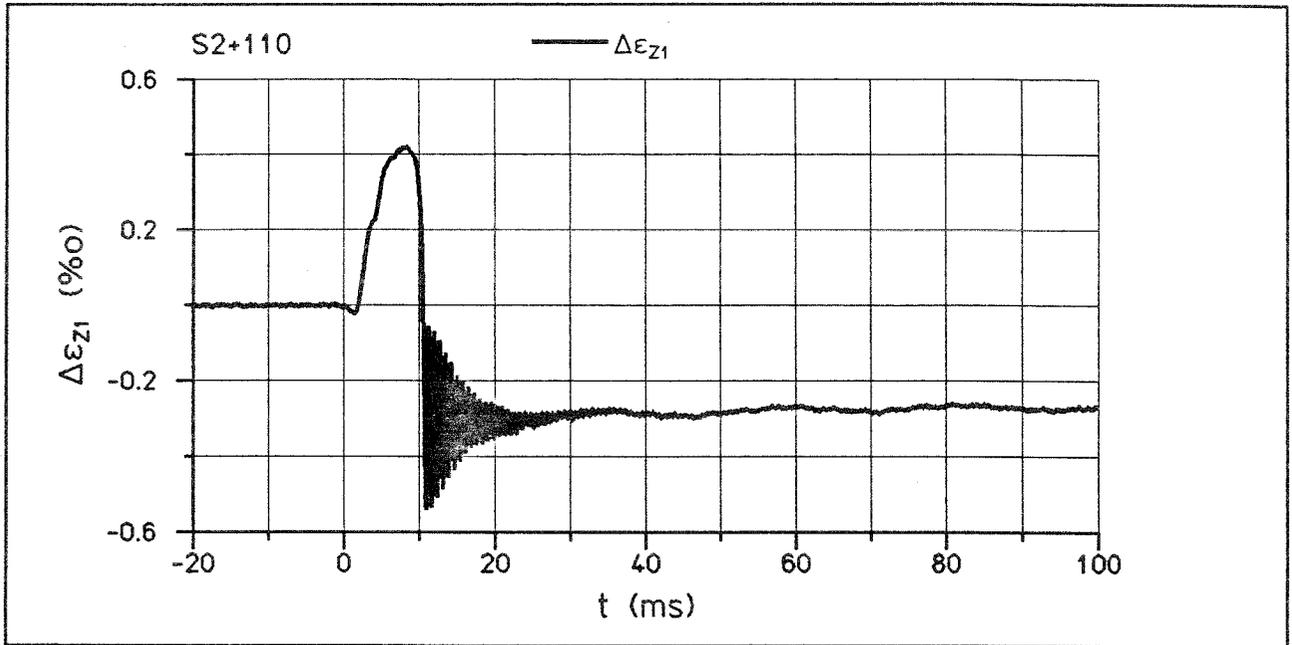


Anlage 6.45: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -

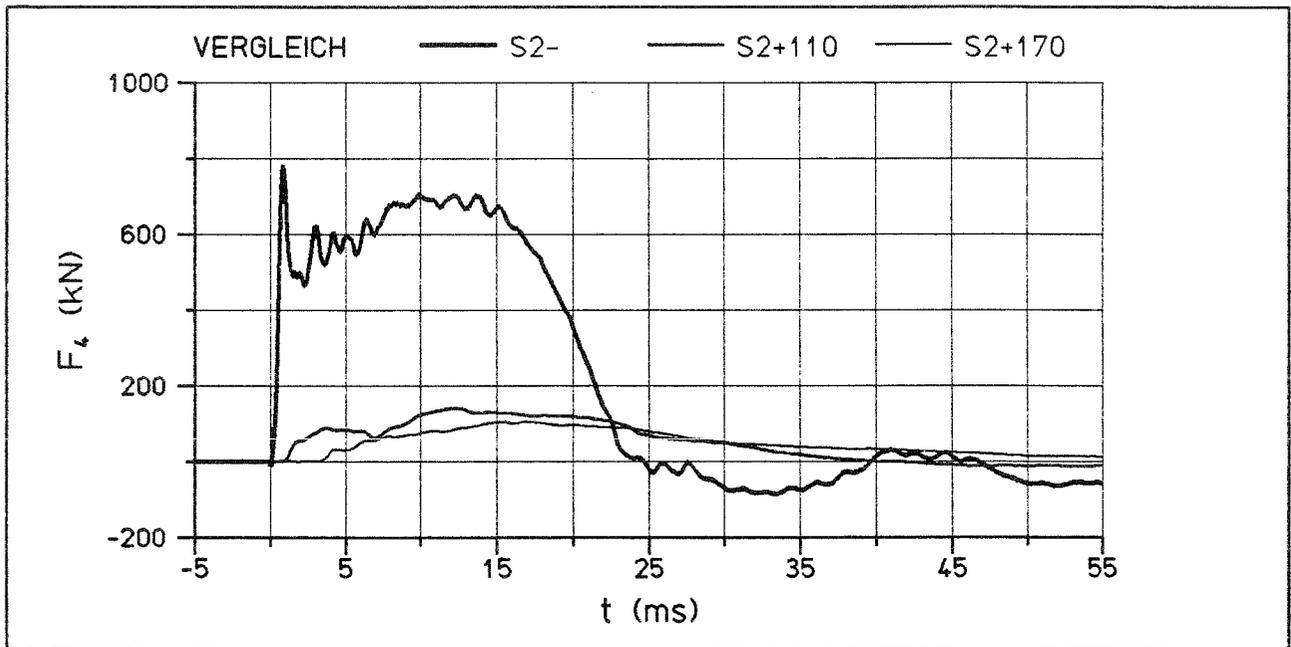
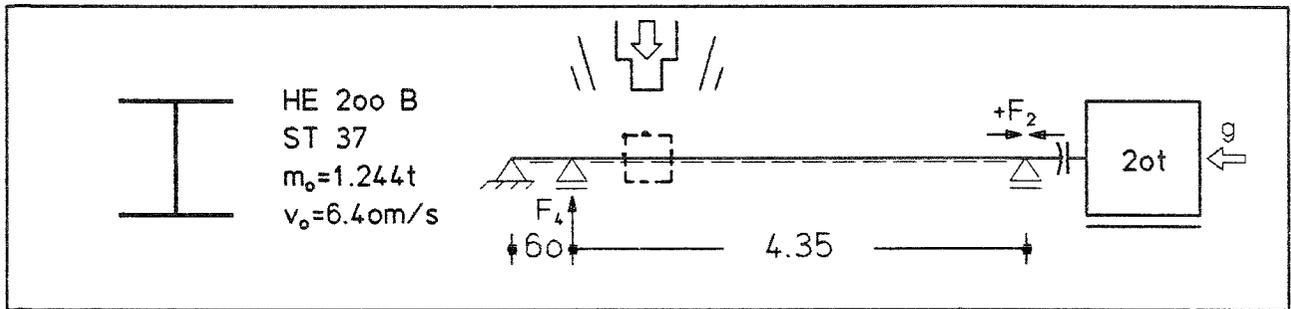
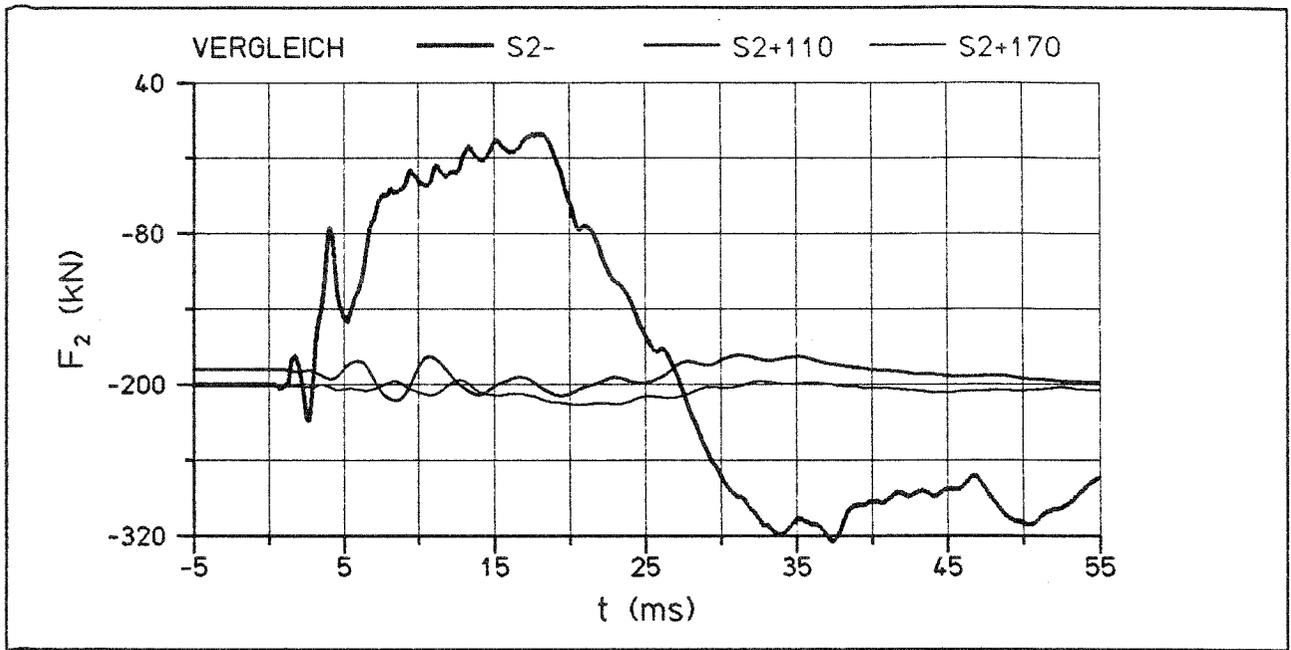
Hauptdehnungen $\epsilon_I, \epsilon_{II}$, Winkel der Hauptzugdehnung α
in Stützenachse an der Stelle "B"



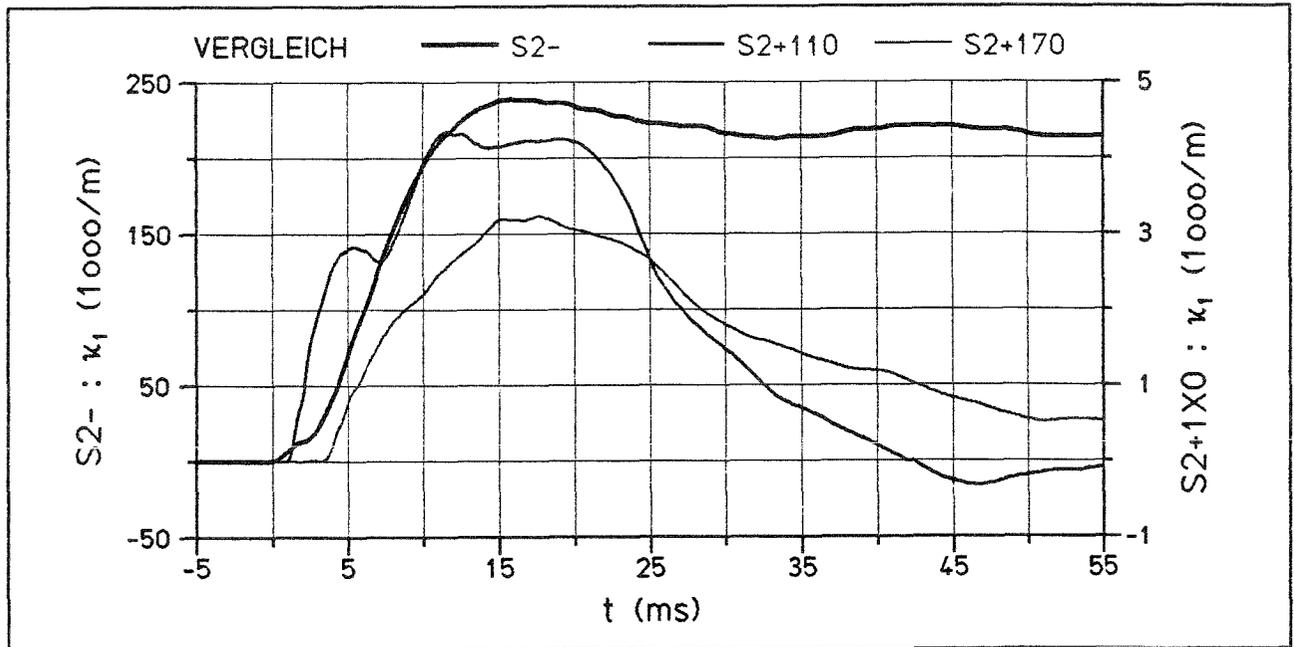
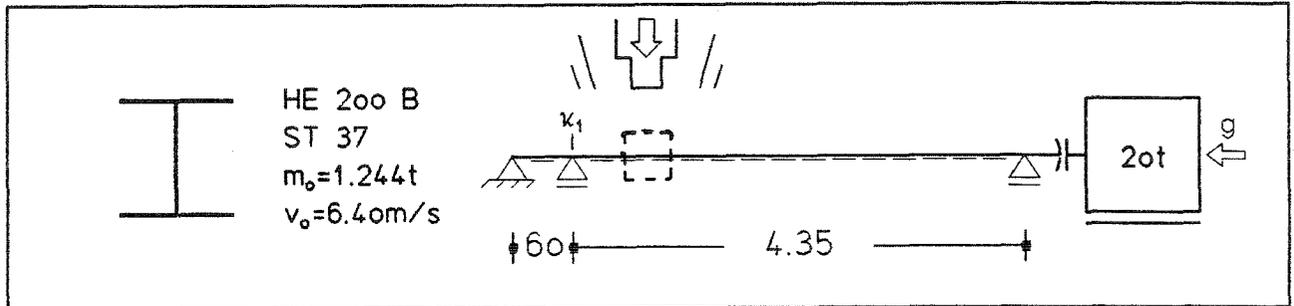
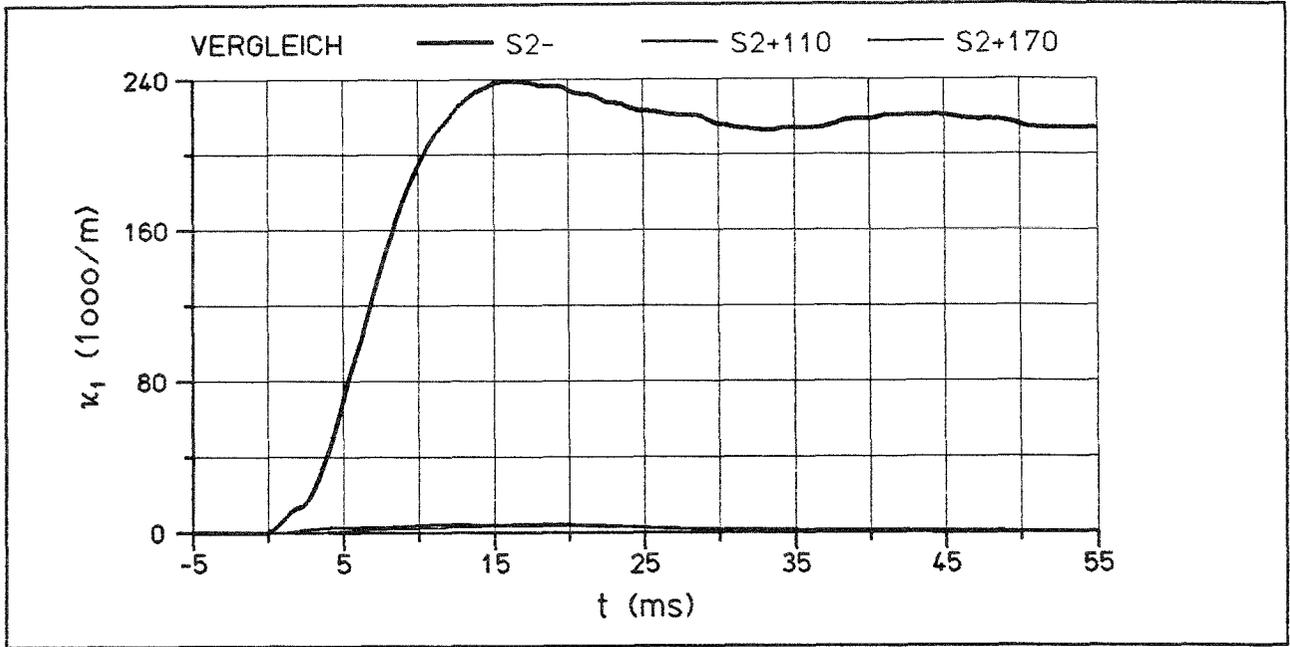
Anlage 6.46: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -
Verschiebungen s_4 , s_5



