

ISBN 3-88314-701-X

Forschungsbericht 143

**Bundesanstalt
für Materialforschung
und -prüfung (BAM) Berlin**

**Kinetische Grenztragfähigkeit von
stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Kinetic Load Bearing Capacity
of Impulsively Loaded Reinforced Concrete
Members**

**Experimentelle und numerische Untersuchungen
zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen
bei Stoßbelastung**

**Experimental and numerical Investigations concerning
Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under
Impact Load**

von/by
Dr.-Ing. Klaus Brandes
Dipl.-Ing. Ernst Limberger
Dipl.-Ing. Jürgen Herter

November 1987

56 Seiten, 29 Abbildungen, 1 Tabelle

Abschlußbericht zum Vorhaben 150 460:

Energieaufnahmevermögen von Stahlbetonbauteilen unter Stoßeinwirkung

Final Report of R & D-Project 150 460

Energy-absorption Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load

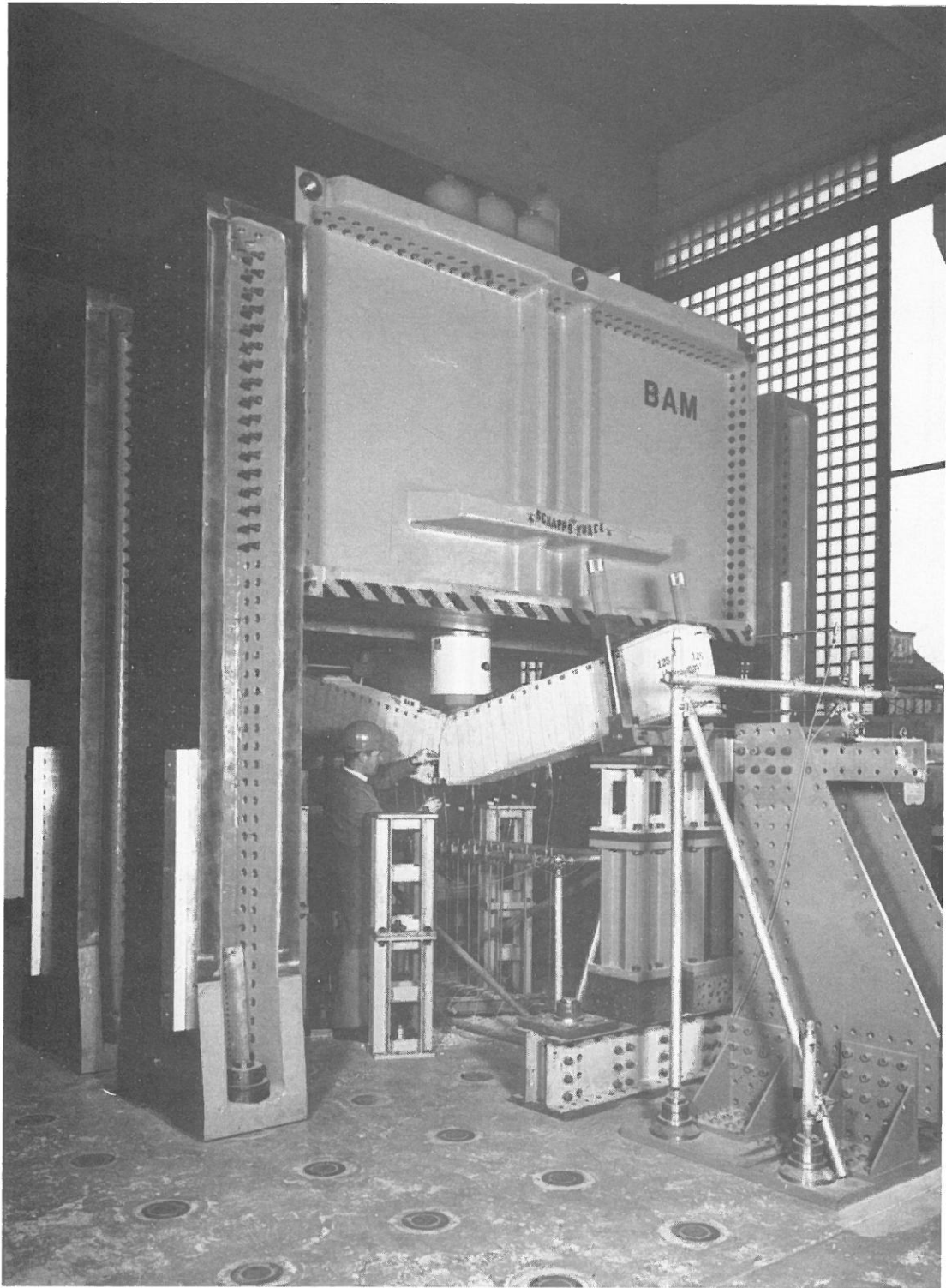
Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie gefördert, Förderkennzeichen 150 460.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d Telefax (030) 8 112 029

Copyright © 1987 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95



Servohydraulische Versuchseinrichtung
Servohydraulic Testing Setup

Inhalt

Seite

Vorbemerkung

Zusammenfassung

Summary

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Übergeordnete Zielsetzung	1
1.3 Einzelzielsetzung	2
2. Begründung für die Durchführung des Vorhabens	4
3. Problembeschreibung	5
4. Grundlage	7
4.1 Allgemeines	7
4.2 Grundlagen aus der Technischen Mechanik	7
4.3 Grundlagen aus dem Stahlbetonbau	7
4.4 Grundlagen aus der Versuchstechnik	8
5. Durchgeführte Arbeiten	10
5.1 Allgemeines	10
5.2 Experimentelle Untersuchungen an Betonstahl zur Bestimmung des Einflusses der Dehngeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten	10
5.3 Versuche zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter örtlicher Stoßbelastung	13
5.4 Theoretisch-numerische Analyse des mechanischen Verhaltens von Stahlbetonbauteilen unter Stoßbeanspruchung	19
6. Ergebnisse	22
6.1 Allgemeines	22
6.2 Ergebnisse der Zugversuche an Betonstahlproben	22
6.3 Ergebnisse der Versuche an Stahlbetonplatten	22
6.4 Ergebnisse der theoretisch-numerischen Analyse	28
7. Folgerungen	33
Literatur	36

Vorbemerkung

Der vorliegende Abschlußbericht beendet die Reihe der Berichte im Forschungsvorhaben 150 460 mit dem Titel

Energieaufnahmevermögen von Stahlbetonbauteilen unter Stoßeinwirkung, das von 1980 bis 1985 in der BAM bearbeitet worden ist.

Die Untersuchungen und ihre Ergebnisse sind in drei Technischen Fachberichten dokumentiert und erläutert worden. Diese Berichte haben einen gemeinsamen Serientitel und jeweils einen Untertitel.

Serientitel:

KINETISCHE GRENZTRAGFÄHIGKEIT VON STOSSARTIG BELASTETEN
STAHLBETONBAUTEILEN

Untertitel:

- Zugversuche an Betonstählen mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
1. Technischer Fachbericht (Vorhaben 150 460), November 1986 (Forschungsbericht 129 der BAM)
- Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 2
2. Technischer Fachbericht (Vorhaben 150 460), November 1986 (Forschungsbericht 131 der BAM)
- Theoretisch-numerische Analyse des mechanischen Verhaltens von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
3. Technischer Fachbericht (Vorhaben 150 460), 1987 (Forschungsbericht der BAM)

Weitere Untersuchungen zum gleichen Problemkreis sind in der BAM im Vorhaben 1500 121 "Tragverhalten quergestößer Stahlbetonbauteile bei geregelter Stoßkraft-Zeit-Verlauf" durchgeführt worden. Diese Arbeiten sind in sechs Technischen Fachberichten dokumentiert, die unter dem gleichen Serientitel erschienen sind (Untertitel):

- Konzeption für geregelte Versuche, Versuchseinrichtung, Vorversuche an Stahlbetonbalken.
1. Technischer Fachbericht, April 1983 (Forschungsbericht 90 der BAM)
- Versuche an Stahlbetonbalken mit Biegebewehrung aus Betonstahl BSt 420/500 RK und BSt 1080/1320.
2. Technischer Fachbericht, Dezember 1983 (Forschungsbericht 99 der BAM)
- Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 1
3. Technischer Fachbericht, November 1986 (Forschungsbericht 127 der BAM)
- Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 1
4. Technischer Fachbericht, Dezember 1985 (Forschungsbericht 119 der BAM)
- Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 2
5. Technischer Fachbericht, November 1986 (Forschungsbericht 128 der BAM)
- Das mechanische Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter statischer und stoßartiger Belastung
Abschlußbericht zum Vorhaben 1500 121, Mai 1987 (Forschungsbericht 140 der BAM)

Das Vorhaben 150 460 wurde vom Bundesminister für Forschung und Technologie gefördert. Es ist Teil eines umfangreichen Forschungsprogramms zu Problemen der äußeren Einwirkungen auf Kernkraftwerke.

Zum sachlichen Inhalt dieses Berichtes

Dieser Abschlußbericht gibt in knapper Form einen Überblick über die Arbeiten und ihre Ergebnisse im Vorhaben 150 460. Sachlich geht er nicht über die drei Technischen Fachberichte hinaus. Vielmehr wird zusammenfassend auf wesentliche Aspekte hingewiesen, nachdem ein kurzer Überblick über die gesamten Arbeiten gegeben worden ist. Damit soll auch eine gewisse Zusammenschau erreicht werden, die durch die Einzeldarstellungen in den Technischen Fachberichten vernachlässigt werden mußte.

An den Arbeiten Beteiligte

An den Arbeiten im Rahmen des Vorhabens waren die nachfolgend genannten Mitarbeiter beteiligt:

Klaus Berner
Klaus Brandes
Werner Falkowski
Jürgen Herter
Manfred Kruck
Axel Wietzorrek

Helmut Lange
Ernst Limberger
Gerhard Lohmann
Jürgen Preuß
Joachim Riedel
Burghard Kühnlein

Zusammenfassung

In der Zeit vom 1980 bis 1985 sind in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) experimentelle Untersuchungen an Betonstahl und an Stahlbetonplatten sowie theoretisch-numerische Arbeiten zum mechanischen Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter Stoßbelastung durchgeführt worden, mit dem Ziel, die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Versuchen an Stahlbeton-Probekörpern kleiner und mittlerer Abmessungen auf die realen Konstruktionen sicherzustellen. Dazu mußten einerseits die wesentlichen mechanischen Werkstoffeigenschaften des Betons und des Betonstahls qualitativ und quantitativ ermittelt werden. Andererseits waren Versuche an Stahlbetonbauteilen erforderlich, deren Maßstab so zu wählen war, daß noch die "innere Struktur" des Stahlbetons wirklichkeitsnah abgebildet werden konnte. Bindeglied zwischen den unterschiedlichen experimentellen Untersuchungen stellt die analytische Behandlung des Trag- und Verformungsverhaltens von Stahlbetonbauteilen dar, die eine zutreffende Idealisierung des mechanischen Systems ebenso einschließt wie die Berücksichtigung der Dehngeschwindigkeit in den Werkstoffgesetzen.

Das Forschungsvorhaben ist in ein größeres Forschungsprogramm eingebettet gewesen, wobei insbesondere das Vorhaben 1500 121 in der BAM sowie die "Meppener Versuche" zu erwähnen sind. Alle diese Vorhaben sind vom Bundesminister für Forschung und Technologie im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung gefördert worden.

In den Untersuchungen an Betonstahl wurde der Einfluß der Dehngeschwindigkeit auf die Festigkeitskennwerte (Fließ-/Streckgrenze, Zugfestigkeit) und auf die Kennwerte der Bruchverformung in Versuchsreihen an drei unterschiedlichen Betonstahlsorten bestimmt. Während sich die Festigkeitskennwerte im Rahmen des Erwarteten mit der Dehngeschwindigkeit etwas erhöhten, wurden für die Bruchverformung erheblich variierende Resultate erzielt: Sie nimmt mit der Dehngeschwindigkeit immer zu, in manchen Fällen nur schwach, in anderen ganz erheblich. Für die Änderung der Kennwerte konnten gesetzmäßige Zusammenhänge angegeben werden.

Die experimentellen Untersuchungen an quadratischen Stahlbetonplatten wurden an 30 Platten mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. Zum einen wurden Platten von 22 cm Dicke und 3 m Kantenlänge, an den vier Ecken gestützt, untersucht, zum anderen Platten von 16 cm Dicke und 2,36 m Kantenlänge, die in Randbalken eingespannt waren. Alle Platten wurden mittig belastet. Es konnte sowohl Durchstanzen als auch Biegeversagen in Fließgelenklinien beobachtet werden. Ein nach vorangegangenen großen plastischen Biegedeformationen auftretendes Durchstanzen wurde als "sekundäres Durchstanzen" definiert. Auch bei den Stahlbetonplatten konnte eine Erhöhung des Widerstandes mit der Dehngeschwindigkeit beobachtet werden.

Alle Versuche wurden in einer servohydraulischen Versuchseinrichtung durchgeführt, die in /4/ detailliert beschrieben worden ist.

In den Arbeiten zur theoretisch-numerischen Analyse sind Stahlbetonbalken zwei-dimensional diskretisiert mit dem Programmsystem ADINA, ein Finite-Element-Programm, das einige Ergänzungen erhalten mußte, nachgerechnet worden. Die Rechnungen konnten von experimentell ermittelten Kennwerten für das Werkstoffverhalten ausgehen und führten zu guter Übereinstimmung zwischen Rechen- und Versuchsergebnis.

Daneben konnten weitere Arbeiten außerhalb der BAM angeregt werden, in denen auf der Grundlage der gleichen Versuchsergebnisse mit anderen Programmsystemen und auch mit anderen Werkstoffgesetzen, bestätigt wurde, daß neben einer zutreffenden Systemidealisation auch eine zutreffende Werkstoffbeschreibung notwendig ist, um Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch zu erzielen.

Stahlbetonplatten sind in anderen Instituten theoretisch-rechnerisch - unter Rückgriff auf die Versuchsergebnisse an Platten und Betonstahl in der BAM - untersucht worden /32/ /33/. Auch diese Untersuchungen führten zu zufriedenstellender Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch.

Neben der Angabe der quantitativen Zusammenhänge zwischen Festigkeitskennwerten und Dehngeschwindigkeit für Betonstähle liegt der wesentliche Erfolg der Arbeiten darin, daß mit der Verfügbarkeit wohldokumentierter Versuche an Stahlbetonbauteilen die Grundlage dafür gelegt ist, theoretisch-numerische Verfahren der Berechnung zu bestätigen und abzusichern. Der vielfache Zugriff auf unsere Versuchsdaten hat die Richtigkeit von Versuchskonzeption und -durchführung bestätigt.

Summary

In the period from 1980 until 1985, experimental investigations have been performed on reinforcing steel and on reinforced concrete slabs in the Federal Institute for Materials Testing (BAM) accompanied by theoretical-numerical analysis of the mechanical behaviour of reinforced concrete structural members under impact load. The aim of the investigations was to assure the transfer of results of tests on small-sized and medium-sized reinforced concrete members to the natural size. For this purpose, the major mechanical properties of the materials had to be evaluated qualitatively and quantitatively on the one hand and on the other hand, tests on reinforced concrete members had to be carried out and the dimensions of the concrete members had to be chosen such that the "internal structure" of reinforced concrete could be modelled close to the reality. The coupling of the experimental investigations on both reinforcing steel and reinforced concrete members had to be realized by mechanical idealization and modelling and numerical analysis, including strain rate effects.

The R&D project was part of a broad research program supported by the Federal Ministry of Research and Technology. Mainly the project 1500 121 at BAM and the "Meppen Tests" had a close connection to the investigations.

In the investigations on reinforcing steel, the influence of the rate of strain on the yield stress and tensile strength and on the total elongation up to fracture have been evaluated for three grades of steel. The yield stress and tensile strength increased with growing strain rate as expected. But for the plastic strain up to fracture, varying results could be obtained: in all cases, the ultimate straining increased with the strain rate, but the amount of in-

creasing differed in a broad range. The laws which describe the relation between the mechanical properties and the strain rate could be evaluated.

In the experimental investigations on square reinforced concrete slabs, 30 tests on slabs with different boundary conditions have been carried out. One type of slab was flat, 22 cm thick and 3 m edge length, with supports at the four corners. The other type was clamped in large edge beams, 2.36 m edge length, 16 cm thick. The load was applied at the centre using different circular loading areas. Both types of failure could be recognized: flexural failure in yield lines and punching shear in a punching cone in the loading region. A punching failure after large flexural deformations has been defined as "secondary punching shear". Also in the tests on slabs, an increasing of the resistance with growing deformation rate could be observed.

All the tests were carried out in a servohydraulic testing equipment which is described in /4/.

In the theoretical-numerical studies, reinforced concrete beams have been discretized as a two-dimensional system, using ADINA, a finite element computer code. The fundament of the numerical investigation was a sufficient description of the materials behaviour which led with a sophisticated discretization to a close agreement between test and calculation. Besides this, a treatment of the problem using other codes and other types of discretization could be initiated, referring to the results of the different test series in BAM. These studies confirmed that an intelligent discretization coupled with a sufficient description of the material behaviour lead to results close to those from tests. The mechanical behaviour of reinforced concrete slabs has been treated in other institutes, using the results obtained by the tests on slabs and reinforcing steel in BAM /32/ /33/. In these investigations, there has been obtained a good agreement between experiment and numerical analysis.

Besides the description of the quantitative relations between the characteristic value of strength and the strain rate for reinforcing steel of different grades, the essential success of the work consists in the availability of well documented tests on reinforced concrete structural members to confirm and qualify theoretical-numerical methods of analysis. Our test results have been issued very often for the verification of computer codes and mechanical modelling, thus confirming the adequacy of our test conception and performance.

1. Zielsetzung

1.1 Allgemeines

Zum Schutz von kerntechnischen Anlagen sowie anderen industriellen Anlagen mit hohem Gefahrenpotential gegen Stoß- oder Impulsbelastung hoher Intensität sind Stahlbetonkonstruktionen besonders gut geeignet. Belastungen dieser Art entstehen z. B. beim Aufprall eines Flugzeuges oder bei der Explosion einer Gaswolke in der Nähe der Anlage. Beide Arten der Einwirkung sind als Belastungen von Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland zu berücksichtigen /19/, /20/, /22/.

Derartigen Beanspruchungen braucht die Konstruktion definitionsgemäß nur einmal zu widerstehen. Daher ist es möglich und sinnvoll, große Verformungen der Stahlbetonkonstruktionen zuzulassen und deren plastisches Formänderungsvermögen in die Berechnung einzubeziehen.

Die damit der Bemessung der Stahlbetonkonstruktion zugrunde gelegte kinetische Grenztragfähigkeit des Bauteils ist einer Analyse bisher nur mit Einschränkungen zugänglich gewesen. Insbesondere verlangte der unzureichende Kenntnisstand über Werkstoffeigenschaften bei hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit jenseits der elastischen Grenzen eine Reihe von Annahmen, die einer Bestätigung harren.

Auf der Seite des Bemessungskonzepts mußte daneben nach neuartigen Lösungen gesucht werden, da neben Grenzen für Kraftgrößen (Spannungen) auch solche für Verformungsgrößen (Dehnungen) bei sehr kurzzeitiger Belastung bis weit in den plastischen Bereich hinein zu berücksichtigen sind.

Um zu zuverlässigen Lösungen in dem skizzierten Problembereich zu gelangen, sind ebenso grundlegende Untersuchungen an Werkstoffproben notwendig als auch Versuche an Stahlbetonbauteilen, die so groß sein müssen, daß die "innere Struktur" des Stahlbetons als Verbundwerkstoff zutreffend nachgebildet werden kann ("medium scale tests"). Die Zusammenfassung wird dann der numerischen Analyse auf der Grundlage ausreichend differenzierter mechanischer Modellabbildungen zugewiesen. Damit kann die Übertragbarkeit der experimentellen Ergebnisse auf bauliche Anlagen sichergestellt werden.

1.2 Übergeordnete Zielsetzung

Die bis zur Mitte der 70er Jahre veröffentlichten Ergebnisse von Versuchen zum Grenztragverhalten von Stahlbetonbauteilen unter transienter Belastung wurden zu einem Teil bei vergleichsweise geringer Beanspruchungsgeschwindigkeit durchgeführt, zu einem anderen Teil bei verhältnismäßig geringer Verformung beendet, so daß über das Verformungsvermögen bis zum endgültigen Versagen unter definierten Versuchsbedingungen kaum Informationen verfügbar waren.

Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen könnten daher nicht allein zur Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens von Stahlbetonbauteilen bis an die Versagensgrenzen herangezogen werden, wenn eine konstruktiv sinnvolle und zugleich sichere Bemessung erreicht werden sollte für Belastungen, wie sie beispielsweise die kerntechnische Regel (Entwurf) KTA 2202 /22/ für die Sicherheitsumschließungen von Kernkraftwerken vorsieht.

Eine weitere grundlegende Annahme mußte in großmaßstäblichen Versuchen bestätigt werden: Der Aufprall eines stark deformierbaren Körpers auf eine entsprechend ausgelegte Stahlbetonkonstruktion führt nicht zu Phänomenen, die mit den Methoden der Terminalen Ballistik zu beschreiben wären. Das heißt, daß nicht Spannungswellen, die sich quer durch das Bauteil ausbreiten, mit Reflektion an der Rückseite des Bauteils, das Geschehen bestimmen. Die "Meppener Versuche" /11/ haben das bestätigt und lieferten gleichzeitig die Bestätigung, daß eine Versuchstechnik, die diese Phänomene weitgehend vermeidet und wie sie in der BAM angewendet worden ist, dem Problem angemessen ist. Im Bericht /4/ ist auf diese Frage detailliert eingegangen worden.

