

**INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG**

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

**ZUM TRAG- UND VERFORMUNGSVERHALTEN
VON STAHLBETONPLATTEN UNTER
PARTIELLER BRANDBEANSPRUCHUNG**

von
Jürgen Wiese

Heft 84 · BRAUNSCHWEIG · 1988

ISBN 3-89288-031-X
ISSN 0178-5796

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Wiese, Jürgen:

Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter partieller Brandbeanspruchung / von Jürgen Wiese. Inst. für Baustoffe, Massivbau u. Brandschutz d. Techn. Univ. Braunschweig, Amtl. Materialprüfanst. für d. Bauwesen. - Braunschweig : Inst. für Baustoffe, Massivbau u. Brandschutz, 1988

(Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig ; H. 84)

Zagl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1988

ISBN 3-89288-031-X

NE: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

<Braunschweig>: Institut für Baustoffe, ...



Diese Arbeit ist die vom Fachbereich für Bauingenieur-
und Vermessungswesen der Technischen Universität Braun-
schweig genehmigte Dissertation des Verfassers.

Eingereicht am : 18.01.1988

Mündliche Prüfung am : 30.06.1988

Berichterstatter : Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.H. Karl Kordina

Berichterstatter : Prof. Dr.-Ing. Ulrich Quast

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig.

Der Initiative des langjährigen Institutsleiters, Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl Kordina, ist die besondere Förderung der Brandschutzforschung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft zu verdanken, die über 15 Jahre den Sonderforschungsbereich (SFB) 148 "Brandverhalten von Bauteilen" finanziell förderte. Prof. Kordina erkannte die Fülle offener Fragen zum hier behandelten Themenkreis und ermöglichte in seiner Funktion als Sprecher des SFBs intensive wissenschaftliche Untersuchungen auch zum Brandverhalten flächenartiger Stahlbetonbauteile.

Frau Dipl.-Ing. Krampf hat sich ständig für die Koordination der von verschiedenen wissenschaftlichen Mitarbeitern zu erbringenden Teilleistungen eingesetzt; erst durch ihr Wirken konnte die umfassende Gesamtleistung des Teilprojektes A2 effektiv erreicht werden. Die guten Arbeitsbedingungen und das kameradschaftliche Arbeitsklima während des Bestehens des SFB 148 sind ganz entscheidend auch auf ihr ausgleichendes, vermittelndes Wesen zurückzuführen. Hierfür und für manchen Zuspruch in kritischen Arbeitsphasen möchte ich mich bei Frau Krampf herzlichst bedanken.

Die eigene Arbeit baut auf den Untersuchungen von Walter /8/ auf und bezieht zusätzlich zur Scheibenwirkung auch das Plattenverhalten von brandbeanspruchten Deckenfeldern in die Betrachtungen mit ein.

Während der eigenen experimentellen Arbeiten leitete Wesche /3/ aus anderen Versuchen ein Rechenverfahren auf der Grundlage der Bruchlinien-theorie ab, mit dem der günstige Einfluß praxisherechter Lagerungsbedingungen auf die Tragfähigkeit brandbeanspruchter Stahlbetonplatten näherungsweise erfaßt werden kann.

Parallel zur eigenen theoretischen Arbeit wurde unabhängig davon von Kiel /12/ das Finite-Element-Programm "FIPSE" und die dazu benötigten,

speziellen Rechengesetze für das Verhalten von Beton unter hohen Temperaturen entwickelt. Vorrangiges Ziel seiner Arbeit ist die theoretische Auseinandersetzung mit geometrischen Nichtlinearitäten im Bauteilverhalten.

Erste Auswertungen der eigenen Versuchs- und Rechenergebnisse deuteten darauf hin, daß der Membranspannungszustand, der sich sofort nach dem Beginn eines Brandes einstellt und dann im beflamten Plattenbereich zu einem Lastabtrag über Gewölbewirkung führt, die Tragfähigkeitsdauer und die Tragwirkung bestimmt. Auf dieser Annahme wurde zunächst ein Tragmodell entworfen, das aber nach weitergehenden Untersuchungen schweren Herzens wieder aufgegeben werden mußte. Starke Biegeverformungen der Platte führen zu Normalkraftentspannungen im Feldbereich und leiten den Abbau der Gewölbewirkung in weiten Bereichen ein. Erneute Schnittkraftumlagerungen treten auf und können bei günstigen Randbedingungen zu einer Erhöhung der Biegesteifigkeit führen. Zwangdruckkräfte aus behinderter Längsausdehnung sind in der Lage, die Biegezugzone zu überdrücken und das Bauteil quasi vorzuspannen.

Dieser Phase des Tragverhaltens von Stahlbetonplatten während eines Normbrandes ist die vorliegende Arbeit gewidmet.

Zunächst verhinderten Konvergenzschwierigkeiten bei der iterativen Rechnung, das Geschehen über den einsetzenden Tragfähigkeitsverlust der inneren Druckgewölbe hinaus zu verfolgen. Daraufhin durchgeführte Modifikationen der Rechenannahmen bezüglich des Betonverhaltens unter biaxialen Druckbeanspruchungen und hohen Temperaturen brachten erst nach Abschluß der Ehm'schen Warmkriechversuche /23/ einigen Erfolg bei der rechnerischen Begleitung der Brandversuche. Insgesamt ist die Bedeutung dieser Rechenfunktionen für das prinzipielle Erkennen der wesentlichen Abläufe jedoch erheblich überschätzt worden.

Eine intensive Auseinandersetzung mit den statischen Randbedingungen der untersuchten Platten brachte den ersehnten Arbeitsfortschritt. Das recht lange, kritikarme Festhalten an der Vorstellung, mit den richtig erkannten Druckgewölben allein müßten sich die teilweise extrem langen Tragfähigkeitsdauern gezwängter Stahlbetonplatten erklären lassen, hat die Arbeit entscheidend verzögert.

Da die genauen Versuchsbedingungen und Rechenannahmen die Untersuchungsergebnisse entscheidend beeinflussen, wird in der vorliegenden Arbeit diesen Gesichtspunkten verstärkt Rechnung getragen. Die angewendeten Verfahren werden in hohem Maße kritisch beleuchtet und die erzielten Resultate einer ebenfalls kritischen Bewertung unterzogen. Einer leichtfertigen Verallgemeinerung einzelner Ergebnisse durch den Leser dieser Arbeit wird durch die deutliche Benennung notwendiger Bedingungen vorgebeugt. Es hat sich gezeigt, daß aufgrund von Versuchsergebnissen allein allgemeingültig formulierte Aussagen mit einer unbefriedigenden Unsicherheit behaftet sein können. Erst die gleichzeitige, sorgfältige Betrachtung von Versuchs- und Rechenergebnissen läßt abgesicherte Deutungen zu. Die ausführliche, über das wissenschaftlich notwendige Maß teilweise hinausgehende, Darstellung wichtiger Details soll es dem Leser erleichtern, aufgrund eigener Gedanken zu evtl. anderen Schlußfolgerungen zu gelangen. Somit können vom Leser subjektive Eindrücke des Autors bei der Deutung von Beobachtungen besser erkannt werden.

Geprägt von den Ereignissen von Tschernobyl und Sandoz aus der jüngeren Vergangenheit liegt mir das Offenhalten einer wissenschaftlichen Diskussion so sehr am Herzen, daß ich bewußt auf eine komprimiertere Ausdrucksweise verzichtet habe. Besonders wichtige Einschränkungen werden an verschiedenen Stellen genannt, um auch solche Leser zu erreichen, die sich nur für Teile der Arbeit interessieren.

Den Herren em. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Kordina und Prof. Dr.-Ing. Quast möchte ich herzlich für die Berichterstattung danken. Beide Herren förderten stets die Selbständigkeit und Eigenverantwortlichkeit, die ich für meine Arbeit aufbringen mußte. Herr Prof. Dr.-Ing. Ahrens, der mir als Lehrer im Studium das Verständnis für die statischen Zusammenhänge und die Grundlagen für die numerischen Methoden vermittelte, war als Prüfer und Herr Prof. Dr.-Ing. Hossler als Vorsitzender Mitglied der Prüfungskommission. Ihnen allen danke ich nicht zuletzt für die äußerst angenehme Atmosphäre bei der mündlichen Prüfung.

Aus dem Kreis der Kollegen erhielt ich manche wertvolle Anregung. Stellvertretend seien hier Frau Dipl.-Ing. Krampf und Herr Dr.-Ing. Richter genannt.

Mein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des Instituts, die sich bei der Durchführung der Versuche stets als zuverlässige Kollegen erwiesen haben. Gemeinsam mit den Herren Ario, ABmann, Krok und Kuphal konnten zahlreiche technische Probleme gelöst werden.

Für die Mitarbeit bei der Darstellung von Meßwerten, den Programmierarbeiten und dem Anfertigen von Zeichnungen danke ich Fräulein Schultze und den Herren Bluhm, Dankers, Fulele, Holsten, Leistner, Neuhof und Viertel.

Zwei Voraussetzungen waren für das Gelingen dieser Arbeit besonders erforderlich: die Kraft, um sich für den unbequemen, schwereren Weg entscheiden zu können, und das Vertrauen darauf, bei Rückschlägen und Niederlagen nicht allein und verloren zu sein.

Für die daraus gewonnene innere Ruhe und Sicherheit danke ich ganz besonders herzlich meinen Eltern.

Braunschweig,
am Tage, als in einem Großfeuer
auf der Ölplattform "Piper Alfa" vor der schottischen Küste
vermutlich über 160 Menschen umgekommen sind,
den 7. Juli 1988

Jürgen Wiese

ZUM TRAG- UND VERFORMUNGSVERHALTEN VON STAHLBETONPLATTEN UNTER PARTIELLER BRANDBEANSPRUCHUNG

Kurzfassung

Im Brandfall wird i. d. R. nur ein Teil einer Gesamtkonstruktion direkt vom Feuer beansprucht, während der Rest kalt bleibt. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie diese kalten Bereiche das Brandverhalten des beflamnten Teils einer Geschoßdecke aus Stahlbeton beeinflussen. Dabei liegt das Schwergewicht des Interesses auf der wirklichkeitsnahen Erfassung der Dehnbehinderung, die dadurch entsteht, daß die kalten Teile das thermisch bedingte Ausdehnungsbestreben des heißen Plattenbereiches teilweise behindern.

Im experimentellen Teil werden Brandversuche an Großbauteilen (5m * 5m große Stahlbetonplatten) durchgeführt und ausgewertet; im theoretischen Teil wird ein Rechenprogramm auf der Basis Finiter Elemente entwickelt, angewendet und die Rechenergebnisse diskutiert.

Sowohl die Experimente als auch das Rechenprogramm werden streng als Modelle verstanden, welche die Wirklichkeit bestenfalls gut annähern können. Daher müssen sich beide Untersuchungsmethoden gegenseitig ergänzen, kontrollieren und bestätigen. Die Wirklichkeitsnähe der Modelle wird in Frage gestellt, diskutiert und beschrieben.

Die Untersuchungen haben bestätigt, daß die Schnittgrößen aus Zwang

- * die Tragfähigkeitsdauer des heißen Teils einer partiell beflamnten Stahlbetonplatte gegenüber einer ungezwängten Platte wesentlich erhöhen können und dabei
- * die Bedeutung der Stahlbewehrung gegenüber den Verhältnissen bei Raumtemperatur erheblich reduzieren.

Einerseits konnte ein hoher Wirkungsgrad schon geringster Zwängungen belegt werden, andererseits macht die u. a. damit erkannte hohe Empfindlichkeit des Bauteilverhaltens gegenüber solchen Zwängungen eine Übertragung von Erkenntnissen auf andere Situationen schwierig. Allgemeingültige Aussagen werden dennoch als Beurteilungshilfe für Fälle der Brandschutzpraxis in einem festgelegten Gültigkeitsbereich formuliert.

	<u>Inhaltsverzeichnis</u>	I
	<u>Literaturverzeichnis</u>	VI
	<u>Bezeichnungen</u>	X
<u>1.</u>	<u>Einleitung</u>	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung.....	4
1.3	Bisherige Arbeiten.....	6
1.4	Eigener Lösungsweg.....	12
<u>2.</u>	<u>Planung und Durchführung von Bauteilversuchen</u>	14
2.1.	Ziele der experimentellen Untersuchungen.....	14
2.2	Realisierung der Verformungsbehinderung im Versuch Beschreibung des Versuchsstandes.....	15
2.3	Untersuchte Bauteile.....	18
2.4	Versuchsvorbereitung und -durchführung.....	20
2.4.1	Alterung der Versuchskörper.....	20
2.4.2	Einbau der Platten in den Versuchsstand.....	21
2.4.3	Brandbeanspruchung und Versuchabbruch.....	21
2.4.4	Festlegung des Grades der Dehnbehinderung.....	23
2.5	Versuchsparameter.....	28
2.5.1	Allgemeines.....	28
2.5.2	Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen.....	29
2.5.3	Übersicht über die Standard-Versuche.....	30
2.6	Systematik der Versuchsauswertung.....	31
2.6.1	Allgemeines.....	31
2.6.2	Berücksichtigung der Materialkennwerte für Beton und Stahl	31
2.6.3	Bewertung der tatsächlich wirksamen Dehnbehinderung.....	32
2.6.3.1	Dehnbehinderung an den Widerlagerseiten.....	32
2.6.3.2	Einfluß der Pressen-Neigung bei großen Randverdrehungen...	32

3.	<u>Experimentelle Untersuchungen</u>	39
3.1	Allgemeines.....	39
3.2	Auswirkung der Mindesthaltekraft und des Randbalkens.....	42
3.3	Wirkung der Zwängung an den Seitenmitten.....	46
3.3.1	Allgemeines.....	46
3.3.2	Durchbiegungsentwicklung bei unterschiedlicher Zwängung..	46
3.3.3	Zwangkraftentwicklung bei unterschiedlicher Zwängung.....	48
3.3.4	Bedeutung der einzelnen Pressen für den Versuchsablauf...	52
3.3.5	Auswirkung der Schiefstellung der Zwang-Pressen.....	54
3.4	Auswirkung einer teilweisen Dehnbehinderung.....	56
3.4.1	Allgemeines.....	56
3.4.2	Einfluß einer schwachen Dehnbehinderung.....	56
3.4.3	Einfluß einer stärkeren Dehnbehinderung.....	60
3.4.4	Zusammenfassung.....	67
3.5	Auswirkung einer vollständigen Dehnbehinderung.....	68
3.5.1	Allgemeines.....	68
3.5.2	Vergleich mit teilweisen Dehnbehinderungen.....	68
3.6	Die partiell beflamnte Platte.....	70
3.6.1	Allgemeines und Zielsetzung.....	70
3.6.2	Versuchskörper.....	72
3.6.3	Versuchsbeobachtungen.....	74
3.6.3.1	Zwangbeanspruchung am Rand des beflamnten Plattenfeldes..	74
3.6.3.2	Verformungen des Randes.....	78
3.6.3.3	Verformungen des beflamnten Plattenfeldes.....	80
3.6.3.4	Bauteiltemperaturen.....	82
3.6.3.5	Rißbildung.....	82
3.6.4	Erkenntnisse aus diesem Versuch.....	85
3.7	Resumee aus den Versuchen.....	89
3.7.1	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	89
3.7.2	Nachrechenbarkeit der Versuche und offene Fragen.....	92

4.	<u>Rechenmodell</u>	94
4.1	Aufgaben und Ziele der Berechnungen.....	94
4.2	Vorüberlegungen zur Wahl des Rechenmodells.....	96
4.3	Beschreibung des gewählten Rechenmodells.....	98
4.3.1	Das finite Platten-Scheiben-Element.....	98
4.3.2	Berücksichtigung geometrischer Nichtlinearitäten.....	104
4.3.2.1	Gleichgewicht am verformten System.....	104
4.3.2.2	Berücksichtigung großer Rotationen.....	106
4.3.3	Das Iterationsverfahren.....	108
4.3.4	Programmstruktur.....	110
4.4	Rechenwerte des Materialverhaltens.....	112
4.4.1	Allgemeines.....	112
4.4.2	Thermische Dehnung.....	116
4.4.3	Beschreibung des Betonverhaltens.....	117
4.4.3.1	Mechanische Werkstoffeigenschaften.....	117
4.4.3.2	Grundform der Arbeitslinie für Beton.....	120
4.4.3.3	Beispiele für Spannungs/Dehnungs-Beziehungen.....	123
4.4.3.4	Rißbildung.....	126
4.4.4	Beschreibung des Stahlverhaltens.....	128
4.5	Kritische Bewertung des Rechenprogramms.....	129