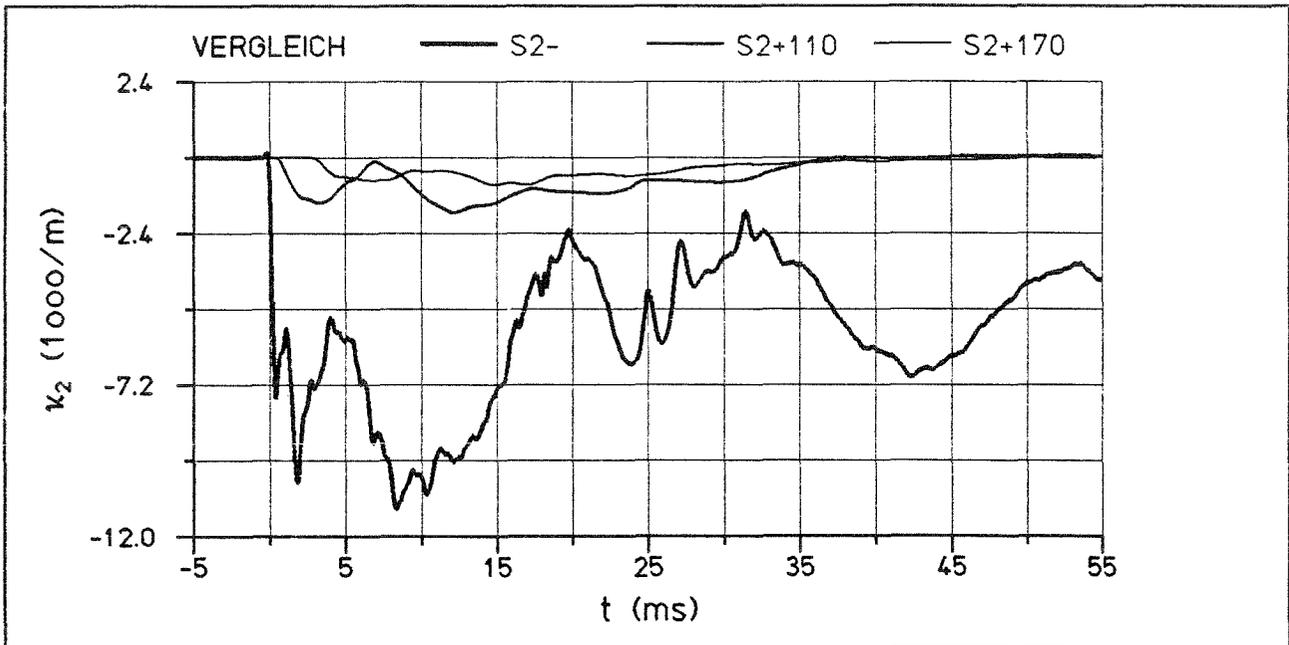
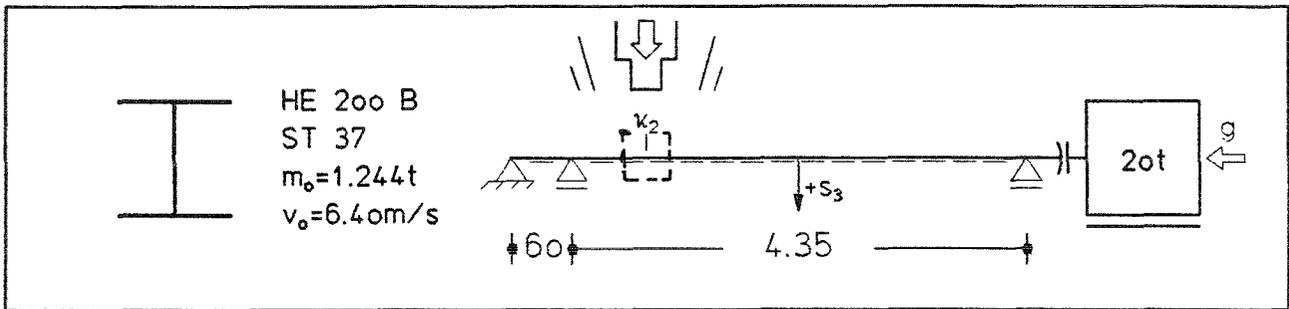
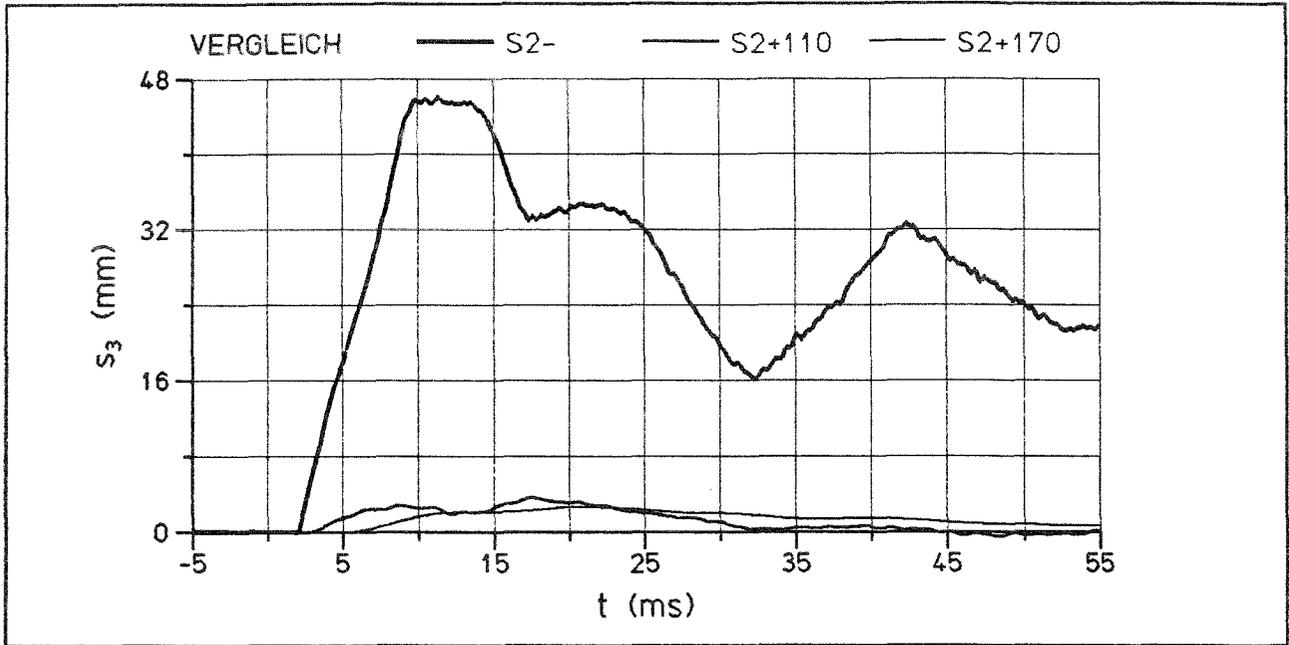
Anlage 6.47: Versuch S2+110 - mit Sandtopf -
Differenz der Zugstangendehnungen ϵ_{z1} , ϵ_{z2}
(negativ = Vorspannkraftverlust)



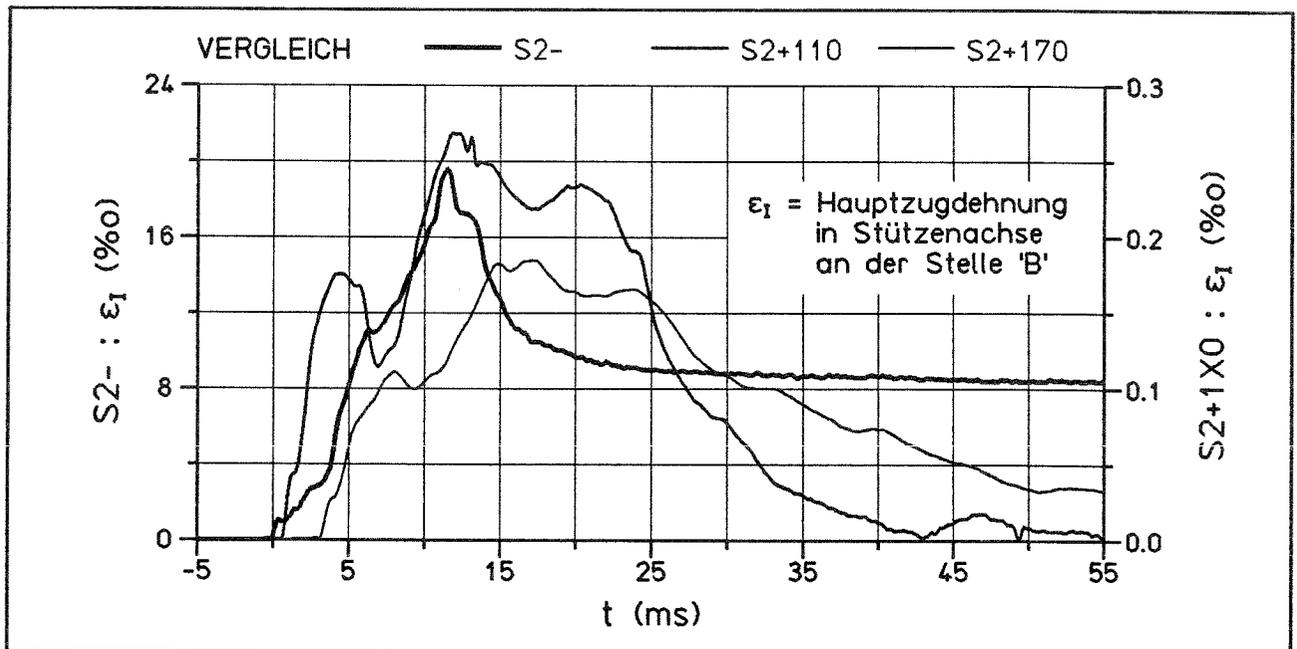
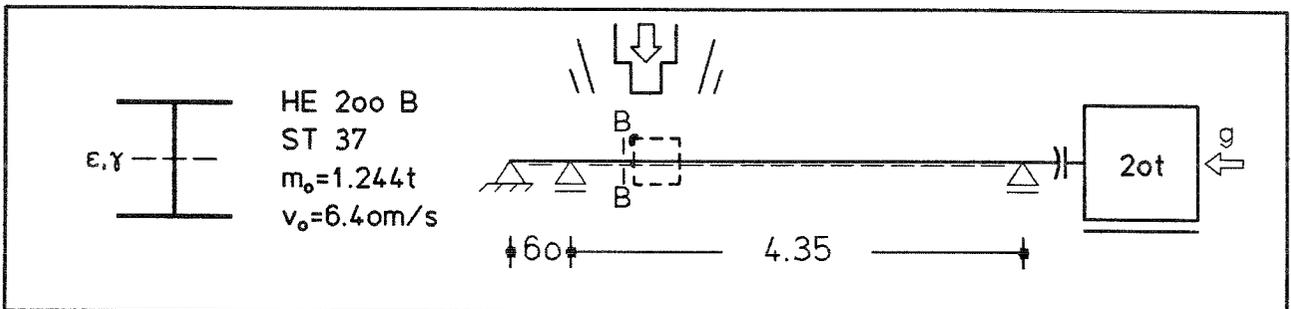
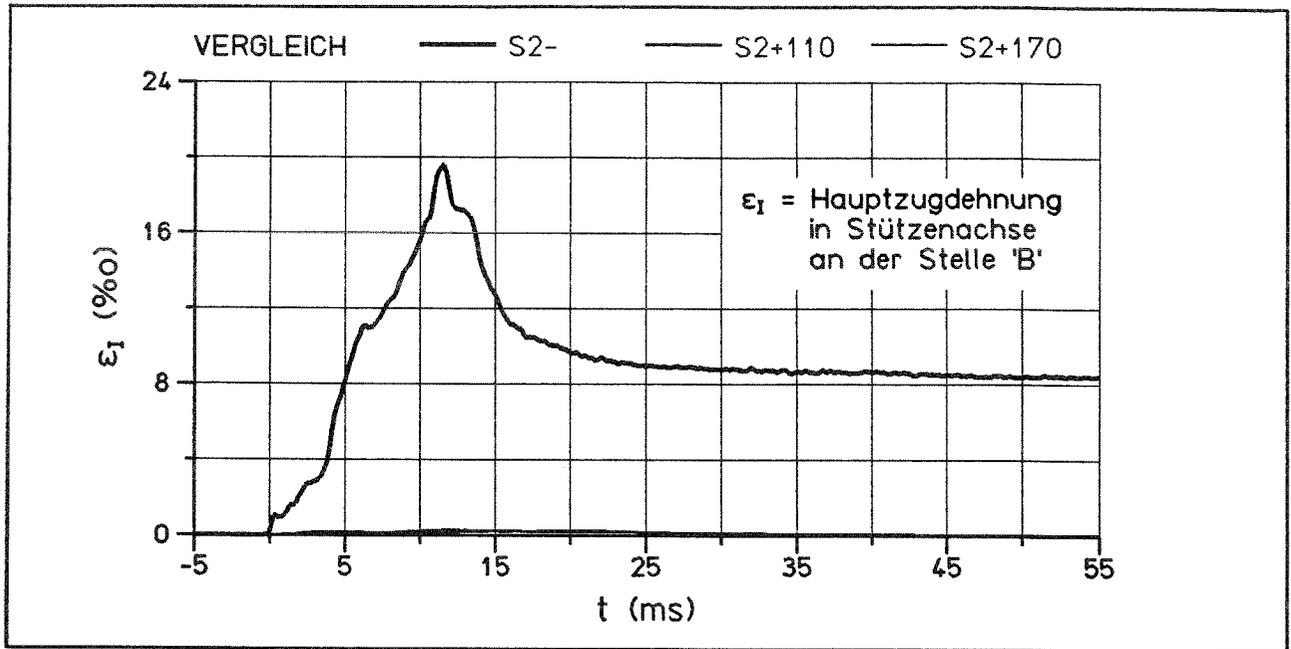
Anlage 6.48: Versuche S2-, S2+110, S2+170 - mit und ohne Sandtopf -
Stablängskräfte F_2 , Auflagerkräfte F_4