Wesentliches Ziel der Arbeiten, über die in diesem Bericht zusammenfassend und abschließend berichtet wird, war es, die Übertragbarkeit der Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen an Stahlbetonbauteilen und an deren Komponenten (vor allem Betonstahl) auf wirkliche Konstruktionen zuverlässig zu ermöglichen. Eingeschlossen werden sollten in diesem Zusammenhang auch die "Meppener Versuche" /10/, /11/, /12/, bei denen der geometrische Maßstab für die Stahlbetonplatten bis an die oberen technisch sinnvollen Grenzen vergrößert worden war. Die dort verwendeten Platten von zumeist 70 cm Dicke können hinsichtlich der Versuche in der BAM als reale Bauteile angesehen werden. (Für die Wände von Hilfsanlagegebäuden von Kernkraftwerken stellen die Meppener Versuche bezüglich der Plattendicke Versuche im Maßstab 1:1 dar.)

1.3 Einzelzielsetzung

Drei Einzelprobleme stellten sich nach den teilweise vorauslaufenden, teilweise zeitlich parallel geführten Arbeiten an anderen Stellen und in der BAM als maßgebend heraus.

Zum einen war die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von Betonstahl durch die relativ hohe Beanspruchungsgeschwindigkeit bei der Belastung beim Flugzeugaufprall im einzelnen zu erkunden, denn das Verhalten von Stahlbetonbauteilen jenseits der elastischen Grenzen wird im wesentlichen von demjenigen des Betonstahls bestimmt (siehe hierzu /5/, /6/, /8/). Bei dieser Fragestellung ist zu beachten, daß sich unterschiedliche Betonstahlsorten durchaus unterschiedlich verhalten, so daß eine Auswahl der Sorten so getroffen werden mußte, daß das gesamte Spektrum erfaßt wird. Zur Lösung der aufgetretenen Fragen wurden zahlreiche Zugversuche an Betonstahlproben aus drei unterschiedlichen Betonstahlsorten durchgeführt.

Zum anderen spielt bei der örtlich stark konzentrierten Belastung beim Stoßvorgang das Durchstanzen von Flächentragwerken eine ganz dominierende Rolle, so daß auch diesem Verformungs- und Versagensmechanismus besondere Aufmerksamkeit zu widmen war. Dabei kommen zwei Phänomene vor allem zum Tragen: Die Festigkeit des Betons und deren Abhängigkeit von der Beanspruchungsgeschwindigkeit ist ein wesentlich maßgebender Faktor, ganz im Gegensatz zu jenen Verformungsmechanismen, bei denen die Biegeverformung dominiert. Bei großen Biegeverformungen stellt sich ein als "sekundäres Durchstanzen" zu kennzeichnender Mechanismus ein /7/, durch den die weitgehend entkoppelte Auslegung von Stahlbetonbauteilen gegen Biegung und gegen Scherbeanspruchung in Frage gestellt ist. Diesem Problem ist in zahlreichen Versuchen an Stahlbetonplatten mit unterschiedlichen Randbedingungen nachgegangen worden. Die Änderung der

Betonfestigkeit mit der Beanspruchungsgeschwindigkeit konnte aus neueren Untersuchungen an der Technischen Hochschule Delft entnommen werden /30/.

Integrierendes Element der verschiedenartigen Untersuchungen stellt die theoretisch-numerische Analyse dar, mit der die Einbeziehung der zuvor bestimmten Abhängigkeiten des Materialverhaltens von der Beanspruchungsgeschwindigkeit - und u. U. von der Beanspruchungsgeschichte - in die Berechnung erfolgen konnte. Dabei sollte auf mehrere verbreitete Anwender-Programmsysteme zurückgegriffen werden. Die Arbeiten in der BAM sollten sich weitgehend auf das Programmsystem ADINA stützen /3/. Ziel war es, das Verhalten von Stahlbetonbauteilen bei statischer und stoßartiger Beanspruchung auf der Grundlage der Eigenschaften der Werkstoffe bei geeigneter Modellabbildung zu simulieren.

2. Begründung für die Durchführung des Vorhabens

Mit der Berücksichtigung der zivilisationsbedingten äußeren Einwirkungen auf die Sicherheitsumschließungen von Kernkraftwerken (Flugzeugaufprall, Explosionsdruckwelle) zu Beginn der siebziger Jahre, stellte sich dem Ingenieur die Aufgabe, Konstruktionen aus Stahlbeton gegen diese Belastungen zugleich sicher und wirtschaftlich auszulegen. Die Praxis zeigte schon sehr bald, daß die Grundlagen hierfür durch zahlreiche Annahmen, vor allem hinsichtlich der Materialgesetze, ergänzt werden mußten. Der Rückgriff auf Materialkennwerte, die für statische Bedingungen galten, stellte einen ersten Ansatz dar. Die Konservativität dieser Annahmen blieb aber noch zu bestätigen. Außerdem mußten einige grundsätzliche Annahmen zur Phänomenologie überprüft werden, um klarzustellen, daß das zunächst herangezogene Fachgebiet der Terminalen Ballistik /24/ mit rein empirischen Hilfsmitteln (Eindringformeln) zu unzutreffenden Beschreibungen führte. Die Richtlinie /21/ gibt den Stand der Kenntnisse zu Beginn der 70er Jahre wieder, als noch bei relativ geringen Kräften auf der Einwirkungsseite eine Auslegung innerhalb der elastischen Grenzen möglich war und sinnvoll erschien. Eine für sehr große, kurzzeitig wirkende Kräfte notwendige Auslegung unter Einbeziehung irreversibler Verformungen der Konstruktion verlangte ein ganz neues Bemessungskonzept, für das maßgebende Kennwerte nicht zur Verfügung standen. Das Konzept gelangte erst im Laufe der letzten Jahre zu einer endgültigen Form, fußend u. a. auf den Forschungsarbeiten, die vom BMFT gefördert wurden. Es hat seinen Ausdruck in der Formulierung der Regel KTA 2203 /23/ gefunden, in die wesentliche Ergebnisse des Vorhabens 150 460 wie auch anderer Vorhaben eingearbeitet werden konnten.

Das Vorhaben wurde formuliert, nachdem vorlaufende Arbeiten gezeigt hatten, daß die auf Bemessungskonzepten für statische Lasten fußenden Ansätze nicht mehr ausreichten und nicht erwartete Phänomene in experimentellen Untersuchungen beobachtet worden waren. Hierzu gehörte vor allem die starke Abhängigkeit der Bruchverformung von Stahlbetonbauteilen von der Beanspruchungsgeschwindigkeit /5/, /6/, /8/, /9/, /26/, /27/, die nur aus den mechanischen Eigenschaften der Betonstähle eine Deutung erfahren konnte, aber auch die Phänomenologie des Durchstanzens nach vorausgegangenen größeren plastischen Biegeverformungen. Die Versuche an Stahlbetonplatten sollten zugleich Ergänzungen zu Versuchen in Meppen darstellen /10/, /11/, /12/, bei denen die Variation der Betonfestigkeit zugunsten der Versuche in der BAM unterbleiben konnte. Mit den Versuchen in der BAM unter statischen Bedingungen wurden die Meppener Versuche ergänzt; denn erst aus einem Vergleich des Widerstands von gleichartigen Stahlbetonplatten, von denen die eine statisch, die andere stoßartig belastet wird, ergibt sich die Änderung der Systemeigenschaften mit der Beanspruchungsgeschwindigkeit.

3. Problembeschreibung

Bei der Beschreibung der Probleme sei hier von der Phänomenologie ausgegangen, aus der sich dann die einzelnen Fragestellungen der Mechanik ergeben.

Ausgangspunkt ist der Aufprall eines deformierbaren Körpers auf ein Stahlbetonbauteil. Der Stoßvorgang sei gekennzeichnet durch starke irreversible Verformungen des aufprallenden Körpers (Knautschen). Dabei wird der größte Teil der dem aufprallenden Körper innewohnenden kinetischen Energie in diesem verzehrt und in Wärme umgesetzt.

Das gestoßene Stahlbetonbauteil soll sich unter der Stoßbeanspruchung relativ stark verformen können, auch große irreversible Deformationen aufweisen, aber nicht versagen.

Während die Vorgänge im aufprallenden Körper (nach KTA 2202 /22/ ein Militärflugzeug) an anderer Stelle weitgehend gelöst worden sind /10/, /25/, /28/ und hier nicht behandelt werden, sind die Vorgänge in der getroffenen Stahlbetonkonstruktion Gegenstand der Arbeiten, über die der vorliegende Bericht Auskunft gibt.

Unter den erwähnten Annahmen ist es erlaubt, das Zwei-Körper-Stoßproblem zu entkoppeln und allein die Aufgabe zu behandeln – das mechanische Verhalten des Stahlbetonbauteils bei örtlich angreifender Impulsbelastung /4/, /26/, /29/ und auch die Versuchsplanung entsprechend vorzunehmen.

Bei der mechanischen Analyse dieser Aufgabe sind zahlreiche Einzelprobleme zu behandeln, die eng miteinander verzahnt sind.

Eine analytische Lösung erscheint ohne Rückgriff auf eines der modernen computerorientierten diskretisierenden Verfahren nicht möglich. Die verwendeten Verfahren basieren auf räumlichen Diskretisierungen nach der Methode der Finiten Elemente (FEM) und verwenden Differenzenformulierungen für die zeitliche Komponente.

Stellt ein FEM-Programm für dynamische Vorgänge eine gute Grundlage für die Behandlung der einzelnen Probleme dar, so gibt es zugleich einen Rahmen vor, in welcher Art die Details zu formulieren sind und wie ihre Lösung dargestellt werden sollte. Darüber hinaus aber muß versucht werden, die mechanischen Einzelfragen so allgemein zu formulieren, wie irgend möglich. Bei der Angabe von Kennwerten für eine Bruchdeformation in Werkstoffgesetzen stellen sich bereits Schwierigkeiten ein, da die Diskretisierung des mechanischen Systems hier bestimmte Vorgaben setzt.

Bezüglich der Werkstoffgesetze sind mehrere Fragen im Rahmen der Arbeiten im Forschungsvorhaben behandelt worden, um auf dieser Grundlage die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Systeme, vor allem auf solche mit anderen Abmessungen, sicherzustellen.

Die Biegedeformationen der Stahlbetonbauteile werden in dem hier behandelten Fall, der durch eine kräftige Biegebewehrung gekennzeichnet ist, vor allem durch das mechanische Verhalten des Betonstahls bestimmt. So mußten auch die Effekte, die durch die hohe Dehngeschwindigkeit im Betonstahl auftreten, bei den Stahlbetonbalken wiederum auftreten /27/.

Da aber zuverlässige Kennwerte für den Dehngeschwindigkeitseinfluß bei Betonstahl - er hängt auch vom Absolutbetrag der Festigkeit des Werkstoffs ab - nicht verfügbar waren, mußten hier grundlegende experimentelle Untersuchungen einsetzen. Diese konnten nicht nur die Änderung der Festigkeit mit der Dehngeschwindigkeit betreffen, sondern mußten auch die Bruchverformung einschließen, die bei Impulsbelastungen eine Auslegungsgröße darstellt - im Gegensatz zur Bemessung von Bauteilen unter statischen Belastungen. Die Ermittlung des Einflusses der Dehngeschwindigkeit auf die Bruchverformungskennwerte führte auf interessante und überraschende Ergebnisse.

Wird bei großflächigen Biegeverformungen das Verhalten der Stahlbetonkonstruktion vor allem von demjenigen des Betonstahls bestimmt, so hat bei örtlichem Versagen in einem Stanzkegel die Betonfestigkeit einen maßgebenden Einfluß neben demjenigen der Bügelbewehrung im Bauteil. Zum Einfluß der Dehngeschwindigkeit auf die Festigkeit von Beton gibt es bereits einige Ergebnisse aus Versuchen an kleinen Betonprobekörpern, so daß zu dieser Frage auf vorhandene Kenntnisse zurückgegriffen werden konnte /30/, /31/. Inwieweit sich diese Effekte auf das Verhalten von Stahlbetonplatten im Durchstanzbereich auswirken, war die Frage, die in Versuchen zu erkunden war. Daneben sollten Versuche an Stahlbetonplatten die Übertragung der Ergebnisse aus den Versuchen an Stahlbetonbalken ermöglichen. Ob insgesamt sich eine Phänomenologie einstellt, die aus dem klassischen Stahlbetonbau nicht bekannt ist, war daneben übergeordneter Gesichtspunkt.

Formuliert man die einzelnen Aufgaben sehr gestrafft, so lauten sie folgendermaßen:

- Die mechanische Modellabbildung und die numerische Analyse müssen ihre Bestätigung aus dem Vergleich von Ergebnissen aus Versuchen an Stahlbetonbalken mit denen aus einer Berechnung finden, wenn eine Werkstoffbeschreibung unter Berücksichtigung der Dehngeschwindigkeit eingeführt wird. Dabei sind die Untersuchungen auf Biegedeformationen beschränkt. Versuchsergebnisse für dynamisch belastete Stahlbetonbalken liegen aus bereits abgeschlossenen Untersuchungen vor /5/, /6/, /8/, /9/. Es sind im Rahmen dieses Vorhabens experimentelle Untersuchungen an Betonstahl vorzunehmen sowie theoretisch-numerische Arbeiten.
- Der zweite, häufig dominierende Verformungsmechanismus bei stoßbelasteten Stahlbeton-Flächentragwerken, der zu Durchstanz-Versagen führen kann, kann nur in Versuchen an Stahlbeton-Platten (eventuell -Schalen) untersucht werden. Dabei kann auf seit kurzer Zeit vorhandene Kenntnisse zum Werkstoffverhalten von Beton (einschließlich der Dehngeschwindigkeits-Effekte) zurückgegriffen werden /30/. Für die Veränderung des Verhaltens der Platten mit der Beanspruchungsgeschwindigkeit wird im Rahmen der Auswertung auf vergleichsweise einfache mechanische Modelle zurückgegriffen, die aber ausreichend sind, da auch die Werkstoffgesetze für Beton - und diese dominieren bei der Beschreibung des Durchstanzens - noch stark streuende Kennwerte aufweisen. Gleichzeitig war zu überprüfen, ob die aus dem klassischen Stahlbetonbau übernommene Entkopplung der Bemessung für Biegebeanspruchung und für Querkraftbeanspruchung auch bei sehr großen Deformationen noch zutrifft.

4. Grundlagen

4.1 Allgemeines

Die Grundlagen für die experimentellen Untersuchungen, über die berichtet wird, entstammen unterschiedlichen Fachdisziplinen. Wesentliche Grundlage ist die Technische Mechanik und daneben die anwendungsorientierte Theorie des Stahlbetonbaus. Weitere wesentliche Vorgaben ergeben sich aus der Versuchstechnik.

4.2 Grundlagen aus der Technischen Mechanik

Ausgangspunkt für die Beschreibung des Verhaltens von Stahlbetonbalken und -platten, aber auch für diejenige des Betonstahls, ist die Kontinuumsmechanik mit ihren Näherungstheorien für Stäbe, Balken und Platten /34/. Die bei den relativ schnell ablaufenden Verformungsvorgängen in den plastischen Zonen der Bauteile ansteigenden Temperaturen bleiben verhältnismäßig gering, so daß auf eine thermomechanische Behandlung /35/ verzichtet werden kann. Eine Zugrundelegung isothermer Vorgänge erscheint im vorliegenden Rahmen durchaus als ausreichend. (Wie einige tastende Messungen bei Versuchen gezeigt haben, überschreitet die Temperaturerhöhung nicht 30 K.)

Für die Beschreibung des Werkstoffgesetzes für den Betonstahl wird ein verhältnismäßig einfaches phänomenologisches visko-plastisches Modell verwendet /36/, das allerdings um einen Nachwirkungseffekt erweitert werden muß, worin eine Inkonsistenz liegt, da einfachen visko-plastischen Körpern kein "Erinnerungsvermögen" zugeordnet werden kann. Eine Nachwirkung ist metallphysikalisch sinnvoll und auch begründbar /37/. Die Dehngeschwindigkeitseffekte sind aber auf diese Art einfach einzufangen und auch einer näherungsweisen Berücksichtigung bei der Berechnung leicht zugänglich: Eine Erhöhung der Fließgrenze bzw. der Zugfestigkeit ist in der Regel ausreichend. Die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen am Betonstahl haben aber auch zur Beschreibung auf der Grundlage einer besser angepaßten Materialtheorie gefunden /38/, /32/, /33/.

Neben einfachen mechanischen Systemen, z. B. Balkenmodell, sind bei der theoretisch-numerischen Analyse mehrdimensionale diskretisierende Modellabbildungen verwendet worden, für Stahlbetonbalken z. B. Scheibenmodelle. An anderer Stelle sind auch dreidimensionale Modelle für die Stahlbetonplatten eingesetzt worden, um die Ergebnisse aus Versuchen rechnerisch auf der Grundlage des Verhaltens der Einzelkomponenten Beton und Stahl zu simulieren /33/.

4.3 Grundlagen aus dem Stahlbetonbau

Den Näherungstheorien der Technischen Mechanik folgend, werden Stahlbetonbauteile als Balken (eindimensionale Kontinua) oder als Flächentragwerke (Platten, Schalen, zweidimensionale Kontinua) idealisiert abgebildet. In der Regel werden nur bei sehr dickwandigen Konstruktionen (z. B. Spannbeton-Reaktordruckbehälter) dreidimensionale Berechnungsmodelle verwendet.

Ausgehend von den Schnittflächen werden Stahlbetonbauteile konstruktiv so gestaltet, daß Druckspannungen vom Beton aufgenommen werden, während Zugkräfte der Bewehrung aus Betonstahl zugewiesen werden. Die gerippte Oberfläche des Betonstahls sorgt für einen engen Verbund zwischen Beton und Bewehrungsstab, so daß die der Festkörpermechanik und ihren Näherungstheorien zugrundeliegende

Nahwirkungshypothese zutrifft. Für ungerippten Betonstahl ist zu diesem Punkt u. U. eine Modifizierung notwendig.

Ausgangspunkt der Versuchsplanung ist die auf den beschriebenen Grundlagen fußende Theorie des Stahlbetonbaus, wie sie in Standardwerken dargestellt ist /39/, /40/, /41/, /42/. Dabei bleiben die Deformationen klein, die Weite der unvermeidlichen Risse im Beton ist begrenzt und als Bemessungskriterium werden einzig Kräfte bzw. Spannungen gewählt.

Für sehr kurzzeitig wirkende Impulsbelastungen werden Erweiterungen in mehrere Richtungen notwendig:

- Die Verformungen werden so groß, daß die Entkopplung von Biege- und Querkraftbemessung nicht mehr beibehalten werden kann. Insbesondere tritt bei Platten nach großen Biegeverformungen mit entsprechenden Rissen im Beton ein "sekundäres Durchstanzen" auf, das durch die Biegerisse bestimmt wird /7/.
- Neben Grenzen für die Spannungen treten bei der Bemessung Begrenzungen für die Deformationen bzw. Dehnungen auf, deren Werte bis zu einem gewissen Grade von dem gewählten Rechenmodell abhängen.
- Die Abhängigkeit der Spannungen von Dehnungen und Dehngeschwindigkeit sollte nicht unberücksichtigt bleiben. Sie kann für eine zutreffende Deutung der Versuchsergebnisse nicht vernachlässigt werden.

Mit diesen Erweiterungen der klassischen Theorie des Stahlbetonbaus ist ein Rahmen abgesteckt, der keinesfalls innerhalb eines Vorhabens an einem Institut ausgefüllt werden konnte. Wir haben systematisch einen Teil des letztgenannten Punktes einer Klärung näherzubringen versucht und bezüglich der anderen Fragen punktuell Ergebnisse erhalten.

4.4 Grundlagen aus der Versuchstechnik

Der klassische Stoßversuch, bei dem ein Fallgewicht oder ein fliegender Körper auf den Probekörper trifft, eignet sich für die systematische Untersuchung des Einflusses der Beanspruchungsgeschwindigkeit nicht, da erst im Zusammenspiel zwischen Stoßkörper und gestoßenem Probekörper die Impuls- und Energieübertragung stattfindet. Diese ändert sich mit Änderungen von Fallgeschwindigkeit und mechanischen Eigenschaften des Probekörpers.

Es ist aber für die quantitative Bestimmung des Einflusses der Deformationsgeschwindigkeit unbedingt notwendig, bei unterschiedlichem Probekörperverhalten die Beanspruchungsbedingungen weitgehend unverändert zu erhalten. Auch bietet nur diese Versuchstechnik die Möglichkeit, die eingeleiteten Kräfte direkt zu messen. Da auch Verformungsgrenzen eine wesentliche Rolle spielen, war Wert darauf zu legen, daß in den Versuchen die Bruchgrenze erreicht wurde, unabhängig davon, welche Energie dazu nötig war. So kamen nur Versuche in einer geregelt gefahrenen Anlage in Frage.

Mit den Anforderungen an die Probekörper (Stahlbetonplatten und Betonstahl-Zugproben) ergaben sich versuchstechnische Grenzwerte: Einzelkräfte bis 1000 kN, Verformungsgeschwindigkeit an der Kraftangriffsstelle von etwa 5 m/s.

Für diese Bedingungen ist eine servohydraulische Versuchseinrichtung entwickelt worden. Ihr regeltechnisches Verhalten wurde vorlaufend in einem Pilotprojekt untersucht /43/, der endgültige Kraftrahmen entsprechend dimensioniert. Im 1. Technischen Fachbericht zum Vorhaben 1500 121 ist die Anlage detailliert beschrieben /4/.