5.	<u>Rechnerische Untersuchungen</u>	133
5.1	Allgemeines.....	133
5.2	Analyse des Plattensystems S 1/86.....	134
5.2.1	Diskretisierung der Struktur.....	134
5.2.2	Verifizierung des Programms durch Versuchsnachrechnung... 136	136
5.2.2.1	Allgemeines.....	136
5.2.2.2	Vergleich von Weggrößen.....	136
5.2.2.3	Vergleich von Kraftgrößen.....	140
5.2.2.4	Rißbildung.....	142
5.2.2.5	Dehnungen im kalten Bereich.....	144
5.2.2.6	Beurteilung der Programmverifikation.....	145
5.2.3	Schnittgrößenumlagerungen partiell brandbeanspruchter Platten.....	147
5.2.3.1	Gleichgewicht an Elementgrenzen.....	147
5.2.3.2	Momentenumlagerungen.....	151
5.2.3.3	Normalkraftumlagerungen.....	156
5.2.4	Diskussion der Ergebnisse.....	157
5.3	Parameterstudie am System S 1/86.....	160
5.3.1	Verminderte Stützbewehrung.....	160
5.3.2	Erhöhte Dehnbehinderung bei geringerer Stützbewehrung... 166	166
5.3.2.1	Allgemeines.....	166
5.3.2.2	Starre Widerlager unmittelbar am freien Rand.....	168
5.3.2.3	Starre Widerlager am Rand eines 10 m breiten Betonstreifens.....	177
5.4	Rechnerische Begleitung der Standard-Versuche.....	184
5.4.1	Allgemeines.....	184
5.4.2	Ungezwängte Quadratplatten.....	184
5.4.3	Minimal aber exzentrisch gezwängte Quadratplatten.....	187
5.4.4	Weggesteuert gezwängte Quadratplatten.....	191
5.4.4.1	Verformungen bei verschiedenem Umfang der Zwängung.....	191
5.4.4.2	Verlauf von Normalkräften im beflamten Teil.....	192
5.4.4.3	Verlauf der Momente im beflamten Teil.....	197
5.4.5	Wirklichkeitsnähe der Versuchsanordnung.....	199

6.	<u>Zusammenfassung und kritische Bewertung der Arbeit</u>	200
6.1	Zusammenfassung.....	200
6.2	Verallgemeinerung der Ergebnisse.....	202
6.3	Ausblick und wünschenswerte weitere Arbeiten.....	204

Literaturverzeichnis

- / 1/ Kordina, K. Stahlbetondurchlaufkonstruktionen unter Feuer-
Wesche, J. angriff bei Varrierung von Stahlart und -güte
der Biegezugbewehrung im Stützbereich,
Abschlußbericht des Instituts für Baustoffkunde
und Stahlbetonbau der Technischen Universität
Braunschweig (Mai 1979), im Auftrag
des Innenministers des Landes Nordrhein-
Westfalen (Az. VB1 - 72.02 Nr. 40.73)
- / 2/ Bechthold, R. Brandversuche Lehrte
Ehlert, K.-P. Schriftenreihe "Bau- und Wohnforschung"
Wesche, J. des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen
und Städtebau, Heft 0.4.037, 1978
- / 3/ Wesche, J. Brandverhalten von Stahlbetonplatten
im baupraktischen Einbauzustand,
Dissertation, Technische Universität
Braunschweig, 1985
- / 4/ Wiese, J. Pilotversuche zum Brandverhalten von Stahlbeton-
platten unter besonderen Versuchsbedingungen,
Beitrag im Arbeitsbericht 1984-86
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1987
- / 5/ DTU Document Technique Unifie:
Methode de prevision par le calcul du comparte-
ment au feu des structures en beton, 1980
- / 6/ Issen, L.A. Fire Tests of Concrete Members.
Gustaferrero, A.W. An Improved Method for Estimating
Carlson, C.C. Thermal Restraint Forces,
ASTM Sp. Technical Publication, 1970
- / 7/ Abrams, M. S. Simulation of Realistic Thermal Restraint
Lin, T. D. During Fire. Tests of Floor and Roof Assemblies
Portland Cement Association, Skokie USA, 1980

- / 8/ Walter, R. Partiiell brandbeanspruchte Stahlbetondecken
Berechnung des inneren Zwanges mit einem
Scheibenmodell
Dissertation, TU-Braunschweig, 1981
- / 9/ Klein, D. Benutzeranleitung für das Programmsystem
Kristjansson, R. DUPLA (dünne Platten)
Mehlhorn, G. Heft 45 des Inst. f. Massivbau der TH-Darmstadt
- /10/ Nizamuddin, Z. Thermal and Structural Analysis of Reinforced
Concrete Slabs in Fire Conditions.
University of California, Berkeley, 1976
- /11/ Armaghani, A The Failure of Reinforced Concrete Beams
and Slabs Subjected to Fire.
Imperial College of Science and Technologie,
London, 1976
- /12/ Kiel, M. Nichtlineare Berechnung ebener Stahlbeton-
flächentragwerke unter Einschluß von Brand-
beanspruchung,
Dissertation, TU-Braunschweig, 1987
- /13/ Wiese, J. Weiterentwicklung des FE-Programms PLAFEU
zur Berechnung von Stahlbetonplatten im Brand,
Beitrag im Arbeitsbericht 1984-86
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1987
- /14/ Krampf, L. Die Brandversuchsanlage für flächenartige
Bauteile mit Verformungsbehinderung,
Beitrag im Arbeitsbericht 1978-80
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1980
- /15/ Krampf, L. Planungsgrundlagen für einen Horizontalrahmen
zur Prüfung brandbeanspruchter, verformungs-
behinderter flächenartiger Tragwerke,
Beitrag im Arbeitsbericht 1975-77
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1977

- /16/ Wiese, J. Brandversuche an quadratischen Stahlbetonplatten
- Grundgedanke, Durchführung und Überblick,
Beitrag im Arbeitsbericht 1984-86
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1987
- /17/ Walter, R. Stahlbeton - Flächentragwerke unter
Klingsch, W. partieller Brandbelastung,
Beitrag im Arbeitsbericht 1975-77
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1977
- /18/ Zienkiewicz, O. The Finite Element Method in Eng. Science
McGraw-Hill, London, 1971
- /19/ Kristjansson, R. Physikalisch und geometrisch nichtlineare
Berechnung von Stahlbetonplatten
mit Hilfe Finiter Elemente,
Dissertation, TH-Darmstadt, 1977
- /20/ Zurmühl, R. Matrizen, Springer Verlag, Berlin 1964
- /21/ Wiese, J. Der Einfluß der Belastung
auf das Brandverhalten von Stahlbetonplatten,
Beitrag im Arbeitsbericht 1984-86
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1987
- /22/ Ehm, C. Versuche zur Festigkeit und Verformung von
Beton unter zweiachsialer Beanspruchung und
hohen Temperaturen,
Dissertation, TU-Braunschweig, 1986
- /23/ Ehm, C. Ergebnisprotokoll biaxialer Warmkriech-
untersuchungen,
unveröffentlicht, persönlich überreicht 1985
- /24/ Richter, E. Beschreibung des Subroutinenpakets SDL-T
Scharf, T. und des Programms PSDL-T,
Schmidtke, F. Inst. für Baustoffe, Massivbau u. Brandschutz
der TU-Braunschweig, 1986

- /25/ Wiese, J. Dokumentation der Plattenversuche
Beitrag im Endbericht
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1987
- /26/ Kordina, K. Untersuchungen zum Trag- und Verformungs-
Krampf, L. verhalten punktförmig gestützter Platten bei
Normbrandbeanspruchung unter Berücksichtigung
des Sonderfalles Vorspannung ohne Verbund,
Forschungsantrag an die Deutsche Forschungs-
gemeinschaft, TU - Braunschweig, 1986
- /27/ Selvaggio, S. Restraint in Fire Tests of Concrete Floors
Carlson, C. C. and Roofs,
Research and Development Laboratories of the
Portland Cement Association, Research Department
Bulletin 220, 1966
- /28/ Schneider, U. Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der
Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen,
Habilitationsschrift, TU Braunschweig, 1979
- /29/ Richter, E. Spannungs/Dehnungs-Linien zur Berechnung des
Trag- und Verformungsverhaltens von Kontstruk-
tionsbauteilen unter Feuerangriff,
Beitrag im Arbeitsbericht 1984-86
des SFB 148 der TU Braunschweig, 1987
- /30/ Wiese, J. Die Stahlbetonplatte als Tragwerksausschnitt im
Brand - Versuchsergebnisse und Rechenverfahren,
Beitrag zum Abschlußkolloquium des SFB 148:
"Bauwerke unter Brandeinwirkung" am 19./20.3.87
an der TU Braunschweig
- DIN 1045 "Beton- und Stahlbeton: Bemessung und Ausführung",
Ausgabe Dezember 1978
- DIN 4102 "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen",
Teil 2, Ausgabe September 1979;
Teil 4, Ausgabe März 1981

Bezeichnungen (soweit nicht im Text erklärt)Geometrische Größen

x, y, z	kartesische Koordinaten
u, v, w	Verschiebungen in x-, y-, z-Richtung
φ_x, φ_y	Neigung bzw. Rotation in x-, y-Richtung
e	Exzentrizität, Abstand in pos. z-Richtung von m
m	Platten-Mittenebene
L	Länge bzw. Stützweite
D	Plattendicke
S	Schwerpunkt

Vektoren und Matrizen

<u>B</u>	Zusammenhang zw. Verformungen und Dehnungen
<u>D</u>	Werkstoffmatrix: ebener Zustand
<u>K</u>	Steifigkeit
<u>P</u>	Belastung
<u>rho</u>	Weggrößen
<u>sig</u>	Spannungszustand in der Platten/Scheiben-Ebene
<u>eps</u>	Dehnungszustand in der Platten/Scheiben-Ebene

Materialkenngrößen

σ	Spannung
ϵ	Dehnung
E	Elastizitäts-Modul
β_p	Prismen-Druckfestigkeit des Betons
β_s	Streckgrenze des Stahls
QDZ und m_y	Querdehnzahl
α_{σ}	Verhältnis der Hauptspannungen: σ_1 / σ_2
α_{ϵ}	Verhältnis der Hauptdehnungen: ϵ_1 / ϵ_2

Indices

L, NL	linearer, nichtlinearer Zusammenhang
Ki	Stabilitätsversagen
U	Bruch, Versagen
' _x 'y	partielle Ableitung in x-, y-Richtung
' _n	partielle Ableitung normal zur Elementgrenze
0	Anfangs-, Ursprungs-....
1, 2	Hauptwerte
S	Sekantenwerte
PS	Platten/Scheiben-Kombination
SP	Scheiben/Platten-Kombination
th	thermisch
g	gesamt
sig	spannungserzeugend

Allgemeine Größen

T	Temperatur (°C)
ΔT	Temperaturdifferenz (K)
g	gleichmäßig verteilte Dauerlasten (Eigengewicht)
p	gleichmäßig verteilte Nutzlasten (Plattenlast)

Abkürzungen

AL	Arbeitslinie = Spannungs/Dehnungs-Linie
BE	Bezugsebene
DBH	Dehnbehinderung
Exz. = e	Exzentrizität
SDL	Spannungs/Dehnungs-Linie = Arbeitslinie
SFB	Sonderforschungsbereich
WKV	Warmkriechversuch

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Ein Brand in einem großflächigen, mehrstöckigen Gebäude ereignet sich i.a. im Bereiche von räumlich begrenzten Abschnitten. Darum wird lediglich ein Teil der Gesamtkonstruktion direkt vom Feuer betroffen, und die restlichen Bauelemente bleiben praktisch kalt. Die Begrenzung der Brandausbreitung kann gegeben sein durch die Verteilung der Brandlasten, durch konstruktive Maßnahmen des baulichen Brandschutzes oder auch durch Feuerlöschmaßnahmen.

Die erwärmten Bauteile wollen sich ausdehnen. Bei der örtlichen Begrenzung der Brände werden einerseits die direkt beflamten Bauteile an der Ausdehnung von den angeschlossenen Bauteilen behindert, d. h. gezwängt und somit anders beansprucht als in den Normbrandversuchen, andererseits erfahren die nicht erwärmten Bauteile Zwangbeanspruchungen aus dem Verformungsbestreben der heißen Teile. Die Zwängungen können das Verhalten der betroffenen Bauteile erheblich verändern.

Wird eine Stahlbetonplatte im Brandfall einseitig von unten erwärmt, so entstehen im allgemeinen mit der Branddauer stetig zunehmende Durchbiegungen. In der Anfangsphase eines Brandes ist diese Verformungszunahme vorwiegend abhängig vom zunächst ständig ansteigenden Unterschied zwischen den Temperaturen an der Plattenober- und der Plattenunterseite, später bewirkt zusätzlich die temperaturabhängige Materialerweichung fortschreitende Durchbiegungen. Nun sind höhere spannungserzeugende Dehnungen erforderlich, um für die äußeren Schnittgrößen aus der Belastung ein Gleichgewicht zu erhalten. Schließlich wird das Bauteilversagen eingeleitet, wenn bei ständig weiter steigender Temperaturerhöhung das Material nicht mehr die Festigkeit besitzt, um für das Gleichgewicht der Kräfte aus den äußeren Lasten die erforderlichen Spannungen entwickeln zu können. Bei statisch bestimmt gelagerten Biegebauteilen ist in der Regel der Versagensmoment erreicht, wenn die Streckgrenze der auf Biegezug beanspruchten Stahlbewehrung auf den Wert der vorhandenen Zugspannung gesunken ist.

In dieser Arbeit wird der Einfluß von solchen Zwangsschnittgrößen auf das Brandverhalten von Stahlbetonplatten untersucht, welche im Brand-

fall durch die Behinderung von Verformungen entstehen. Während eines Brandes werden die Schnittgrößen aus den äußeren Lasten überlagert von Zwangsschnittgrößen und wegen sich ständig ändernder Steifigkeiten finden laufend **Schnittkraftumlagerungen** statt. Das Schwergewicht dieser Arbeit liegt bei den **Auswirkungen teilweise behinderter Längenänderungen auf das Trag- und Verformungsverhalten** von Platten aus Stahlbeton.

Bei statisch bestimmt gelagerten Bauteilen ruft die Temperaturbeanspruchung keine Zusatzkräfte an den Auflagern hervor; diese Bauteile können sich durch Verformungen einer Zwangskraftbildung entziehen. Ist die freie Verformbarkeit jedoch durch eine statisch unbestimmte Lagerung behindert, so rufen die örtlich unterdrückten Verformungsanteile im gesamten Bauwerk Zwangsschnittgrößen hervor. Durch die Behinderung von freien Rotationen (z. B. an Zwischenauflagern von durchlaufenden Mehrfeldsystemen) entstehen primär Zwangsmomente und durch eine Behinderung der freien Ausdehnung (z. B. durch starre Widerlager) entstehen vorwiegend Zwangnormalkräfte. Diese Zwangsschnittgrößen überlagern das Gleichgewicht aus den äußeren Lasten. Verformungen können diese Zwangsschnittgrößen reduzieren. Bei nur teilweise dem Brand ausgesetzten Systemen können auch Querschnitte im nicht direkt beflamten, weniger verformungsfreudigen (steiferen und spröderen) Bereich des Systems versagen.

Die Auswirkungen von Zwangsmomenten aus einer Temperaturbeanspruchung auf das Verhalten von Zweifeld-Plattenstreifen wurden z. B. 1975 von KORDINA/WESCHE /1/ untersucht. Es hat sich im Versuch bestätigt, daß über dem Zwischenaufleger die negativen Stützmomente anwachsen und der Momentennullpunkt weiter in das Feld vorrückt (Bild 1.1). Solche Schnittkraftumlagerungen können brandschutztechnisch sinnvoll genutzt werden und die Ergebnisse speziell dieses Forschungsvorhabens /1/ haben sich sogar auf die deutsche Brandschutznormung ausgewirkt. **Rotationsbehinderungen können nach WESCHE /3/ die Tragfähigkeitsdauer von ungezwängten Biegebauteilen um ca. 15 Minuten erhöhen.**

Normalkräfte aus behinderter Längsdehnung sind bei brandbeanspruchten Platten im baupraktischen Einbauzustand stets zu erwarten, denn ein in ein Gesamtgebäude integrierter erwärmter Deckenteil wird im allgemeinen an seinen Rändern von den ihn umgebenden Bauteilen daran gehindert, sich frei entsprechend seiner thermischen Beanspruchung auszu-

dehnen. Über Auflagerlinien durchlaufender Platten liegt die Resultierende der aus diesem Zwang entstehenden Druckspannungen unterhalb der Schwerlinie des Plattenquerschnittes und erzeugt damit neben der Kraftwirkung gleichzeitig ein Zwangmoment, das das Stützmoment aus den äußeren, von oben angreifenden Lasten reduziert. Diese Rotationsbehinderung ist als Folgeerscheinung einer Dehnbehinderung im Gegensatz zu der zuvor angesprochenen weniger stark abhängig von der Bewehrung im betrachteten Querschnitt (Bild 1.3). Von der Größe der Exzentrizität dieser Zwangkräfte hängt in entscheidendem Maße die Auswirkung auf das Verformungsverhalten des brandbeanspruchten Plattenausschnittes ab. Während die Normalkraft (Druck) wegen des Gleichgewichtes am verformten System solche Zusatzmomente bildet, die die Durchbiegung beschleunigen, wirkt das Randmoment dem entgegen. Für eine wirklichkeitsnahe Beurteilung von Gesamttragwerken fehlen z. Zt. auf systematischen Untersuchungen beruhende Erkenntnisse über das Zusammenwirken von Zwangmomenten und Zwangkräften bei Deckenplatten.