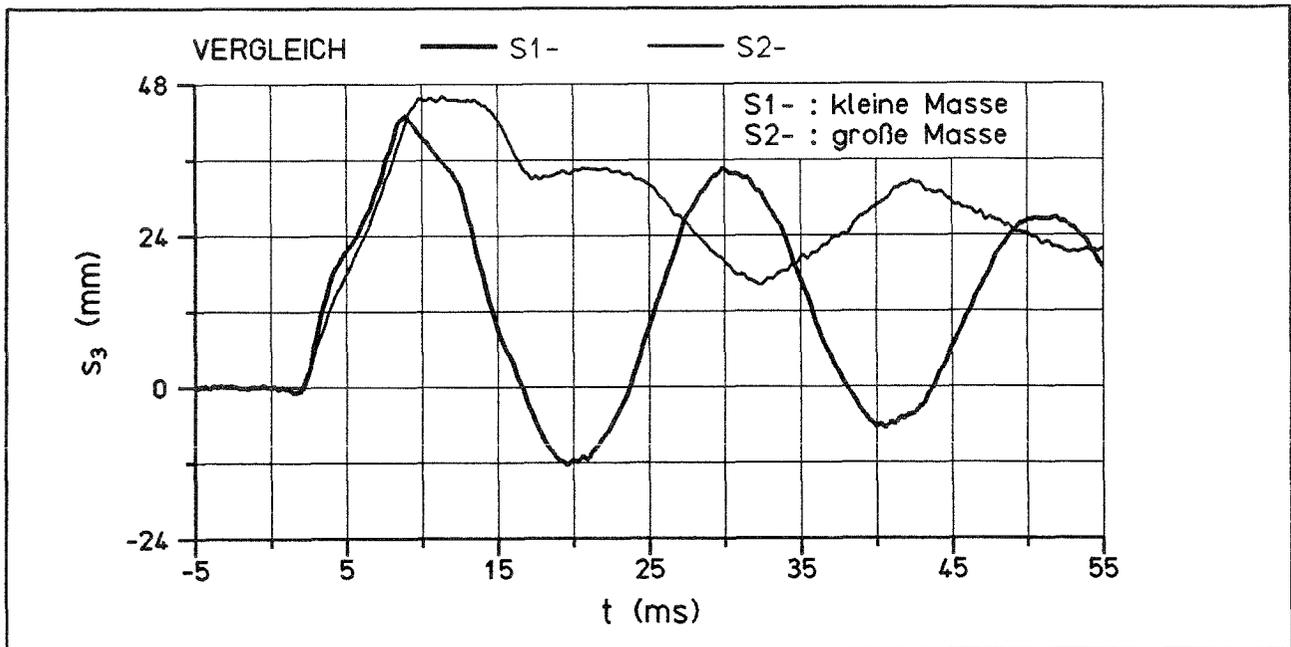
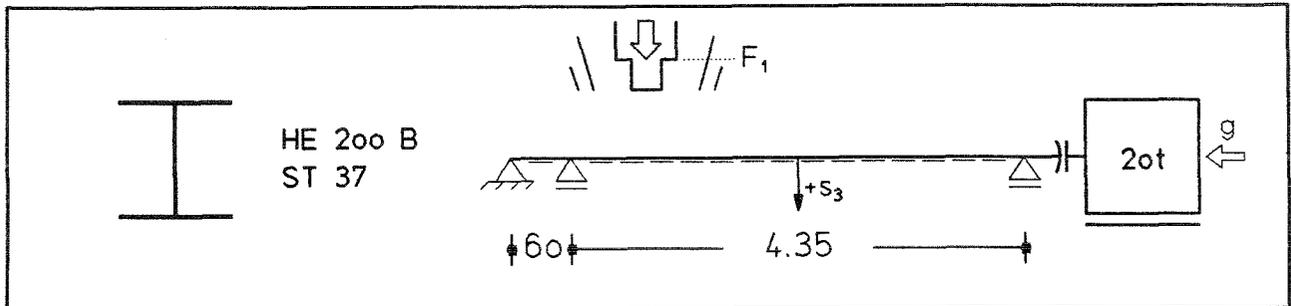
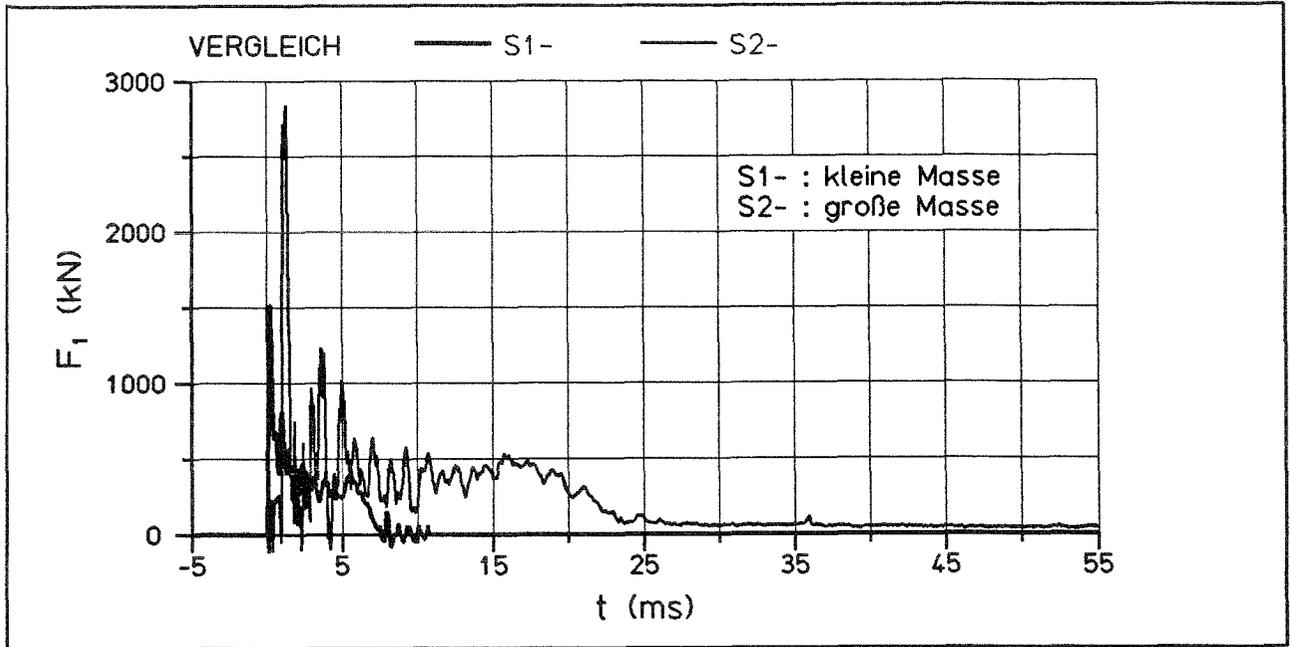
Anlage 6.49: Versuche S2-, S2+110, S2+170 - mit und ohne Sandtopf -
Krümmungen κ_1



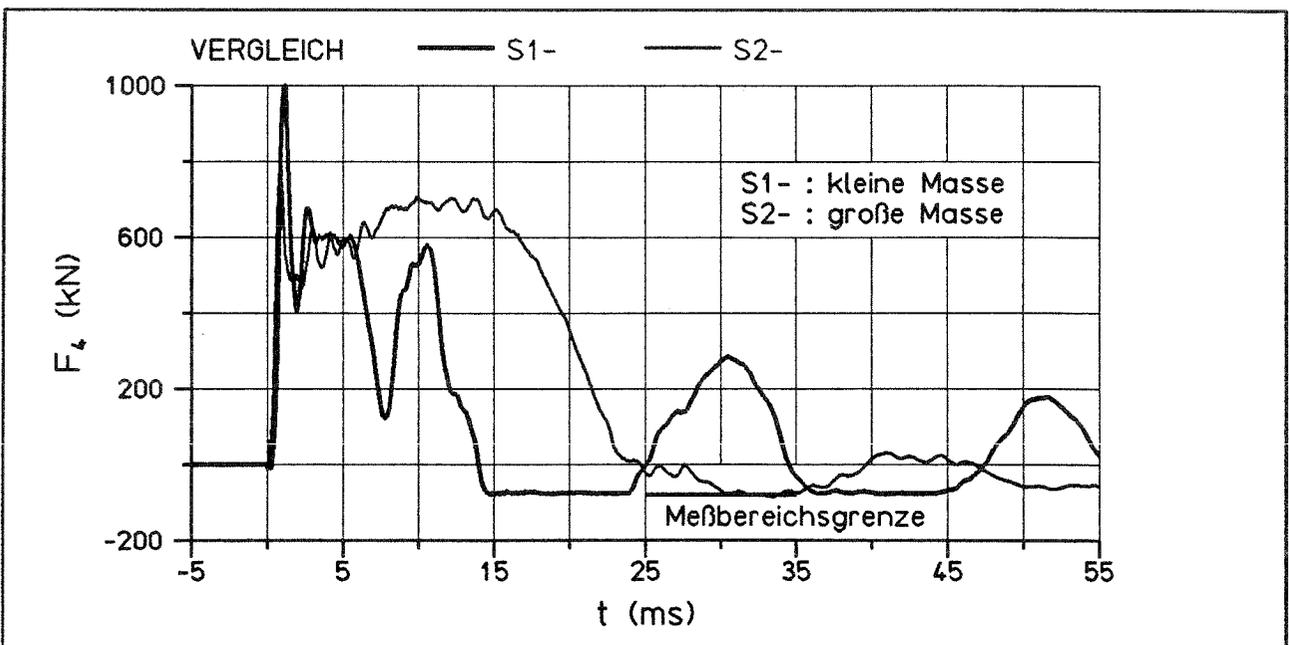
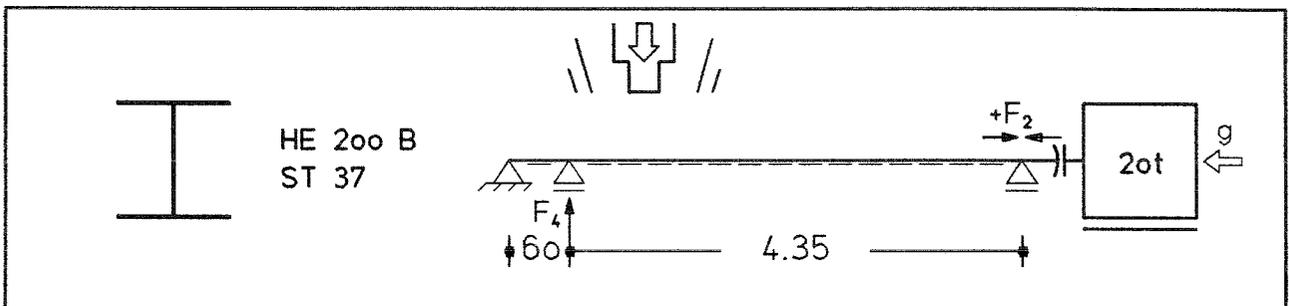
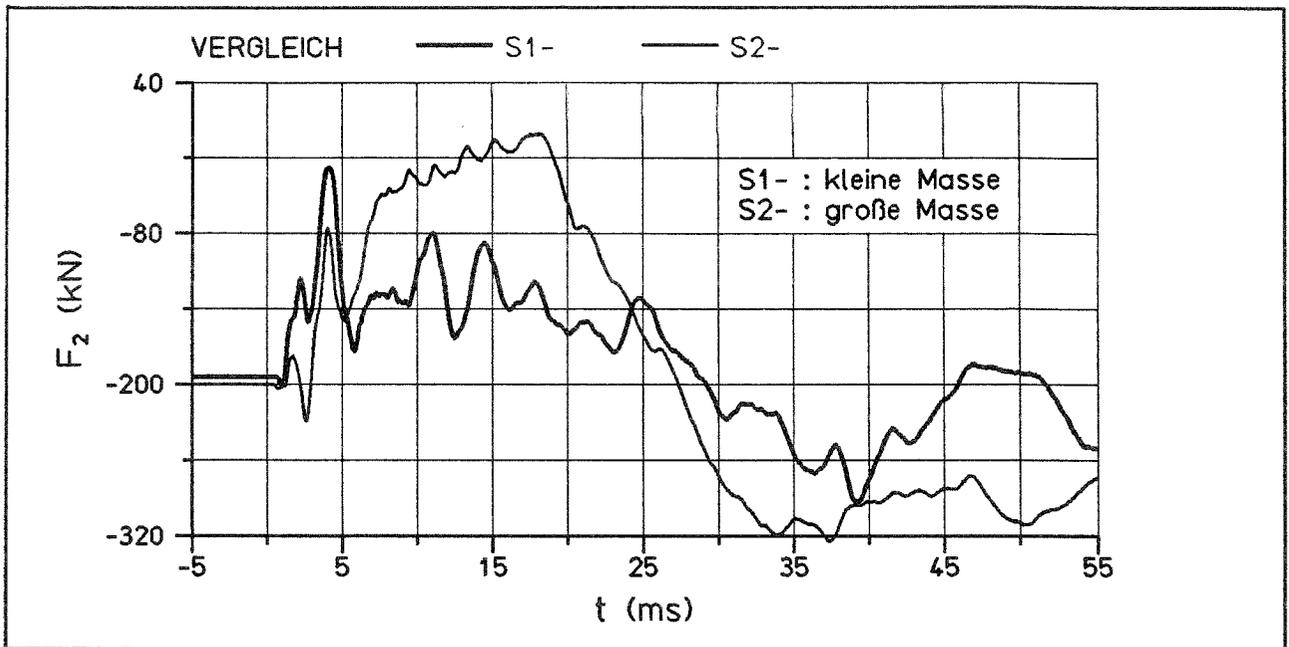
Anlage 6.50: Versuche S2-, S2+110, S2+170 - mit und ohne Sandtopf -
Verschiebungen s_3 , Krümmungen κ_2