Bei der Auswahl der physikalischen Größen, die in jedem Versuch zu messen waren, ist Wert darauf gelegt worden, daß jeweils ein vollständiger Satz derjenigen Größen gemessen wurde, die zur theoretischen Beschreibung herangezogen werden. Bei Stahlbetonplatten sind die Verformung senkrecht zur Mittelebene und entsprechende Beschleunigungen (nicht bei statischer Belastung) an zahlreichen Punkten der Platten-Unterseite gemessen worden, zusätzlich die Kraft, die in Plattenmitte eingeleitet wurde. Der zeitliche Ablauf dieser Größen im Versuch mußte in ausreichender zeitlicher Auflösung zur Verfügung stehen, was bei maximal 32 parallelen Meßkanälen und einer Datenfrequenz von 60 kHz (bei 12 Bit-Darstellung) erreicht werden konnte /4/. Bei den Versuchen an Betonstahlproben waren dagegen nur wenige Meßgrößen zu erfassen: Die Geschwindigkeit der einen Einspannung relativ zu der zweiten sowie die Kraft. Das Kraftmeßelement war dabei sinnvollerweise auf der dem Arbeitszylinder gegenüberliegenden Seite anzuordnen.

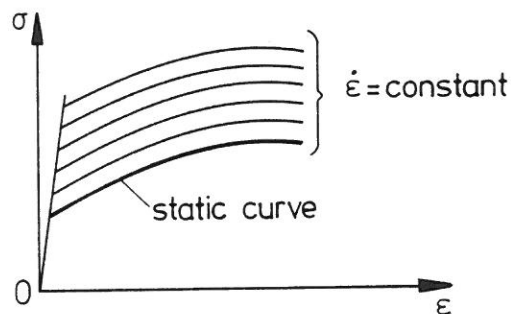


Bild 1: Elastisch/visko-plastisches Verhalten von Werkstoffen:
Abhängigkeit der Spannungs-Dehnungs-Diagramme von der Deformationsgeschwindigkeit /44/

Fig. 1: Elastic/visco-plastic behaviour of materials:
Influence of strain rate on the stress-strain-relation /44/

5. Durchgeführte Arbeiten

5.1 Allgemeines

Die Untersuchungen

- zum Dehngeschwindigkeitseinfluß auf die Festigkeitskennwerte von Betonstahl
- zum mechanischen Verhalten von örtlich stoßbelasteten Stahlbetonplatten
- zur theoretisch-numerischen Beschreibung von Stahlbetonbauteilen unter Stoßbelastung

sind äußerlich nur schwach miteinander gekoppelt und werden im folgenden getrennt voneinander dargestellt. Sie begannen im Jahr 1980. Die Versuche konnten 1984 beendet werden, die Produktionsläufe an den Rechnern des Wissenschaftlichen Rechenzentrums Berlin (WRB) bzw. am Konrad Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB) 1987. Im folgenden wird über die Untersuchungen in stark gestraffter Form berichtet, wobei die neuartigen Erkenntnisse herausgehoben werden. Detailliert ist über die Arbeiten in drei Technischen Fachberichten /1/, /2/, /3/ berichtet worden.

5.2 Experimentelle Untersuchungen an Betonstahl zur Bestimmung des Einflusses der Dehngeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten

Stahl zeigt ebenso wie viele andere Stoffe ein elastisch/visko-plastisches Verhalten (Bild 1) /44/, d. h., daß mit zunehmender Dehngeschwindigkeit der Widerstand des Materials gegen Verformungen ansteigt. Allerdings gelingt die mechanische Beschreibung als einfacher visko-plastischer Stoff /36/ jenseits der Elastizitätsgrenze nicht. Vielmehr muß dem Stoff ein Erinnerungsvermögen zugeordnet werden, das - soweit die mangelhaften Kenntnisse es vermuten lassen - schwindet ("fading memory"). Für die Praxis bedeutet das, daß der einmal erreichte erhöhte Widerstand bei schneller Verformung eine geringe Zeit nachwirkt, wenn die Verformungsgeschwindigkeit absinkt /18/, /33/. Diesem Problem konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht nachgegangen werden.

Vielmehr wurde nur die Änderung des Widerstandes von Betonstahl-Proben in dynamischen Zugversuchen bestimmt. Gleichzeitig konnte eine Veränderung der plastischen Verformung der Proben bis zum Bruch festgestellt werden.

In die Untersuchung wurden drei unterschiedliche Betonstahlsorten einbezogen:

- Rippentorstahl BSt 420/500 RK (Kurzbezeichnung: III b)
- Betonrippenstahl BSt 420/500 RU (III a)
- hochfester Betonstahl BSt 1100 (frühere Bezeichnung: BSt 1080/1320)

(In der neu herausgegebenen DIN 488 - Betonstahl - aus dem Jahr 1984 haben sich die Bezeichnungen etwas geändert. Der Betonstahl 1100 besitzt eine Zulassung durch das Institut für Bautechnik (IfBt), Berlin, für den kerntechnischen Ingenieurbau.)

Mit diesen Betonstahlsorten erscheint der gesamte Bereich der Variationsmöglichkeiten von Betonstahl eingeschlossen:

- Beim Rippentorstahl BSt 420/500 RK handelt es sich um durch Verdrillen kaltverformten Betonstahl.
- Der Betonrippenstahl BSt 420/500 RU ist unverformt und nicht schweißgeeignet.
- Der Betonstahl BSt 1100 ist ein für Spannbeton entwickelter hochfester Stahl, der mit Durchmessern 20 mm und 28 mm gewalzt wird.

Insgesamt sind etwa hundert Zugversuche durchgeführt worden an Betonstahlproben von 22 mm Durchmesser (BSt 420/500 RK und BSt 420/500 RU) und 20 mm Durchmesser (BSt 1100). Es ist eine Besonderheit für die Ermittlung technologischer Kennwerte von Betonstahl, daß es sich bei den Proben um unbehandelte Stababschnitte handelt. Für die Zugversuche wurden daher erhebliche Kräfte, bis zu etwa 450 kN, benötigt, die in der in /4/ beschriebenen servohydraulischen Versuchseinrichtung erzeugt werden konnten. Details der Versuchseinrichtung sind auf Bild 2 zu erkennen: Die Zugprobe wird in Spannbacken festgeklemmt. Die Kraft wird mit dem

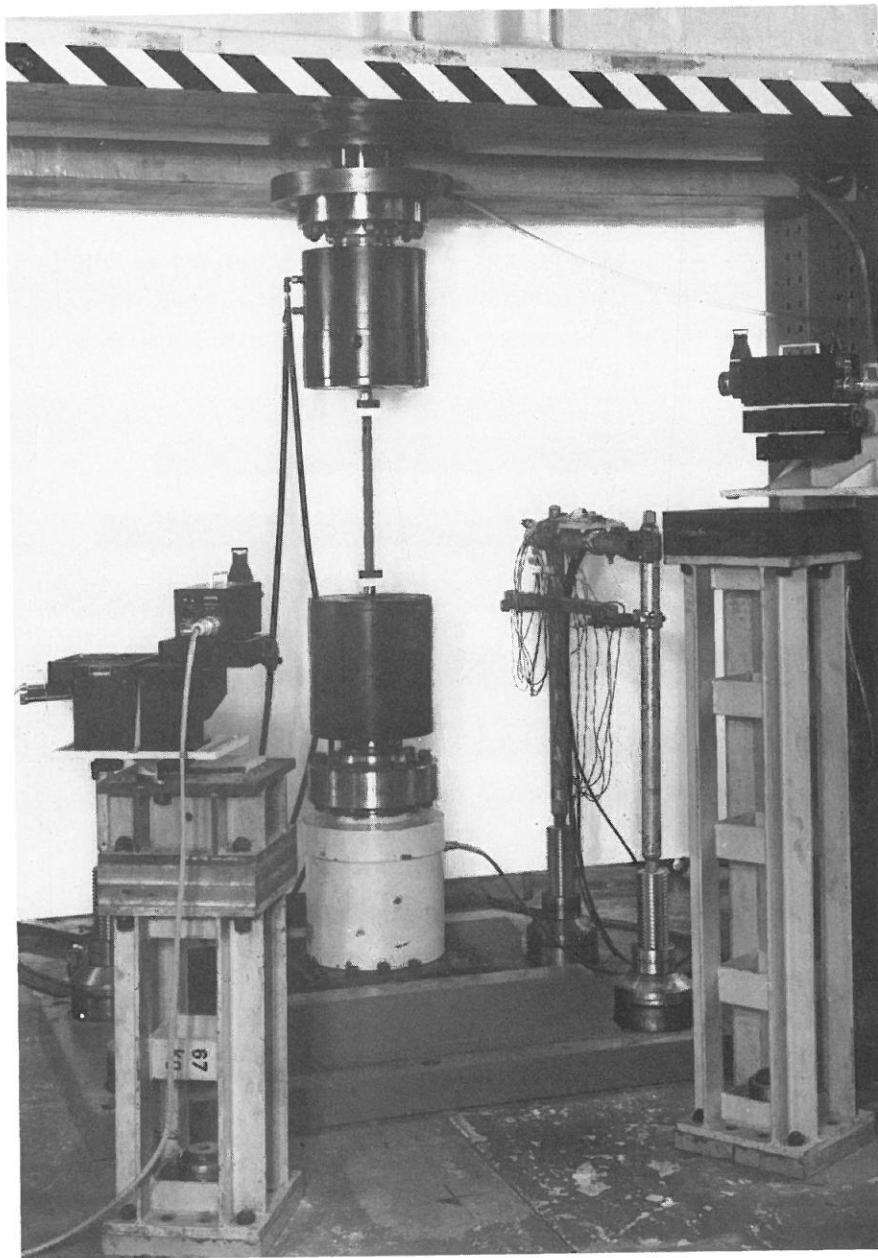


Bild 2: Details der servohydraulischen Versuchseinrichtung für Zugversuche an Betonstahl-Proben. Die Betonstahl-Probe mit zwei aufgeklebten Meßmarken für die elektro-optischen Wegaufnehmer ist an den Ecken in hydraulische Spannbacken eingespannt. Der Arbeitszylinder der Versuchseinrichtung befindet sich oben. Unten ist der Kraftaufnehmer zu erkennen.

Fig. 2: Details of the servo-hydraulic testing setup for tension tests on reinforcing steel samples. The sample with two fixed measure marks is clamped at the ends to hydraulic clamping devices. The hydraulic actuator is at the top. The force transducer is at the bottom.

unten zu erkennenden Kraftaufnehmer (Ringtorsionskraftaufnehmer) gemessen, die Verlängerung der Probe durch die Messung der Wege der schwarz-weißen Meßmarken an der Probe mit elektro-optischen Aufnehmern. Zusätzlich wurde jede Probe vor dem Versuch mit einer Reihe von Ritzmarken versehen, aus deren Abstand vor dem Versuch und danach die plastische Längenänderung ermittelt werden kann, wie auch deren Verteilung über die Länge der Probe.

Einen Eindruck von der Längenänderung der Proben aus BSt 420/500 RK und BSt 1100 vermittelt Bild 3. Die Proben sind mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bis zum Bruch mit konstanter Geschwindigkeit verformt worden. Die Dehngeschwindigkeit in den Proben hatte die Werte

$$\dot{\epsilon} = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \quad (\text{statisch})$$

$$\dot{\epsilon} = 0,2 \quad \text{s}^{-1}$$

$$\dot{\epsilon} = 2 \quad \text{s}^{-1}$$

$$\dot{\epsilon} = 8,5 \quad \text{s}^{-1}$$

Bei den Versuchen an Proben aus BSt 1100 konnte nur $\dot{\epsilon} = 2 \text{ s}^{-1}$ erreicht werden, da die Leistungsfähigkeit der Versuchseinrichtung damit erreicht wurde. Während der unterste Wert derjenige für statische Versuche ist (etwa 10 bis 20 Minuten

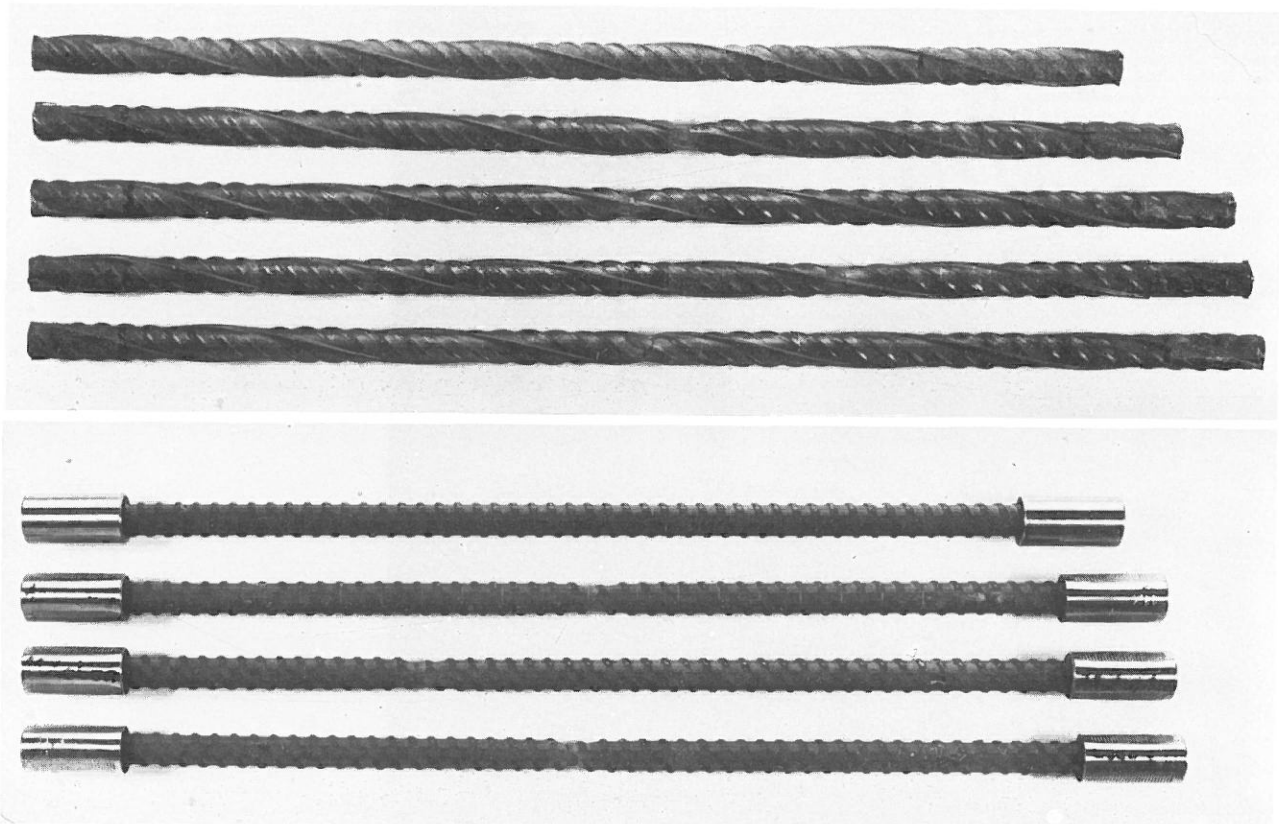


Bild 3: Betonstahl-Proben aus BSt 420/500 RK (Rippentorstahl) und BSt 1100 (hochfester Betonstahl).

Bei der obersten Probe handelt es sich jeweils um eine noch nicht beanspruchte Probe, die auch als Referenz für die Längenänderung dient. Darunter sind jeweils Proben angeordnet, die mit zunehmender Geschwindigkeit beansprucht wurden.

Fig. 3: Reinforcing steel specimens of BSt 420/500 RK (cold worked steel with ribs) and BSt 1100 (high strength steel). The first of the specimens in each series is untested and is a reference for the elongation. Below this, the specimens are arranged which have been tested with different strain rates.

Versuchsdauer bis zum Bruch), treten bei der Beanspruchung einer Kernkraftwerk-Sicherheitsumschließung durch ein aufprallendes Militärflugzeug entsprechend KTA 2202 /22/ Dehngeschwindigkeiten von etwa 2 s^{-1} auf (50 bis 100 Millisekunden bis zum Bruch einer Probe).

Erstes Ergebnis aus einem Zugversuch ist das Kraft-Verlängerungs-Diagramm, bei Bezug auf die Anfangsabmessungen der Probe als Spannungs-Dehnungs-Diagramm angegeben. Aus diesem lassen sich erste Schlüsse ziehen. Für die drei verschiedenen Betonstahlsorten sind diese Diagramme in Bild 4 dargestellt. Scharparameter in den Bildern ist die Dehngeschwindigkeit. Typische Eigenheiten sind daraus sofort zu erkennen:

Bei den Betonstahlsorten BSt 420/500 RK und BSt 420/500 RU nehmen Fließ- bzw. Streckgrenze und Zugfestigkeit mit der Dehngeschwindigkeit merklich zu. Die Bruchdehnung steigt bei BSt 420/500 RK mit der Geschwindigkeit beträchtlich an, bei BSt 420/500 RU nur geringfügig. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme des hochfesten Betonstahls BSt 1100 verändern sich mit der Dehngeschwindigkeit kaum. Die quantitativen Ergebnisse werden in Abschnitt 6 dargestellt.

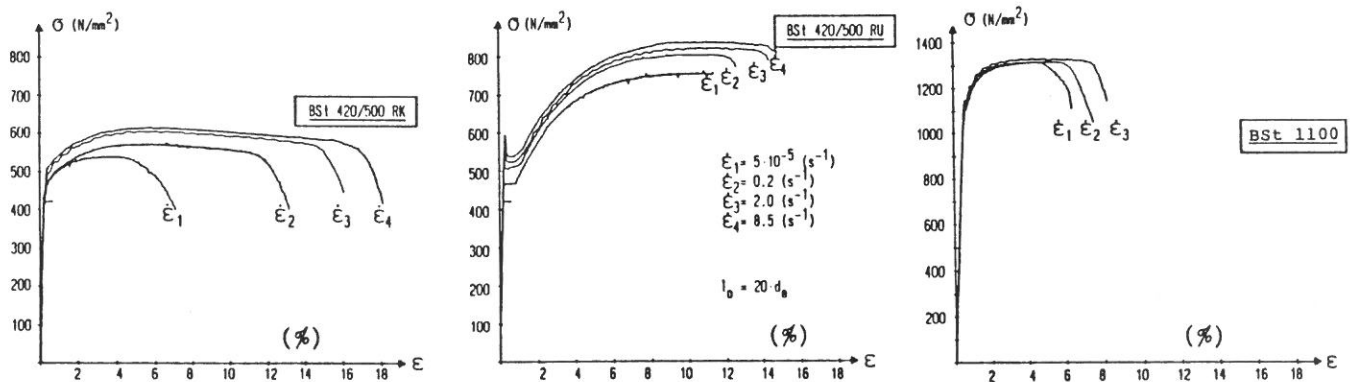


Bild 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die drei in die Untersuchung einbezogenen Betonstahlsorten. Scharparameter ist jeweils die Dehngeschwindigkeit.

Fig. 4: Stress-strain-diagrams for the reinforcing steel grades which have been included in the investigation. The different curves in each diagram are associated to different strain rates.

5.3 Versuche zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter örtlicher Stoßbelastung

In den experimentellen Untersuchungen von Stahlbetonplatten war eine Vielzahl von Parametern zu berücksichtigen.

Drei unterschiedliche Verformungsmechanismen, die schließlich zum Versagen führen konnten, waren zu beobachten:

- Ausbildung von Fließgelenklinien
- Örtliches Durchstanzen ohne wesentliche Biegeverformungen
- "Sekundäres Durchstanzen" unter der Lasteinleitungsplatte nach erheblichen bleibenden Biegeverformungen.