1.2 Zielsetzung

Hauptziel dieser Arbeit ist die Beschreibung des Zusammenwirkens kalter und beflammer Teile einer teilweise von einem Brandereignis betroffenen Geschoßdecke. Dabei ist gleichzeitig die Platten- und die Scheibenwirkung des Flächentragwerkes zu berücksichtigen und der erhebliche Einfluß der Temperatur auf die Materialeigenschaften zu beachten.

Die Bedeutung der Zwangwirkungen für das Trag- und Verformungsverhalten der unmittelbar vom Feuer angegriffenen Teile wird experimentell belegt: **Schon eine mäßige Dehnbehinderung kann die Tragfähigkeitsdauer einer Platte um Stunden verlängern.** Dieser Effekt wird in dieser Arbeit eingehend und systematisch untersucht; evtl. kann er in Zukunft planmäßig bei der Konzeption eines Gebäudes berücksichtigt werden.

Da auch bei tatsächlichen Brandfällen mit extrem langen Branddauern Deckeneinstürze nur selten vorkommen, müssen Tragmechanismen wirksam werden, die unabhängig von den zur Zeit in Deutschland in der Brandschutznormung berücksichtigten Parametern funktionieren. Diese Tragmechanismen werden ergründet und damit eventuell einer ökonomischen Nutzung nähergebracht. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Erfassung der angesprochenen Zwängungswirkungen.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die tatsächlichen Zusammenhänge werden mit den Bestimmungen der deutschen Brandschutznormung verglichen und diskutiert.

1.3 Bisherige Arbeiten

An dieser Stelle werden die Erkenntnisse ausschließlich derjenigen vorausgegangenen Arbeiten vorgestellt, die für die eigene Arbeit wichtige Grundlagen geschaffen haben. Dies ist daher kein umfassender Überblick über das Schrifttum zum behandelten Thema.

Momentenumlagerungen im Brandfall

Brandversuche mit unerwartet frühem Bauteilversagen waren für KORDINA/WESCHE der Anlaß, den Mechanismus der **Umlagerung der Momentenbeanspruchung im Brandfall** an Zweifeld-Plattensteifen bei reiner äußerer Biegebeanspruchung näher zu untersuchen und aus den Erkenntnissen Vorschläge für eine verbesserte Bewehrungsführung zu erarbeiten /u. a. 1/. Die obenliegende Stützbewehrung kann das Entstehen von Zwangmomenten und darüber die Tragfähigkeitsdauer erheblich beeinflussen:

Im Brandfall wachsen die negativen Biegemomente über dem Mittelaufleger an und die positiven Feldmomente werden abgebaut. Reicht die obenliegende Bewehrung über den inneren Auflagern bei durchlaufenden Mehrfeldkonstruktionen nicht weit genug in die Felder hinein, um die Beanspruchung aus der im Brandfall hochwandernden Momentenlinie aufnehmen zu können, so entsteht ein Riß (Gelenk) am Ende der Stützbewehrung (Bild 1.1, Fall "b") noch bevor das Fließmoment über dem Mittelaufleger erreicht ist und ein plötzlicher Systemwechsel zu einem weniger tragfähigen statisch bestimmten System ist die Folge. Durch eine Verlängerung der Stützbewehrung kann die tragfähigkeitssteigernde Wirkung der Stützbewehrung erhöht werden; der kritische Querschnitt liegt dann direkt über dem Zwischenaufleger (Bild 1.1, Fall "a").

Bei Verwendung von BSt 420/500 für die obenliegende Bewehrung bildet sich über dem Zwischenaufleger ein plastisches Gelenk, während oben verlegte Baustahlgewebematten aus BSt 500/550 bei der hohen Beanspruchung reißen können (hohe lokale Dehnung, geringe Gleichmaßdehnung, hervorragender Verbund), was dann vorzeitig das Systemversagen herbeiführen kann. Dieser Versagensmechanismus ist bei Zweifeld-Plattenstreifen im Brandversuch beobachtet worden /1/. Die brandschutztechnische Bemessung geht aber davon aus, daß während der gesamten Brand-

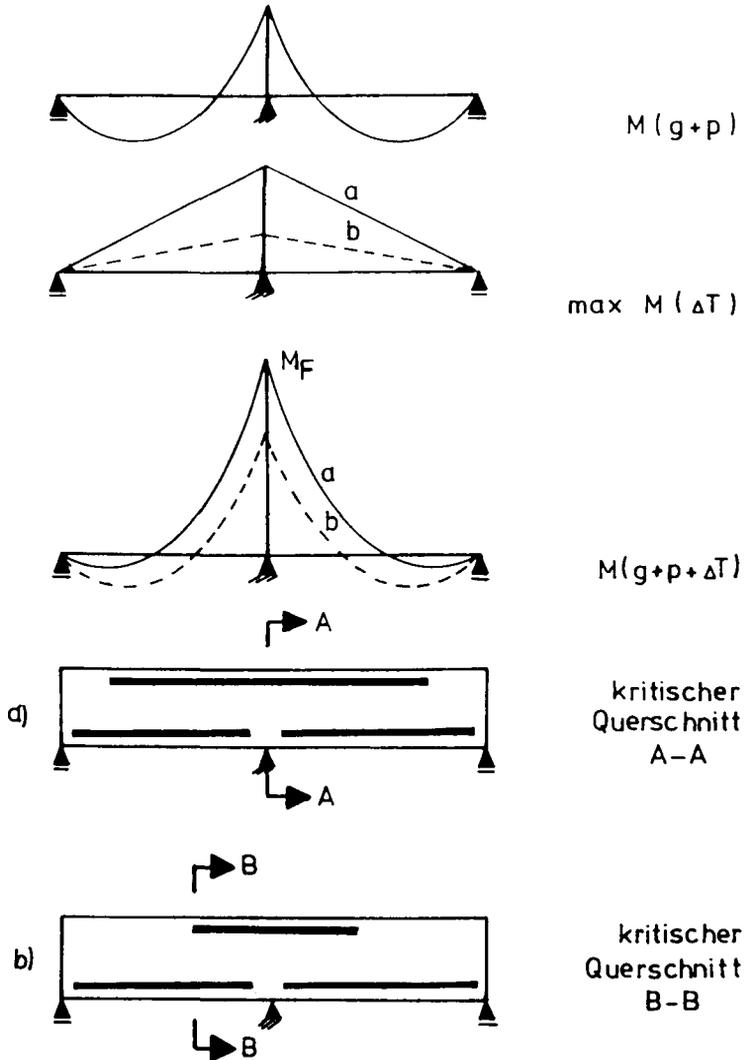


Bild 1.1: Einfluß der Stützbewehrung auf mögliche Umlagerungen von Momenten und die Lage kritischer Querschnitte im Brand

dauer vor dem Erreichen der Feuerwiderstandszeit über der Mittelstütze das Stützmoment aus der "kalten" Bemessung wirkt und die Momentenbeanspruchung der Felder auch im Brandfall entlastet. Durch ein Querschnittsversagen über der Mittelstütze werden die Biegemomente aus äußerer Last zu Ungunsten der Felder umgelagert und wegen dieser Überbeanspruchung tritt dann mit dem Fließen der unteren Feldbewehrung das Systemversagen vorzeitig ein.

Die obenliegende Mattenbewehrung aus BSt 500/550 kann über der Mittelstütze zerreißen, weil die hervorragenden Verbundeigenschaften der relativ dünnen, gerippten kalten Stäbe die plastischen Verformungen auf einen eng begrenzten Bereich konzentrieren. Die im Vergleich zu Bewehrungsstäben aus BSt 420/500 mit üblichen Durchmessern wesentlich geringeren Gleichmaßdehnungen der Stäbe von Baustahlgewebematten aus BSt 500/550 können reißen. Dann entstehen einzelne klaffende Risse. Für ein so eingeleitetes Bauteilversagen ist neben der Gleichmaßdehnung und dem Verbund auch der Bewehrungsgehalt entscheidend.

Hinsichtlich der Stahlart werden in der DIN 4102 keine Anforderungen gestellt, so daß im Regelfall bei flächenartigen Bauteilen des Hoch- und Industriebaus geschweißte Baustahlmatten aus BSt 500/550 verwendet werden. Ein Zerreißen dieser Stützbewehrung über den Auflagerlinien vierseitig gelagerter Platten wird in /1/ als unwahrscheinlich angenommen und bei der Formulierung von Konstruktionsempfehlungen ausgeschlossen, weil durch die Plattenwirkung bei mehrseitig aufgelegten Platten die Verformungen gegenüber denen eines Plattenstreifens drastisch vermindert werden. Neuere eigene Experimente /Kap. 3/ zeigen allerdings, daß sich diese optimistische Annahme so nicht uneingeschränkt aufrechterhalten läßt.

Ausländische Entwurfsrichtlinien /5/ verlangen an dieser Stelle teilweise die Verwendung von glattem Stahl I, der sowohl eine höhere Bruchdehnung als auch ein sehr viel schlechteres Verbundverhalten hat als der gerippte und kaltverformte Stahl IV der Baustahlgewebematten. Bei Anwendung dieser Richtlinie ist ein Zerreißen der Stützbewehrung im Brandfall praktisch ausgeschlossen.

Ebenso wie bei den entsprechenden Zweifeld-Plattenstreifen des o. g. Forschungsvorhabens /1/ ist bei den "Brandversuchen Lehrte" /2/ an einem viergeschossigen modernen Wohnblock beobachtet worden, daß sich

bei einachsig gespannten aber vierseitig gelagerten Durchlaufplatten aus Stahlbeton Risse am Ende der oberen Stützbewehrung eingestellt haben (Bild 1.1, Fall "b"). Bei all diesen Platten wurden keine besonderen brandschutztechnischen Regeln zur Festlegung der Stützbewehrung beachtet. Weitere Risse verliefen entlang den zur planmäßigen Tragrichtung parallelen Auflagerlinien. Im Gegensatz zu den Plattenstreifen von /1/ ist jedoch bei keiner vierseitig gelagerten Platte ein Systemversagen festgestellt worden.

Momentenumlagerungen brandbeanspruchter Platten

WESCHE /3/ untersucht in seiner Arbeit aus dem Jahre 1985 den vierseitigen Lastabtrag auch von solchen Platten im Brand, deren Haupttragwirkung für den Bemessungsfall - also ohne Brandeinwirkung - durch die Bewehrungsführung in nur eine Richtung festgelegt worden ist. Er kann zeigen, daß die Quertragwirkung im Brandfall an Bedeutung zunimmt und dadurch vierseitig gelagerte aber nur einachsig gespannte Platten in der Regel einer Brandbeanspruchung von über 90 Minuten gemäß der Einheitstemperatur/Zeit-Kurve (ETK) der DIN 4102, Teil 2 standhalten. Mindestens zwei benachbarte Ränder müssen dann allerdings im Sinne der DIN 1045 als eingespannt betrachtet werden können. Dieser Nachweis gelingt ihm mit einer rechnerischen Parameterstudie mit Hilfe der Bruchlinientheorie. Der Verlauf der Fließgelenklinien wird dabei den Ribildern der Durchlaufdecken der "Brandversuche Lehrte" angepaßt.

Das kritische System für eine vierseitig liniengelagerte Quadratplatte ist nach WESCHE das Innenfeld jenseits der in DIN 1045 empfohlenen Stützbewehrung (mit ca. 70 % der Platten-Stützweite) (Bild 1.2) und das Versagen tritt ein, wenn die Feldebewehrung dieses frei drehbar auf die unverformten Stützstreifen aufgelegt gedachten Teilsystems die Beanspruchung aus den äußeren Lasten wegen der Materialentfestigung durch die Erwärmung nicht mehr aufnehmen kann.

Bei über den Auflagerlinien zerrissener Stützbewehrung umfaßt das kritische System jedoch die gesamte Fläche zwischen den Auflagerlinien und hat gegenüber den Annahmen zur vereinfachten rechnerischen Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonplatten im baupraktischen Einbauzustand von WESCHE /3/ die doppelte Fläche und Momentenbeanspruchung.

In der vorliegenden Arbeit soll gezeigt werden, ob und auf welche Weise vierseitig liniengelagerte Platten als Teil einer Durchlaufkonstruktion auch dann noch sicher die äußeren Lasten tragen, wenn im Brandfall über allen 4 Auflagerlinien die Stützbewehrung gerissen ist und damit die Voraussetzung für eine Durchlaufwirkung im üblichen Sinne einer Tragwerksbeschreibung vollständig verlorengegangen ist. Der Nachweis gelingt, wenn anstelle einer funktionierenden Stützbewehrung "stützende" Zwangsschnittkräfte - hervorgerufen durch die Behinderung der freien thermischen Ausdehnung - aktiviert werden (Bild 1.3).

Auswirkungen von Dehnbehinderungen

Bereits die ersten experimentellen Untersuchungen mit dehnbehinderten Bauteilen unter Brandbeanspruchung von GUSTAFERRO /6/ mit dem Ziel, für eine näherungsweise Bestimmung der maximalen Größe der Zwangdruckkraft die Grundlagen bereitzustellen, zeigten gegenüber ungezwängten Bauteilen deutlich größere Feuerwiderstandszeiten. Aus seinen Betrachtungen bezüglich des Tragverhaltens unter Berücksichtigung praxisnaher Dehnbehinderungsgrade leitete er zwei Folgerungen ab:

1. keine Mindeststabsabstände mehr fordern
2. Abplatzungen sind ungefährlich

Ein denkbares Stabilitätsversagen hält er aufgrund seiner Versuche mit sehr schlanken, hoch auf Druck beanspruchten Bauteilen wegen der Verformungsfreudigkeit von stark erwärmten Stahlbetonbauteilen für ausgeschlossen. Bauteile entziehen sich durch große Biegeverformungen den Zwang-Druckkräften.

Ausgehend von der Befürchtung, daß die Zwangnormalkräfte ein Deckenfeld vorzeitig zerstören können, wurden von SELVAGGIO und CARLSON /27/ Brandversuche an dehnbehinderten Flächentragwerken durchgeführt. Die Experimente bestätigen, daß vollständige Dehnbehinderungen in der Praxis nicht entstehen und daß schwächere Dehnbehinderungen die Tragfähigkeitdauer der Bauteile sogar erheblich vergrößern können.

Darauf folgende theoretische und mit relativ kleinen Probekörpern in den USA von ABRAMS und LIN /7/ durchgeführte experimentelle Untersuchungen zur gleichen Frage bei flächigen Bauteilen unter Einschluß einer partiellen Beflammung wurde im theoretischen Teil von WALTER /8/

maßgeblich erweitert. Er simuliert mit einem finiten Scheibenmodell gleichzeitig das Zusammenwirken des kalten und des heißen Bereiches eines partiell beheizten Deckenfeldes. Die Längskräfte aus innerem Zwang können, wie aus den Untersuchungen von WALTER /8/ hervorgeht, beachtliche Größenordnungen erreichen. Seine Erkenntnisse liefern die Basisdaten für die Projektierung der eigenen Versuche.

1.4 Eigener Lösungsweg

In der vorliegenden Arbeit wird mit Hilfe experimenteller und theoretischer Methoden untersucht, wie vorwiegend eine Behinderung der freien thermischen Bauteilausdehnung, die jedoch i. a. mit einer Behinderung der freien Rotation der Bauteilränder einhergeht, das Trag- und Verformungsverhalten eines Plattenfeldes im Brandfall bis zum Versagen beeinflusst.