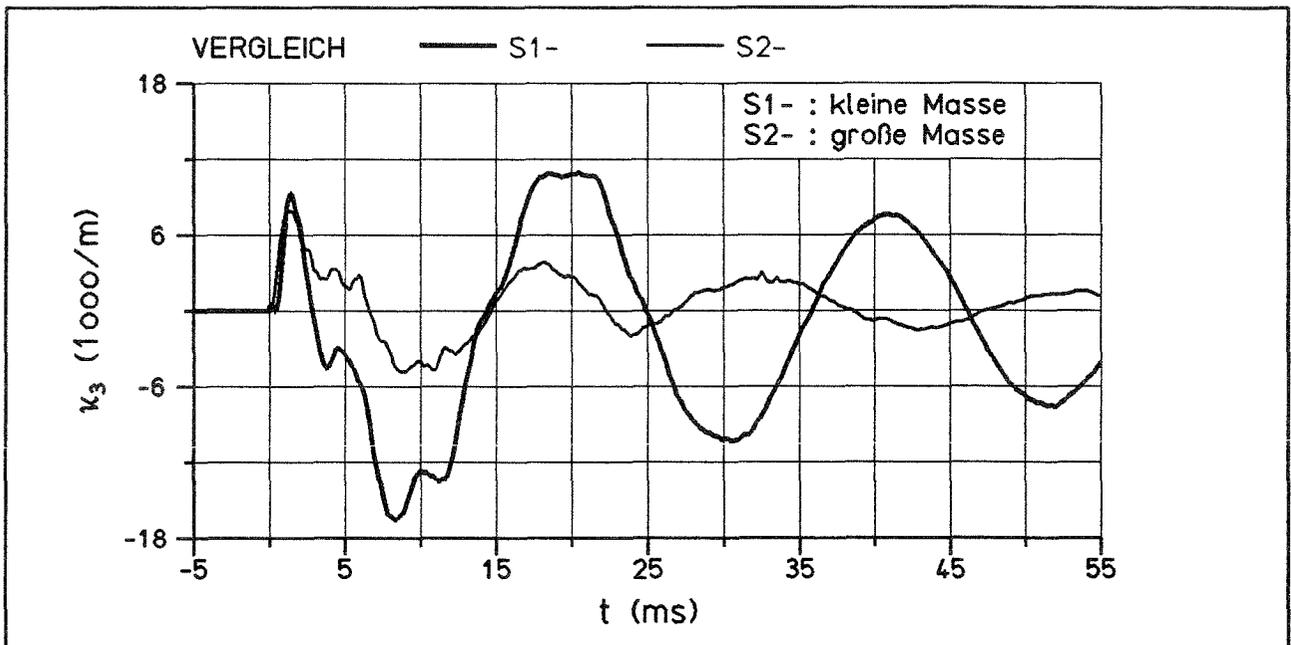
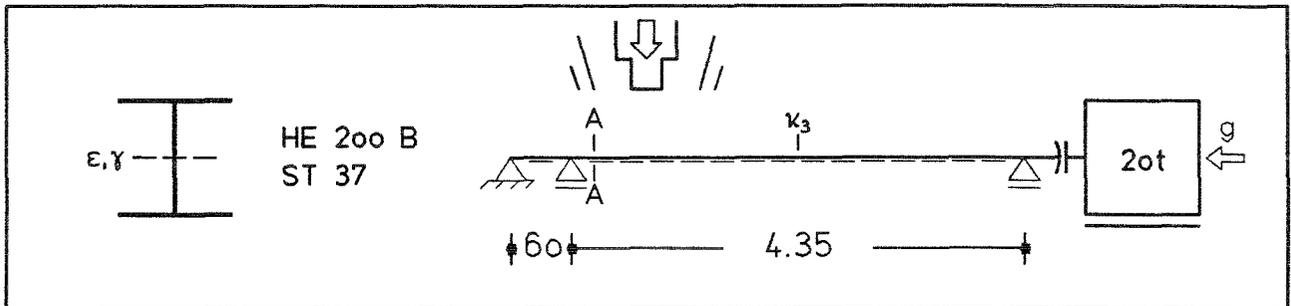
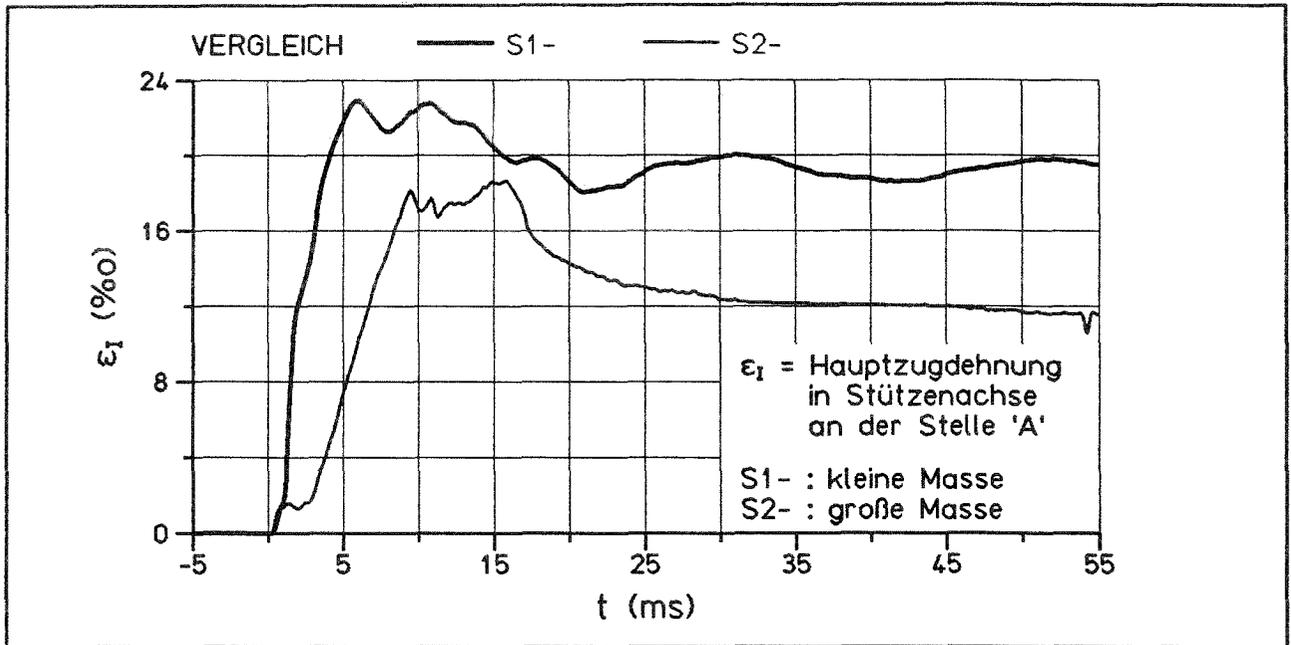
Anlage 6.51: Versuche S2-, S2+110, S2+170 - mit und ohne Sandtopf - Hauptzugdehnungen ϵ_I



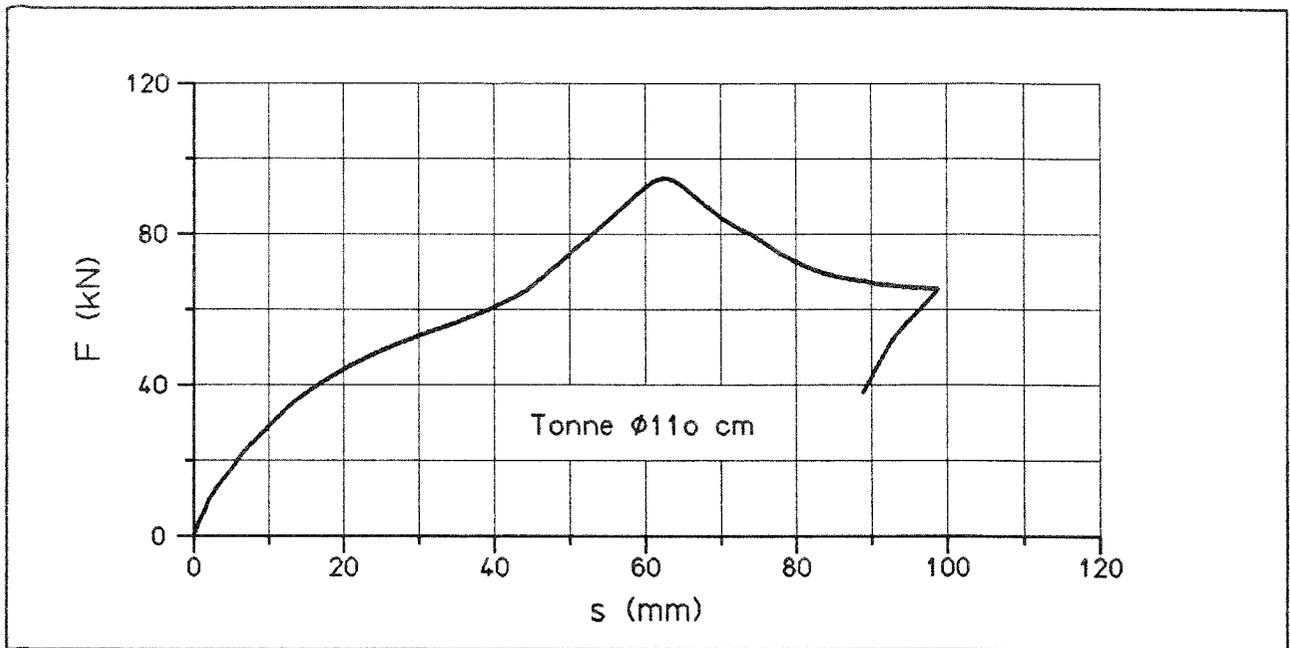
Anlage 6.52: Versuche S1-, S2- - ohne Sandtopf -
Stoßkräfte F_1 , Verschiebungen s_3



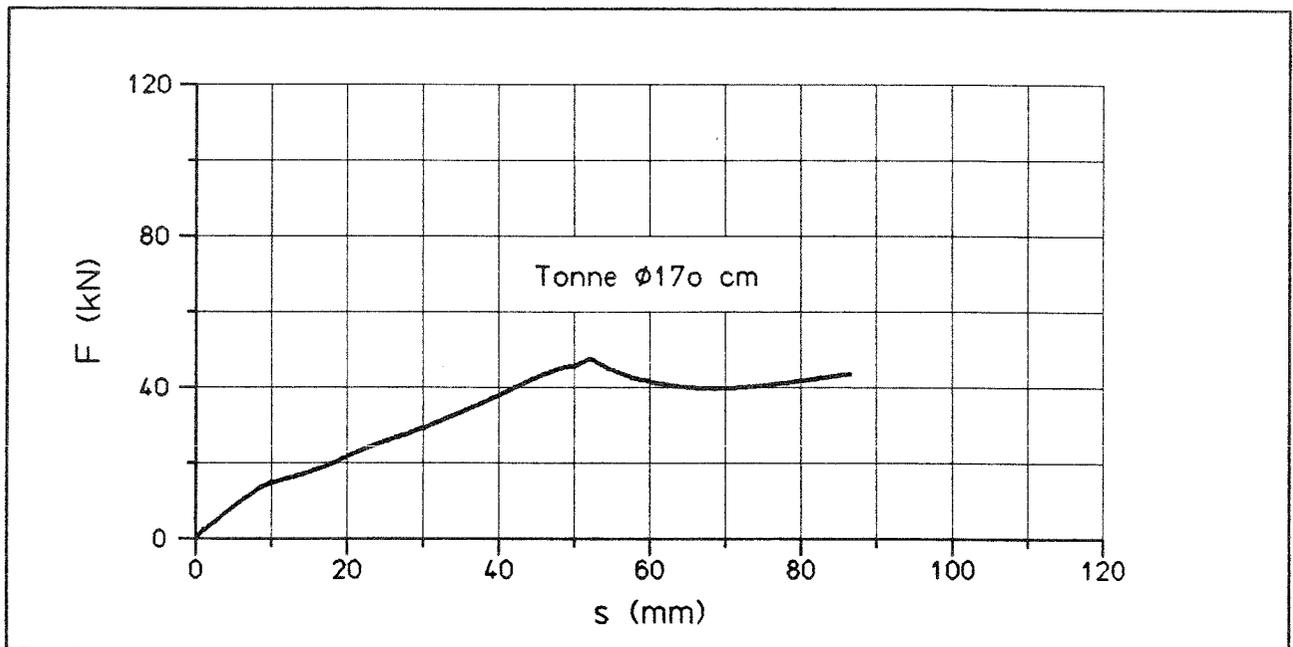
Anlage 6.53: Versuche S1-, S2- - ohne Sandtopf -
Stoßkräfte F_2 , Auflagerkräfte F_4



Anlage 6.54: Versuche S1-, S2- - ohne Sandtopf -
Hauptzugdehnungen ϵ_I , Krümmungen κ_3