Um diese Mechanismen in den Versuchen voneinander getrennt behandeln zu können, sind zwei unterschiedliche Plattentypen verwendet worden, die in den Bil-

	lfd. Nr.	Versuchs-Nr.	Betonfestigkeitsklasse	Biegebewehrung				Bügel		Lasteinleitungsfläche d [cm]	Beanspruchung	Bemerkungen zum Versagen
				unten d _s mm	μ %	oben d _s mm	μ %	d _s mm	μ cm ² /m ²			
Versuchsreihe II Stahlbetonplatten 3 m x 3 m, 22 cm dick Auflagerung an den vier Ecken	1	307	25			10		8	45	27	dyn.	Fließgelenke
	2	308	25			10		6	25	27	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	3	309	25			10		-	-	16	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	4	310	55			10		-	-	16	dyn.	Primäres Stanzen
	5	311	25			10	0,4	8	45	16	mittelschnell	Primäres Stanzen
	6	312	55			10		8	45	16	dyn.	Primäres Stanzen
	7	313	25			10		6	25	16	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	8	314	55	10	0,8	10		6	25	16	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	9	315	25			-		-	-	27	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	10	316	55			-		-	-	27	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	11	317	25			10		8	45	16	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	12	318	25			10		8	45	16	stat.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	13	319	25			10	0,4	-	-	27	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	14	320	25			10		-	-	36	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	15	321	25			10		-	-	27	stat.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	16	322	25			10		6	25	27	stat.	Fließgelenke, sek. Stanzen
Versuchsreihe III Stahlbetonplatten, 2,36 m x 2,36 m, 16 cm dick mit Randeinspannung im Stahlbetonbalken	17	401	35	10	1,2			-	-	16	dyn.	Prim. Stanzen
	18	402	25	10	1,2			6	25	16	dyn.	(Prim. Stanzen)
	19	403	15	10	1,2			6	25	16	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	20	404	15	10	1,2			-	-	16	dyn.	Prim. Stanzen
	21	405		10	1,2			-	-	16	stat.	Prim. Stanzen
	22	406	35	10	1,2			6	25	16	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	23	407	35	10	1,2	8	0,8	6	25	16	stat.	Querkraft- versagen
	24	408		10	1,2			-	-	27	dyn.	Prim. Stanzen
	25	409	35	8	0,8			6	25	16	stat.	Prim. Stanzen
	26	410	35	8	0,8			6	25	16	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	27	411	35	10	1,2			6	25	16	stat.	Prim. Stanzen
	28	412	35	6	0,4			6	25	16	dyn.	Fließgelenke, sek. Stanzen
	29	413	35	6	0,4			6	25	27	dyn.	Fließgelenke, Versagen der Randbalken

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Versuche an Stahlbetonplatten, Versuchsreihen II und III
(Versuchsreihe I wurde im Vorhaben 150 0 121 bearbeitet, siehe Bericht /7/)

dern 5 und 6 dargestellt sind. Bei den an den vier Ecken aufgelagerten Platten, Bild 5, dominierte zunächst immer die Biegeverformung, bevor sekundäres Stanzen eintrat, was nicht immer erreicht wurde. Diese Platten zeichnen sich durch klar definierbare Randbedingungen aus. Sehr biegesteife Platten entstanden durch Einspannung in einem monolithisch mit ihnen hergestellten sehr steifen Randbalken-Rahmen, Bild 6. Für die Beschreibung des Verhaltens dieser Platten im plasti-

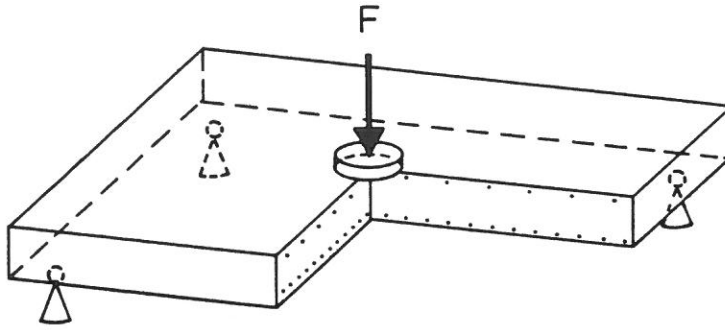


Bild 5: Stahlbetonplatte mit Auflagerung an den vier Ecken und mittig angreifender Belastung (Schnitt-Darstellung)

Fig. 5: Flat reinforced concrete slab with supports at the corners and central loading (cut away model)

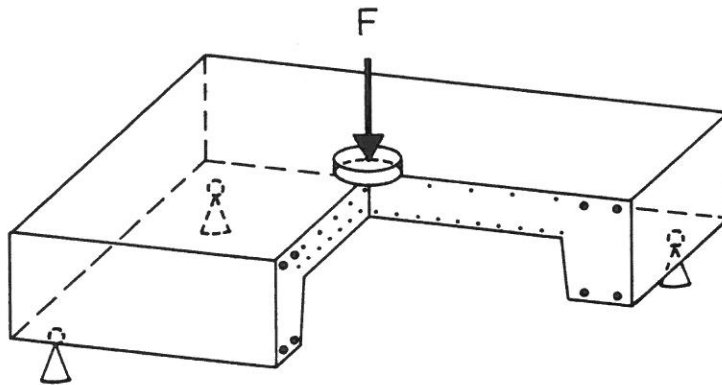


Bild 6: Stahlbetonplatte mit Einspannung in Randbalken und mittig angreifender Belastung (Schnitt-Darstellung)

Fig. 6: Reinforced concrete slab clamped in edge beams and loaded centrally (cut away model)

schen Bereich konnte von einer nahezu starren Einspannung ausgegangen werden, wie die in den Versuchen sich ausbildenden Fließgelenklinien ausweisen. In den Bildern 7 bis 9 sind typische Verformungsbilder im plastischen Bereich erkennbar.

Insgesamt sind 23 Platten in die Untersuchung einbezogen worden. Einen Überblick über die Versuche gibt Tabelle 1, in der auch die Parameter angegeben sind, die in den Untersuchungen variiert wurden /2/.

Im einzelnen Versuch sind folgende Größen gemessen worden:

- Durchbiegungen an zahlreichen Punkten
- Vertikale Beschleunigungen an mehreren Punkten in dynamischen Versuchen (Stoßbeanspruchung)
- Kraft an der Kraftangriffsstelle
- Bei Platten mit Randbalken auch einige Verschiebungen am Randbalken.

Die Verformungsgeschwindigkeit betrug in den statischen Versuchen 0,1 mm/s, so daß ein Versuch bis zu 25 min dauerte. In den Versuchen mit stoßartiger Beanspruchung wurde eine Geschwindigkeit von etwa 2 m/s erreicht, die Versuchsdauer betrug jeweils etwa 40 ms bis 80 ms. In allen Versuchen, auch denen mit stoßartiger Belastung, begann der Versuch nach einem leichten Kontakt zwischen dem Kolben des Arbeitszylinders (mit zwischengeschaltetem Kraftaufnehmer) und Probekörper.

Alle Versuche konnten planmäßig zu Ende geführt werden.

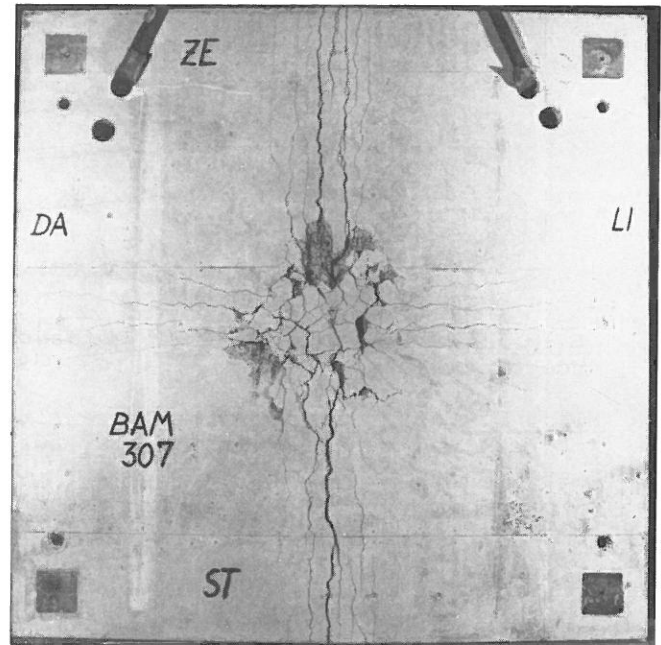
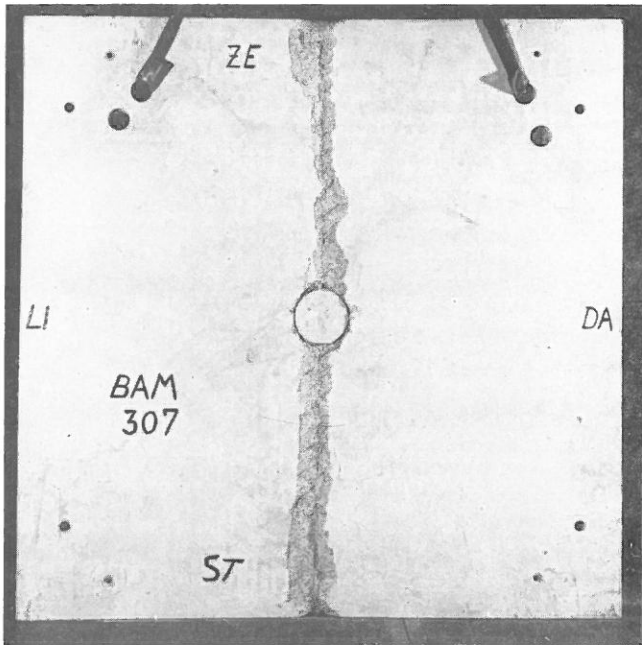


Bild 7: Ausbildung von Fließgelenklinien in einer Stahlbetonplatte, die im Versuch an den Ecken aufgelagert war (Bild 5). Die eine der Fließgelenklinien ist stärker ausgebildet als die andere. Vorder- und Rückansicht

Fig. 7: Yield line pattern in a flat slab (fig. 5). One of the yield lines got more deformation than the other one. Front and rear face

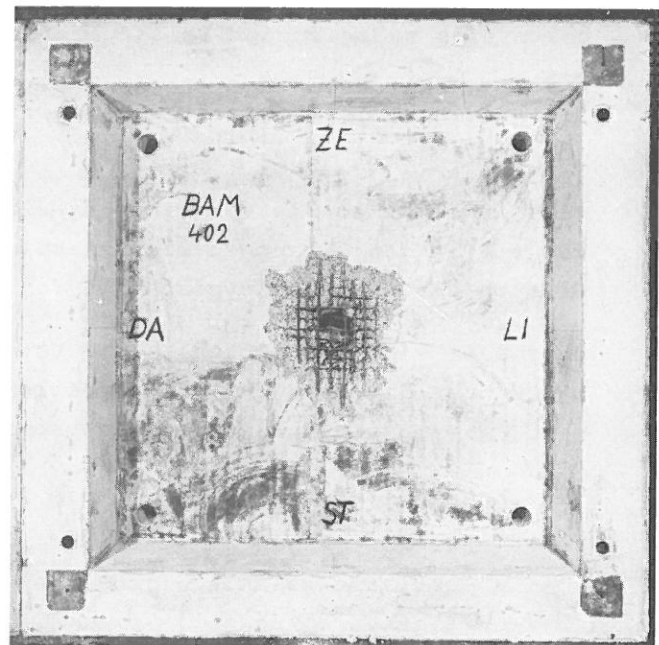
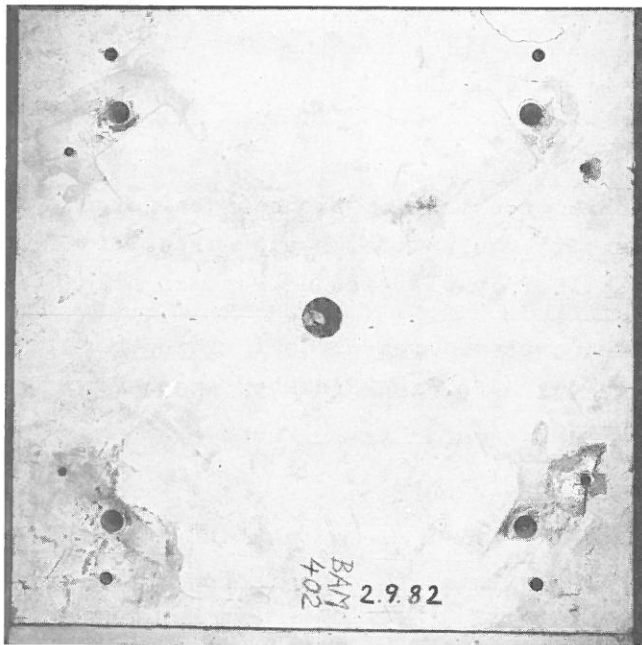


Bild 8: Durchstanzen einer in Randbalken eingespannten Stahlbetonplatte (Bild 6) unter mittiger Belastung ohne merkliche Biegedeformationen. Vorder- und Rückansicht

Fig. 8: Punching shear of a reinforced concrete slab clamped in edge beams (fig. 6) under central load without remarkable flexural deformation. Front and rear face

Aus der Messung in jedem Versuch ergeben sich zunächst Kräfte und Verschiebungen als Funktion der Zeit. Die drei unterschiedlichen Verformungsmechanismen sind in den Kraft-Zeit-Diagrammen, aber auch in den darauf basierenden Kraft-Weg-Diagrammen deutlich zu identifizieren (Bilder 10 bis 12).

Die Ergebnisse werden im einzelnen im Abschnitt 6 beschrieben und erläutert.

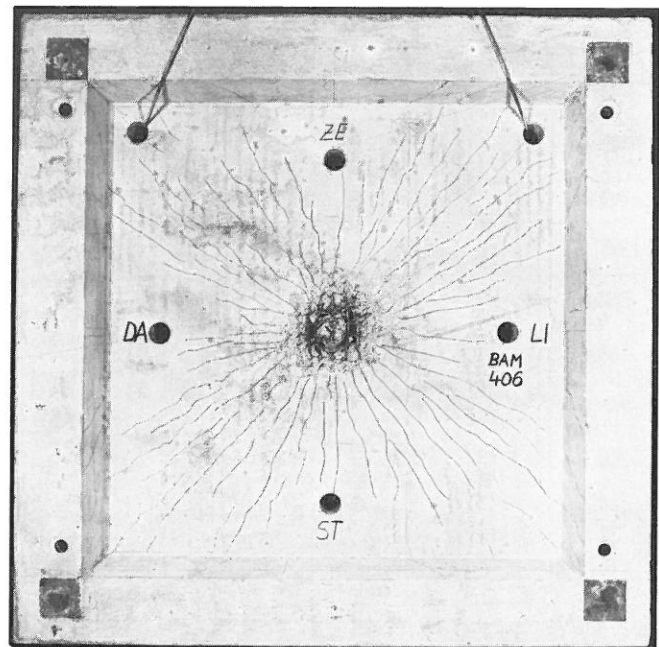
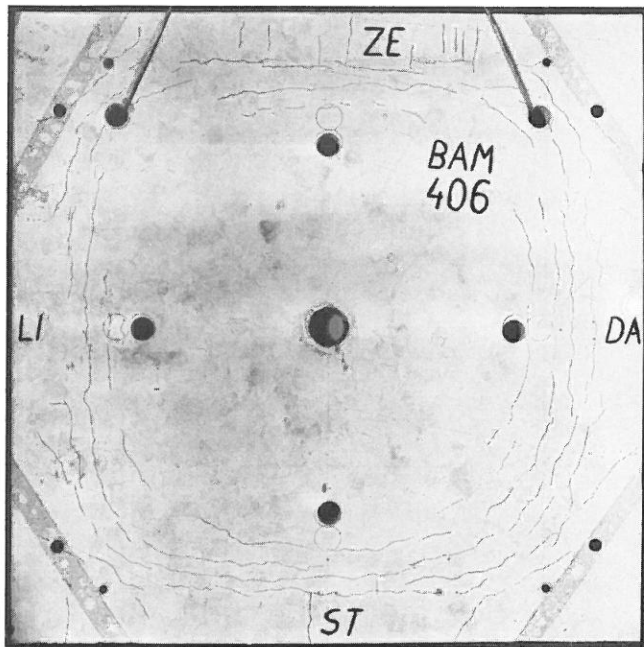


Bild 9: Sekundäres Durchstanzen einer Stahlbetonplatte (Bild 6) nach erheblichen Biegedehformationen. Das Muster der Fließgelenklinien ist auf Vorder- und Rückseite gut zu erkennen.

Fig. 9: Secondary punching shear of a reinforced concrete slab (fig. 6) after considerable flexural deformation. The yield line pattern is clearly marked on the front and rear.

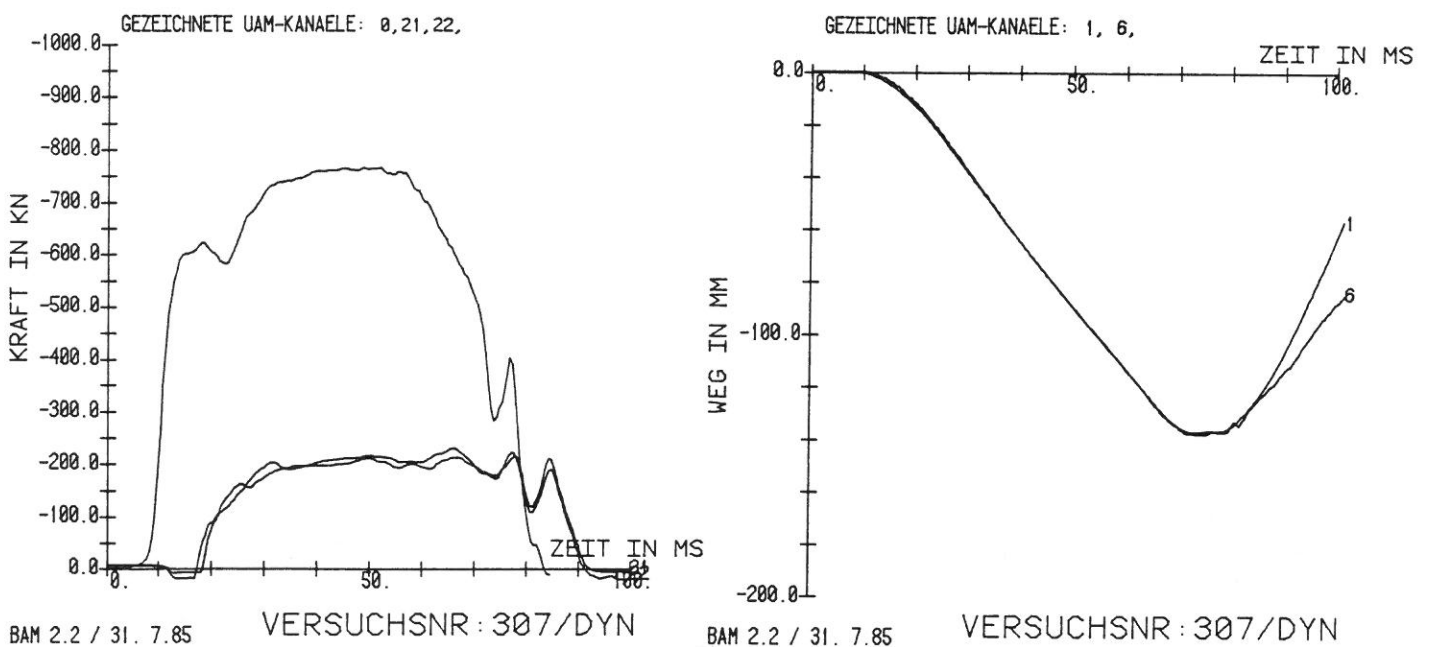
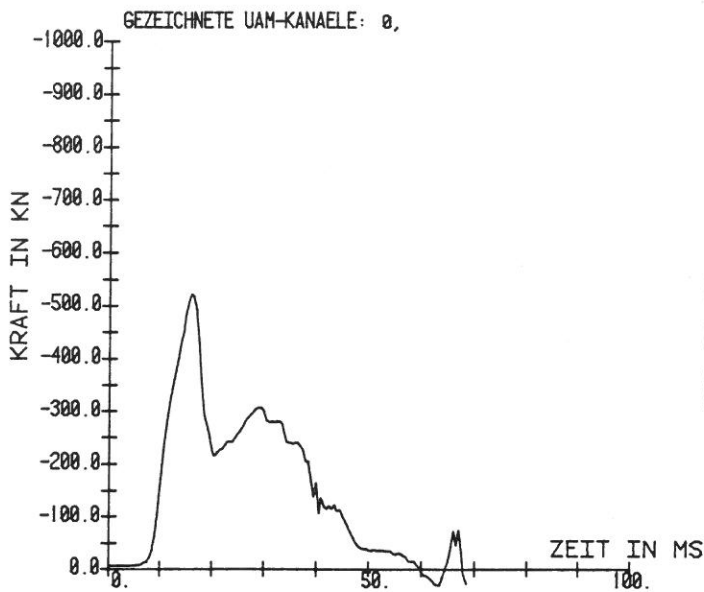


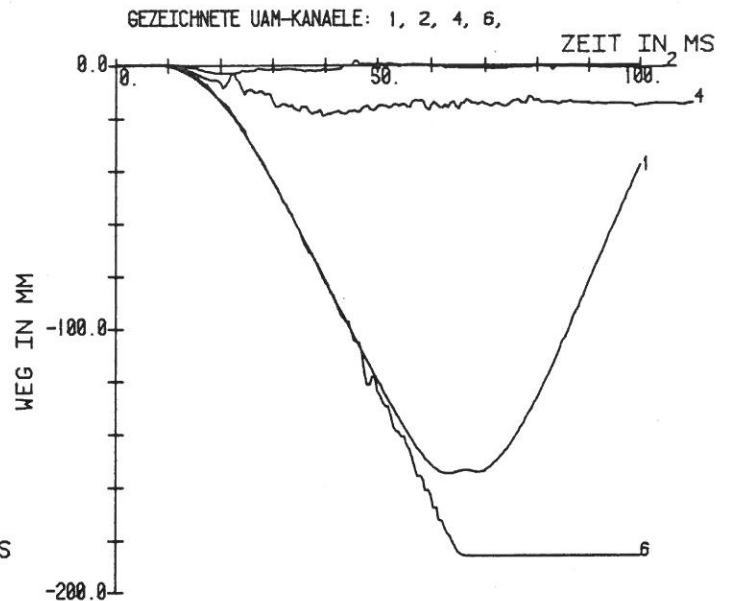
Bild 10: Zeitlicher Verlauf der Kraft und der Verformung unter dem Kraftangriffspunkt in Plattenmitte für eine ebene Stahlbetonplatte (Bild 5), in der sich Fließgelenklinien ausbilden (Versuch 307, Bild 7)

Fig. 10: Test on a reinforced concrete slab (fig. 5) in which occurred yield lines. Diagram of force applied at centre of the slab, and displacement at this point versus time for test 307 (fig. 7)



BAM 2.2 / 16. 8.85

VERSUCHSNR: 404/DYN

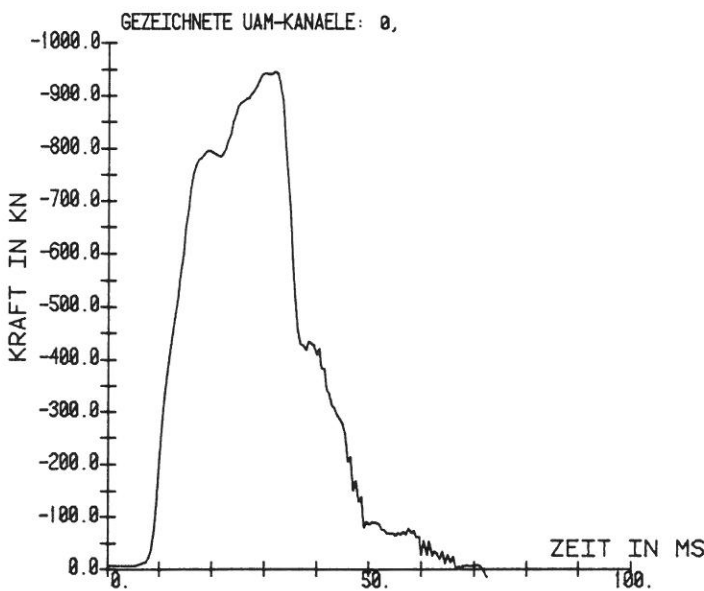


BAM 2.2 / 16. 8.85

VERSUCHSNR: 404/DYN

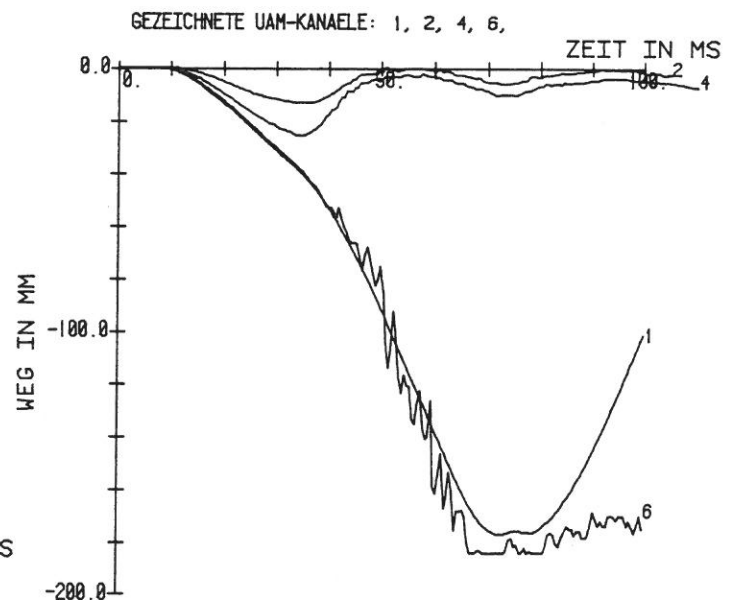
Bild 11: Versuch an einer Stahlbetonplatte, bei der (primäres) Durchstanzen zu beobachten war (Bild 6, Bild 8). Darstellung von angreifender Kraft in Plattenmitte und der Verformung an diesem Punkt über der Zeit

Fig. 11: Test on a reinforced concrete slab failing in (primary) punching shear (fig. 6, fig. 8). Force applied at slab centre and displacement at that point versus time.