Das Bauteilverhalten wird von dem Wechselspiel zwischen instationärer Temperaturbeanspruchung und thermisch bedingter Materialentfestigung, Ausdehnungen und Durchbiegungen, Längskräften und Biegemomenten bestimmt. Das Zusammenwirken all dieser komplexen Vorgänge kann nur näherungsweise von theoretisch rechnerischen Verfahren erfaßt werden. Um die Aussagefähigkeit theoretischer Überlegungen bewerten zu können, sind als Grundlage experimentelle Untersuchungen unerläßlich. Im Versuch werden die wesentlichen Faktoren meßtechnisch erfaßt und verfolgt. Mit geeigneten Versuchen wird der Erfahrungsraum punktuell abgedeckt, für den dann allgemeingültige Aussagen gewonnen werden. Rechnerische Methoden verdichten den Datenbestand zwischen den experimentell gefundenen Eckwerten. Jede Extrapolation über den versuchstechnisch abgesicherten Erfahrungsraum hinaus ist mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet; Untersuchungen dieser Art sind aber gerade auch für nicht versuchstechnisch prüffähige Situationen von großer Bedeutung.

Mit Bauteilversuchen können i. a. nur Teilbereiche einer Gesamtkonstruktion untersucht werden. Durch das Herausschneiden eines Bauwerksausschnittes aus seiner Umgebung werden naturgemäß Bindungen frei, die durch den Versuchsaufbau nur noch näherungsweise ähnlich wie in der Gesamtstruktur berücksichtigt werden können. Bei ebenen Flächentragwerken entstehen aus dem idealisierten ebenen Spannungszustand Momente und Kräfte in 3 Richtungen an jedem Punkt der Struktur, also auch an den Rändern des im Versuch geprüften Ausschnittes. Im Brandfall verändern sich diese Größen ständig und zudem längs der Ränder unterschiedlich. Die Kontinuität des Tragwerks kann am Rand der Versuchsbauteile nur punktuell ersetzt werden. Aus dieser Betrachtung wird sofort einsichtig, daß auch Brandversuche nur ein Modell der Wirklichkeit darstellen können. Modelle aber sind nicht in der Lage, jede Einzelheit mit der gleichen Güte zu erfassen. Bei stark zeitab-

hängigen Problemen wie bei einem Brandszenario kommt die ungleichmäßige zeitliche Entwicklung einzelner Parameter hinzu.

Für die eigenen Bauteilversuche wurde im Rahmen des Soderforschungsgebietes 148 - Brandverhalten von Bauteilen - ein Prüfstand errichtet, in dem mit Hilfe von horizontal angeordneten Pressen die zwingende Wirkung von Umgebungsbauteilen simuliert werden kann. Während des Brandversuches behindern diese Pressen teilweise die Ausdehnungen des geprüften Ausschnitts und nehmen dabei die Zwangkräfte auf. Bei exzentrischer Pressenanordnung werden also eine Zwangskraft und ein Biegemoment am Rand erzeugt, während im Bauwerk an der Schnittlinie 6 Schnittgrößen auftreten, von denen die 2 simulierten für das Bauteilverhalten dominierend sind. Das Verhältnis von M zu N ist im Versuch durch die Exzentrizität der Zwangskraft festgelegt. Im Bauwerk können sich M und N unabhängig voneinander verändern. Weitere Einschränkungen bei der Versuchstätigkeit ergeben sich aus der Bedingung, daß die Brandraumbegrenzungen im Versuch mit den Auflagerlinien des Plattenausschnittes zusammenfallen müssen.

Mit mehreren Versuchsserien werden sowohl extreme als auch praxisnahe Dehnbehinderungsgrade an Bauteilen in Originalgröße studiert. Mit WALTERS /8/ Rechenprogramm ermittelte Verschiebungsgrößen werden bei den eigenen Brandversuchen am Rand der Platten freigegeben.

Der Aufbau und die Durchführung der Versuche wird im Kapitel 2 beschrieben, ausgewählte Ergebnisse im Kapitel 3 dargestellt und diskutiert.

Die theoretische Untersuchung der Zusammenhänge erfolgt rechnerisch mit Hilfe von finiten Elementen. Es wird das finite dreieckförmige Platten-Scheiben-Element des in Darmstadt unter Professor MEHLHORN entwickelten Programms DUPLA /9/ (dünne Platten) verwendet. Durch geeignete Modifikationen vorwiegend im Rechenablauf und bei den Materialgesetzen wurde daraus das eigene Programm PLAFEU (Platten im Feuer) entwickelt. Im Kapitel 4 werden die wesentlichen Teile dieses Programms dargestellt und im Kapitel 5 berechnete Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Im Schlußkapitel 6 erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse.

2. Planung und Durchführung von Bauteilversuchen

2.1 Ziele der experimentellen Untersuchungen

In dieser Arbeit wird die Platte als ein Bestandteil einer Gesamtkonstruktion aufgefaßt. Die Ränder des betrachteten Ausschnittes einer gesamten Geschoßdecke sind monolithisch verbunden mit der angrenzenden Umgebung.

Bei der brandschutztechnischen Beurteilung größerer zusammenhängender Platten muß auf den experimentell abgesicherten Erfahrungsraum zurückgegriffen werden, der bislang Platten vorwiegend als Einzelbauteile erfaßt. Die i. a. günstige Wirkung aus dem Gesamttragverhalten unter Einbeziehung der angeschlossenen Umgebungsbauteile kann noch nicht planmäßig berücksichtigt werden, weil zuverlässige, durch Großversuche abgesicherte Erkenntnisse hierfür nicht in ausreichendem Umfang verfügbar sind.

Der experimentelle Teil dieser Arbeit trägt mit dazu bei, diese Lücke zu schließen.

Die Versuchsergebnisse sollen auf häufig vorkommende Gegebenheiten der Baupraxis direkt übertragbar sein. Sie bilden die Grundlage sowohl für verallgemeinernde Überlegungen als auch für die im theoretischen Teil durchgeführten Programmentwicklungen.

Da das Trag- und Verformungsverhalten der Platten auch im Brandfall sehr stark von der Plattendicke und der Stützweite der betroffenen Plattenbereiche abhängt, ist eine Übertragung experimentell gefundener Zusammenhänge auf andere Steifigkeitsverhältnisse sehr problematisch und ohne Hinzuziehung theoretischer Methoden unmöglich. Um Übertragungsfehler möglichst gering zu halten, werden die Versuche mit Originalbauteilen im Maßstab 1:1 durchgeführt. Versuche im Modellmaßstab an wesentlich kleineren Bauteilen scheiden also für die hier erforderlichen Untersuchungen aus.

Die Versuchsergebnisse sollen mit den Bestimmungen der Brandschutzvorschriften verglichen werden und evtl. später für deren Ergänzung herangezogen werden können. Um diese Teilziele zu erreichen, werden

die Bauteile der Normbrandbeanspruchung unterworfen. Untersucht werden vorwiegend die Auswirkungen von Dehnbehinderungen unterschiedlicher Intensität; d. h.: die Umgebungsbauteile haben unterschiedliche Dehnsteifigkeit.

2.2 Realisierung der Verformungsbehinderung im Versuch / Versuchsstand

Bei bislang in Deutschland durchgeführten Experimenten an brandbeanspruchten Stahlbetonplatten konnten sich die Bauteile frei, d. h. ungezwängt ausdehnen. Die Platten wurden als isolierte Einzelbauteile geprüft, ohne den Einfluß der Umgebungsbauteile angemessen zu berücksichtigen. Die vorhandenen Versuchsstände waren daher für die erforderlichen Experimente ungeeignet und es wurde ein neuer Deckenprüfstand geschaffen (Bild 2.1). Mit Hilfe von horizontal angeordneten hydraulischen Pressen kann mit diesem Versuchsaufbau die freie Längsausdehnung der Bauteile behindert werden. Durch die Vorgabe eines bestimmten vertikalen Abstandes der Pressenangriffspunkte zur Mittenenebene der Platten ist eine Kombination von Druckkraft und Biegemoment am Plattenrand festgelegt. Gleichzeitig kann so die freie Ausdehnung und die freie Verdrehung am Rand im Brandversuch gezielt eingeschränkt werden. Dieser Prüfstand wurde u. a. von KRAMPF in /14/ und /15/ beschrieben.

Bei der Konzeption der Prüfanlage konnte noch nicht davon ausgegangen werden, daß die Zwangpressen im späteren Einsatz von einem Prozeßrechner gesteuert werden können. Daher wurde der Standard-Versuchsaufbau auf den gleichzeitigen Einsatz von maximal 6 Pressen festgelegt. Erst die praktische Versuchserfahrung zeigte, in welchem hohem Maße sich die Pressenwirkungen bei der anfänglich hohen Steifigkeit der Platten gegenseitig beeinflussen. Die sehr hohen und schnellen Schwankungen in der Kraftentwicklung ließen das Risiko eines Abrutschens einzelner Pressen infolge kurzzeitiger, vollständiger Entlastung unannehmbar hoch erscheinen, so daß die Verwendung eines Prozeßrechners unausweichbar wurde. Die Anzahl der einsetzbaren Pressen konnte aber aus Kostengründen nicht weiter gesteigert werden; vielmehr mußten die vorhandenen Pressen schonend eingesetzt werden. Insbesondere wurde darauf geachtet, daß sich der Pressenkolben bei Verdrehungen am Plattenrand nicht im Zylinder verkanten kann. Nur mit einer beidseits ge-

lenkigen Lagerung (Pendelstab) bleibt der Zylinder frei von schadlichen Querkraften. Damit ist bewußt und absichtlich die vertikale Beweglichkeit der Zwangpressen herbeigeführt worden!

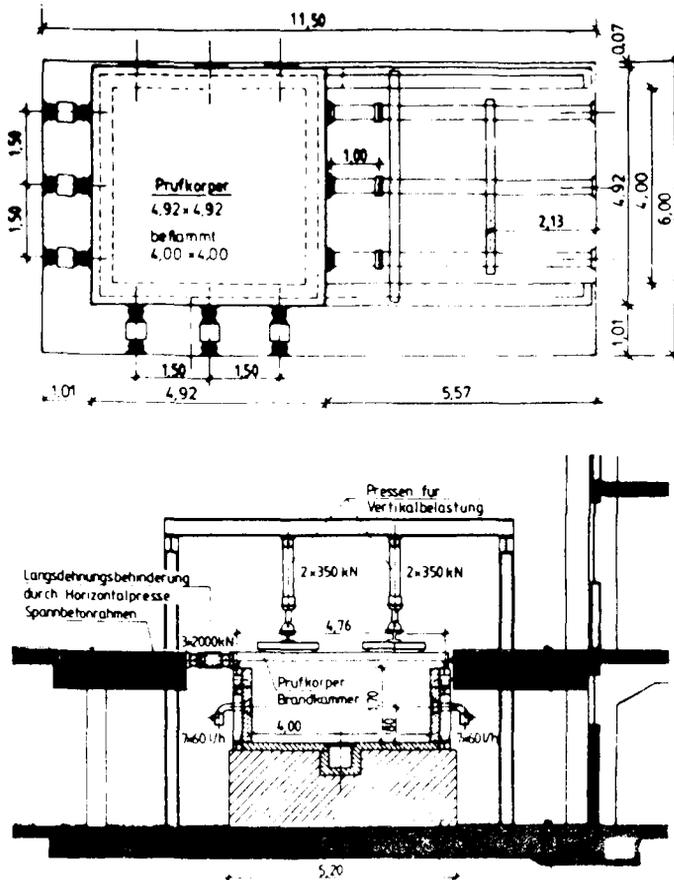


Bild 2.1: Versuchsstand zur Untersuchung von brandbeanspruchten Platten mit Verformungsbehinderung im Grundriß und im Querschnitt

Der Versuchsstand besteht im wesentlichen aus der Brandkammer, auf deren Wänden die Platte aufliegt, und einem geschlossenen Spannbetonrahmen, der die Brandkammeröffnung umgibt. An diesem liegenden Rahmen können an vorgegebenen Stellen, aber in beliebiger Höhenlage Pressen horizontal befestigt werden. Jeweils 3 Pressen von je 2000 kN Tragkraft sind an zwei benachbarten Plattenrändern eingesetzt. Die beiden verbleibenden Plattenränder müssen wegen der Ofengeometrie unverschieblich gehalten werden. Rollen in der Höhenlage der Pressenangriffsebene erlauben jedoch eine Verdrehung dieser Ränder. Über Distanzstücke muß der Ostrand der Platten mit dem Rahmen verbunden werden.

Während des Brandversuches werden die Kolben der Zwang-Pressen langsam eingezogen. Dies geschieht rechnergesteuert nach einer vorher festgelegten Sollkurve. Bis auf zwei Sonderversuche gilt eine Sollkurve jeweils für alle 6 Pressen. Eine vorgegebene Mindestkraft darf nicht unterschritten werden, damit die nur durch Haftreibung an der Platte fixierten Pressenfüße nicht abrutschen.

Die Festlegung dieser Sollkurven und die Genauigkeit Ihrer Realisierbarkeit wird unter Punkt 2.4.4 eingehend diskutiert.

Nachfolgend werden die 4 ecknahen Zwang-Pressen als Außenpressen und die 2 mittleren Zwang-Pressen als Mittenpressen bezeichnet.

An die Brandkammer sind an 2 gegenüberliegenden Seiten Ölbrenner angeschlossen, deren horizontale Flammen den Brandraum und das Bauteil erwärmen.

2.3 Untersuchte Bauteile (Bild 2.2)

Für die Versuchsserien sind quadratische Stahlbetonplatten mit den Solldicken 10, 12 und 15 cm hergestellt worden. Die Seitenlänge ergibt sich aus den Abmessungen des Versuchsstandes zu 4,92 m. Die untenliegende Bewehrung hat stets eine Betondeckung von 10 mm und besteht aus durchlaufenden Q-Matten BSt 500/550 RK. Oben sind Q-Matten so verlegt, daß in Plattenmitte ein quadratisches Feld von 1,92 m * 1,92 m unbewehrt bleibt. Nur bei einer Platte (der Platte Q 5/83) ist die obere Bewehrung durchlaufend.

Wegen des vorhandenen Achsabstandes der unteren Bewehrung sind alle Platten der Feuerwiderstandsklasse F 60 gemäß DIN 4102, Teil 4 zuzuordnen, weil sie als 4-seitig aufliegend und 2-achsig gespannt gelten.

Bis auf eine Ausnahme (Platte Q 5/82) haben alle Platten einen umlaufenden Randbalken, um im Versuch eine große Zwangskraft exzentrisch zur Mittelebene in das Plattenfeld einleiten zu können. Die 12 Krafteinleitungsstellen sind durch stehende U-Eisen verstärkt. Die Torsionssteifigkeit dieses Randbalkens nimmt während des Versuches durch die Ribbildung stark ab und ist zusätzlich durch vertikale Weicheinlagen weiter geschwächt. Außerdem ist die Bewehrung zur Aufnahme von Spaltzugkräften aus der punktuellen Einleitung der Zwangkräfte nicht um die Ecken herumgeführt. Somit ist ausgeschlossen, daß das Verhalten des Plattenfeldes von der Torsionssteifigkeit des Randbalkens merklich beeinflusst wird.

Das Plattensystem S 1/86 weicht von den "Standard-Platten" deutlich ab. Es wird im Kap. 3.6 beschrieben.

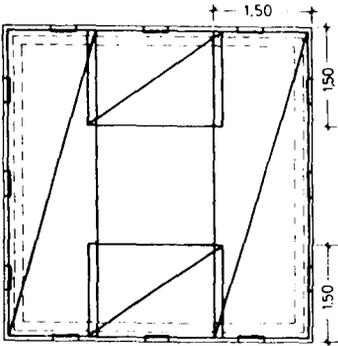
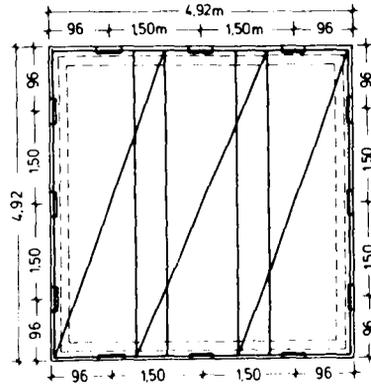
Obere BewehrungUntere Bewehrung

Bild 2.2a: Typische Bewehrungsführung der Standard-Platten
geschweißte Betonstahlmatten BST 500/550 RK

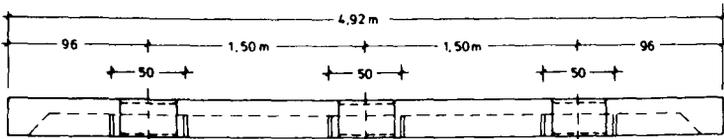
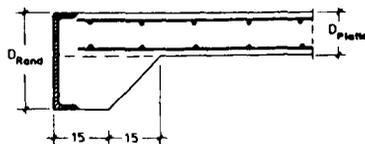
AnsichtSchnitt

Bild 2.2b: Plattenansicht
Randausbildung und Zwangeinleitungspunkte

2.4 Versuchsvorbereitung und -durchführung

2.4.1 Alterung der Versuchskörper

Junger Beton neigt wegen seines noch hohen Feuchtigkeitsgehaltes bei Brandbeanspruchung zum Abplatzen. Die Abplatzgefahr wird erhöht, wenn der Beton zusätzlich von Druckspannungen beansprucht wird. Solche Abplatzungen erheblichen Ausmaßes geschahen auch bei einer Platte (Platte Q 3/82) aus diesem Versuchsprogramm. Diese Platte war zum Versuch ca. 6 Monate alt und wurde an den Rändern nur "schwach" gezwängt. Danach wurden alle weiteren Platten vor dem Brandversuch künstlich gealtert, um den Wassergehalt der oberflächennahen Betonschichten unter einen als kritisch erkannten Wert von 4 Gew.-% zu drücken. Zwei Methoden kamen hierfür zur Anwendung:

Typ 1:

Die Platten liegen unbelastet und ungezwängt auf dem Ofen auf und werden ca. 8 Stunden lang von unten beheizt. Dabei wird durch wechselweises Benutzen von jeweils zwei Ölbrennern eine Brandraumtemperatur von ca. 200 °C erzeugt und konstant gehalten. Nach diesem Vorgang kühlen die Platten wieder auf Raumtemperatur ab und werden dann geprüft.