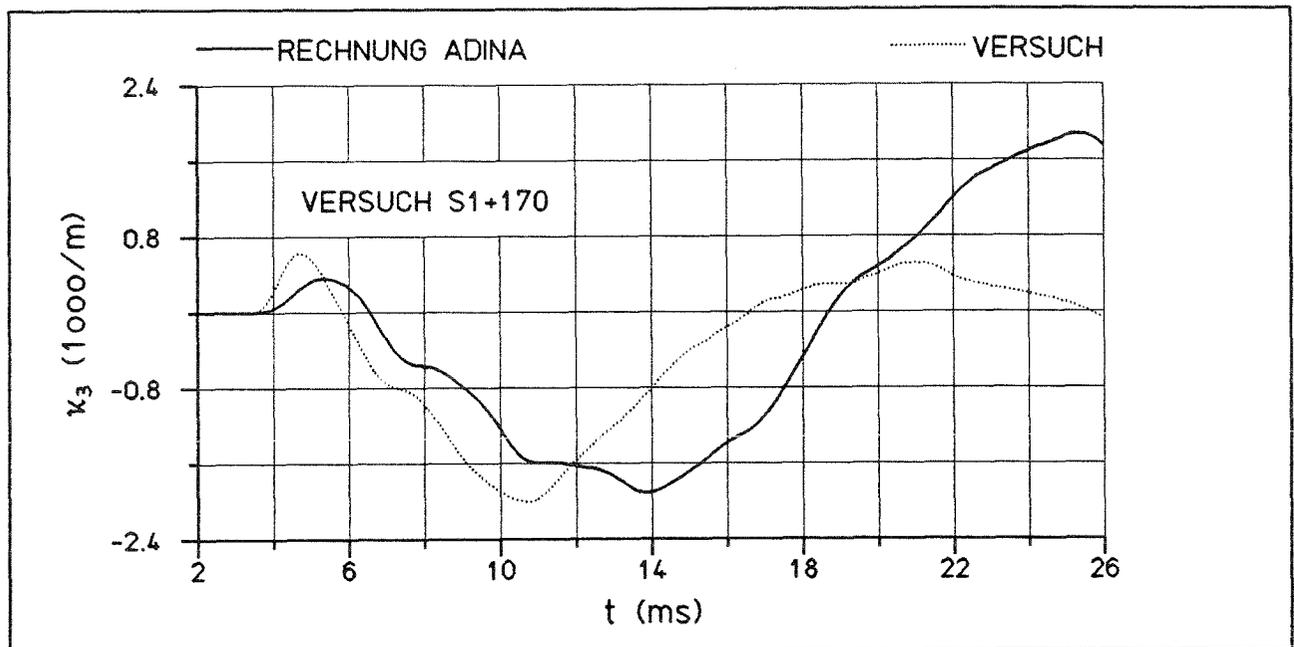
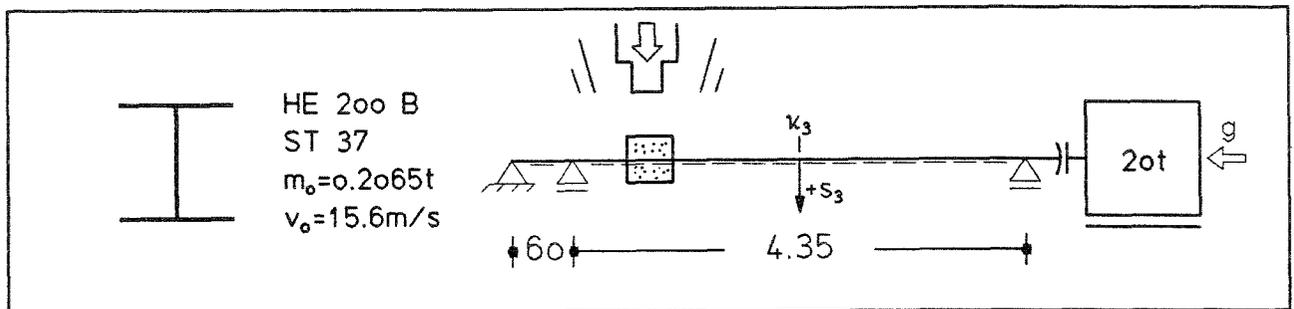
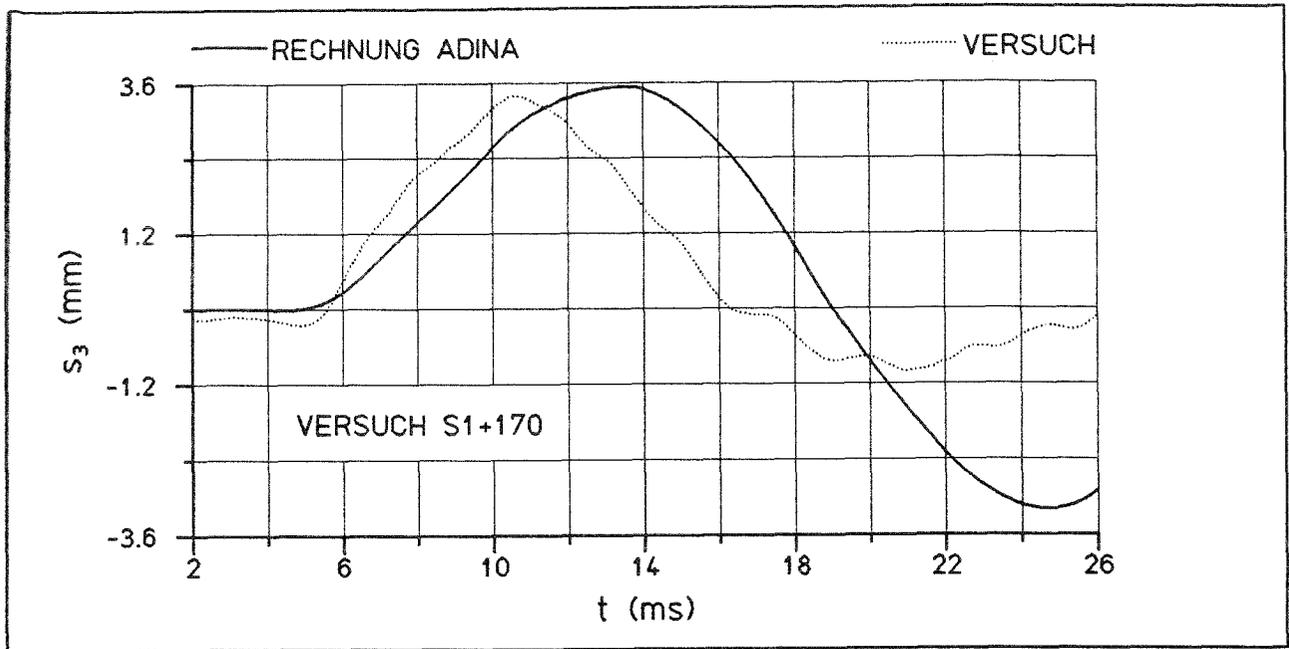


Kraft-Verformungsdiagramme der leeren Stahltonnen
 ermittelt in statischem Versuch
 Belastungsgeschwindigkeit : 1.0 cm/min
 Krafteinleitung über Stoßkopf des Fallgewichts



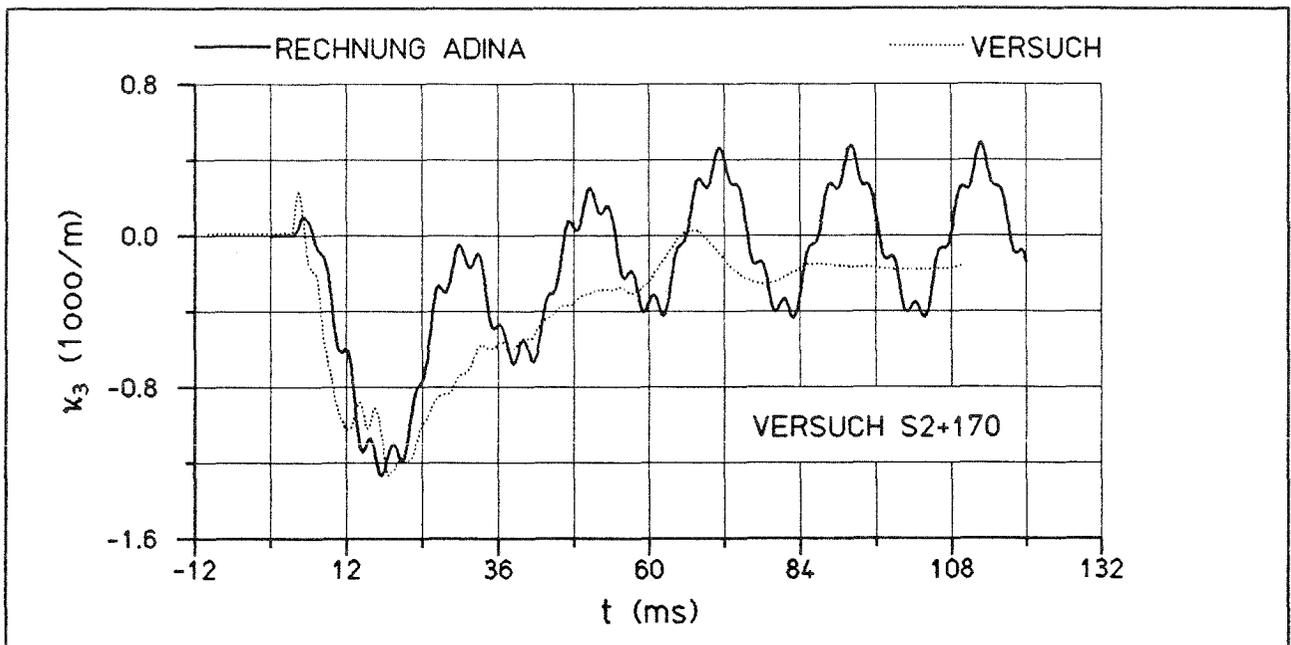
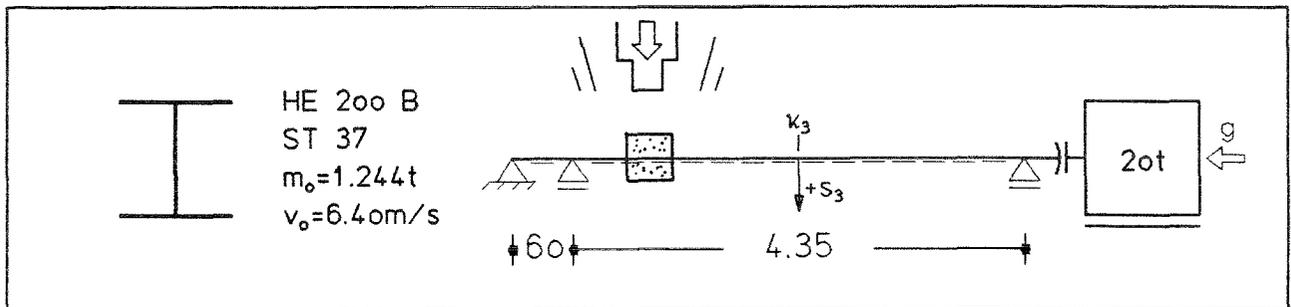
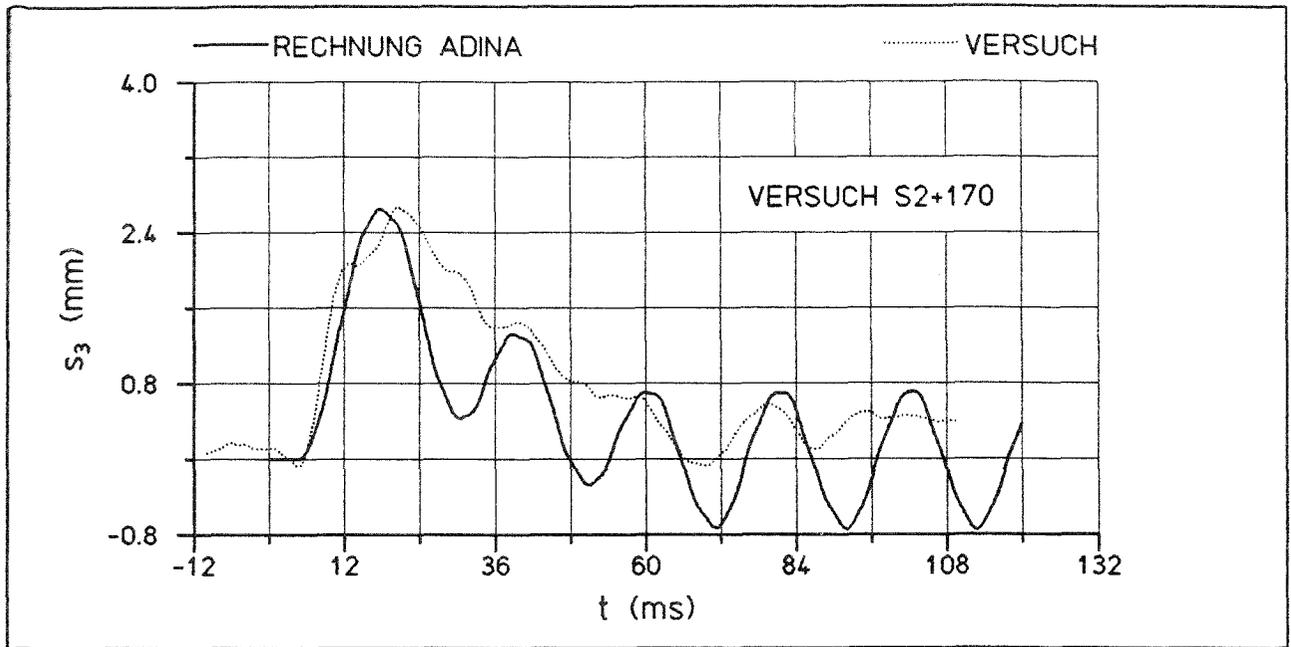
Anlage 6.55: Versuche T170, T110

Kraft-Verformungsdiagramme



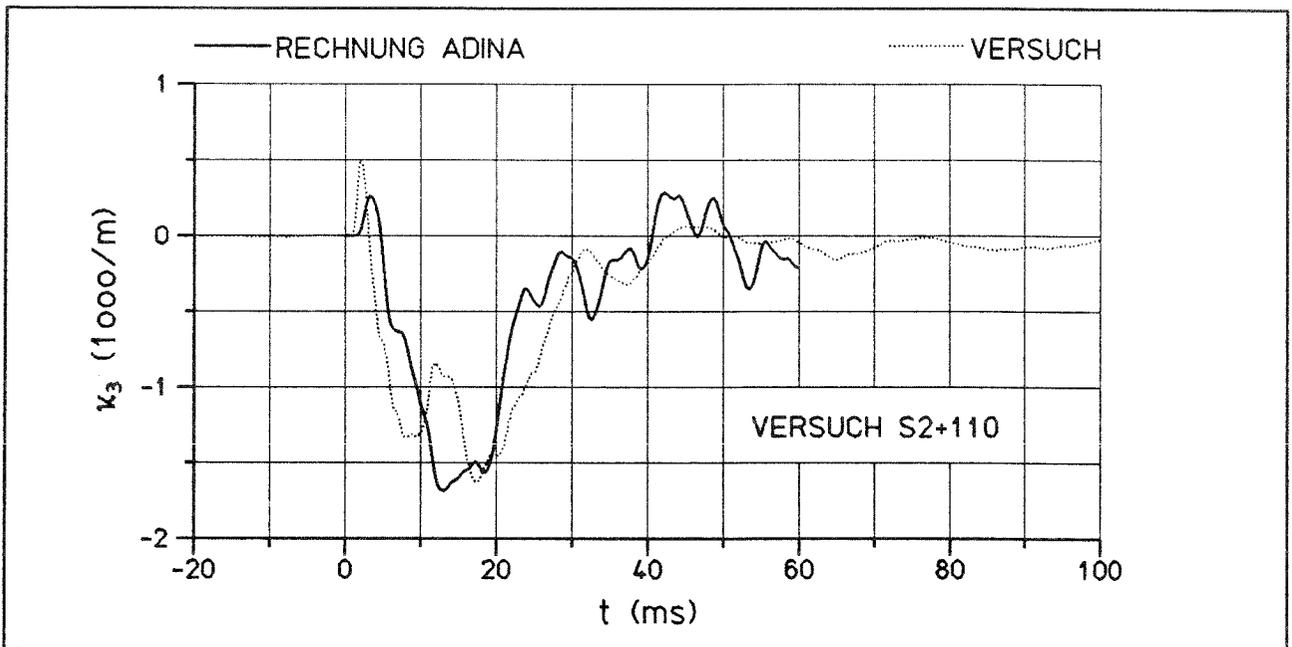
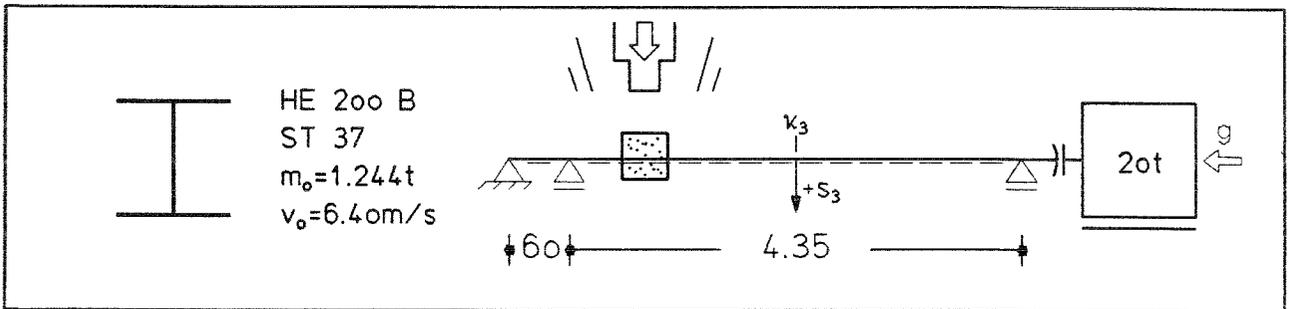
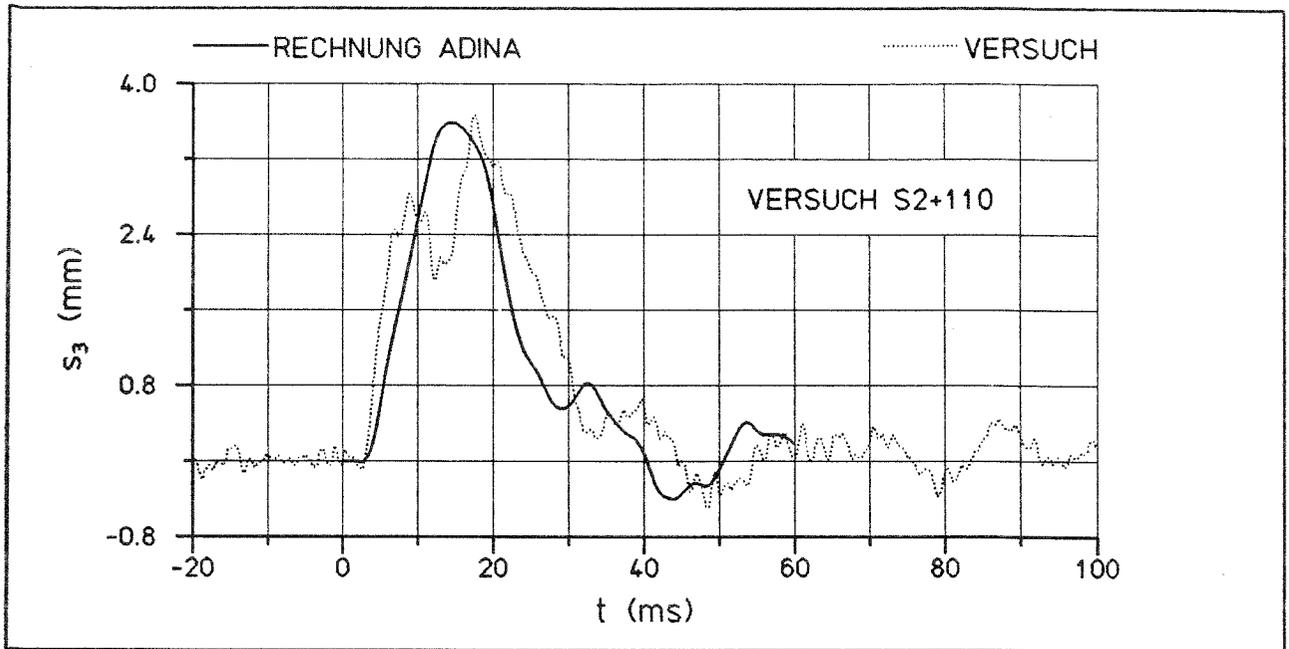
Anlage 7.1: S1+170