BAM 2.2 / 16. 8.85

VERSUCHSNR: 406/DYN



BAM 2.2 / 16. 8.85

VERSUCHSNR: 406/DYN

Bild 12: Versuch an einer Stahlbetonplatte, bei der sekundäres Durchstanzen auftrat (Bild 6, Bild 9). Darstellung von angreifender Kraft in Plattenmitte und der Verformung an diesem Punkt als Funktion der Zeit.

Fig. 12: Test on a reinforced concrete slab failing in secondary punching shear (fig. 6, fig. 9). Diagram of force and displacement in slab centre versus time.

5.4 Theoretisch-numerische Analyse des mechanischen Verhaltens von Stahlbetonbauteilen unter Stoßeinwirkung

(1) Dem Teil der Arbeiten im gesamten Vorhaben, der sich mit der Idealisierung des Systems, also der Modellabbildung, und mit der numerischen Lösung der das mechanische Verhalten des Systems beschreibenden Gleichungen beschäftigt, kommt eine Schlüsselrolle zu; denn nur, wenn Modellabbildung und numerische Behandlung zutreffen, kann mit einer Übereinstimmung zwischen Versuch und analytischer Lösung gerechnet werden. Auf dieser Grundlage läßt sich die Behandlung derartiger Probleme in gewissem Umfange einer Manipulation entziehen. Die Ergebnisse von Berechnungen, die zwar in guter Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen stehen, obwohl nur unzureichende Eingangsparameter (z. B. Festigkeitskenngrößen) verfügbar waren (in /45/ wird beispielsweise darauf hingewiesen), sind einer Interpretation nur schwer zugänglich.

Es war das Ziel der im folgenden kurz zu beschreibenden Arbeiten, durch sorgfältige Modellabbildung und Einbeziehung aller signifikanten Effekte eine reproduzierbare Grundlage für derartige Untersuchungen zu geben. Auf eine sehr differenzierte Einbeziehung von Effekten, die letztlich in den Ergebnissen nur marginal bleiben müssen, wurde - im Gegensatz zu manchen anderen Untersuchungen - verzichtet: Bei Stahlbetonbalken spielt die Betonfestigkeit bei der vorherrschenden starken Bewehrung nur eine untergeordnete Rolle; so konnte dort auf eine pauschale Erfassung von Geschwindigkeitseinflüssen zurückgegriffen werden. Dagegen beherrscht das plastische Arbeitsvermögen des Betonstahls dasjenige von Stahlbetonbalken, so daß das mechanische Verhalten von Betonstahl sehr genau erfaßt werden mußte. Stahlbetonplatten werden allerdings in ihrem Widerstand gegen örtliches Durchstanzen sehr stark von der Festigkeit des Betons bestimmt, so daß an dieser Stelle eine ganz andere Priorität zu setzen war.

Bei Stahlbetonbalken konnte aus den zuvor erwähnten Gründen auf eine gesonderte Abbildung der Verbundwirkung verzichtet werden, ein Vorgehen, das u. U. bei sehr geringen Durchmessern der Bewehrungsstäbe problematisch werden könnte; aber dieser Bereich ist nicht Gegenstand der Untersuchungen im Vorhaben gewesen.

Auf die Berücksichtigung von Temperatureffekten wurde verzichtet.

(2) Das Ziel der theoretisch-numerischen Untersuchungen, nämlich unter Verwendung verschiedener, möglichst weit verbreiteter Programmsysteme mit unterschiedlichen Modellabbildungen das Verhalten von Stahlbetonbauteilen auf der Grundlage der Eigenschaften der Komponenten des Stahlbetons zusammensetzen, konnte nur erreicht werden, wenn Anwender dieser Programme an anderen Stellen unterstützend tätig wurden. So können heute neben den Ergebnissen, die bei Verwendung des Programmsystems ADINA /46/ in der BAM entstanden /3/, andere in die Darstellung einbezogen werden, die an der ETH Zürich (Programmsystem PIFF /47/), an der TH Delft (Programmsysteme DIANA /48/ und DYNAMO /49/), mit ADINA bei der KWU, mit FEMAS bei Sigma Karlsruhe, von der Sozietät Fricke in Hannover und von Dyckerhoff & Widmann /50/ gewonnen wurden. Dabei sind zum einen die Werkstoffkennwerte eingeführt worden, die für Betonstahl in der BAM ermittelt werden konnten /1/ und zum anderen die Ergebnisse aus Versuchen an Stahlbetonbauteilen in der BAM /6/, /8/.

Besondere Erwähnung gebührt den Arbeiten von Steberl /32/, /33/, der den Versuch unternahm, das Werkstoffverhalten von Beton und Betonstahl im Rahmen einer endochronen Materialtheorie zu beschreiben und der mit den so gewonnenen Materialgesetzen das Verhalten von Stahlbetonplatten bis zum Einsetzen des sekundären Durchstanzens in erstaunlich guter Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen /2/ analytisch nachvollzogen hat.

(3) Den Modellabbildungen sind in den erwähnten Arbeiten ein-, zwei- und dreidimensionale Systeme zugrunde gelegt worden. Dem Balkenmodell, Bild 13, /57/, stehen Scheibenmodelle, Bild 14 /3/, gegenüber, während Stahlbetonplatten sowohl eine dreidimensionale Abbildung erfahren können /32/, Bild 15, als auch als Flächentragwerk zweidimensional, bei Belastung in Plattenmitte aber auch rotationssymmetrisch gar eindimensional /51/, /59/ behandelt werden können.

(4) Bei den Untersuchungen in der BAM ist eine Diskretisierung von Stahlbetonbalken als Scheibe für die Berechnungen mit ADINA verwendet worden, Bild 14. Die Bewehrung ließ sich in dieses Modell recht gut einfügen, auch wenn die Einbeziehung der Betondeckung problematisch bleibt /3/. Das Materialgesetz für Be-

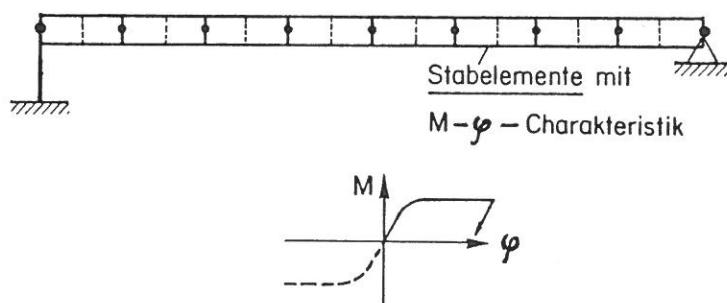


Bild 13: Abbildung eines Stahlbetonbalkens auf ein eindimensionales Balkenmodell /57/ mit finiten Elementen

Fig. 13: One-dimensional finite element model of a reinforced concrete beam /57/

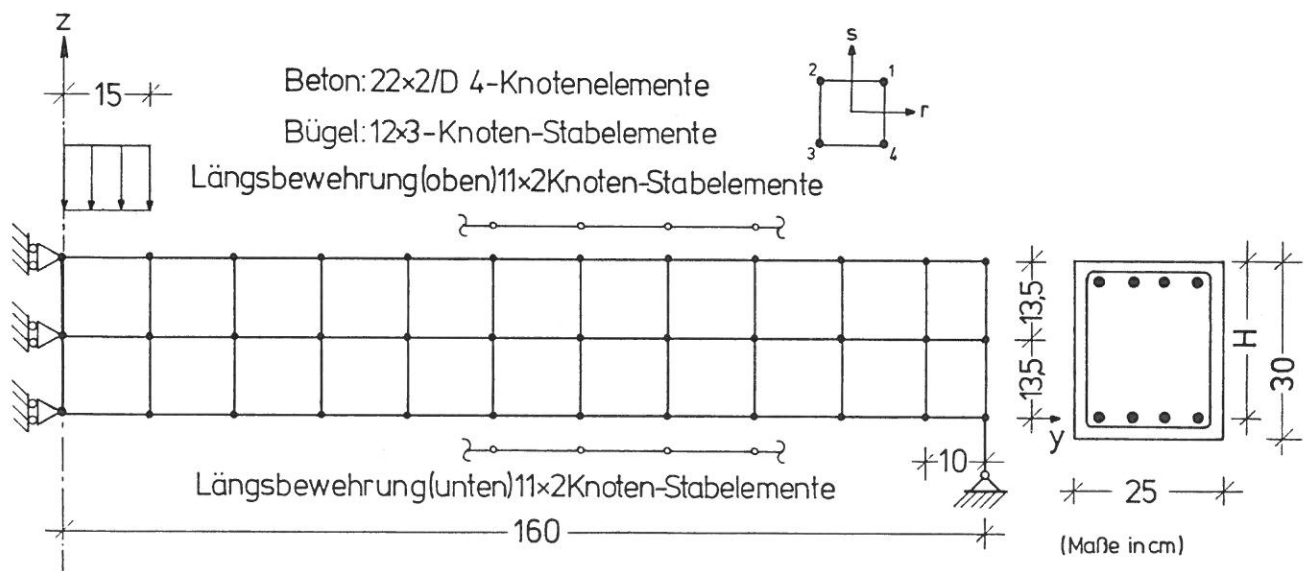


Bild 14: Abbildung eines Stahlbetonbalkens auf ein Scheibenmodell /3/

Fig. 14: Two dimensional modelling of a reinforced concrete beams /3/

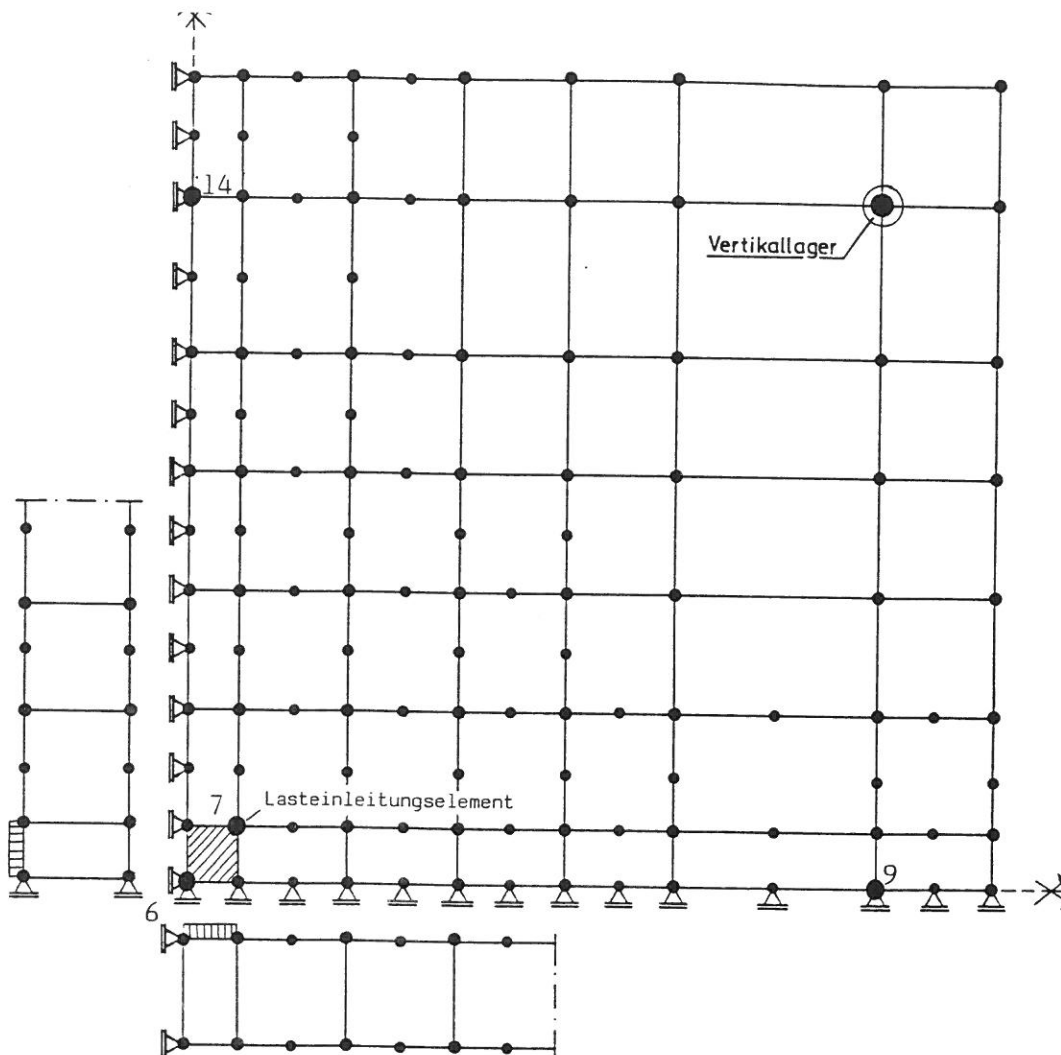


Bild 15: Abbildung einer Stahlbetonplatte als dreidimensionales Kontinuum /32/
Fig. 15: Three dimensional modelling of a reinforced concrete slab /32/

ton unter mehrachsiger Beanspruchung konnte mit geringfügigen Modifizierungen aus ADINA übernommen werden. Schwierigkeiten entstanden im Krafteinleitungsbereich; denn bei den dort auftretenden hohen Spannungen kann in der Rechnung frühzeitig lokal eine Versagensgrenze erreicht werden, die in Wirklichkeit nicht zu beobachten ist, aber zum Abbruch des Rechenlaufs führt. Für die Rißentstehung und -entwicklung sowie für das Verhalten nach Druckversagen steht in ADINA eine bestimmte Prozedur zur Verfügung, die für jeden Integrationspunkt in jedem Element den Übergang in der Materialformulierung ermöglicht. Auch das Schließen von Rissen kann simuliert werden. Derartige Diskontinuitäten treten im Kontinuum Betonstahl nicht auf und erleichtern an dieser Stelle die Formulierung. Eine Material- oder Systemdämpfung ist in die Rechnung nicht eingeführt worden. Im Rahmen der Untersuchungen sind mehrere Versuche "nachgerechnet" und dabei wesentliche Parameter variiert worden.

(5) Im Laufe der Arbeiten sind an den Rechenzentren, das Zentrale Rechenzentrum der Technischen Universität Berlin (ZRZ-TUB), das Wissenschaftliche Rechenzentrum Berlin (WRB) bzw. Konrad Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB), die zentralen Rechner mehrfach ausgetauscht worden, so daß ADINA in mehreren Anlagen implementiert werden mußte (Cyber 175, Cyber 825, Cray), was den Fortgang der Arbeiten mehrfach merklich verzögert hat.

6. Ergebnisse

6.1 Allgemeines

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens 150 460 "Energieaufnahmevermögen von Stahlbetonbauteilen unter Stoßeinwirkung" sind in drei Technischen Fachberichten /1/, /2/, /3/ im Detail wiedergegeben. Jeder dieser Berichte behandelt eines der drei Teilgebiete, denen die Arbeiten im Vorhaben galten.

Im folgenden werden die Ergebnisse in sehr kurzer Form zusammengefaßt, um so unter Heraushebung neuartiger Resultate einen Überblick zu geben.

6.2 Ergebnisse der Zugversuche an Betonstahlproben

Die Untersuchungen an Betonstahl zur Ermittlung des Einflusses der Dehngeschwindigkeit auf deren mechanisches Verhalten führten zu folgenden Ergebnissen:

- Im untersuchten Bereich der Dehngeschwindigkeit von $0,5 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$ bis etwa 10s^{-1} bleibt der Betonstahl duktil.
- Die Festigkeitskennwerte, Fließgrenze und Zugfestigkeit, steigen in dem betrachteten Bereich mit der Dehngeschwindigkeit, ebenso die Bruchverformung. Dieser Effekt ist für Betonstahlorten mittlerer Festigkeit signifikant und verschwindet nahezu für hochfesten Betonstahl.
- Rippentorstahl BSt 420/500 RK, der durch Verdrillen kaltverformt worden ist, zeigt eine ganz außerordentliche Zunahme der Bruchverformung mit der Dehngeschwindigkeit, ohne daß aber die Absolutwerte der Bruchdehnung diejenigen von BSt 420/500 RU, der nicht kaltverformt wird, überträfen.

Die Abhängigkeiten sind aus den Bildern 16 und 17 zu erkennen. Diese Ergebnisse stimmen mit denen ähnlicher Untersuchungen in der Schweiz überein /53/.

Die Beschreibung der beobachteten Phänomene im Rahmen einer einfachen viskoelastischen Materialtheorie ist in /18/ zu finden. Eine den physikalischen Vorgängen besser angepaßte endochrone Theorie ist in /32/, /33/ zur Grundlage der Deutung der Versuchsergebnisse gemacht worden. Für die praktische Anwendung dürfte allerdings in der Regel eine pauschale Anhebung der Fließgrenze des Betonstahls um Werte, die denjenigen in ACI 349-76 /54/ entsprechen, ausreichen. Über den Einfluß der Dehngeschwindigkeit auf die Gleichmaßdehnung bei Baustählen werden in /62/ abweichende Ergebnisse mitgeteilt, was u. U. darauf zurückgeführt werden kann, daß sehr kleine Proben verwendet worden sind.

Eine Untersuchung zur Frage, bis zu welcher Verformungsgeschwindigkeit mit einer homogenen Deformation des Probekörpers im Versuch gerechnet werden kann, findet sich in /61/. Diese Grenze kennzeichnet auch den Bereich, in dem das Vorgehen, das im Projekt gewählt worden ist, noch als zulässig angesehen werden kann.

6.3 Ergebnisse der Versuche an Stahlbetonplatten

(1) In den experimentellen Untersuchungen an Stahlbetonplatten wurden die folgenden Parameter variiert:

- Randbedingungen und Plattendicke
- Lasteinleitungsfläche (Stahlplatte)

- Betonfestigkeit
- Bügelbewehrungsmenge
- Biegebewehrungsquerschnitt
- Verformungsgeschwindigkeit

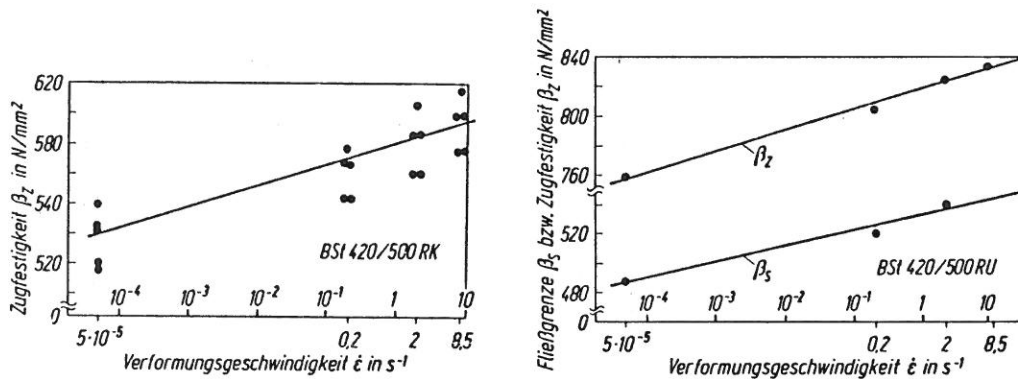


Bild 16: Abhängigkeit der Festigkeitskennwerte (Fließ-/ Streckgrenze und Zugfestigkeit) von Betonstahl von der Dehngeschwindigkeit. Darstellung der Kennwerte über dem Logarithmus der Dehngeschwindigkeit für zwei der in die Untersuchung einbezogenen Betonstahlsorten /1/.