Typ 2:

Die Platten einer Versuchs-Serie liegen auf einem Plattenstapel übereinander. Zwischen je zwei Platten befindet sich ein ca. 30 cm breiter Zwischenraum, in welchen Heizspiralen verlegt sind. Der gesamte Stapel ist mit einem Mauerwerk aus Leichtbeton-Steinen umgeben und mit Leichtbetonplatten abgedeckt. Über einen Zeitraum von ca. 4 - 6 Wochen wird nun eine Temperatur von ca. 60 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 20 % erzeugt und dadurch ein Wasserverlust von ca. 2 Gew.-% bei den Platten im Mittel erzielt.

Der Typ 2 hat gegenüber dem Typ 1 mehrere Vorteile:

Mikrorisse, die im Beton erst ab ca. 70 °C entstehen, werden vermieden. Das Bauteil wird stets gleichmäßig durchwärmt, so daß keine Durchbiegungen wegen eines Temperaturgradienten entstehen, die nach

dem Abkühlen dann nicht wieder vollständig zurückgehen.

Über die thermische Vorbehandlung der Platten wird in /16/ ausführlich berichtet.

Für die Bestimmung von Materialkennwerten vorgesehene Baustoffproben wurden zusammen mit den Bauteilen ebenfalls diesem Alterungs-Prozeß unterzogen.

2.4.2 Einbau der Platten in den Versuchsstand

Die Platten werden an 12 Stellen auf die Wände des Brandhauses aufgelegt. Stahlrollen unter den Pressenrändern ermöglichen sowohl Verschiebungen als auch Verdrehungen; unter den Rändern der Seiten mit den starren Widerlagern lassen Stahlhalbrunde vorwiegend die Verdrehung zu. Die Orte der Verformungsbehinderung sind identisch mit den Auflagerpunkten.

Danach werden die Lastverteiler und die Meßinstrumente am Bauteil angebracht. Anschließend werden die vier Ecken der Platte über Stahlstempel und Handpressen nach oben hin abgestützt.

Erst unmittelbar vor dem Beginn der Belastung werden die horizontalen Zwang-Pressen nacheinander gegen die Platte gefahren. Sie schieben die Platte gegen die starren Widerlager. Während des Belastungsvorgangs mit Hilfe von vertikalen Pressen wird bei den gezwängten Platten eine horizontale Bewegung der Ränder vollständig verhindert. Die Last wird stufenweise mit einer Entlastung aufgebracht.

2.4.3 Brandbeanspruchung und Versuchsabbruch

Durch Verbrennen von leichtem Heizöl in 6 Ölbrennern wird im Brandraum die Temperatur gesteigert. Der zeitliche Verlauf der Erwärmung ca. 10 cm unterhalb der Plattenunterseite entspricht der in DIN 4102, Teil 2 bzw. ISO 834 festgelegten Einheitstemperatur/Zeit-Kurve (ETK) (Bild 2.3). Bis auf einen schmalen etwas kälteren Streifen entlang der Plattenränder ist die Temperaturbeanspruchung der Platten vom Ort

unabhängig.

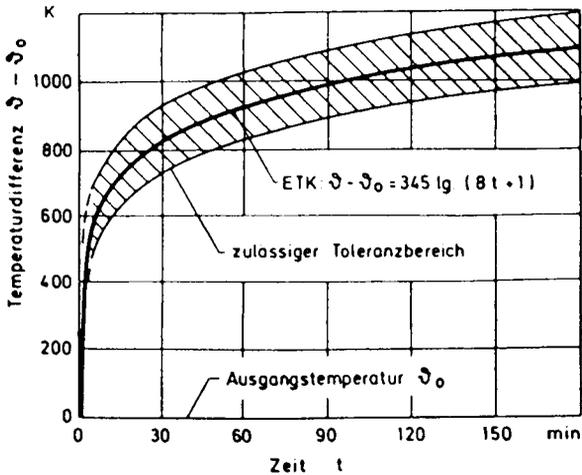


Bild 2.3: Einheitstemperatur/Zeit-Kurve
nach DIN 4102, Teil 2

Der Temperaturverlauf im Inneren des Querschnittes wird u. a. beeinflusst vom Wassergehalt des Betons. Durch das künstliche Altern der Platten vor den Brandversuchen wird ein praxisnaher Wassergehalt für einen alten Beton erzielt. Trockene Bauteile durchwärmen gleichmäßiger und schneller als feuchte, weil weniger Wasser mit hohem Energieverbrauch aus der flüssigen in die gasförmige Phase überführt werden kann.

Die Dauer eines Brandversuches kann vor dem Versuch nur geschätzt werden, da die variierten Parameter gerade auch die Tragfähigkeitsdauer der Bauteile mit bestimmen. Versagenskriterien aufgrund von Verformungen oder Verformungsgeschwindigkeiten, wie sie z. B. in DIN 4102 für statisch bestimmt gelagerte Bauteile angegeben sind, existieren für statisch unbestimmt gelagerte Bauteile nicht. Zu keinem Zeitpunkt dürfen anwesende Personen oder die eingesetzten Gerätschaften ernsthaft in Gefahr geraten. Daher ist kein einziger Versuch bis zum vollständigen Kollaps der Platte durchgeführt worden. Für den rechtzeitigen Versuchsabbruch ist also der Kompromiß zwischen dem Verantwortungsgefühl und der Risikobereitschaft des Versuchsleiters maßgebend. Das Eintreten mindestens eines der nachfolgend aufgelisteten Ereignis-

nisse hatte rückblickend den Versuchsabbruch zur Folge, nämlich wenn

- wesentliche Teile des Prüfkörpers versagten, oder
- die Durchbiegungsgeschwindigkeit so groß war, daß ein unmittelbar bevorstehender Einsturz angenommen werden mußte, oder
- wegen großer Verformungen der Platte die lasteintragenden Pressen von den Lastverteilern abrutschten, oder
- wegen großer Durchbiegungen sich die Platte auf die Wärmeschutz-
auskleidung der Brandkammerwände auflegte und so die Wände des
Brandhauses auseinanderdrückte, oder
- die Versuchsdauer bereits mehrere Stunden betrug und keine
baldige wesentliche Änderung im Bauteilverhalten erwartet wurde.

2.4.4 Festlegung des Grades der Dehnbehinderung

Am Plattenrand wird eine Dehnbehinderung dort wirksam, wo die freie horizontale Bewegung eingeschränkt wird. Die Werte der ungehinderten Randverschiebungen - das Ausdehnungsbestreben - sind entlang des Randes bei gleichförmiger Temperaturerhöhung gleich.

Aus der Scheibenwirkung des partiell erwärmten Bauteils resultiert i. a. ein "Aufblaseffekt"; dabei sind die Verschiebungen der Seitenmitten größer als die der Eckpunkte. Für eine partiell beflamnte Scheibe ist in /17/ der berechnete Verformungszustand dargestellt (Bild 2.4). Dabei sind für die Lage des beflamnten Teils innerhalb der Gesamtscheibe verschiedene Orte angenommen. Die reine Scheibenwirkung läßt keine Verdrehungen zu, und die Verschiebungen sind daher von der Höhenlage unabhängig.

Aus diesem Bild 2.4 geht hervor, daß der Unterschied zwischen den Verschiebungen an den Ecken und den Seitenmitten des beflamnten Bereichs geringer wird, je weiter der beflamnte Bereich in das Zentrum der Gesamtscheibe rückt.

Betrachtet man hingegen ausschließlich die Biegeverformungen einer liniengelagerten Platte, so treten zunächst an keinem Ort Verschiebungen auf. Außerhalb der Mittelebene liegende Punkte bewegen sich aber doch in horizontaler Richtung wegen der Verdrehung der Querschnitte. Diese

Verschiebungswerte hängen direkt ab von der Größe der Verdrehung und dem Abstand des Punktes von der Mittelebene. Aus einer solchen Betrachtung entstehen an den Plattenoberflächen in der Mitte des Randes die größten Verschiebungen. An festgehaltenen Ecken können aus reiner Biegung keine Verschiebungen auftreten.

▣ beflamtes Gebiet

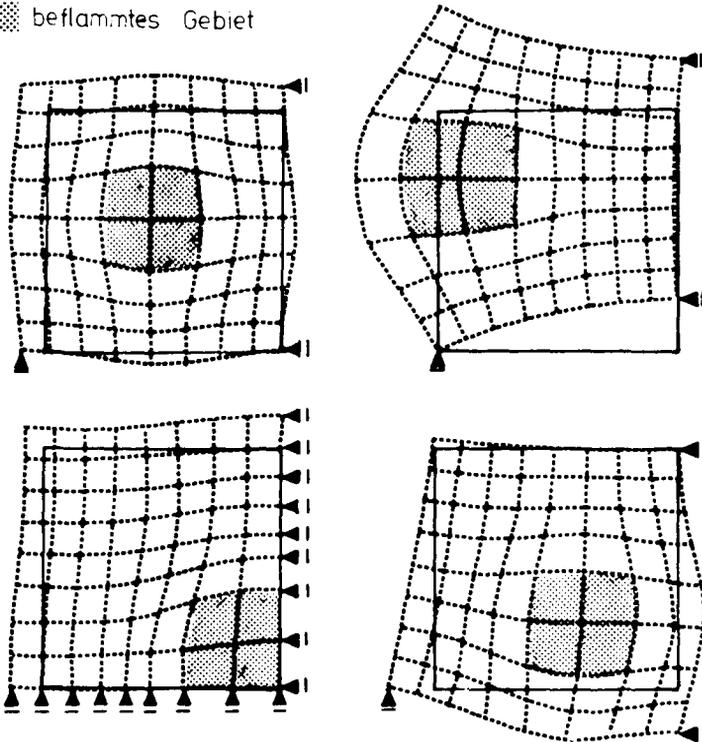


Bild 2.4: mit einem Scheibenmodell berechnete Verschiebungsfelder nach 90 Minuten ETK-Beflammung /17/

Zusammengenommen führen diese Gedanken zu dem Schluß, daß bei einem nicht gezwungenen Bauteil unter Brandbeanspruchung die Kombination aus der Platten- und der Scheibenwirkung am unteren Rand der Seitenmitten die größten horizontalen Bewegungen erzeugt.

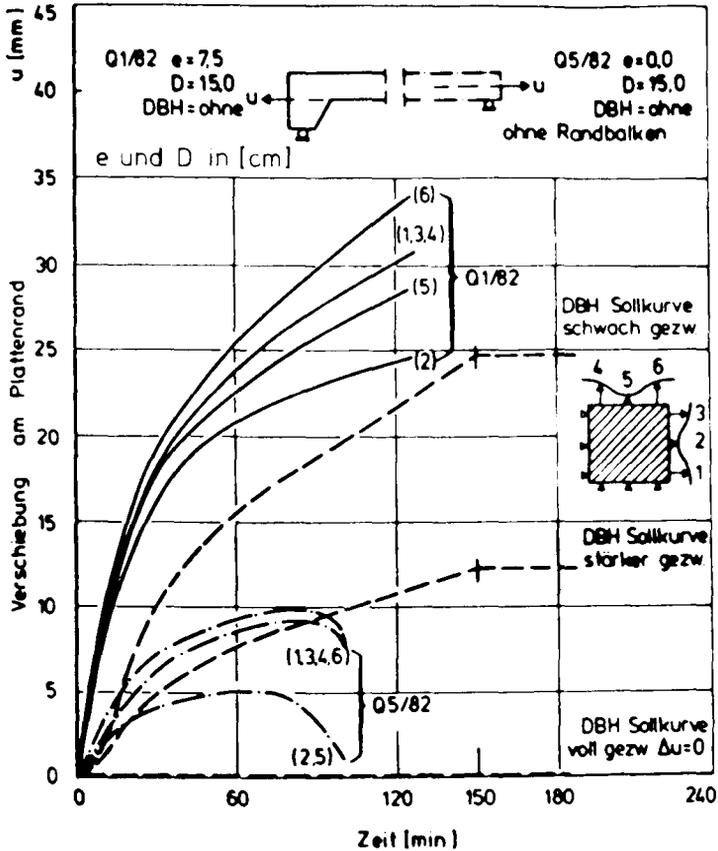


Bild 2.5: horizontale Randverschiebungen, Meßwerte von unbehinderten Platten und Sollkurven für dehnbehinderte Platten

Im Bild 2.5 sind die in zwei Brandversuchen gemessenen Verschiebungen eingetragen. Bei dem Plattenversuch Q 1/82 wurden diese Wege auf der Höhe der Plattenunterseite gemessen und bei der Platte Q 5/82 auf der Höhe der Plattenmittebene. Das Biegeverhalten (Randverdrehung) war bis zur 60ten Minute nahezu gleich, später verbog sich die Platte Q 1/82 etwas langsamer als die Platte Q 5/82. Voll bestätigt wird der beschriebene Zusammenhang zwischen der Verschiebung und der Höhenlage des Meßpunktes, jedoch zeigen diese Werte entgegen der obigen Annahme, daß in der Nahe der Ecken größere Verschiebungen gemessen werden als

in der Mitte der Ränder.

Diese unerwarteten Meßwerte können auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

1. Bei diesen Versuchen sind in Plattenmitte Durchbiegungen aufgetreten, die die Größe der Plattendicke von 15 cm nach ca. 1 Stunde überschritten haben. Solche Durchbiegungen rufen im Bauteil eine Sehnenverkürzung hervor.
2. Die dargestellten Verschiebungswerte sind die Kolbenwege der Zwang-Pressen, die bei diesen beiden Versuchen nur zum Zwecke der Verschiebungsmessung mit der ständig wirkenden Mindesthaltekraft kraftgesteuert eingesetzt worden sind; das sind noch nicht die Randverschiebungen der Platten selbst. Bei großen Randverdrehungen (und das ist bei beiden Platten der Fall) neigen sich die zunächst horizontal eingebauten Pressen nach oben. Die dann an den Pressenkolben gemessenen Wege sind stets kleiner als die Verschiebung des Punktes, an dem der Pressenfuß auf dem Plattenrand sitzt. Dieser Aspekt zu der Versuchseinrichtung wird im Kapitel 3 abgehandelt.

Aus dem Bild 2.5 wird aber auch ersichtlich, daß der Unterschied zwischen den Verschiebungen an unterschiedlichen Orten längs der Ränder im Vergleich zu den absoluten Größen dieser Wege relativ gering ist. Für die Festlegung der Sollkurven für die Zwang-Pressen werden diese Unterschiede daher bewußt vernachlässigt. Sämtliche 6 Zwang-Pressen werden unabhängig voneinander i. a. nach der gleichen Sollkurve gesteuert. Dadurch bleiben die 2 Pressenränder der Versuchsplatten jedoch während des Brandversuches keineswegs vollkommen gerade, sondern die vertikale Beweglichkeit der Zwang-Pressen läßt auch bei einer nominellen Parallelverschiebung der Pressenränder den dargestellten "Aufblaseeffekt" zu. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse spielen diese Sekundäreffekte allerdings eine Rolle.