Vergleich der Stützenreaktionen s_3 und κ_3
in Rechnung und Versuch



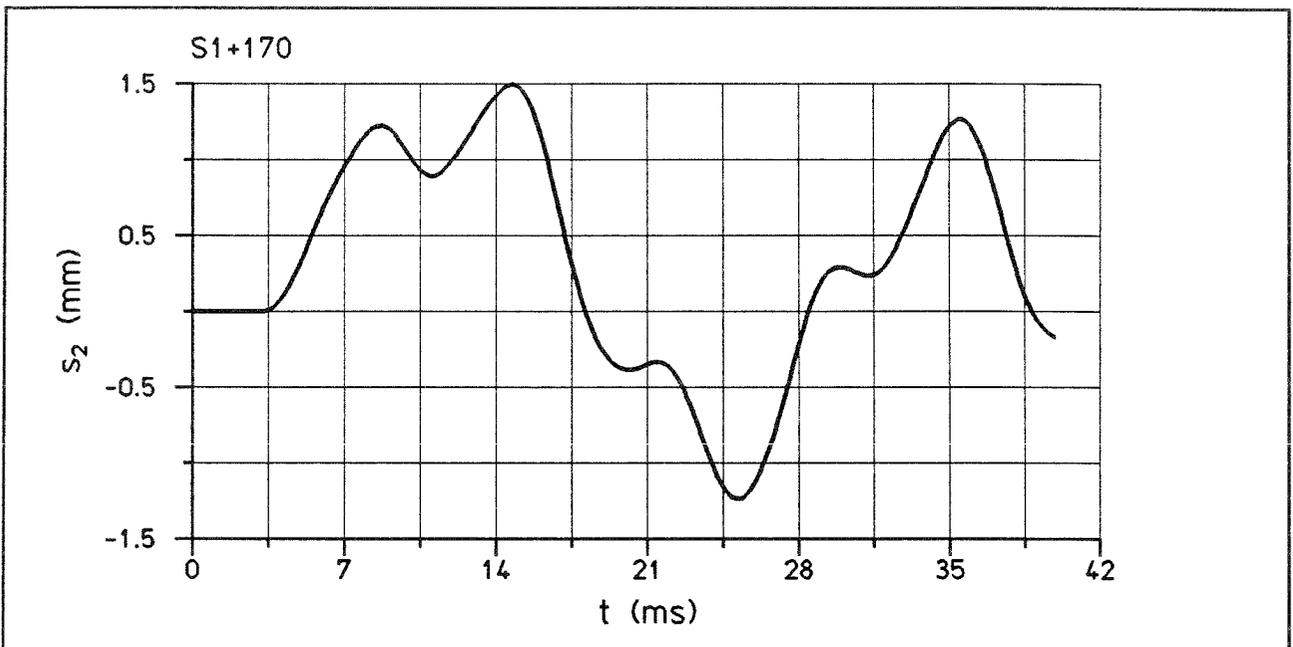
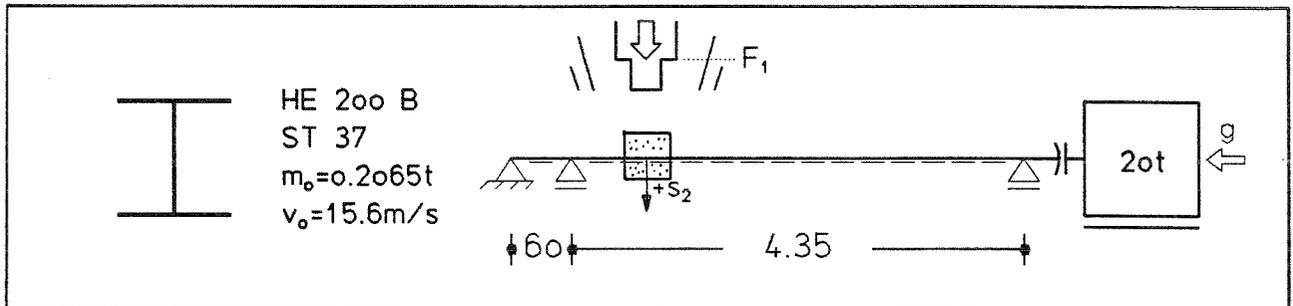
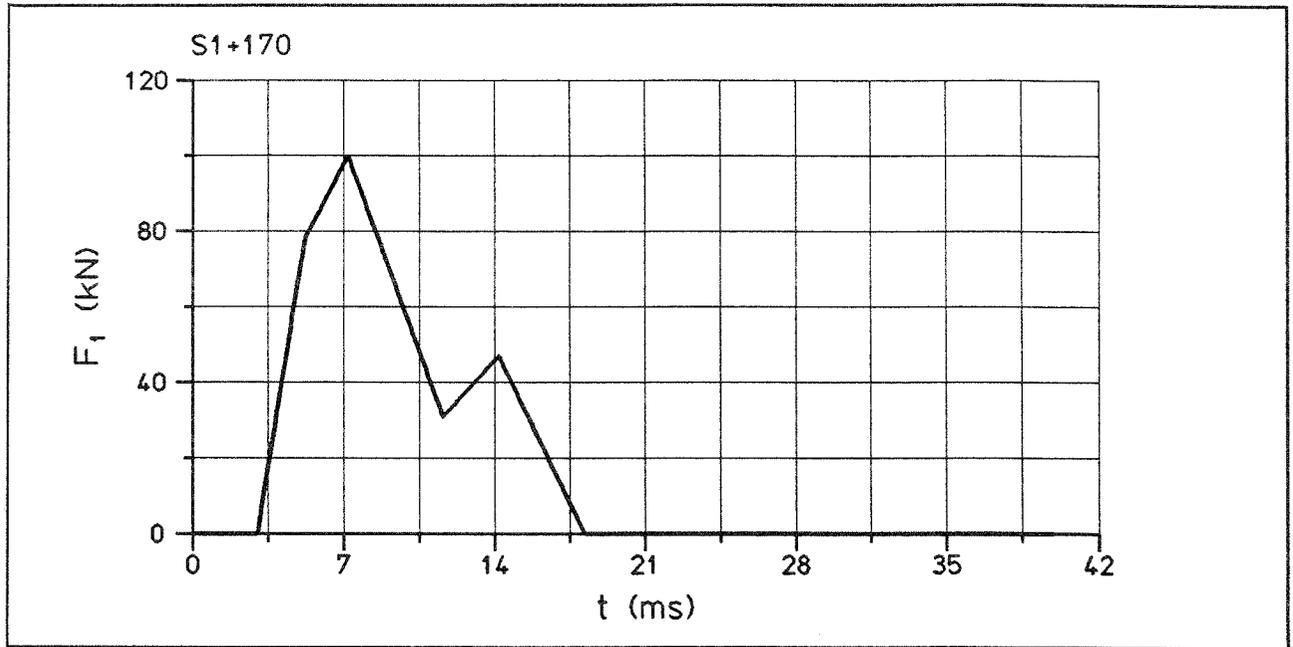
Anlage 7.2: S2+170

Vergleich der Stützenreaktionen s_3 und κ_3
in Rechnung und Versuch



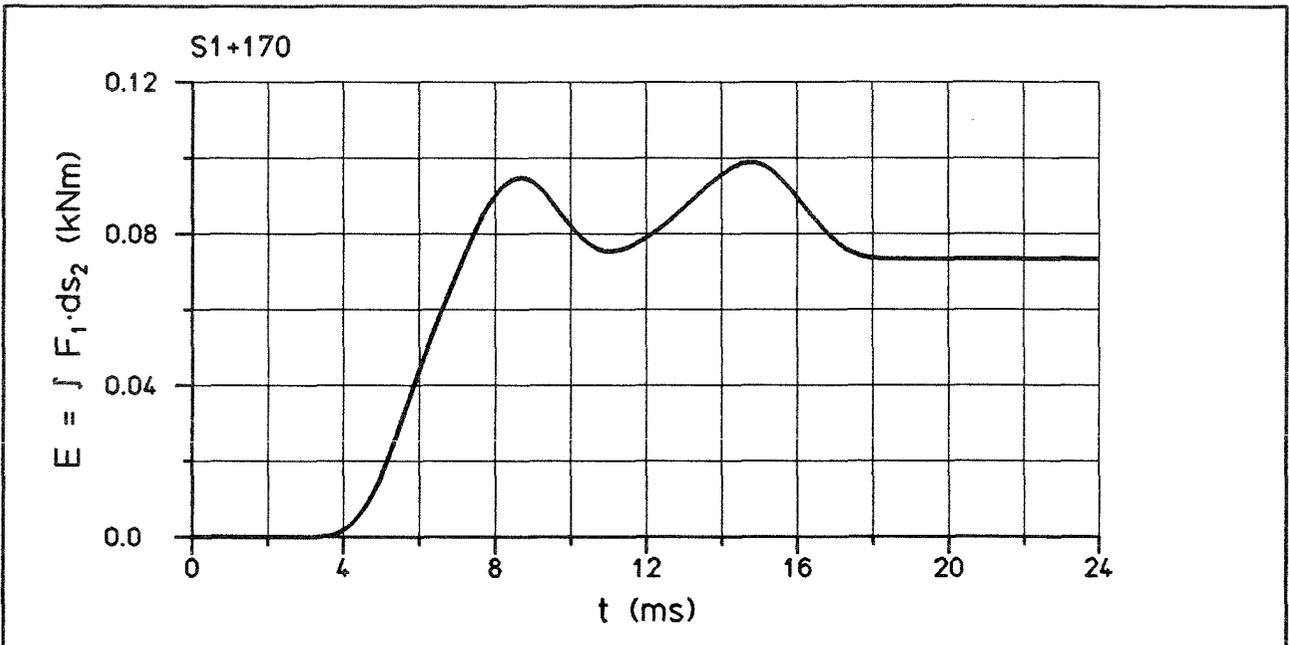
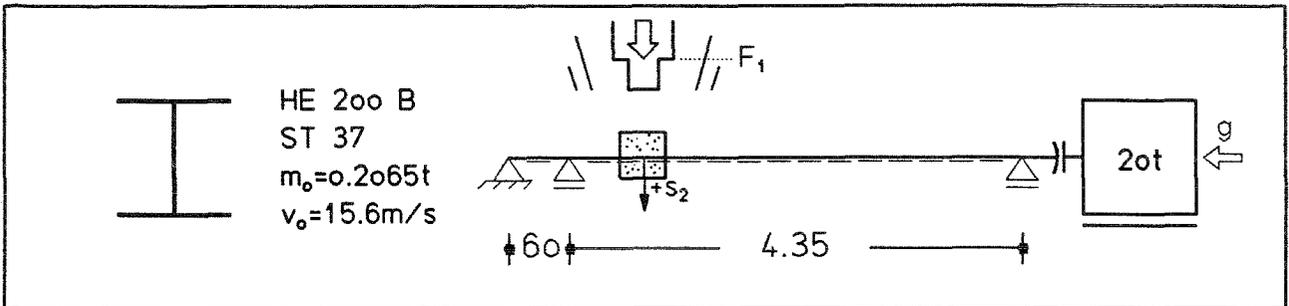
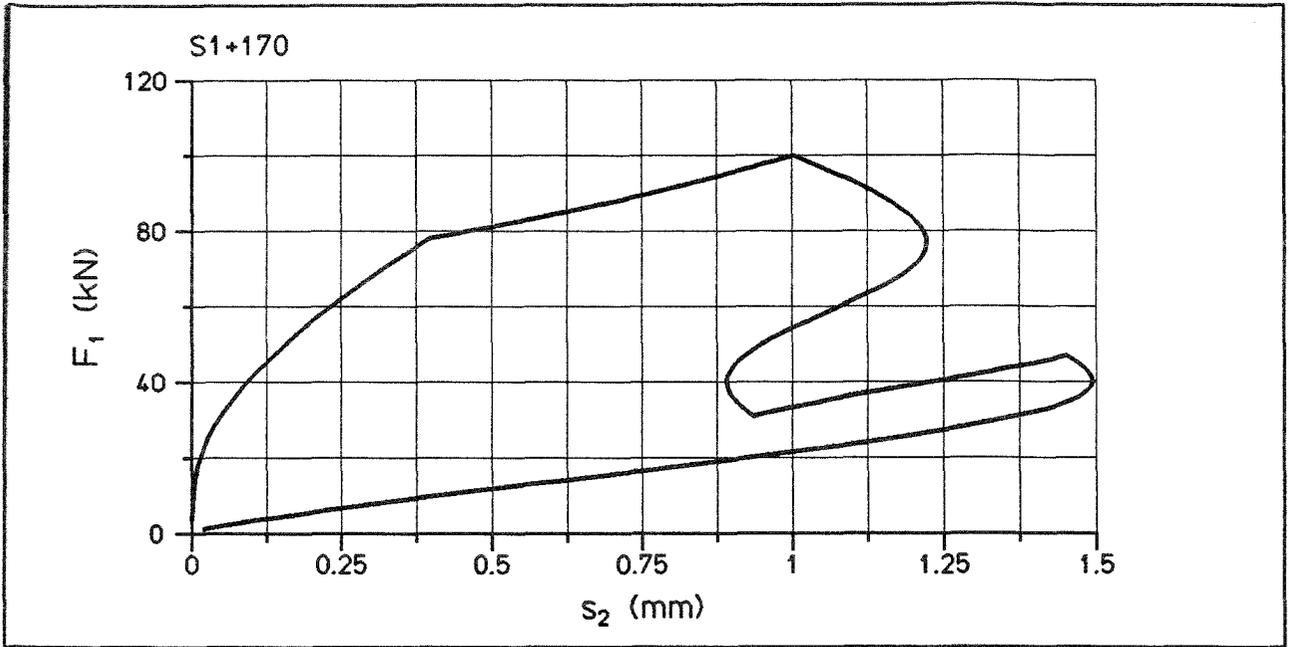
Anlage 7.3: S2+110