Fig. 16: Strain rate effect on the characteristic values of strength of reinforcing steel (yield stress, tension strength). The diagrams show the characteristic values versus logarithm of strain rate for two of the grades of reinforcing steel which have been included in the investigation /1/.

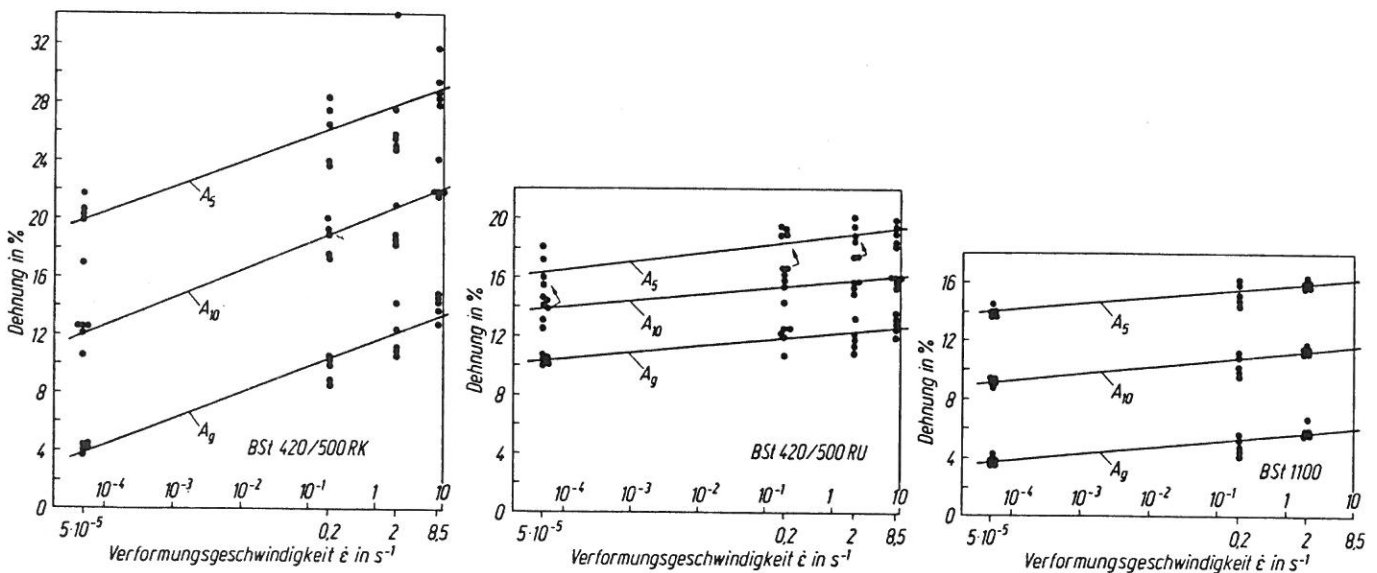


Bild 17: Abhängigkeit der Bruchverformungskennwerte von Betonstahl von der Dehngeschwindigkeit /1/

Fig. 17: Strain rate effect on the characteristic values of elongation of tension specimens /1/

Während bei den 3 m x 3 m großen, 22 cm dicken Platten, die an den vier Eckpunkten aufgelagert waren, Bild 5, in allen Versuchen plastische Biegeverformungen auftraten, bevor örtliches Durchstanzen einsetzte, konnte bei den 16 cm dicken Platten, die in kräftige Randbalken eingespannt waren (2,36 m x 2,36 m) Bild 6, bei entsprechender Bewehrungsanordnung auch ein frühzeitiges Durchstanzen unter der Lasteinleitungsplatte erzielt werden. Daß insgesamt bei der Vielzahl zu va-

riierender Parameter die Anzahl der Versuche - 16 Versuche an flachen Platten, 13 Versuche an in Randbalken eingespannte Platten - nicht ausreichend sein konnte, für alle Einflüsse quantitative Aussagen zu machen, ist offensichtlich. Es ist aber in vielen Fällen gelungen, zu klaren Aussagen zu gelangen.

Im folgenden werden die Ergebnisse zu den einzelnen Fragestellungen kurz zusammenfassend dargestellt.

(2) Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten bei örtlich eingeleiteter Belastung wird durch zwei unterschiedliche Deformationsmechanismen bestimmt, Biegedeformation unter Ausbildung plastischer Gelenklinien in unterschiedlichen Mustern /55/ und örtliches Durchstanzen in einem kegelstumpfförmigen Bereich, Bild 18. Die zugehörige "Kennlinie" für die Biegeverformungen ist in Bild 19 dargestellt, sie gibt die Belastung in Plattenmitte über der Verformung an dieser Stelle an. Begrenzt wird diese Kurve durch Versagen der Platte - entweder in den Fließgelenklinien oder ein sekundäres Durchstanzen. Eine Stahlbetonplatte mit großer Biegesteifigkeit und geringem Widerstand gegenüber Querkräften kann frühzeitig in einem Stanzkegelstumpf versagen, ohne daß der Biege widerstand erreicht ist, wie es Bild 20 wiedergibt.

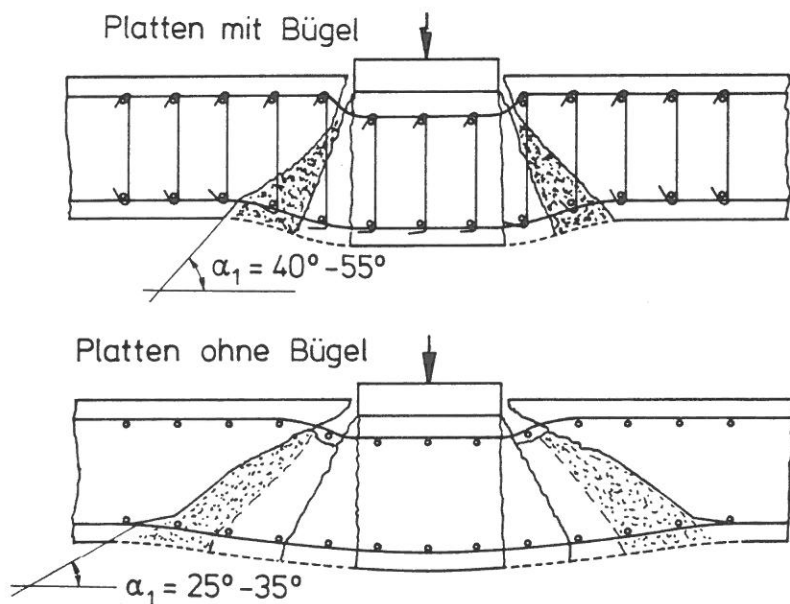


Bild 18: Verformungs- bzw. Versagensmechanismus einer Stahlbetonplatte unter einer konzentrierten Belastung: Durchstanzversagen bei Platten mit und ohne Bügelbewehrung

Fig. 18: Deformation and failure mechanism of reinforced concrete slabs under intense local loading: Punching shear of slabs with stirrups and without those

Die in den Bildern 19 und 20 gezeigten Charakteristika treten gleichermaßen bei statischer als auch bei stoßartiger Belastung auf. Änderungen zu diesen Kennlinien sollten in Abhängigkeit von den Parametervariationen erkundet werden. Ein wesentlicher Vorteil der bei den experimentellen Untersuchungen eingesetzten Versuchstechnik liegt darin, daß das in den Bildern 19 und 20 dargestellte mechanische Verhalten im zeitlichen Verlauf der Kraft an der Lasteinleitungsstelle deutlich zu erkennen ist. In allen folgenden Bildern 21 bis 23 wird das deutlich werden.

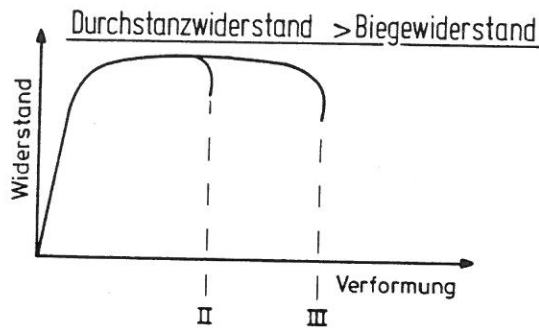


Bild 19: Schematische Darstellung der "Kennlinie" einer Stahlbetonplatte unter örtlich angreifender Belastung, wenn Biegeverformungen überwiegen. Der Widerstand der Platte fällt rapide ab, wenn entweder sekundäres Durchstanzen auftritt (II) oder in den Fließgelenklinien Versagen eintritt (III)

Fig. 19: Scheme of the characteristic curve of a reinforced concrete slab subjected to intense local loading in the case of dominant flexural deformation. The slab's resistance decreases rapidly when secondary punching shear occurs (II) or when yield lines reach failure (III)

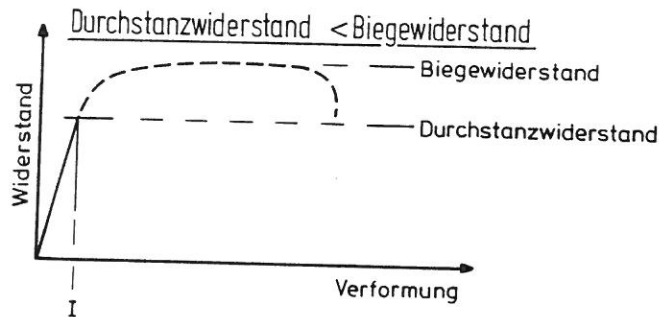


Bild 20: Schematische Darstellung der Kennlinie einer Stahlbetonplatte, bei der primäres Durchstanzen ohne wesentliche Biegedeformationen auftritt

Fig. 20: Scheme of the characteristic curve of a reinforced concrete slab, which fails in primary punching shear without remarkable flexural deformation

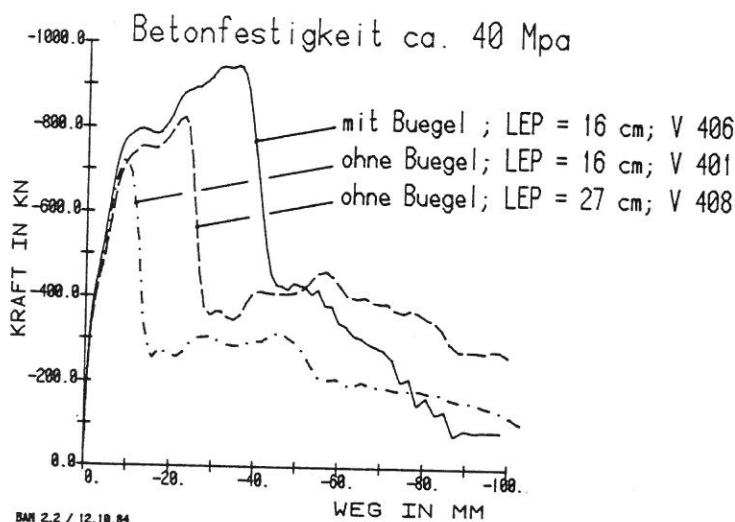


Bild 21: Einfluß der Größe der Lasteinleitungsfläche auf das Versagensverhalten von Stahlbetonplatten /2/ (Versuche 401 und 408 an Platten mit Randbalken (Bild 6)) (LEP = Durchmesser der Lasteinleitungsplatte)

Fig. 21: Influence of the area of loading on the behaviour of reinforced concrete slabs up to failure /2/ (Tests 401 and 408 on slab with edge beams (fig. 6)) (LEP = Diameter of loading plate)

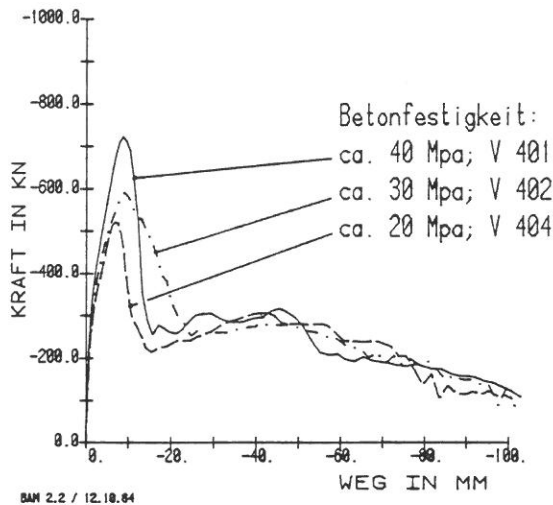


Bild 22: Einfluß der Betonfestigkeit auf den Durchstanzwiderstand von Stahlbetonplatten. Die Versuche wurden an Platten mit Randbalken (Bild 6) durchgeführt. (Lasteinleitungsplatte: $d = 16$ cm)

Fig. 22: Influence of concrete strength on the punching shear resistance of reinforced concrete slabs. The tests have been performed on slabs with edge beams (fig. 6). (Loading area: $d = 16$ cm)

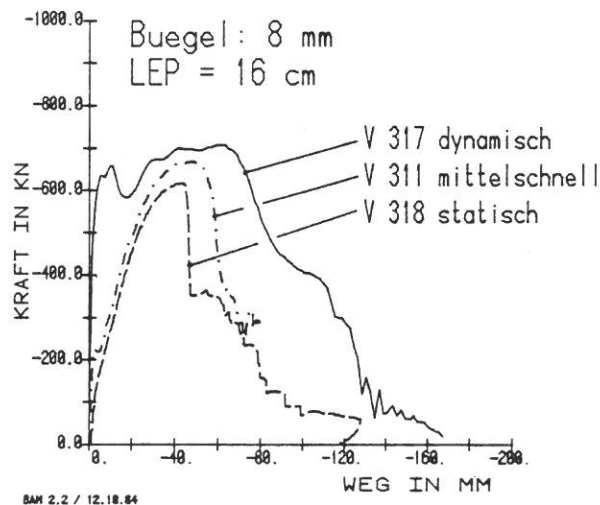


Bild 23: Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten von Stahlbetonplatten (22 cm dicke Platten mit Bügelbewehrung)

Fig. 23: Influence of rate of deformation on the mechanical behaviour of reinforced concrete slabs (22 cm thick flat slabs (fig. 5) with stirrups)

(3) Einfluß der Lasteinleitungsfläche

Die Kraft wurde in die quadratischen Stahlbetonplatten mittig über eine Kreisplatte aus Stahl eingeleitet. Je größer diese Lasteinleitungsplatte war, desto größer wurde die einleitbare Kraft. Unter Umständen konnte auf diese Art und Weise das Auftreten eines frühzeitigen (primären) Durchstanzens verhindert werden, wie es in Bild 21 dargestellt ist. An dieser Stelle sind die Ergebnisse der beiden Versuche 401 und 408 miteinander zu vergleichen, bei denen Stahlbetonplatten mit Randbalken ohne Bügelbewehrung untersucht wurden. Im Versuch 401 mit einer Lasteinleitungsplatte von 16 cm Durchmesser trat primäres Durchstanzens auf, noch bevor der volle Biege widerstand erreicht werden konnte /2/. An flachen

Stahlbetonplatten konnte vergleichbares beobachtet werden (s. /2/, Abschnitt 7.4).

(4) Einfluß der Betonfestigkeit

Bei der Beurteilung des Einflusses der Betonfestigkeit muß streng zwischen den verschiedenen Versagensmechanismen unterschieden werden.

- Bei primärem Durchstanzen, also bei geringen Biegedeformationen, spielt die Betonfestigkeit eine wesentliche Rolle für den erreichbaren Widerstand. Derartige Versuche konnten an Stahlbetonplatten mit Randbalken durchgeführt werden, Bild 22. Die häufig für die Interpretation verwendete Regel, daß der Durchstanzwiderstand mit der Wurzel der Betonfestigkeit ansteigt, steht mit den Ergebnissen nicht in Widerspruch.
- Bei sekundärem Durchstanzen ist dieser Einfluß bei Stahlbetonplatten mit Randbalkenplatten gering und er verschwindet fast bei flachen eckgestützten Stahlbetonplatten (/2/, Abschnitt 7.6).

(5) Einfluß der Bügelbewehrungsfläche

Durch Anordnung von Bügeln in der Stahlbetonplatte wird deren Widerstand gegen Querkraftbeanspruchung und damit auch gegen Durchstanzen stark angehoben. Maximal kann der Querkraftwiderstand bis zu der Grenze angehoben werden, die dadurch gegeben ist, daß unter der Lasteinleitungsfläche ein Zylinder herausgedrückt wird (Bild 18). Gegenüber dem Durchstanzversagen ist äußerlich der gleiche Effekt erreicht, der auch durch Vergrößerung der Lasteinleitungsfläche erreichbar ist, wie es Bild 21 zeigt.

(6) Einfluß der Biegebewehrung

Die Menge der Biegebewehrung wurde nur in Versuchen an Stahlbetonplatten mit Randbalken variiert, in denen die Biegedeformationen von Membrankräften überlagert werden. Der erwartete Effekt, daß der Biegewiderstand sich etwa proportional zur Fläche der eingelegten unteren Bewehrung verändert, trat nicht ein. Die Änderungen blieben wesentlich geringer (s. /2/, Abschnitt 9.2).

(7) Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit

Während alle zuvor dargestellten Phänomene auch bei geregelten statischen Versuchen zu erkennen sind, galt das wesentliche Interesse in den Untersuchungen dem Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit; denn aus anderen Untersuchungen war bekannt, daß Widerstand und Bruchverformung des Materials geschwindigkeitsabhängig sind /1/, /9/, /18/. In den experimentellen Untersuchungen an Stahlbetonplatten wurde zur Erkundung des Einflusses der Deformationsgeschwindigkeit jeweils mindestens eine von mehreren gleichartigen Platten unter statischen Bedingungen bis zum Versagen verformt. Geschwindigkeitseffekte mußten dann aus einem Vergleich von Ergebnissen aus Versuchen unter statischer und unter stoßartiger Beanspruchung gleichartiger Stahlbetonplatten hervorgehen, wenn zuvor die "Antwort" der Platte auf die Beanspruchung um die Massenträgheitseffekte reduziert worden war. Nur ein Versuch ist "mittelschnell" durchgeführt worden, nämlich mit einer Verformungsgeschwindigkeit, die erst unwesentlich Massenträgheitseffekte aktivierte, aber bereits Geschwindigkeitseinflüsse im Materialverhalten erkennbar werden läßt (Versuch 311 an einer flachen Stahlbetonplatte).

Die Änderung der Verformungsgeschwindigkeit führte zu den erwarteten Effekten: Der Biege widerstand flacher Stahlbetonplatten nahm um etwa den Betrag zu, zu dem sich die Fließgrenze des Betonstahls erhöht, wenn man die Ergebnisse statischer Versuche mit denen schnell ablaufender Versuche vergleicht (Bild 23). Auch die Bruchverformung nimmt zu. Aus den Versuchen an Stahlbetonplatten mit Randbalken kann für den Biege widerstand ähnliches gesagt werden. Wird bei derartigen Platten ohne Bügelbewehrung frühzeitig Durchstanzen als Versagensform maßgebend, so erhöht sich der Durchstanzwiderstand mit der Beanspruchungsgeschwindigkeit in etwa um den Betrag, um den auch die Betonfestigkeit als Folge der Beanspruchungsgeschwindigkeit zunimmt (Bild 24).

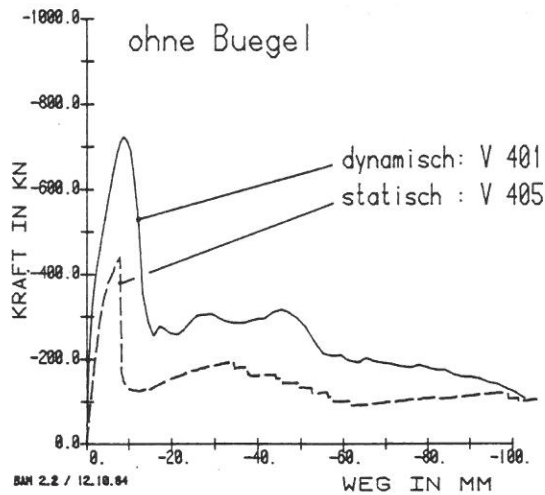


Bild 24: Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf den Durchstanzwiderstand von Stahlbetonplatten. In den beiden Versuchen 401 und 405 wurden Stahlbetonplatten mit Randbalken (Bild 6) ohne Bügelbewehrung zum einen statisch und zum anderen stoßartig ($v = 2 \text{ m/s}$ an der Lastangriffsstelle in Plattenmitte) beansprucht. (Lasteinleitungsfläche: $d = 16 \text{ cm}$, Betonfestigkeit $\beta_W = 40 \text{ MPa}$)

Fig. 24: Influence of rate of deformation on the punching shear resistance of reinforced concrete slabs. In the tests 401 and 405, there have been investigated two slabs with edge beams (fig. 6) without stirrups. They have been loaded statically (test 401) and impulsively (test 405, $v = 2 \text{ m/s}$ at loading point in the centre of the slab). (Loading area: $d = 16 \text{ cm}$, concrete strength $\beta_W = 40 \text{ MPa}$)

6.4 Ergebnisse der theoretisch-numerischen Analyse

(1) Untersuchungen zur mechanischen Modellabbildung und zur numerischen Simulation sind sowohl in der BAM als auch an anderen Stellen durchgeführt worden. Damit konnte eine breite Nutzung der Versuchsergebnisse erreicht werden, die in diesem Umfang in der BAM allein nicht möglich gewesen wäre. Im folgenden wird über die Arbeiten in der BAM und auch über die Ergebnisse aus anderen Instituten berichtet.