Mit Hilfe des von WALTER entwickelten nichtlinearen Scheibenprogramms /8/ wird eine partiell beflamnte Scheibe von 15 cm Dicke untersucht. Ein $4 \times 4 \text{ m}^2$ Teilgebiet inmitten einer $12 \times 12 \text{ m}^2$ großen Gesamtscheibe wird unter einer Normbrandbeanspruchung berechnet. Die sich daraus ergebenden mittleren Verschiebungen am Rand des beflamnten Gebietes

ist als Sollkurve stellvertretend für eine **"schwache" Dehnbehinderung** mit im Bild 2.5 eingezeichnet. Es ist zu erkennen, daß in einem Brandversuch die Zwang-Pressen mit dieser Sollkurve nur dann tatsächlich einen Zwang ausüben können, wenn sie weit unterhalb der Plattenmittenebene angesetzt werden.

Denkt man sich die gemessenen Werte aus dem Plattenversuch Q 1/82 fortgesetzt, so kann nach einer Branddauer von ca. 150 Minuten erwartet werden, daß auch tiefsitzende Mittenpressen dann abrutschen werden. Aus diesem Grunde wird die berechnete Kurve zu diesem Zeitpunkt verlassen, und die Pressenkolben werden nicht weiter eingefahren.

Ebenfalls wird durch diesen Vergleich deutlich, daß die berechneten Werte für die zugelassenen Verschiebungen größer sind als die auf der Mittelebene gemessenen Verschiebungen der Platte Q 5/82 ohne Dehnbehinderung. Für die Bestimmung einer zweiten Sollkurve wird daher nicht mehr auf weitere Rechenergebnisse zurückgegriffen, sondern die Verschiebungen der ersten Sollkurve werden halbiert und ergeben die Sollkurve für eine **"stärkere" Dehnbehinderung**. Diese Kurve liegt auch im Streuband der auf der Höhe der Mittelebene gemessenen Randverschiebungen (Bild 2.5).

Die dritte Sollkurve simuliert den Grenzfall einer **vollständigen Dehnbehinderung**. Die Kolben der Pressen werden nicht eingezogen.

2.5 Versuchsparameter

2.5.1 Allgemeines

Die Versuche waren so zu konzipieren, daß sie auch ohne rechnerische Begleitung mit aufwendigen Rechenmethoden bereits verallgemeinerungsfähige Aussagen zu den wichtigsten Fragen erlauben. Dies sind:

- Wie wirkt sich die Behinderung der freien Randverschiebung auf das Trag- und Verformungsverhalten brandbeanspruchter Stahlbetonplatten aus?
- Können positive Auswirkungen einer Dehnbehinderung für eine brandschutztechnische Bemessung wirtschaftlich nutzbar gemacht werden?
- Können bislang nicht bekannte Risiken aus einer Dehnbehinderung entstehen?

Sowohl die hohen Kosten für die Bauteilversuche als auch die geringe Anzahl möglicher Versuch pro Jahr (wegen der Austrocknungszeit und der Größe der Bauteile konnten maximal 8 Versuche pro Jahr durchgeführt werden) zwangen zu einer Straffung des Versuchsprogramms. Die einzelnen Versuche waren so zu konzipieren, daß sie Rückschlüsse zu möglichst vielen Einflußfaktoren zulassen. Bewußt ist in Kauf genommen, daß für die Auswertung später die Wirkung einiger anderer Einflußfaktoren aus den Erkenntnissen anderer Versuche abgeschätzt werden müssen. Erkenntnisse und neue Fragestellungen aus vorangegangenen Versuchsserien sind bei der Konzeption der Folgeserien bereits berücksichtigt. Eine vollständige versuchsmäßige Untersuchung aller denkbaren Einflußparameter ist ohnehin nicht möglich und auch nicht sinnvoll. Solche Parameter sind:

1. Dehnbehinderung

1.1 Grad

1.2 Wirkungsebene der Zwangskraft

1.3 Anzahl der Ränder mit Dehnbehinderung

1.4 Anzahl der dehnbehinderten Punkte am Rand

2. Erwärmung

- 3. Bauteilabmessungen
 - 3.1 Seitenverhältnisse
 - 3.2 Schlankheit
 - 3.3 Stützweite
 - 3.4 Form des Grundrisses

- 4. Bauteillagerung
 - 4.1 Eckfesthaltung
 - 4.2 Linienlagerung / Punktlagerung / nachgiebige Lagerung
 - 4.3 freie Ränder
 - 4.4 eingespannte Ränder

- 5. Bewehrung der Bauteile
 - 5.1 Stahlsorte
 - 5.2 Bewehrungsmenge oben und unten
 - 5.3 Achsabstand

- 6. Beton
 - 6.1 Art des Zuschlages
 - 6.2 Betongüte

- 7. Belastung
 - 7.1 Laststellung
 - 7.2 Größe der Last

2.5.2 Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen

Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen stehen die Auswirkungen von Dehnbehinderungen bei brandbeanspruchten Stahlbetonplatten. Vorrangig werden hier dementsprechend ausgewählte Versuche besprochen, die sich ausschließlich im Grad der Dehnbehinderung unterscheiden (Bild 2.5). Die Bandbreite des Zwängungsgrades reicht von der freien Verformbarkeit bis hin zur maximalen Behinderung der Längsausdehnung, die sich mit der bestehenden Versuchsanlage erreichen läßt.

2.5.3 Übersicht über die Standard-Versuche

Aus der Tabelle 2.1 geht hervor, welche Versuche sich lediglich in einem Parameter unterscheiden, und welcher Parameter das ist. Die Auswertung hinsichtlich isolierter Einflußfaktoren geschieht nach dieser Übersicht. Die Tabelle enthält alle vierseitig liniengelagerten Standard-Platten, die gemäß der ETK (DIN 4102, Teil 2) beflammt worden sind.

		1982		1983				1984						
		3	5	2	4	6	8	2	4	6	8			
1982	1	Z	R									1	1982	
	3						D	D				3		
	4											4		
	5											5		
1983	1			E								1	1983	
	2											2		
	3				L							3		
	4					D						4		
	5						L	L				5		
	6							L	Z	Z		6		
	7											7		
	8								Z	D		8		
	9								Z	L		9		
1984	1									L		P	1	
	2									L	Z		2	
	3										B		3	
	4											B	4	
	5											P	5	
	6												L	6
	7													7
	8													8

D = Dicke
 L = äußere Last
 E = Exzentrizität
 R = Randbalken
 P = Zahl der Zwangpressen
 B = untere Bewehrung
 Z = Grad der Zwängung

Tab. 2.1: Standardversuche, die sich nur durch einen Parameter unterscheiden (Plattennamen: 1984 4 = Q 4/84)

(Beispiel zum Lesen der Tafel: Platte Q 6/83 (Zeile) unterscheidet sich von Platte Q 7/83 (Spalte) nur durch die äußere Last, von den Platten Q 8/83 und Q 9/83 (Spalten) nur durch den Grad der Zwängung. Von allen anderen Platten unterscheidet sie sich durch mehrere Parameter).

2.6 Systematik der Versuchsauswertung

2.6.1 Allgemeines

Für diese Arbeit stehen die Beobachtungen und Meßdaten aus allen Brandversuchen an Stahlbetonplatten zur Verfügung, die im SFB 148 vom Verfasser durchgeführt worden sind. Jeder dieser Versuche wurde unter individuellen Gesichtspunkten konzipiert und in der Regel aus Kosten- und Zeitgründen nicht durch Doppelversuche bestätigt. Es hat sich aber gezeigt, daß die Versuchsergebnisse zusammenpassen und eine umfassende Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens von Stahlbetonplatten im Brand zulassen.

Unter den speziellen Gesichtspunkten der vorliegenden Untersuchung werden einzelne Versuche aus den Versuchsreihen ausgewählt. Bei der Auswertung kann jedoch im Bedarfsfall auf Beobachtungen bei den anderen Versuchen zurückgegriffen werden.

2.6.2 Berücksichtigung der Materialkennwerte für Beton und Stahl

Sowohl vom Beton als auch vom Bewehrungsstahl sind für jedes Bauteil die Materialkennwerte bestimmt worden. Die Streubreite der mechanischen Werte war beim Stahl gering und beim Beton hoch. Die mechanischen Betoneigenschaften beeinflussen aber das Verformungsverhalten der Platten im Brand nur geringfügig, können sich aber sichtbar auf das Entstehen von Spannungen und Schnittkräften aus Zwang auswirken.

Bei der Auswertung der Versuche und Gegenüberstellung der Meßwerte werden zunächst die unterschiedlichen Materialkennwerte nicht beachtet. Die Bestimmung der Spannungsausnutzung der Bewehrung erfolgt aber unter Berücksichtigung der wahren Werte. Die Betonkennwerte sind in /16/ zusammengestellt.

2.6.3 Bewertung der tatsächlich wirksamen Dehnbehinderung

2.6.3.1 Dehnbehinderung an den Widerlagerseiten

Von den 4 Seiten der Platten sind nur 2 benachbarte horizontal verschieblich gegen die 6 Zwang-Pressen gelagert. Die beiden anderen benachbarten Ränder sind horizontal unverschieblich gehalten. Stahlrollen in der Ebene der gegenüberliegenden Pressen lassen jedoch eine Randverdrehung zu.

Die Verdrehung der Ränder an den Widerlagerseiten erfolgt bei großen Zwangkräften um die Widerlager-Rollen, bei geringen Zwangkräften um die Auflager-Halbrunde. Bei gezwängten Platten beweisen i. d. R. deutliche Schleifspuren, daß eine Randverdrehung um die Widerlager-Rolle stattgefunden hat, welche dann zu einer Verschiebung der Auflager-Halbrunde führte. Auflager-Rollen wären weggerutscht.

Die Dehnbehinderung wird in den Versuchen also nicht symmetrisch realisiert. Die Pressen müssen den doppelten Weg freigeben. Bei der tatsächlich wirksamen Dehnbehinderung ist zu beachten, daß eine Verschiebung des gesamten Bauteils zu den Pressen hin wegen der Randverdrehung um die tiefsitzenden starren Widerlagern stattgefunden hat. Die daraus entstandenen zusätzlichen Verschiebungswege sind allerdings zu vernachlässigen, da hier die äußeren Punkte mit der geringen Verdrehung bestimmend sind.

Reibungskräfte quer zu den Rollen müssen nicht berücksichtigt werden, da horizontal reibungsarm verschiebliche Wälzwagen eine praktisch reibungsfreie Bauteilausdehnung bzw. -verschiebung ermöglicht.

2.6.3.2 Einfluß der Pressen-Neigung bei großen Randverdrehungen

Während der Plattenversuche wurde beobachtet, wie sich die 2 mittleren der insgesamt 6 Horizontalpressen im Laufe der Zeit langsam nach oben neigten (Bild 2.6); der Randbalken selber blieb hingegen ständig auf der zugehörigen Auflager-Rolle liegen. Einzelne darauf folgende Messungen dieser nicht zu beeinflussenden Eigenbewegung bestätigen den im Bild 2.8 mit dargestellten Bewegungsmechanismus.

Innerhalb der Platten-Randbalken entwickelt sich über jeder Auflagerrolle ein Drehpol. Der Hydraulikzylinder ist beidseitig gelenkig zwischen dem Randbalken der Platte und dem Spannbetonrahmen des Versuchstandes gelagert, während der Pressenfuß quasi fest über Haftreibung mit dem Plattenrand verbunden ist. Randverdrehungen um den Polpunkt macht der Pressenfuß also mit und bewirkt damit ein Anheben des plattennahen Fußgelenkes der Presse. Die Presse stellt sich schrag. Der Polplan berücksichtigt bei einer Randrotation eine horizontale Auflagerbewegung auf den Rollen. Mit den Abmessungen des Randbalkens und des Pressenfußes ergibt sich eine Pressenanhebung am Fußgelenk von

$$W_{pv} \text{ [mm]} = \hat{\varphi} \cdot 235$$

mit $\hat{\varphi}$ = Rotationswinkel des Randes im Bogenmaß.

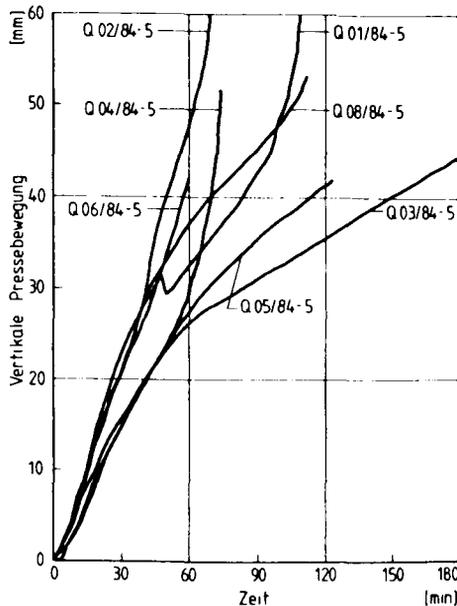


Bild 2.6: gemessene Vertikalbewegung des plattennahen Gelenkes der Mittenpressen

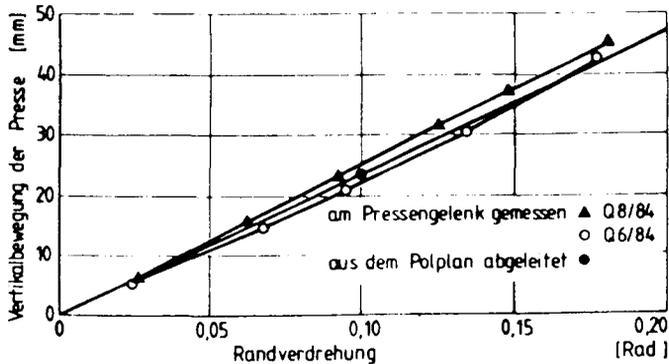
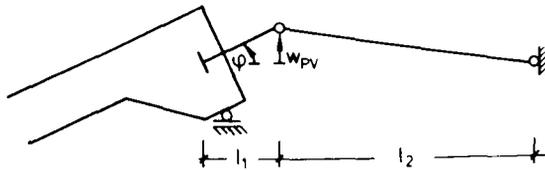
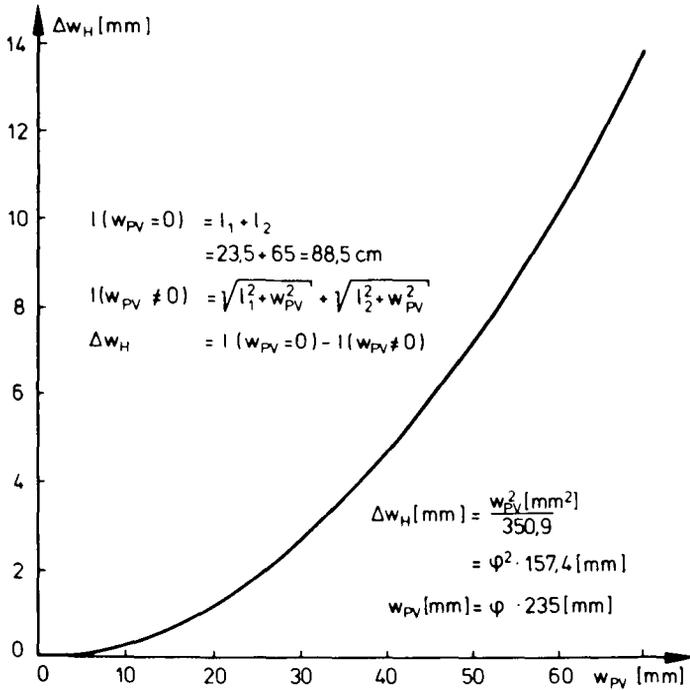


Bild 2.7: Zusammenhang zwischen der Verdrehung des Plattenrandes und der vertikalen Bewegung des Pressengelenkes

Dieser Zusammenhang wird durch Messungen an den Plattenversuchen Q 6/84 und Q 8/84 voll bestätigt (s. Bild 2.7).

Die vertikale Pressenbewegung wirkt sich praktisch nur bei den Mittenpressen aus und hat mehrere Folgen für den Ablauf und die Ergebnisse der Versuche.

- a) Die planmäßig zugelassene Plattenverlängerung wird um einen Betrag von Δw_H vergrößert. Bei weggesteuerten Versuchen kommt zu dem Betrag der Kolbenbewegung also noch die Differenz Δw_H zwischen dem Abstand der beiden Pressengelenke voneinander und der Größe seiner Projektion auf die Horizontale. Dieser Differenzbetrag ist jedoch quadratisch abhängig von der Pressenneigung (s. Bild 2.8) und erreicht erst bei sehr großen Pressenneigungen (ab 6° bei einer Mittendurchbiegung von etwa 12 cm) spürbare Beträge.