Vergleich der Stützenreaktionen s_3 und κ_3
in Rechnung und Versuch



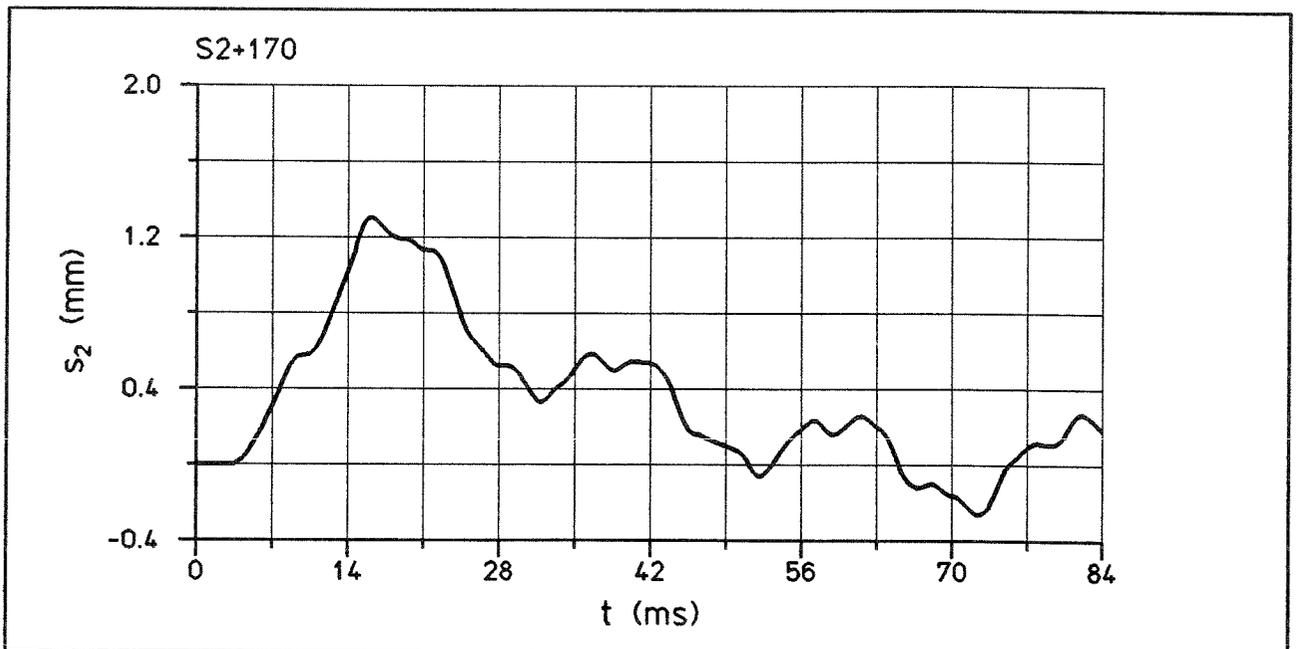
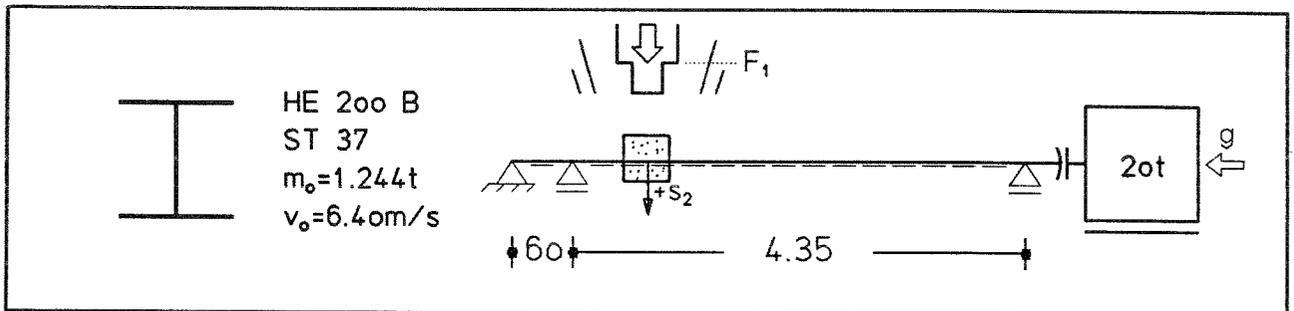
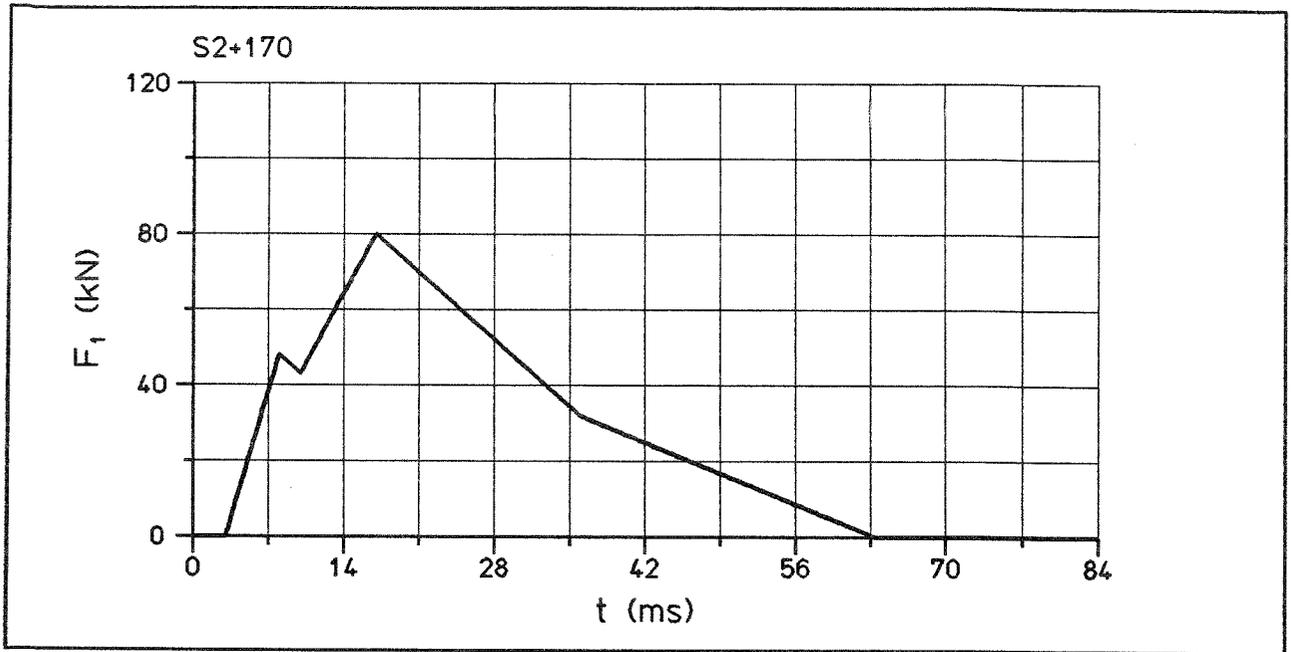
Anlage 7.4: S1+170

Kraft-Zeit-Verlauf, Verschiebungs-Zeit-Verlauf
aus kalibrierter Rechnung



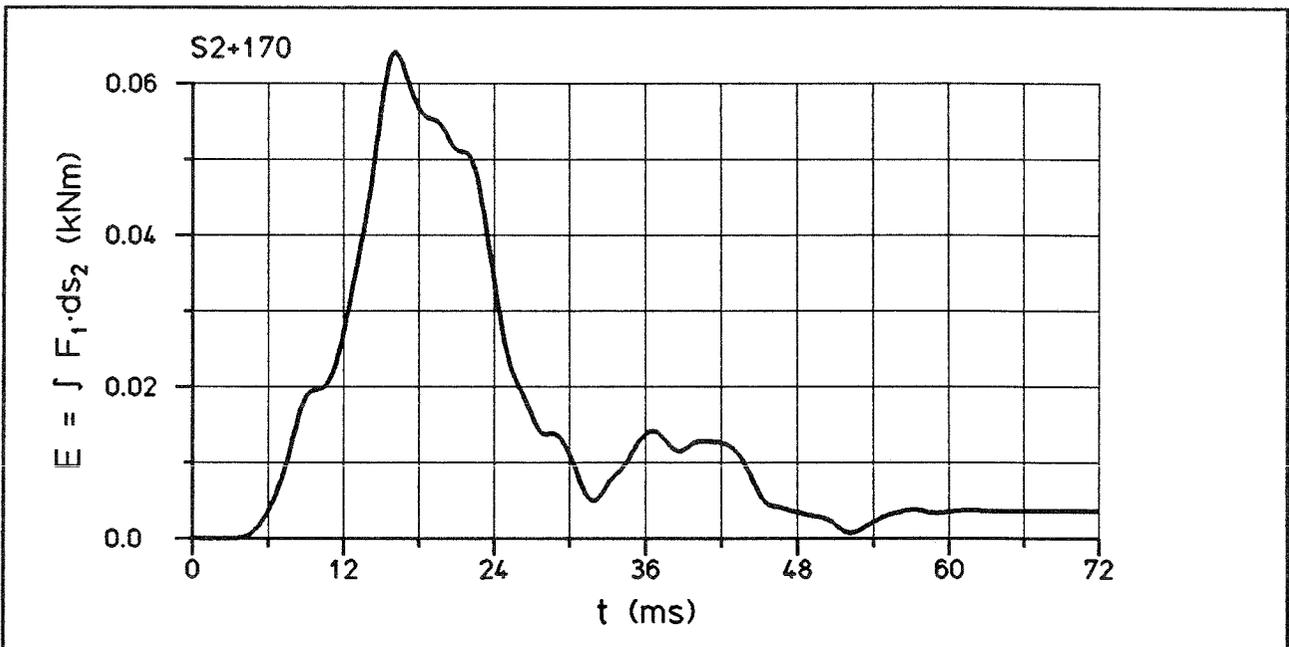
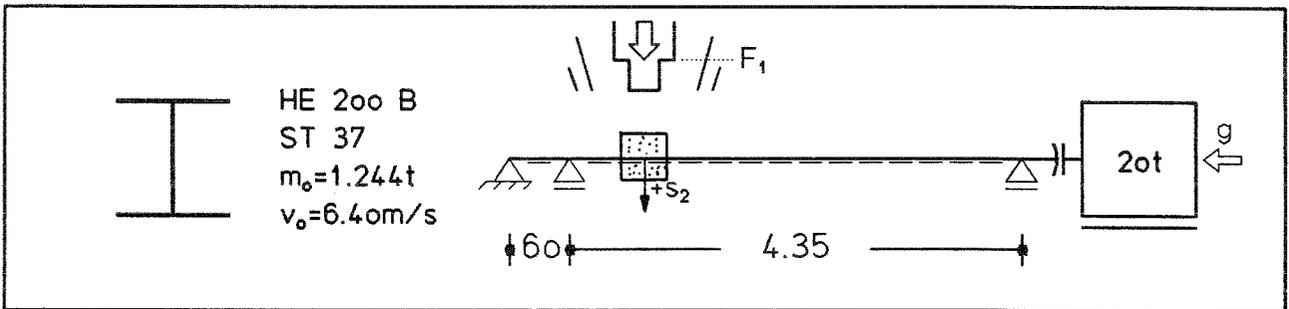
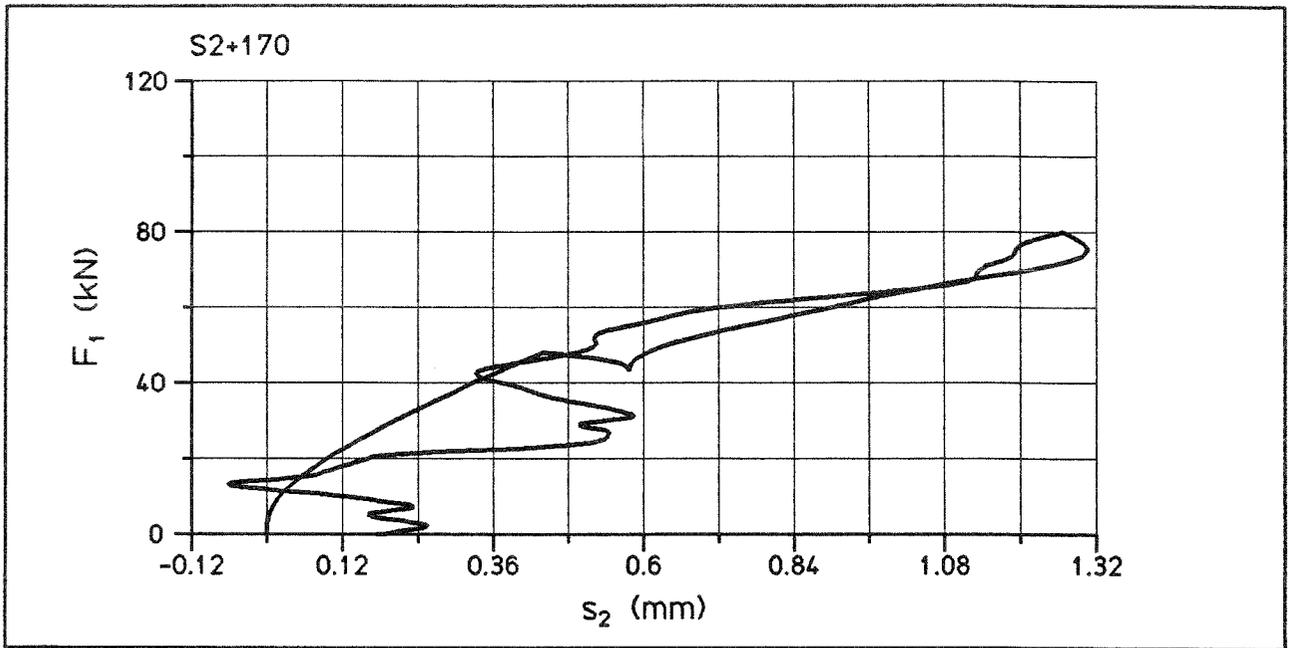
Anlage 7.5: S1+170