(2) Untersuchungen mit ADINA in der BAM:

Der Zielsetzung folgend, ein vielfältig eingesetztes Programmsystem zu verwenden, um die geplanten theoretisch-numerischen Untersuchungen durchzuführen, wurde auf das Programmsystem ADINA /46/ zurückgegriffen. Es konnte auf den Rechenanlagen der Technischen Universität Berlin, des Wissenschaftlichen Rechenzentrums Berlin (WRB) bzw. des Konrad Zuse-Zentrums für Informationstechnik Berlin (ZIB) (Cyber 175, Cyber 825, Cray) eingesetzt werden.

Das mechanische Verhalten von mehreren Balken, über die in /6/ berichtet worden ist, wurde numerisch auf der Grundlage derjenigen der Komponenten synthetisiert. Gewählt wurde eine Finite-Element-Diskretisierung aus Scheibenelementen, Bild 14. Die Möglichkeiten, die in ADINA geboten werden, auch endliche Verformungen zu berücksichtigen, sind in einzelnen Fällen genutzt worden. Die in ADINA implementierten Materialgesetze für Beton bei mehrdimensionaler Beanspruchung und Betonstahl wurden übernommen und Geschwindigkeitseffekte durch erhöhte Stoffkennwerte berücksichtigt. Dem üblichen Vorgehen folgend, wurde das System als ungedämpft angesehen, was auch mit den Ergebnissen aus Versuchen an Stahlbetonbalken mit starker Bewehrung übereinstimmt /6/.

Die auf diesem Wege erhaltenen Ergebnisse bestätigen, daß eine einfache Modellabbildung und Materialbeschreibung bereits ausreichend genau sein können, daß aber bestimmte Eingabeparameter sehr sorgfältig ausgewählt werden müssen. Für einen der Versuche mit stoßartiger Belastung /6/ sind die numerischen Ergebnisse in den Bildern 25 bis 28 wiedergegeben (Versuch Nr. 115).

(3) Als weitere Möglichkeit zur Berechnung von Stahlbetonbalken, basierend auf finiten Balkenelementen, erwies sich ein diskretisiertes Modell, das Grundlage des in Delft entwickelten Rechenprogramms DYNAMO ist /49/. Ergebnisse aus der Nachrechnung eines Stahlbetonbalkens aus den Versuchsreihen in der BAM zeigt Bild 29. Auch hierbei ist die Übereinstimmung zufriedenstellend. Geschwindigkeitseffekte im Materialverhalten sind berücksichtigt worden /60/.

(4) Das mechanische Verhalten von Stahlbetonplatten bei einer endochronen Materialbeschreibung hat Steberl berechnet, bezugnehmend auf Versuchsergebnisse im Vorhaben 150 460. Dabei wurde das als Grundsystem verwendete Programmsystem ADINA ganz wesentlich verändert und erweitert. Bis zum Einsetzen des sekundären Durchstanzens im Versuch, das sich einer sinnvollen Modellabbildung entzieht, hat sich ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ergeben /32/.

Wesentliche Angaben zu der Arbeit /32/ und einige Ergebnisse sind in den Bildern 30 und 31 wiedergegeben.

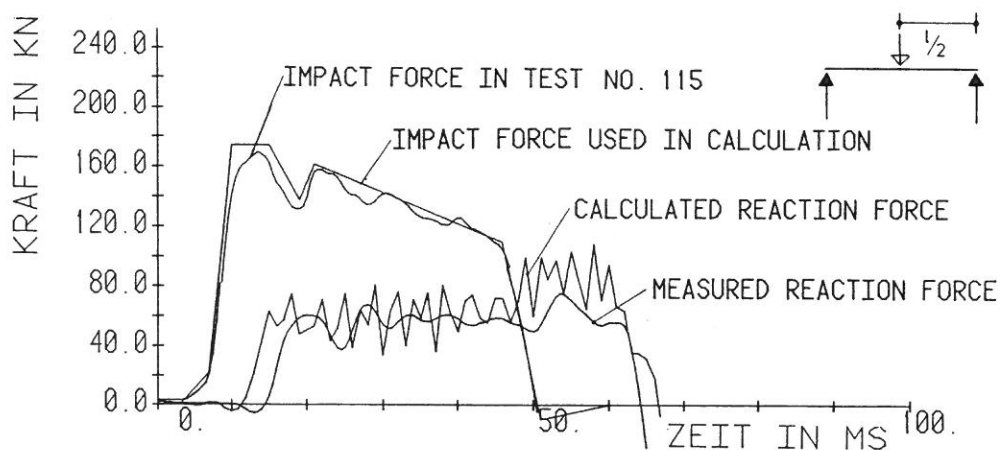


Bild 25: Numerische Analyse zum Balken-Versuch 115 /63/. Zeitlicher Verlauf der Kräfte an der Lastangriffsstelle in Balkenmitte und der Auflagerkräfte; Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Werte

Fig. 25: Numerical analysis of beam test 115 /63/. Time function of the forces at the middle of the beam (applied force) and at the supports; comparison of measured and calculated values

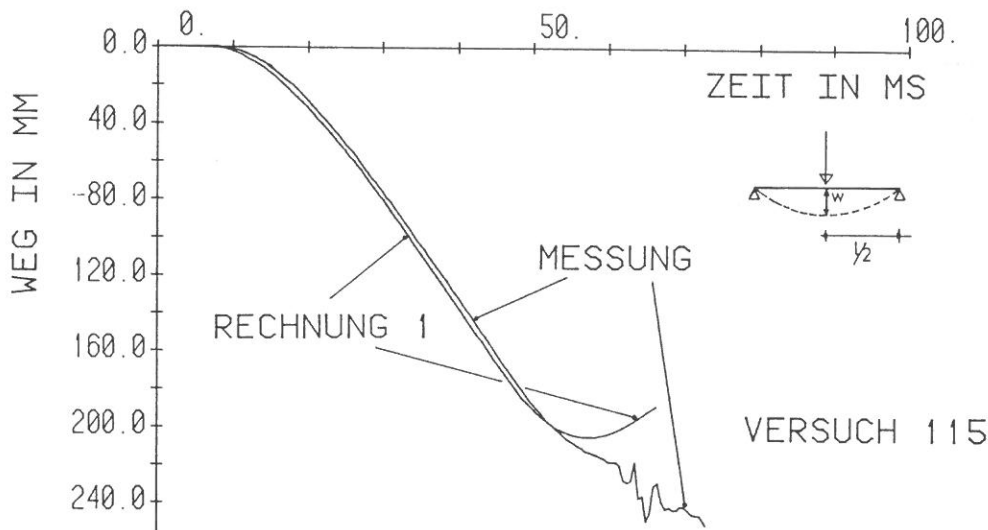


Bild 26: Numerische Analyse zum Balken-Versuch 115 /63/.
Zeitlicher Verlauf der Durchbiegung in Balkenmitte;
Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Werten

Fig. 26: Numerical analysis of beam test 115 /63/.
Time function of the deflection at midspan; comparison
of measured and calculated values

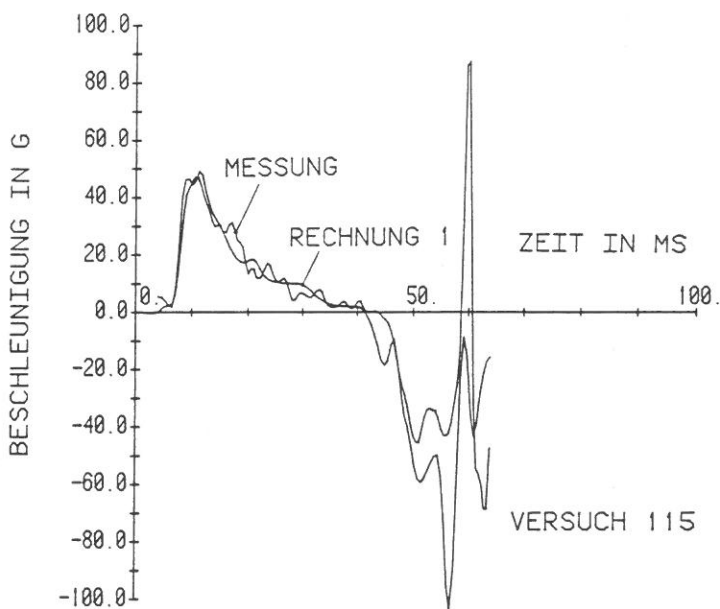


Bild 27: Numerische Analyse zum Balken-Versuch 115 /63/.
Zeitlicher Verlauf der Beschleunigung in Balkenmitte.
Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Werten

Fig. 27: Numerical analysis of beam test 115 /63/.
Time function of the acceleration at midspan. Comparison
of measured and calculated values

(5) Die Ergebnisse der Untersuchungen zur mechanischen Modellabbildung und zur numerischen Analyse, von denen an dieser Stelle nur einige beispielhaft erwähnt werden konnten und auf die in /3/ im einzelnen eingegangen ist, lassen erkennen, daß mit der Einbeziehung der Geschwindigkeitseffekte eine zufriedenstellende Übereinstimmung von Versuchsergebnissen und numerischen Resultaten erzielt werden kann.

Diese Übereinstimmung wird auch für die Deformationen des Systems erreicht, die bei großen Verformungen im plastischen Bereich außerordentlich sensibel auf Änderungen von Modellparametern reagieren.

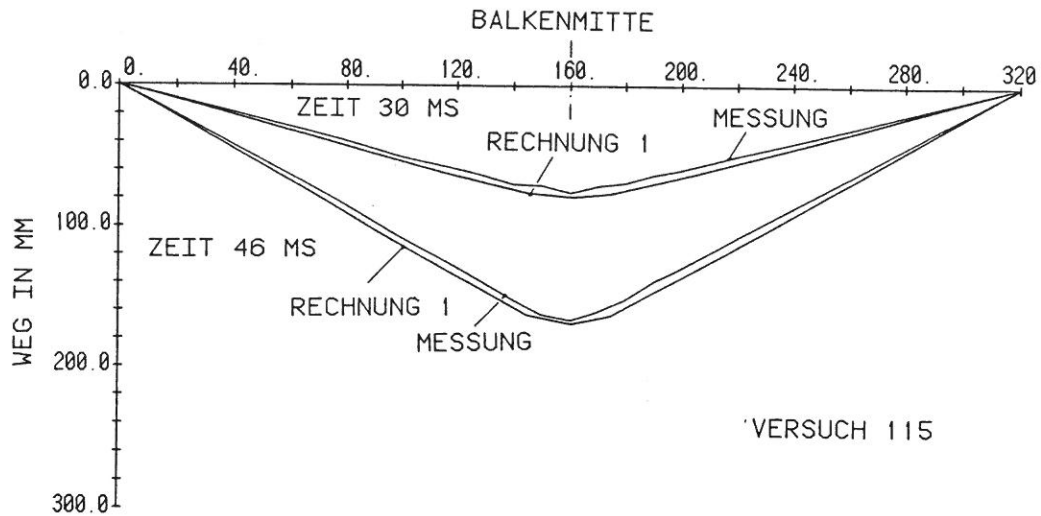


Bild 28: Numerische Analyse zum Balken-Versuch 115 /63/.
Gegenüberstellung der Durchbiegungslinien, die experimentell und rechnerisch ermittelt worden sind, zu zwei Zeitpunkten im Versuch

Fig. 28: Numerical analysis of beam test 115 /63/.
Measured and calculated deflection curves at two different moments during test

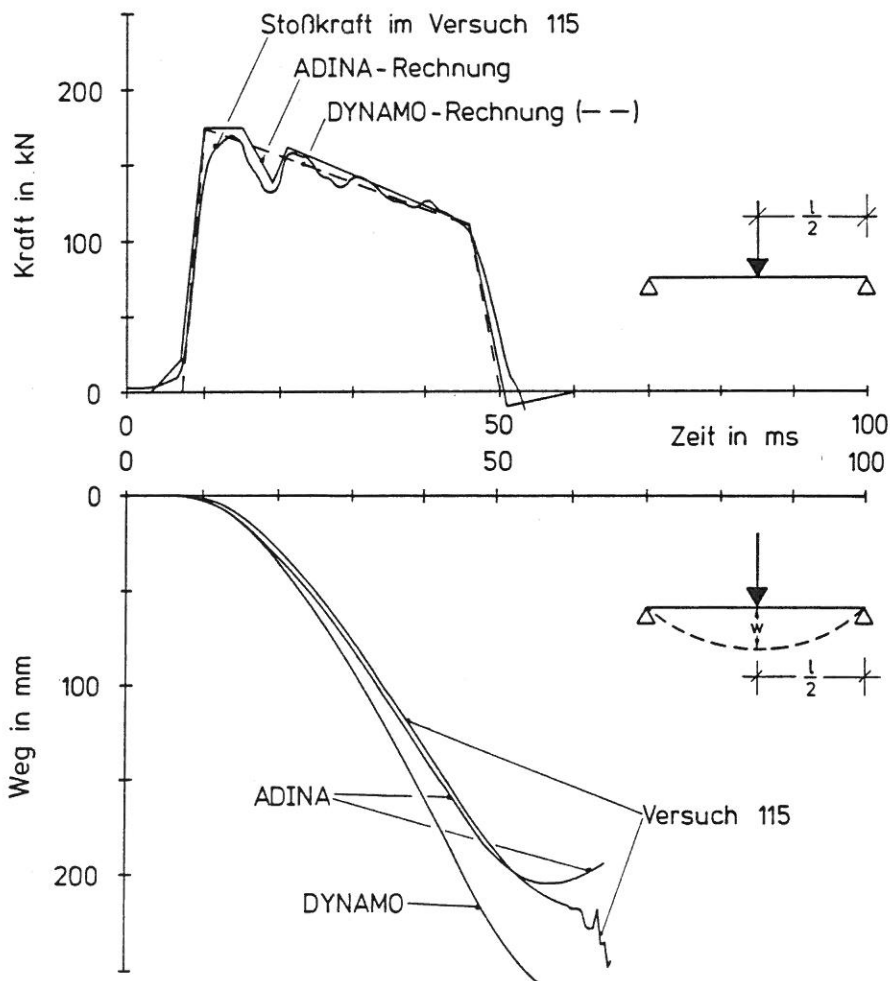


Bild 29: Numerische Analyse eines Balken-Versuchs mit DYNAMO. Gegenüberstellung von experimentell und rechnerisch ermittelten Ergebnissen /60/

Fig. 29: Numerical analysis of a beam test using DYNAMO. Comparison of experimentally and analytically obtained results /60/

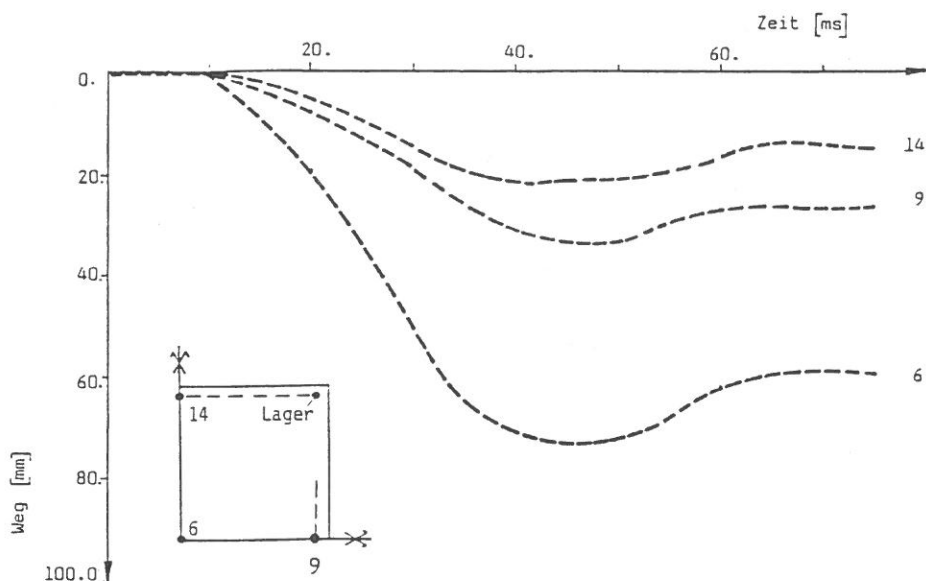


Bild 30: Numerische Analyse von Versuchen an Stahlbetonplatten. Durchbiegung der Platte zu verschiedenen Zeitpunkten; Gegenüberstellung von experimentell und rechnerisch ermittelten Kurven /32/

Fig. 30: Numerical analysis of tests on reinforced concrete slabs. Deflection of the slab for different moments during test. Comparison of experimentally and numerically obtained results /32/

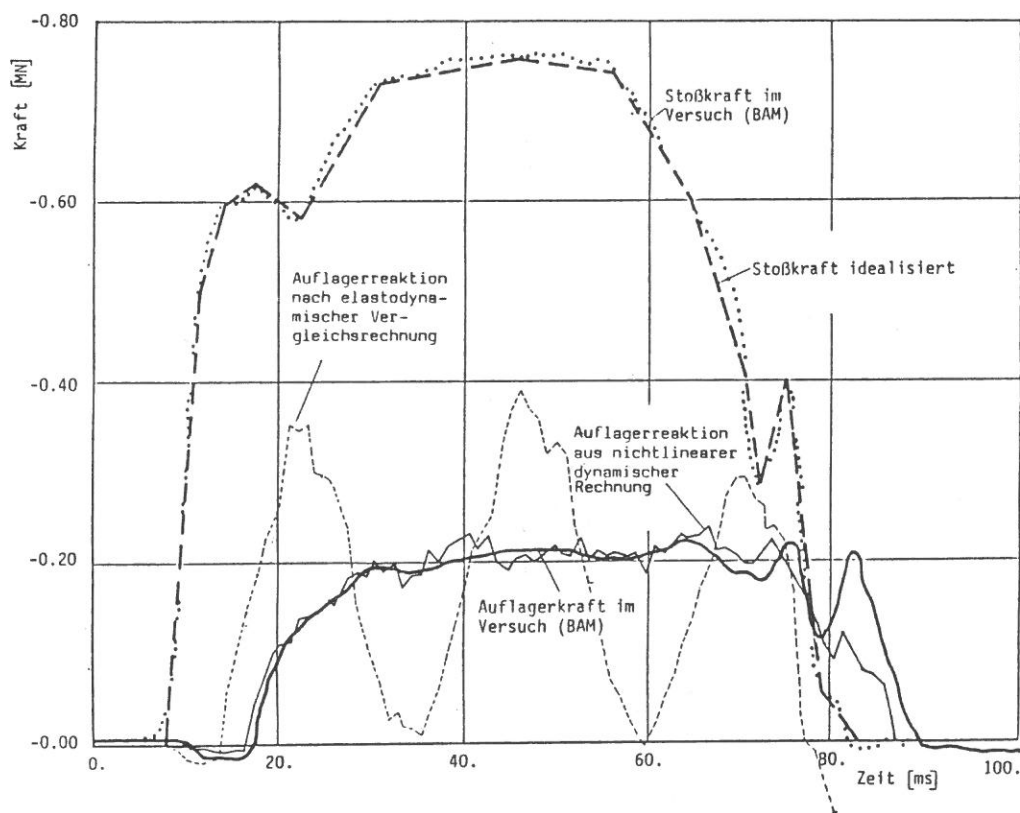


Bild 31: Numerische Analyse von Versuchen an Stahlbetonplatten. Zeitlicher Verlauf der Stoßkraft und der Verformungen in Plattenmitte und am Plattenrand. Gegenüberstellung experimentell und rechnerisch ermittelter Kurven /32/

Fig. 31: Numerical analysis of tests on reinforced concrete slabs. Time function of applying force and displacements in the slab centre and at one of the edges. Comparison of experimentally and analytically obtained results /32/

7. Folgerungen

Die Folgerungen haben sich auf zwei unterschiedliche Bereiche zu beziehen, auf die ingenieurwissenschaftlichen Erkenntnisse einerseits und auf die Sicherheitsbeurteilung von Kernkraftwerken unter den postulierten äußeren Einwirkungen andererseits.

Zunächst seien die ingenieurwissenschaftlichen Aspekte behandelt.

Bezüglich der Materialgesetze für Betonstahl, der bei großen plastischen Deformationen das Verhalten von Stahlbetonbauteilen bestimmt, hat sich herausgestellt, daß sich der Stahl in dem betrachteten Bereich der Dehngeschwindigkeit ($0,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ bis 10 s^{-1}) duktil verhält. Die Festigkeitskennwerte steigen mit der Dehngeschwindigkeit an (Fließgrenze, Zugfestigkeit). Dieser Effekt ist bei Betonstahl geringer Festigkeit stark ausgeprägt und verschwindet nahezu für hochfesten Betonstahl. Ein gleiches gilt für die Bruchverformung, ein Ergebnis der Untersuchungen, das neuartig ist. Für den kalt verformten Rippentorstahl (BSt 420/500 RK) ist der Einfluß der Dehngeschwindigkeit auf die Bruchverformung besonders stark ausgeprägt.