Durch die Pressenbewegung nach oben um w_{PV} wird der tatsächlich freigegebene Weg an den Pressen um Δw_H größer

Bild 2.8: Zusammenhang zwischen der vertikalen Pressebewegung der Vergrößerung des freigegebenen Dehnweges

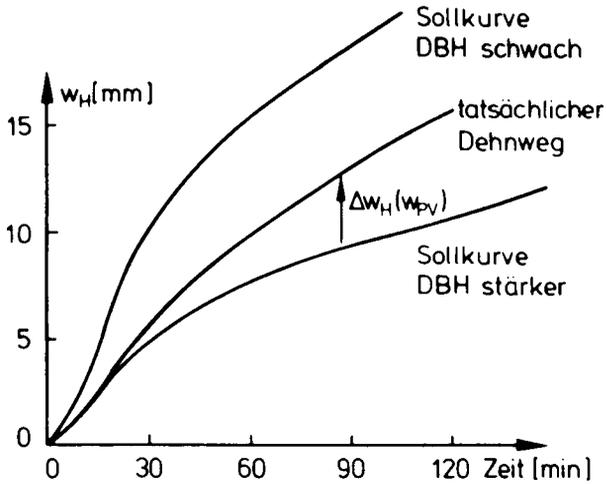
Bedeutsamer ist jedoch, daß mit der Schiefstellung der Pressen auch der wirksame Pressenangriffspunkt nach oben wandert. Die Zwangskraft wird also mit einer stets abnehmenden Exzentrizität in den Rand eingetragen. Wird der Rand aber mit einer geringeren Exzen-

trizität an der Ausdehnung behindert, so muß bei wachsender Verdrehung der Querschnitt um einen größeren Betrag an der Ausdehnung behindert werden, damit ein ähnlich hoher Dehnbehinderungsgrad erreicht wird. Bei schiefstehender Presse wird also außer der Rotationsbehinderung auch die Dehnbehinderung vermindert. Bei einer weiter oben liegenden Wirkungslinie der Zwangskraft erzeugt nur eine Sollkurve für eine stärkere Zwängung die angestrebte Dehnbehinderung.

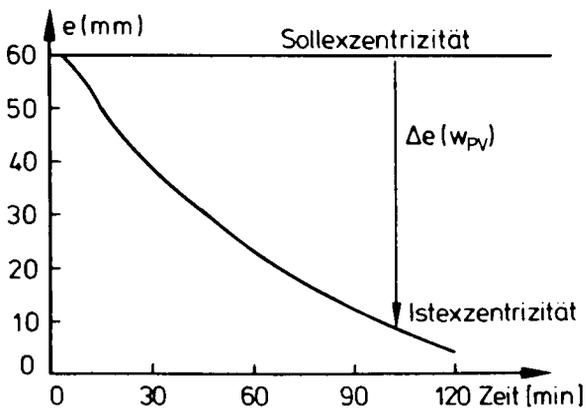
Wegen dieser Schwächung der Dehnbehinderung nehmen die sich entwickelnden Zwangkräfte auch nicht die Größe an, die zu dem Pressenweg bei unveränderter Exzentrizität gehören, sondern sie liegen darunter. Insbesondere bei voll und stark gezwängten Platten mit sehr geringen zugelassenen Dehnwegen macht sich dieser Zusatzweg deutlich bei der Entwicklung der Zwangskraft bemerkbar. Im Bild 2.9 ist für die Mittenpresse der Platte Q 5/84 sowohl die Verringerung der Exzentrizität als auch das Anwachsen des zugelassenen Pressenweges im Vergleich zu dem Sollweg exemplarisch dargestellt. Bei sehr großen Randverdrehungen kann die vertikale Pressenbewegung sogar einen völligen Kraftabfall an der Presse und ein anschließendes Abrutschen zur Folge haben, wenn nicht vorzeitig auf Kraftsteuerung umgeschaltet wird.

- b) Durch den unter a) besprochenen relativen Abfall der Zwangskraft und das Hochwandern der Kraftwirkungslinie wird das eingeleitete Randmoment, das der Randverdrehung entgegenwirken soll, in doppelter Weise vermindert und kann in extremen Fällen ganz verschwinden oder sogar das Vorzeichen wechseln und dann die Randverdrehung unterstützen statt diese zu behindern. Durch diesen Abbau der wirksamen Verformungsbehinderung werden größere Verformungen möglich.
- c) Durch die vertikale Eigenbewegung der Pressen liegen an der Mitte der Pressenränder strenggenommen keine definierten Randbedingungen mehr vor. Die Randbedingungen verändern sich während des Versuches durch die Verformungen der Bauteile.
- d) Bei der Versuchsauswertung muß im Einzelfall überprüft werden, ob und ggf. wie die geschilderten Zusammenhänge den Versuch beeinflussen haben.

Q 5/84 Mittenpresse



(a) Vergrößerung des zugelassenen Dehnweges



(b) Veränderung der Exzentrizität der Presse

Bild 2.9: Beispiel für die Veränderung des Sollweges einer ausweichenden Zwang-Presse

e) Die Nachrechenbarkeit der Versuche wird durch das unterschiedliche Verhalten der Ränder sehr erschwert. Die komplizierten Eigenbewegungen der Pressen können kaum in einem Rechenmodell verifiziert werden, ohne den Rechenaufwand extrem zu vergrößern.

Bei Versuchsnachrechnungen wie in /30/ wurde der Rechenlauf mehrfach unterbrochen und die Rechnung mit veränderten Exzentrizitäten für die vorgegebenen Verschiebungswerte fortgesetzt. Dabei richtet sich die neue Exzentrizität nach der rechnerisch ermittelten Randverdrehung; sie wird aber "zu spät" angepaßt und der so simulierte Abbau der Exzentrizität bleibt unter den tatsächlichen Werten. Die immer noch zu starke rechnerische Behinderung der Randverformungen führt systematisch zu einer rechnerischen Unterschätzung der Verformungen.

Der in /30/ aufgeführte Randbalken-Einfluß scheidet nach ergänzenden Versuchsauswertungen (Abschnitt 3.2) als Ursache für zu gering berechnete Verformungen aus. Ohne die Beachtung der lokalen Verhältnisse an den Zwängungspunkten lassen sich die "Standard-Versuche" nicht wirklichkeitsnah nachvollziehen (dazu: Abschnitt 5.4.3).

f) Durch das Ausweichen der Zwangpressen an der Randmitte wird bei den Versuchen eine Kraftumlagerung hin zu den ecknahen Zwang-Pressen begünstigt. Damit wird ein Vorgang unterstützt, der so auch bei partiell beflamten rechteckförmigen Platten eintritt. Die Zwangkräfte aus behinderter Längsausdehnung treten bei durchgebogenen Platten vorwiegend im Bereich der Ecken auf, während an den Seitenmitten mit wachsender Branddauer eine Normalkraftentspannung zu beobachten ist.

Das Zwangmoment hingegen wächst bei durchlaufenden Konstruktionen bis zum Erreichen des plastischen Momentes an. Dieser Grenzwert ist gekennzeichnet durch das Fließen der oberliegenden Stützbewehrung. Bei großen Rotationen kann bei gutem Verbund zwischen Beton und Bewehrung der Stahl zerreißen (vorwiegend bei geschweißten Baustahl-Gewebematten mit dünnen Stäben), womit das Stützmoment plötzlich - zumindest lokal - stark abfällt (s. Versuch S 1/86, S. 76).

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Beobachtungen und Meßergebnisse aus den eigenen Versuchsserien beschrieben, zusammengefaßt und bewertet. Vorrangig wird der Einfluß der Behinderung freier Verformungen am Rand eines direkt beflamten Deckenteils behandelt.

Hier werden ausschließlich Versuche miteinander verglichen, die im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 148 in dem zuvor beschriebenen Deckenprüfstand durchgeführt worden sind. All diese Versuche sind durch umfangreiche Meßwerte dokumentiert /25/. Eigene - die Messungen ergänzende - Beobachtungen während der Versuchsdurchführung geben weitere wichtige Hinweise für die Bewertung einzelner Meßwerte.

Angestrebt wird eine Übertragung der durch die Versuche gefundenen Zusammenhänge auf wirkliche Bauwerke. Dazu müssen Versuchs-Beobachtungen zunächst kritisch bewertet werden. Einzelne Versuchsergebnisse können zwar einen Hinweis auf einen generell bestehenden Zusammenhang liefern, sie dürfen jedoch nicht vorschnell als generelle Bestätigung einer Vermutung gedeutet werden. Da z. B. Doppelversuche aus Kostengründen nicht durchgeführt werden konnten und Vergleiche mit Versuchsergebnissen anderer Forscher nur in sehr begrenztem Umfang möglich sind, müssen aus Vorsicht die eigenen Versuche in besonderem Maße kritisch und konservativ ausgelegt werden. In den nachfolgenden Versuchsbesprechungen wird dies deutlich durch die Terminologie bei der Formulierung von Versuchsergebnissen. Hier werden die Ausdrücke "Beobachtung" und "Erkenntnis" verwendet, um auch eine begriffliche Klassifizierung der Güte einzelner Teilergebnisse herbeizuführen. Als Erkenntnis werden hier auch bereits grundsätzlich bekannte Zusammenhänge bezeichnet. Eine formelmäßig verkürzte Ausdrucksweise mit der Angabe von Gültigkeitsbereichen und Einschränkungen bzw. Nebenbedingungen macht die Zusammenhänge klarer. Es werden jeweils direkte Abhängigkeiten der Ausdrücke auf der linken Seite der Beziehungen von den Ausdrücken auf der rechten Seite angenommen. Dabei wird ein linearer Zusammenhang nicht unterstellt.

Die Versuchsauswertung konzentriert sich auf die qualitative Formulierung von Zusammenhängen. Für allgemeingültige quantitative Angaben zu Detailfragen erscheinen die Meßwerte zu stark von der Art der Versuchsdurchführung abzuhängen. Da sind unter anderem der hohe Einfluß der neben der Dehnbehinderung wirksamen Rotationsbehinderung und die Art der gewählten Funktion für die freigegebenen Verschiebungen zu nennen. Die grundsätzlichen Abhängigkeiten sind dagegen übertragbar. Durch die Darstellung und die ausführliche Diskussion von Meßwerten wird ein umfassender Einblick in die Größenordnung interessanter Kennwerte ermöglicht.

Da wesentliche Teile des Versuchsaufbaues bei den Versuchen nicht verändert werden konnten, können eventuelle systematische "Störeinflüsse" aus der Versuchsanlage nur schwer erkannt und eliminiert werden. Es besteht also die Möglichkeit, daß künftige Untersuchungen mit einem modifizierten Versuchsaufbau im Detail zu anderen Aussagen kommen könnten. Daher ist es besonders wichtig, mit einer theoretischen Begleitung die im Versuch gefundenen Zusammenhänge erklären zu können. Die Versuche dienen also nicht nur als Grundlage zur Verifizierung der Theorie, sondern auch die Theorie muß umgekehrt die Versuchsergebnisse bestätigen. Erst beide Untersuchungsmethoden zusammen liefern die Sicherheit, um Erkenntnisse allgemeingültig formulieren zu können und diese dann auf wirkliche Verhältnisse übertragen zu dürfen.

Bei der Auswertung der Versuche bleiben zunächst die theoretisch gewonnenen Erkenntnisse unberücksichtigt. Jedoch wird auf parallele theoretische Untersuchungen/Erkenntnisse verwiesen. Geringfügige Differenzen zwischen den experimentell und theoretisch abgeleiteten Tragmodellen werden bewußt offengelegt, um die Möglichkeiten der unterschiedlichen Verfahren zu dokumentieren. Während rechnerische Methoden den Blick ins Innere des Kontinuums an jedem Punkt ermöglichen und damit eine verfeinerte Analyse zulassen, erlaubt der Großversuch eine ganzheitliche Betrachtungsweise des Zusammenwirkens aller beteiligten Parameter.

Wesentlich erleichtert (eigentlich erst ermöglicht) wird die Übertragbarkeit durch die Abmessungen der Versuchs-Platten im Originalmaßstab 1:1.

Mit den zunächst zu besprechenden Versuchsergebnissen wird im folgenden Abschnitt 3.2 die Frage abgehandelt, in welcher Weise das Verformungsverhalten der Versuchs-Platten beeinflusst wird vom umlaufenden Randbalken und von der Mindest-Haltekraft, mit der die Pressen bei den weggesteuert dehnbehinderten Platten später auch dann noch gegen die Platten drücken sollen, wenn bei großen Bauteilverformungen die Sollkurve nicht mehr eingehalten werden kann. Die Platte 1, in die keinerlei Horizontalkräfte von außen eingeleitet werden, dient als ungezwängte Platte in vergleichenden Betrachtungen als Maßstab für die Wirkung von Dehnbehinderungen. Schon bei dieser Untersuchung wird der extreme Zuwachs der Tragfähigkeitsdauer infolge horizontaler Zwängung bewiesen.

Aus diesen Versuchen ergibt sich die Frage nach dem Verlauf der von den Pressen eingeleiteten Normalkräfte, wenn sich die Platten stark durchgebogen haben. Außerdem muß wegen eines möglichen Ausweichens der Zwang-Pressen gesondert nachgewiesen werden, daß sich die angestrebten Ergebnisse überhaupt mit der bestehenden Versuchsanlage erzielen lassen.

Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen führen im Abschnitt 3.3 zur Entwicklung des **Druckring-Modells**, bei dem ein randnaher Druckring im beflamten Bereich die Platte vorspannt und das Verformungsverhalten bestimmt.

Danach wird im Abschnitt 3.4 das Druckring-Modell mit verschiedenen Dehnbehinderungsgraden und Plattendicken bestätigt.

Anschließend wird im Abschnitt 3.5 der Grenzfall der vollständigen Dehnbehinderung untersucht.

Zum Abschluß wird unter Punkt 3.6 ein Plattenversuch behandelt, bei dem keine Zwang-Pressen, sondern ein nicht beflamter Randsteifen die Dehnbehinderung bewirkt. Diese tatsächlich partiell beflamte Platte bestätigt in hohem Maße die wesentlichen Erkenntnisse aus den Standard-Versuchen mit Zwang-Pressen.

Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen werden im Abschnitt 3.7 zusammenfassend besprochen und bewertet.

3.2 Auswirkungen der Mindesthaltekraft und des Randbalkens

Im Bild 3.1 ist die zeitliche Entwicklung der Durchbiegung in Feldmitte der 3 hier zu vergleichenden Platten (Platte 1, Q 1/82 und Q 5/82) eingetragen. Die variierten Größen der sonst gleichen Versuche geht auch aus diesem Bild hervor. Hervorzuheben ist, daß sowohl die Platte 1 als auch die Platte Q 1/82 von gleichartigen Randbalken umgeben sind.

Auffallend ist die zunächst gleiche Verformungsentwicklung der 3 Platten während der ersten 30 Minuten. Weder der Randbalken noch die Haltekraft oder die Feldbewehrung kann also in dieser Phase den Versuch beeinflussen. Die ungezwängte, frei drehbar aufliegende Platte 1 versagt mit dem Erreichen der kritischen Temperatur von ca. 550 °C nach 65 Minuten Branddauer und die Platte Q 5/82 wegen der geringeren Auslastung der Bewehrung nach 100 Minuten. Bei beiden Platten können kaum Momentenumlagerungen auftreten, da am Bauteilrand keine Stützmente abgenommen werden.

Erst nach ca. 30 Minuten Branddauer biegen sich die beiden Platten mit der Mindesthaltekraft langsamer durch als die Platte 1. Unabhängig von der Angriffsebene der Zwang-Pressen verformen sich die beiden Platten zunächst gleich weiter, bis nach ca. 60 Minuten die Durchbiegungen etwa 15 cm betragen. Erst danach sind die Verformungszunahmen kleiner bei der Platte mit Randbalken und tiefer angreifenden Zwang-Pressen, obwohl diese weniger stark bewehrt ist. In diesem Zeitraum beeinflußt das eingeleitete Randmoment das Plattenverhalten also im gleichen Ausmaß wie eine verminderte Spannungsausnutzung der Feldbewehrung.

Aus der Durchbiegungsentwicklung ergibt sich, daß bereits die hier ständig wirkenden Haltekräfte von ca. 75 kN je Presse die Verformungen deutlich und zwar günstig beeinflussen. Die in diesem Fall lediglich als Meßinstrument eingesetzten Pressen haben trotz der minimalen Kräfte die Tragfähigkeitsdauer der Platten Q 1/82 um etwa eine Stunde gegenüber der Platte 1 vergrößert. Das sind ca. 100 %. Obwohl dieser Effekt bei der Versuchsplanung keineswegs vermutet oder gar absichtlich herbeigeführt wurde, ist der experimentelle Nachweis dieser extrem hohen Empfindlichkeit der Platte in bezug auf exzentrische Nor-

alkraftbeanspruchungen ein bedeutendes Ergebnis dieser Forschungsarbeit:

Bereits äußerst minimale Druckkräfte können die Tragfähigkeitsdauer von Stahlbetonplatten gegenüber Platten ohne Längskraftbeanspruchung im Brandfall wesentlich vergrößern.