Kraft-Weg-Verlauf, Energie-Zeit-Verlauf
aus kalibrierter Rechnung

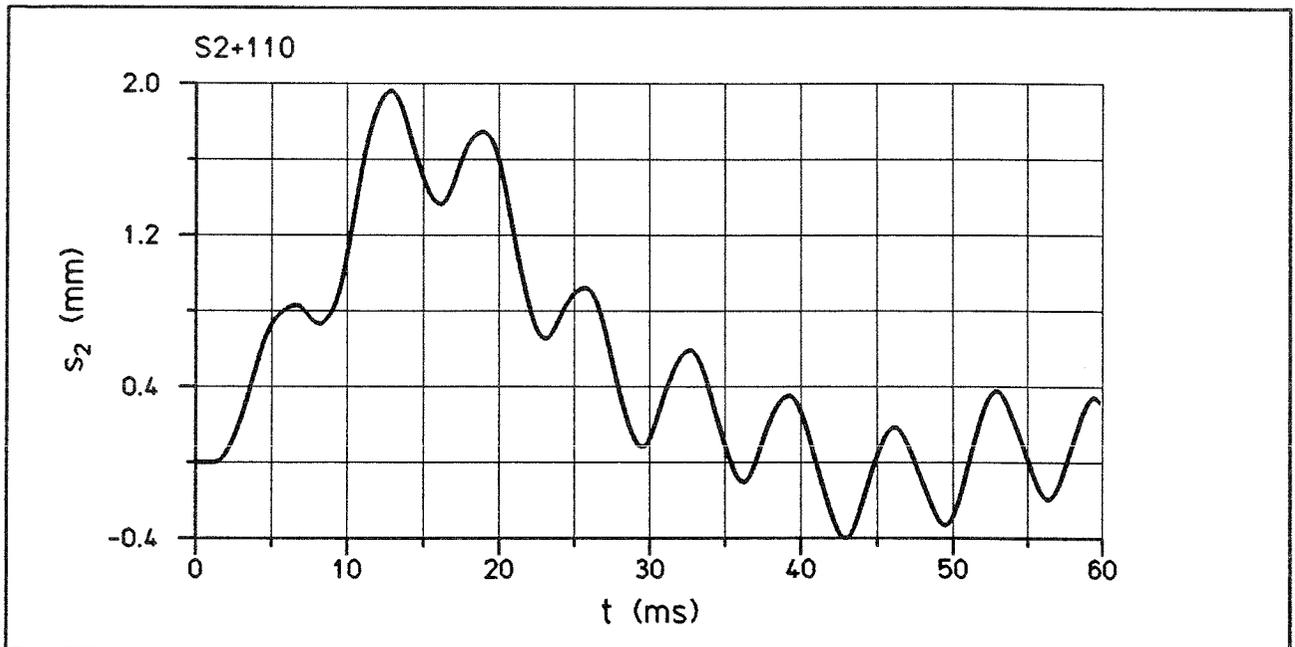
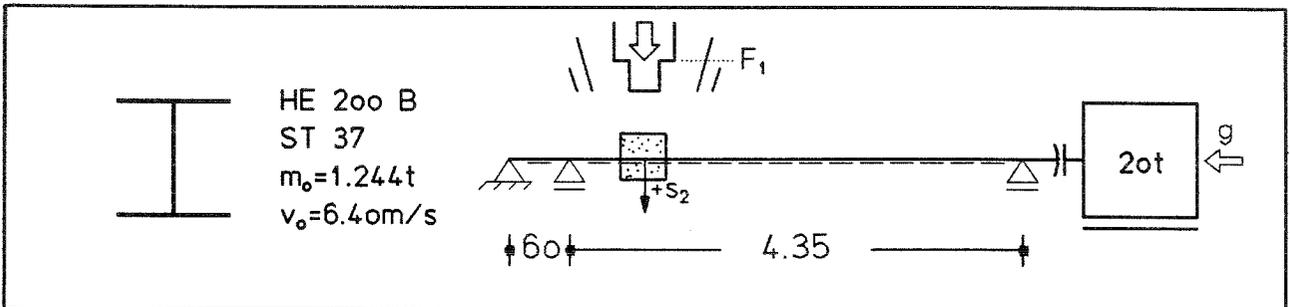
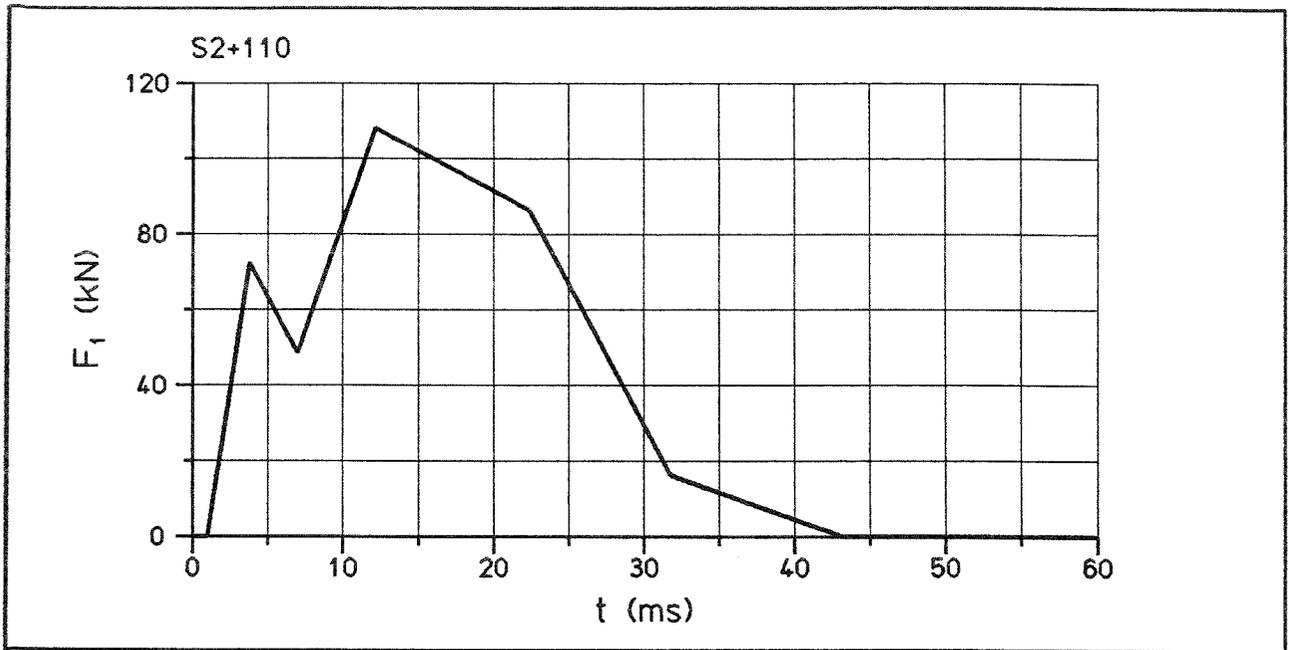


Anlage 7.6: S2+170

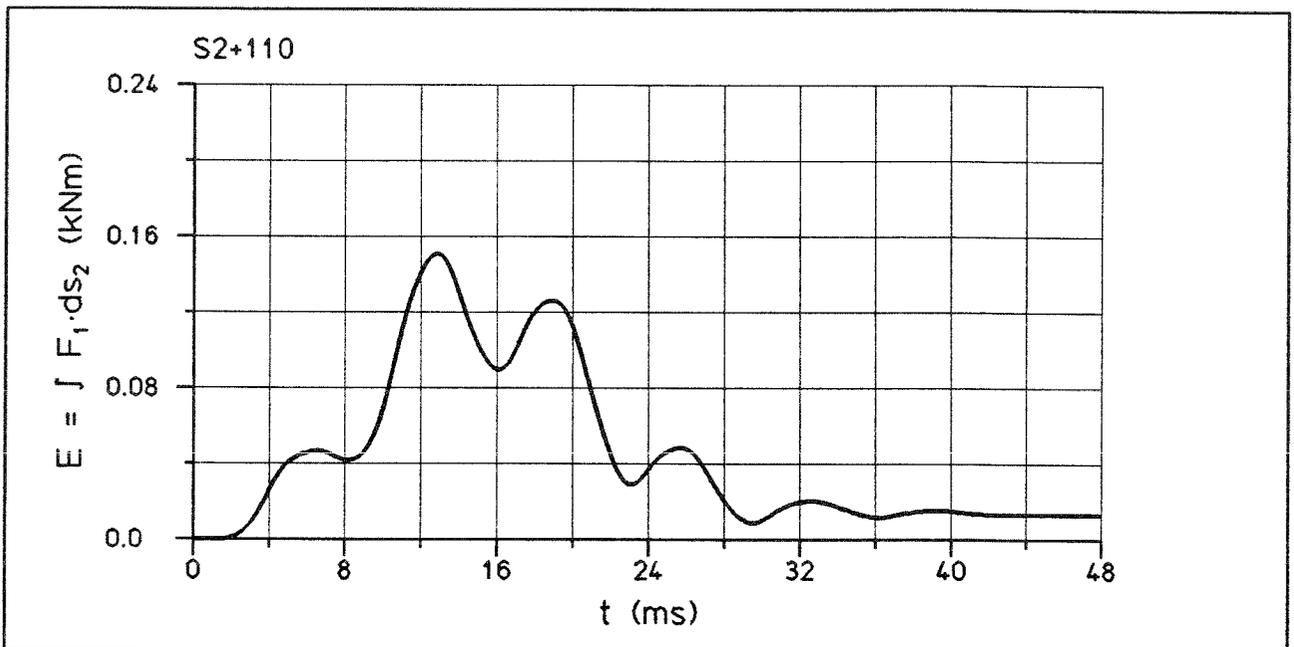
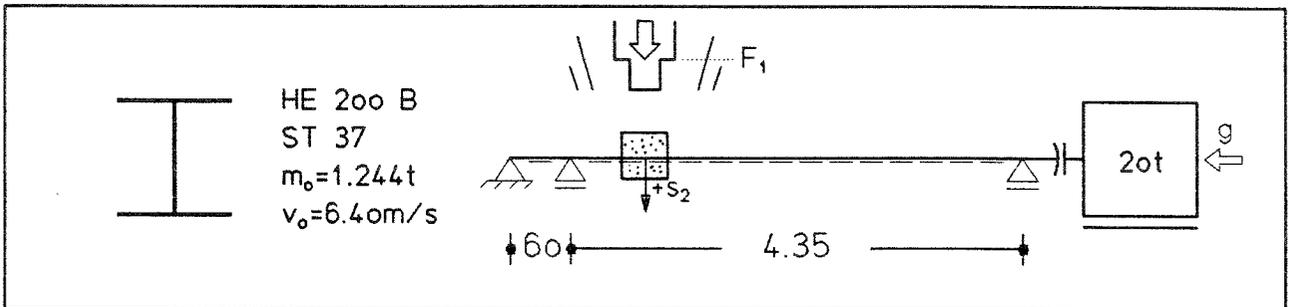
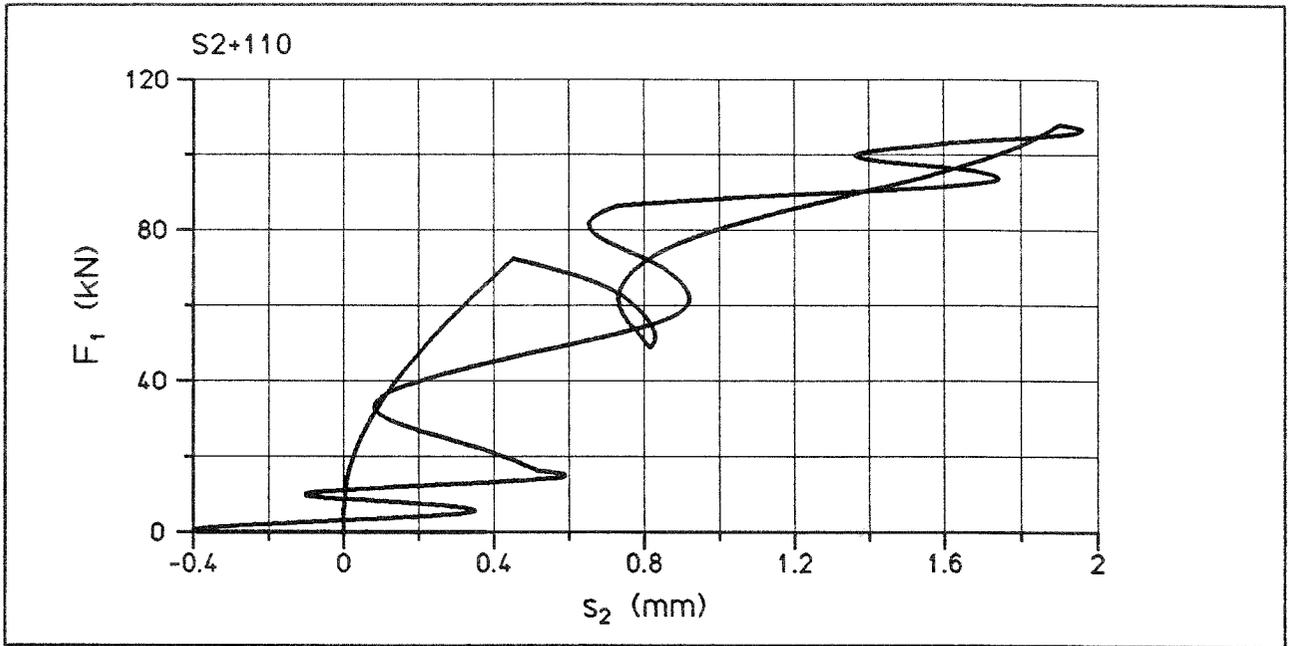
Kraft-Zeit-Verlauf, Verschiebungs-Zeit-Verlauf
aus kalibrierter Rechnung



Anlage 7.7: S2+170
Kraft-Weg-Verlauf, Energie-Zeit-Verlauf
aus kalibrierter Rechnung



Anlage 7.8: S2+110
Kraft-Zeit-Verlauf, Verschiebungs-Zeit-Verlauf
aus kalibrierter Rechnung



Anlage 7.9: S2+110
Kraft-Weg-Verlauf, Energie-Zeit-Verlauf
aus kalibrierter Rechnung