Die in der amerikanischen Regel ACI 349-76 /54/ angegebenen Werte für die Zunahme der Festigkeitskennwerte mit der Dehngeschwindigkeit sind weitgehend bestätigt worden /56/.

Für das mechanische Verhalten von Stahlbetonplatten bei intensiver örtlicher Belastung hat sich herausgestellt, daß die allgemein übliche Auslegung, indem die Biegebemessung und die Querkraftbemessung entkoppelt behandelt werden, bei großen Biegeverformungen nicht mehr zutreffen kann. Daher wurde neben dem (primären) Durchstanzen unter der Lasteinleitungsfläche ein "sekundäres" Durchstanzen definiert, das erst nach erheblichen plastischen Biegedeformationen einsetzt, wenn Biegerisse sich geöffnet haben und das durch diese Biegerisse phänomenologisch bestimmt wird. Bis zum Einsetzen des sekundären Durchstanzens scheint eine rechnerische Analyse möglich /32/.

Sowohl für Balken als auch für Platten aus Stahlbeton konnte das mechanische Verhalten bei intensiver Stoßbelastung theoretisch-numerisch zutreffend auf der Grundlage der mechanischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten Beton und Stahl ermittelt werden. Voraussetzung dafür war die Verwendung zutreffender Materialgesetze und einer dem Problem angepaßten Diskretisierung des Systems. Der Zielsetzung entsprechend wurden verschiedene Rechenprogramm-Systeme mit unterschiedlichen Modellabbildungen aktiviert. Die Resultate der Versuche und deren Dokumentation haben sich als ausgesprochen geeignet erwiesen, für die "Kalibrierung" von Programmsystemen herangezogen zu werden. Wie sich zeigte, kann bei intelligenter Handhabung mit jedem der Programmsysteme ein zuverlässiges Ergebnis erreicht werden.

Für Aussagen zu Fragen der Reaktorsicherheit ergibt sich damit, daß der Rückgriff auf statische Kennwerte für die Materialkenngrößen für die Sicherheits einschließungen aus Stahlbeton zu einer konservativen Abschätzung führt. Will man allerdings plastische Formänderungen der Stahlbetonkonstruktion aktivieren, um auch die Weiterleitung hochfrequenter Erschütterungen zu reduzieren, so sollte das tatsächliche Materialverhalten zugrunde gelegt werden. Insofern

können die Ergebnisse der Untersuchungen als Ergänzung der Kerntechnischen Regel KTA 2203 /23/ verstanden werden, in der auf die Geschwindigkeitseffekte ausdrücklich verwiesen wird.

Dank

Wenn das Forschungsvorhaben erfolgreich und mit neuen Erkenntnissen abgeschlossen werden konnte, so gebührt auch denen Dank, die zu diesem Erfolg mit beigetragen haben.

Von der Forschungsbetreuung der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) in Köln war uns über Jahre hinweg Herr Dr. K. Kollath ein interessierter und sachverständiger Partner. Die Berichte sind durch seine kritischen Bemerkungen bereichert worden.

Sehr fruchtbar gestaltete sich die Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der Hochtief AG, Abteilung Kerntechnischer Ingenieurbau, in Frankfurt: Herrn Dr.-Ing. W. Jonas, Herrn Dipl.-Ing. E. Rüdiger und Herrn Dipl.-Ing. H. Riech, mit Mitarbeitern der Technischen Universität Berlin: Herrn Dipl.-Ing. F. Emrich, Herrn Dipl.-Ing. G. Puffer unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Hees sowie mit Mitarbeitern der Universität Karlsruhe: Herrn Dr.-Ing. O. Henseleit, Herrn Dr.-Ing. Hehn und Herrn Dr.-Ing. Hoch.

Die Stahlbeton-Probekörper wurden in Berlin bei der Firma Engel & Leonhardt hergestellt, deren Mitarbeiter sich bereitwillig der ungewohnten Prozedur einer sehr akkuraten Probekörper-Herstellung mit empfindlichen Einbauten unterzogen.

Innerhalb der BAM haben uns verschiedene andere Abteilungen und Fachgruppen bei den Arbeiten unterstützt:

- Fachgruppe 2.1: "Mineralische Baustoffe" bei den Betonprüfungen
- Die Zentralwerkstatt hat viele Geräte und Teile für die Versuchseinrichtungen hergestellt. Sie haben alle ihre Funktion von Beginn an erfüllt und waren termingerecht zur Hand.
- Die Fotoabteilung hat immer schnell reagiert, wenn wir Aufnahmen brauchten, um Verzögerungen im Arbeitsablauf zu vermeiden. Die zahlreichen fotografischen Aufnahmen in den Berichten zeugen von der sachverständigen Tätigkeit in dieser Abteilung.

Den Mitarbeitern der Fachgruppe 2.2: Tragfähigkeit der Baukonstruktionen, soweit sie an den Arbeiten beteiligt waren, sei für ihre sachverständige und von Einsatzwillen getragene Arbeit gedankt; sie sind bereits am Beginn des Berichts genannt worden.

Der mühseligen Arbeit, die Berichte zu schreiben und die häufigen Korrekturen einzuarbeiten, haben sich mit viel Sorgfalt Frau E. Gowin und Frau K. Wuttig gewidmet; auch ihnen sei an dieser Stelle gedankt.

Literatur

- /1/ Brandes, K., Limberger, E., Herter, J. und Berner, K.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
- Zugversuche an Betonstählen mit erhöhter Dehngeschwindigkeit.
November 1986; Forschungsbericht 129 der BAM
- /2/ Limberger, E., Brandes, K. und Herter, J.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
- Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 2.
November 1986; Forschungsbericht 131 der BAM
- /3/ Herter, J.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen.
- Theoretisch-numerische Analyse des mechanischen Verhaltens von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung.
1987; Forschungsbericht der BAM
- /4/ Brandes, K., Limberger, E. und Herter, J.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
- Konzeption für geregelte Versuche, Versuchseinrichtung, Vorversuche an Stahlbetonbalken.
April 1983; Forschungsbericht 90 der BAM
- /5/ Brandes, K., Limberger, E. und Herter, J.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
- Versuche an Stahlbetonbalken mit Biegebewehrung aus Betonstahl
BSt 420/500 RK und BSt 1080/1320.
Dezember 1983; Forschungsbericht 99 der BAM
- /6/ Limberger, E., Brandes, K., Herter, J. und Berner, K.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
- Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 1
November 1986; Forschungsbericht 127 der BAM
- /7/ Herter, J., Brandes, K. und Limberger, E.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
- Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 1
November 1985; Forschungsbericht 119 der BAM
- /8/ Limberger, E., Brandes, K. und Herter, J.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
- Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 2
November 1986; Forschungsbericht 128 der BAM
- /9/ Brandes, K., Limberger, E. und Herter, J.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
- Das mechanische Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter statischer und stoßartiger Belastung. Abschlußbericht zum Vorhaben 1500 121.
Mai 1987; Forschungsbericht 140 der BAM
- /10/ Riech, H. und Rüdiger, E.:
Meppener Versuche II/11 bis II/22.
II. Technischer Bericht, Vorhaben 1500 408. Hochtief AG, Frankfurt/Main, 1985
- /11/ Rüdiger, E. und Riech, H.:
Experimental and Theoretical Investigations on the Impact of Deformable Missiles onto Reinforced Concrete Slabs.
Transactions, 7th Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, Chicago, Aug. 22-26, 1983, Vol. J, paper 78/3, pp. 387-394

- /12/ Jonas, W., Rüdiger, E., Gries, M., Riech, H. und Rützel, H.:
Kinetische Grenztragfähigkeit von Stahlbetonplatten.
IV. Technischer Bericht / Schlußbericht RS 165. Hochtief AG, Frankfurt/
Main 1984
- /13/ Henseleit, O., Hehn, K.-H., Hoch, A.: Grenztragfähigkeit von Stahlbetonbal-
ken bei großer Belastungsgeschwindigkeit.
Institut für Beton und Stahlbeton, Universität Karlsruhe, Januar 1980
- /14/ Hoch, A.:
Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbalken bei großer Belastungs-
geschwindigkeit.
Diss. Universität Karlsruhe (TH), 1983
- /15/ Hasse, T., Henseleit, O. und Hoch, A.:
Evaluation of Reinforced Concrete Beams under Impact Loading until Final
Failure.
/27/, pp. 472-487 (1982)
- /16/ Ammann, J.W.:
Stahlbeton- und Spannbetontragwerke unter stoßartiger Belastung.
Diss. ETH Zürich 1983
- /17/ Kieselbach, R.:
Zugversuche mit erhöhter Dehngeschwindigkeit.
Material und Technik 9 (1981), S. 76-84
- /18/ Brandes, K. und Limberger, E.:
Zur Beeinflussung der Festigkeitskennwerte von Betonstahl durch die Dehnge-
schwindigkeit.
Beton- und Stahlbetonbau 80 (1985), 90-94, 128-133
- /19/ RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren.
3. Ausgabe, Oktober 1981. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Köln
- /20/ Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus che-
mischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer
Festigkeit und induzierter Schwingungen sowie durch Sicherheitsabstände.
Bundesanzeiger Nr. 179 vom 22.9.1976
- /21/ Richtlinie für die Bemessung von Kernkraftwerken für außergewöhnliche Be-
lastungen (Erdbeben, äußere Explosionen, Flugzeugabsturz).
Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 6/1974, 175-181
- /22/ KTA 2202. Schutz von Kernkraftwerken gegen Flugzeugabsturz. Grundsätze
und Lastannahmen. Kerntechnischer Ausschuß (KTA)
Entwurf 1980
- /23/ KTA 2203. Schutz von Kernkraftwerken gegen Flugzeugabsturz. Auslegung der
baulichen Anlagen (bei vorgegebenen Lastannahmen). Kerntechnischer Aus-
schuß (KTA)
Entwurf Dezember 1983
- /24/ Langheim, H.:
Impactuntersuchungen an armierten Betonplatten.
Ernst-Mach-Institut, Freiburg, Okt. 1976 EMI-E 14/76 (siehe auch: Encyclo-
paedia Britannica (1960): Ballistics; Terminal Ballistics)
- /25/ RILEM-CEB-IABSE-IASS Interassociation Symposium: Concrete structures under
impact and impulsive loading. Berlin, June 2-4, 1982.
Introductory Report. BAM, Berlin, 1982.
Proceedings. BAM, Berlin, 1982.
Final Report. BAM, Berlin, 1983

- /26/ Introductory Report, /25/, BAM, Berlin 1982
- /27/ Proceedings, /25/, BAM, Berlin 1982
- /28/ Riera, J.D.:
A critical reappraisal of nuclear power plant safety against accidental aircraft impact.
Nuclear Engineering and Design 57 (1980), 193-206
- /29/ 12. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton,
März 1981, BAM, Berlin. Berichte
- /30/ Reinhardt, H.W.:
Zugfestigkeit von Beton unter stoßartiger Beanspruchung.
In: Eibl, J. (Hrsg.): Berichte zum Forschungskolloquium: Stoßartige Belastung von Stahlbetonbauteilen, Universität Dortmund, Sept. 1980
- /31/ Suaris, W. und Shah, S.P.:
Mechanical Properties of Materials Subjected to Impact.
/26/, pp. 33-62
- /32/ Steberl, R.:
Berechnung stoßartig beanspruchter Stahlbetonbauteile mit endochronen Werkstoffgesetzen.
Diss. TU Berlin, 1985 (auch: Werner-Verlag, 1986)
- /33/ Steberl, R.:
Modelling of Strain Rate Effect on Reinforcing Steel.
/27/, pp. 157-169
- /34/ Morgenstern, D. und Szabó, J.:
Vorlesungen über Theoretische Mechanik. Springer-Verlag, Berlin, 1961
- /35/ Ziegler, H.:
An Introduction to Thermomechanics.
North-Holland, Amsterdam, 1977
- /36/ Brandes, K.:
Strain rate effects appearing in the mechanical behaviour of reinforced concrete structures under impact load.
In: Mechanics of inelastic media and structures, ed. by O. Mahrenholtz and A. Sawczuk, Warszawa 1982. Proceedings of the Int. Symp. held in Warszawa, Sept. 8-11, 1978
- /37/ Seeger, A.:
Theorie der Gitterfehlstellen.
In: Handbuch der Physik, Springer-Verlag, Berlin 1955 (Hrsg.: S. Flügge), Bd. VII/1
- /38/ Valanis, K.C. und Lee, Ch.-F.:
Some recent developments of the endochronic theory with applications.
Nuclear Engineering and Design 69 (1982), 327-344
- /39/ Beyer, K.:
Die Statik im Stahlbetonbau.
2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1956
- /40/ Leonhardt, F.:
Vorlesungen über Massivbau. Teile 1 bis 4.
Springer-Verlag, Berlin 1974

- /41/ DIN 1045. Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung.
Ausgabe Dezember 1978. Beuth Verlag, Berlin und Köln 1978
- /42/ EUROCODE Nr. 2: Gemeinsame einheitliche Regeln für Betonbauwerke.
Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg/Brüssel 1978
- /43/ Brandes, K., Limberger, E. und Herter, J.:
Grenztragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen unter Stoßbelastung.
Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM),
Berlin 7 (1977), 149-152
- /44/ Perzyna, P.:
Fundamental Problems of Visco-Plasticity.
Advances in Applied Mechanics, Vol. 9. Academic Press, New York and London,
pp. 243-377 (1966)
- /45/ Bauer, J., Scharpf, F. und Schwarz, R.:
Analysis of Reinforced Concrete Structures Subjected to Aircraft Impact
Loading.
7th Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, Chicago, Aug.
22-26, 1983, Vol. J, paper J 9/4, pp. 423-430
- /46/ Bathe, K.-J.:
ADINA - A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Non-
linear Analysis.
MIT, Cambridge, Mass., Rep. 82448-1 (1978)
- /47/ Rossi, M. und Bazzi, G.:
Two simple reinforced concrete beams elements for static and dynamic
analysis.
IABSE-Colloquium: Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Delft, 1981.
Final Report
- /48/ Kusters, G.M.A., Nauta, P. und de Witte, F.C.:
DIANA - a comprehensive, but flexible finite element system.
4th Int. Sem. on Finite Element Systems, Southampton, July 6-8, 1983
- /49/ Van der Veen, C. und Blaauwendraad, J.:
Dynamic elasto-plastic model for reinforced concrete members.
HERON 28, No. 1 (1983)
- /50/ Einfeldträger unter dynamischer Belastung.
Programme für elektronische Rechenanlagen, Nr. 121, Dyckerhoff & Widmann,
München, 1975
- /51/ Nachtsheim, W. und Zinn, R.:
Displacements and Vibration Transfer Referring to Meppen Slab Tests.
/27/, pp. 516-533 (1982)
- /52/ Tätigkeitsbericht 1982 der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM),
Berlin (1983)
- /53/ Ammann, W., Mühlematter, M. und Bachmann, H.:
Zugversuche an Bewehrungs- und Spannstahl mit erhöhter Dehngeschwindig-
keit.
Birkhäuser Verlag, Basel 1982
- /54/ ACI 349-76. Code requirements for nuclear safety related concrete struc-
tures.
ACI-Journal, Feb. 1977

- /55/ Sawczuk, A. und Jaeger, Th.A.:
Grenztragfähigkeitstheorie der Platten.
Springer-Verlag, Berlin 1963
- /56/ Brandes, K.:
Design of reinforced concrete structures against impact and impulsive loading.
12th Int. Congr. IABSE, Vancouver, Sept. 3-7, 1984, Final Report, p. 927
- /57/ Ammann, W., Mühlematter, M. und Bachmann, H.:
Untersuchungen über das Bruch- und Verformungsverhalten stoßbelasteter Stahlbeton- und Spannbetontragwerke.
In: J. Eibl (Hrsg.): Berichte zum Forschungskolloquium "Stoßartige Belastung von Stahlbetonbauteilen, Dortmund, Sept. 1980
- /58/ Plauk, G.:
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl.
Forschungsbericht 59 der BAM, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, 1979
- /59/ Stangenberg, F.:
Shock induced response of structural systems. Analytical and experimental investigations.
ANAIIS/Proceedings, Conference on Structural Analysis and Design of Nuclear Power Plants, Porto Alegre, Oct. 3-5, 1984. Vol. III, pp. 87-98
- /60/ Van der Veen, C.:
Analysis dynamic loaded beams.
Unveröffentlichtes Manuskript 1984
- /61/ Wittwer, H.-J.:
Die kritische Zuggeschwindigkeit und ihre Bedeutung zur Kennzeichnung des Werkstoffverhaltens bei stoßartiger Belastung.
Materialprüfung 15 (1973), S. 1-10
- /62/ Krabiell, A. und Dahl, W.:
Zum Einfluß von Temperatur und Dehngeschwindigkeit auf die Festigkeits- und Dehnungskennwerte von Baustählen unterschiedlicher Festigkeit.
Archiv für das Eisenhüttenwesen 52 (1981), S. 437-444
- /63/ Emrich, F., Herter, J. und Puffer, G.:
Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams under Impact Load.
/27/, S. 455-471 (1982)
- /64/ Emrich, F., Herter, J. und Puffer, G.:
Ein Konzept zur rechnerischen Analyse stoßbelasteter Stahlbetonbalken in Anbindung an Versuchsergebnisse.
Beton- und Stahlbetonbau 80 (1985), S. 60
- /65/ Emrich, F., Herter, J. und Puffer, G.:
Nichtlineare zweidimensionale Finite-Element-Analyse von Stahlbetonbalken unter Stoßeinwirkung.
Beton- und Stahlbetonbau 80 (1985), S. 329-335
- /66/ Herter, J., Limberger, E., und Brandes, K.:
Experimental and Numerical Investigations of Reinforced Concrete Structural Members Subjected to Impact Load.
In: Design of Concrete Structures - The Use of Model Analysis, ed. by J.L. Clarke, F.K. Garas and G.S.I. Armer. Elsevier Appl. Sc. Publ., London/New York 1985

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

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

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972 (vergriffen)

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin
Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

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

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

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

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonischem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

- Nr. 40/Juni 1976
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Oktob er 1976
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Oktob er 1976
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 43/Oktob er 1976
Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zähspädrem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler
- Nr. 47/Juni 1977
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Oktob er 1977
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzöhner
- Nr. 49/Dezember 1977
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski
- Nr. 51/Juni 1978
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld
- Nr. 52/August 1978
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov
- Nr. 53/Oktob er 1978
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrman n und Reinald Rudolphi
- Nr. 54/Oktob er 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk .
- Nr. 60/August 1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmatrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rucker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Drucklastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/November 1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/November 1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/November 1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/November 1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/April 1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/September 1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rucker
- Nr. 79/Dezember 1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann

- Nr. 80/Dezember 1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/Dezember 1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/April 1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski
- Nr. 83/Juli 1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/Juli 1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Okttober 1982
Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ — Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonteilen
Konzeption für geregelte Versuche
Versuchseinrichtung
Vorversuche an Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Okttober 1983
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonteilen
Versuche an Stahlbetonbalken mit Biegebewehrung aus Betonstahl BSt 420/500 RK und BSt 1080/1320
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Okttober 1984
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Okttober 1984
Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Okttober 1984
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985
Zur Wirkung der Schrumpfbinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985
Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützwow
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungsrißkorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985
Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Okttober 1985
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Okttober 1985
Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn

Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Oktober 1985

Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung

Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler

Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/November 1985

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I

von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/April 1986

Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung

von Dr.-Ing. Andreas Hecht

Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/Juni 1986

Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung

von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/Juli 1986

Entsorgung kerntechnischer Anlagen

von J. Mischke
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste

Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/Juli 1986

Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase

von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch

Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/Juli 1986

Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung

von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas

Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/Juli 1986

Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks

von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst

Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/August 1986

Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen

von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/November 1986

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I

Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I

von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner

Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/November 1986

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II

Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II

von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner

Nr. 129/ISBN 3-88 314-569-6/November 1986

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load

Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit

Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates

von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner

Nr. 130/ISBN 3-88 314-570-X /November 1986

Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 131/ISBN 3-88-314-585-8/November 1986

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load

Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II

Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II

von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 132/ISBN 3-88-314-595-5/Januar 1987

Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen

von Dipl.-Ing. Christian Herold und Dipl.-Ing. Frank-Ulrich Vogdt

Nr. 133/ISBN 3-88 314-609-9/Januar 1987

Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe

von Dipl.-Ing. Mathias Woydt und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 134/ISBN 3-88 314-615-3/Februar 1987

Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen

von Dr. Götz Andreae und Gottfried Niessen

Nr. 135/ISBN 3-88 314-618-8/Februar 1987

Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen

von Dipl.-Ing. Jörg Ludwig, Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Mischke und Dipl.-Ing. Armin Ulrich

Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/April 1987

Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau

von Prof. Dr. rer. silv. Hans-Joachim Deppe und Klaus Schmidt

Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/Mai 1987

Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Komponentensicherheit

Projektleiter: Dr. Dietmar Aurich

Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/Mai 1987

Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.

von Dipl.-Geol. Michael Dogunke und Dr.-Ing. Frank Buchhardt

Nr.139/ISBN 3-88314-658-7/Juni 1987

Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle.

von Dipl.-Ing. Jürgen Olschewski und Sven-Peter Scholz

Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/Juni 1987

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/Oktober 1987

Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken

von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Götz Magiera und Dr.-Ing. Friedrich Mathiak

Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/Oktober 1987

Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen

von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Ing. Günter Krüger, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Dr. rer. nat. Sigrid von Zahn-Ullmann

Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/November 1987

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung

Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load

von/by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/November 1987

Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes

von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Michael Weber,

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Dr.-Ing. Jürgen Altes,

Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)

Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/November 1987

Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften

von Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhner

Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/November 1987

Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks

von Dipl.-Ing. Wolfgang Schön und Dipl.-Ing. Michael Mallon