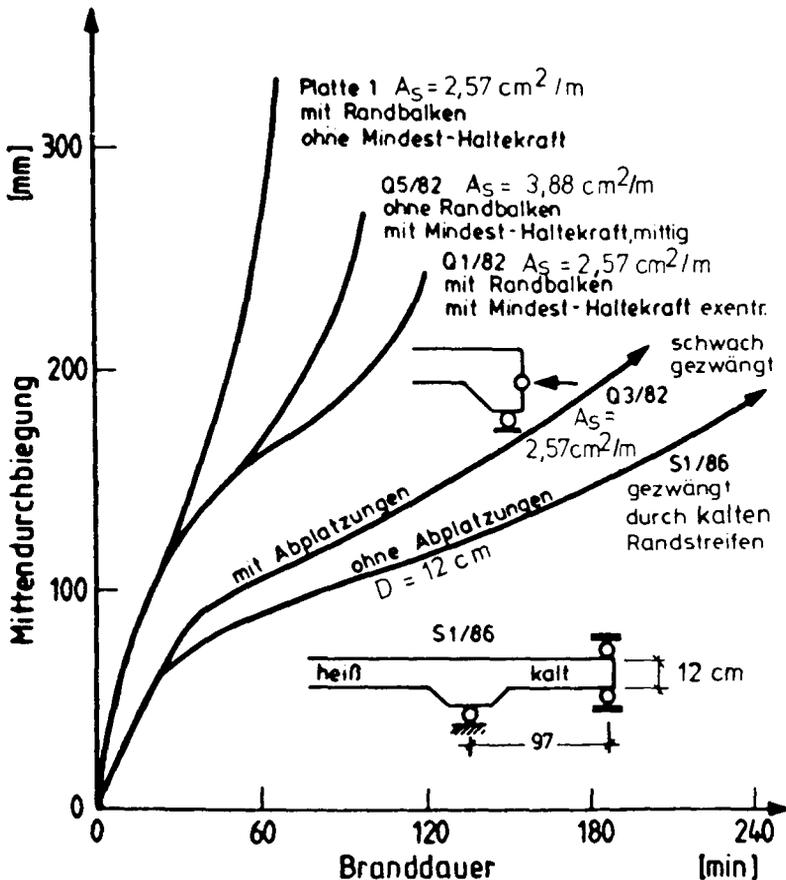


Bild 3.1: Einfluß von schwachen Dehnbehinderungen auf die Durchbiegung von 15 cm dicken Platten

Wie zu erwarten ist, wachsen die Durchbiegungen langsamer weiter, wenn diese Normalkräfte exzentrisch unterhalb der Mittelebene eingeleitet werden. **Gegenüber der ungezwängten Platte 1 tritt eine Verdoppelung der Tragfähigkeitsdauer ein, wenn die Mindesthaltekraft bei Beginn des Brandversuches auf der Höhe der Plattenunterseite angreift.**

In der Anfangsphase der Versuche bestimmt allein der wachsende Temperaturunterschied zwischen der Plattenunter- und der Plattenoberseite das Verformungsgeschehen. Weder der Randbalken noch die Mindesthaltekraft können einen sichtbaren Einfluß ausüben. Erst ab einer Mittendurchbiegung von ca. 12 cm ist ein Einfluß der Haltekraft erkennbar. Dann unterstützen die exzentrischen Mindesthaltekräfte die Platte Q 1/82 im gleichen Maße wie der erhöhte Bewehrungsgrad die Platte Q 5/82.

Zunächst wirkt sich das eingeleitete Randmoment nicht verformungsmindernd aus. Bei einer Mittendurchbiegung von ca. 15 cm hat sich der wahre Kraftangriffspunkt an der Mittenpresse gegenüber der Einbauhöhe zu Versuchsbeginn bei diesem Versuchstyp um ca. 20 mm nach oben verlagert. Erst im weiteren Versuchsablauf gewinnt die tatsächliche Wirkungsebene der Pressen an Bedeutung. Dann wirkt das eingeleitete Randmoment bei der Platte Q 5/82 bereits rotationsfördernd, während bei der Platte Q 1/82 noch eine Rotationsbehinderung des Randes vorliegt. Die Stützung durch die Exzentrizität bei der Zwangkräfteinleitung übertrifft die Wirkung einer geringeren Stahlausnutzung.

Diese 3 Kurven werfen noch eine weitere wichtige Frage auf:

Bei einer Mittendurchbiegung, spätestens wenn sie die Größe der Plattendicke überschreitet, muß jede Druckkraft unabhängig von der Höhe des Einleitungspunktes Zusatzverformungen nach der Theorie II. Ordnung bewirken. Die Plattenversuche scheinen zunächst diesen elementaren Zusammenhang zwischen Kraft und Verformung zu widerlegen, aber die Beobachtungen lassen sich folgendermaßen erklären:

- a. Die Kräfte werden nicht ausschließlich in der Mitte der Ränder in die Platte eingeleitet sondern außerdem an zwei weiteren Stellen, die in der Nähe der Ecken liegen. Unterstellt man für den Kraftfluß gerade Linien zwischen den Pressen und den Widerlagern, so

wirken $\frac{2}{3}$ der Normalkräfte auf wenig durchgebogenen randnahen Streifen aussteifend und nur $\frac{1}{3}$ auf einem stark verbogenen Mittelstreifen weiter durchbiegungsfördernd. Dieser Mittelstreifen grenzt aber an die Randstreifen und wird von ihnen gestützt.

- b. Die Normalkräfte können bei flächenartigen Bauteilen auch auf gekrümmten Bahnen weitergeleitet werden. Bei den stark durchgebogenen Platten kann sich das Plattenzentrum also der Normalkraft entziehen. Im Falle großer Durchbiegungen darf grundsätzlich nicht angenommen werden, daß punktuell am Rand eingeleitete Normalkräfte auf geradlinigem Wege durch die Platte verlaufen, um ein gegenüberliegendes Auflager zu erreichen.

Der Verlauf der Normalkräfte innerhalb der Platte zwischen den Zwangpressen und den Widerlagern wird im Kap. 5 rechnerisch und im folgenden Abschnitt experimentell untersucht.

3.3 Untersuchungen zur Wirkung der Zwängung an den Seitenmitten

3.3.1 Allgemeines

Aus den vorangegangenen Untersuchungen wurde die Vermutung abgeleitet, daß die von den Pressen in die Platte eingeleiteten Normalkräfte das Plattenzentrum umfließen und somit die Auswirkungen der Zusatzmomente aus der Theorie II. Ordnung vermindern. Die Auswirkung besonders der von den Mittenpressen eingetragenen Kräfte wird an dieser Stelle geklärt. Es wird der Verlauf der Druckkräfte durch die Platten untersucht und die Folgen des Ausweichens der Mittenpressen abgeschätzt.

Da ein Ausweichen der Pressen nach oben nicht verhindert werden kann, kann der Einfluß dieser Pressenbewegung nicht auf direktem Wege versuchsstechnisch untersucht werden. Lediglich über die Auswirkungen der von den Mittenpressen ausgehenden Zwangkräfte lassen sich auf experimentellem Wege Erkenntnisse gewinnen. Dazu sind solche Versuche mit 12 cm dicken Platten durchgeführt worden, bei denen die Anzahl der eingesetzten Zwang-Pressen gegenüber den Standardversuchen verändert ist. Bei der Platte Q 7/84 sind nur die äußeren Pressen und bei der Platte Q 8/84 nur die mittleren Pressen weggesteuert verwendet. Die restlichen Pressen arbeiten jeweils kraftgesteuert bei konstanter Mindesthaltekraft für die Messung der Verschiebungen bei freigegebenen Wegen. Vergleichsversuche mit allen 6 Pressen sollen die Isolierung des Einflusses einzelner Pressen erlauben. Auf der Widerlagerseite sind die 6 Punkte stets unverschieblich gelagert worden.

3.3.2 Durchbiegungsentwicklung bei unterschiedlicher Zwängung

Im Bild 3.2 sind die Mittendurchbiegungen und die wesentlichen Versuchsparameter angegeben. Es fällt sofort auf, daß sich nahezu unabhängig von der Auswahl der zwängend eingesetzten Pressen in etwa die gleichen Durchbiegungen einstellen. Die Unterschiede sind bezogen auf die absolute Größe der Durchbiegungen gering, und zwar verformen sich die Platten stärker, wenn die Zwängung durch alle Pressen erfolgt.

Es ist erkennbar, daß sich hauptsächlich abhängig von der Höhe der Plattenlast und vom Grad der Dehnbehinderung die Durchbiegungen ein-

stellen, und weitgehend unabhängig sind vom Ort, an dem der Zwang ausgeübt wird, solange die Höhenlage der Zwangskrafteinleitung unverändert bleibt.

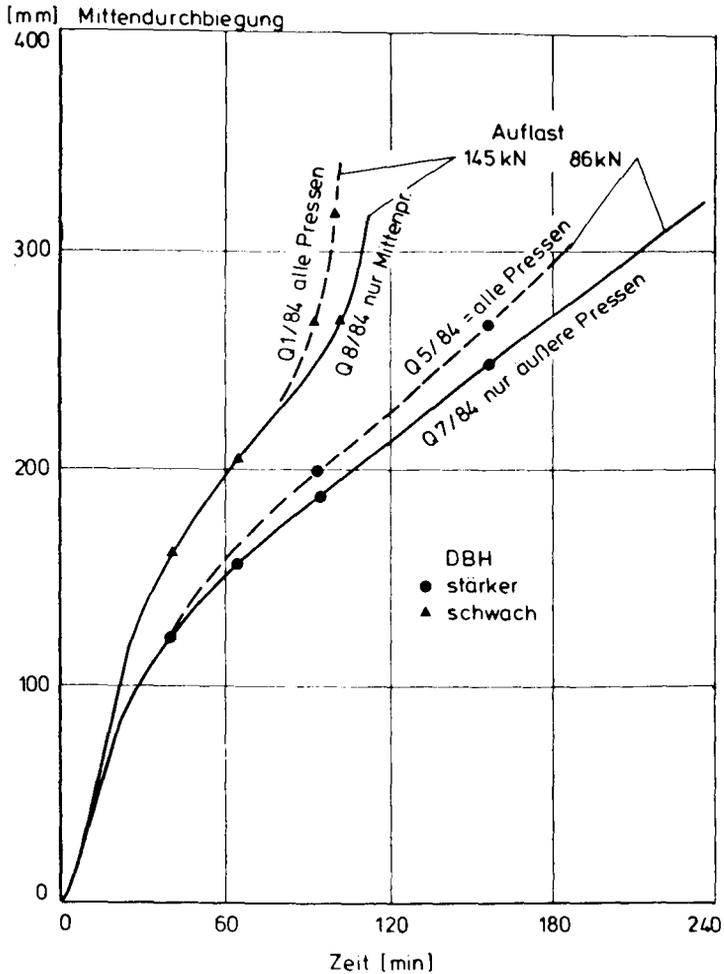


Bild 3.2: Durchbiegungen bei unterschiedlicher Zwangung

Hieraus ist noch nicht erkennbar, zu welchen Anteilen die Höhe der Nutzlast und der Grad der Dehnbehinderung an dem unterschiedlichen Verformungsverhalten ursächlich beteiligt sind. Unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus Vergleichsversuchen mit unterschiedlich hoher Nutzlast bei unveränderter Zwängung (Abschnitt 3.4) läßt sich eindeutig der Grad der Dehnbehinderung als der dominierende Faktor für das Verformungsgeschehen der hier diskutierten Platten ableiten!

Beobachtung 1: $w_{\text{m}} \neq f$ (Ort der Pressen am Rand) bei gleicher Exz.

Erkenntnis 1: $w_{\text{m}} = f$ (Größe der Plattenlast) geringer Einfluß

Erkenntnis 2: $w_{\text{m}} = f$ (Grad der Dehnbehinderung) großer Einfluß

Es bleibt zu beachten, daß die unveränderte Zwängung an den 2 Seiten mit den starren Widerlagern den Presseneinfluß auf die Durchbiegung evtl. erheblich verwischt haben mag. Eine numerische Untersuchung im Kap. 5 zeigt im Gegensatz zu diesen Versuchsergebnissen eine große Bedeutung des Umfangs einer exzentrischen Dehnbehinderung, wenn gleichzeitig auch Rotationsbehinderungen wirksam werden.

Es ist auch zu untersuchen, ob die geringen Durchbiegungsunterschiede bei gleichem Grad der Dehnbehinderung zufälliger Natur sind, oder ob sich dafür Begründungen finden lassen. Eine Erklärung wird am Ende des folgenden Abschnitts gegeben.

3.3.3 Zwangkraftentwicklung bei unterschiedlicher Zwängung (Bild 3.3)

Bei den stärker gezwängten Platten Q 5/84 und Q 7/84 ist zunächst die 45te Minute interessant. Zu diesem Zeitpunkt wird ein Maximum bei den Zwangkräften erreicht, und zwar an der Mittenpresse, wenn alle Pressen zwängen und an den Außenpressen, wenn die Mittenpressen praktisch fehlen. Ohne zwängende Mittenpressen entstehen an den Außenpressen höhere Kräfte. **Offenbar ist bis zu diesem Zeitpunkt die Summe der Zwangkräfte nahezu unabhängig von der Wirksamkeit der Mittenpresse.**

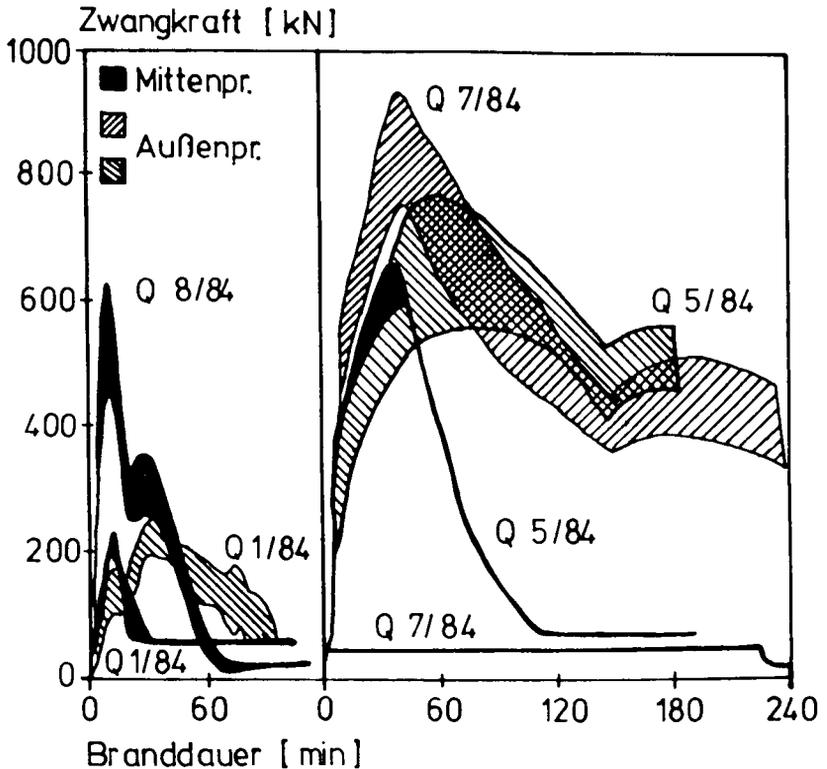


Bild 3.3: Zwangkräfte bei unterschiedlicher Zwangung

Erkenntnis 3: Summe $N_{Zw} \cdot f$ (Ort der Pressen am Rand) bei kleinen w_m

Auch ohne zwingend eingesetzte Mittenpressen entstehen in der Summe gleich hohe Zwangkräfte, die aus Gleichgewichtsgründen auch an den gegenüberliegenden starren Widerlagern vorhanden sind, wo sich die Wirkungsebene während des Versuchs nicht verändert. Die beiden schwach gezwangten Platten bestätigen eindeutig dieses Erkenntnis. Bei ihnen wird das Zwangkraftmaximum jedoch eher, und zwar in der 15ten Minute erreicht.

Nach der 45ten Minute fällt die Kraft an der Mittenpresse rapide ab, während an den Außenpressen die Kräfte noch weiter anwachsen. Ab jetzt findet eine Kraftumlagerung statt und zwar von den Mittenpressen auf die Außenpressen. Im Feld hat die Durchbiegung die Größe der Plattendicke von 12 cm erreicht. Es entzieht sich durch Verformungszunahme teilweise der Druckkraft, und die Mittenpressen entziehen sich gleichzeitig durch Ausweichen nach oben der Zwangskraft. Verbunden mit der Kraftumlagerung auf die Außenpressen ist ein verstärktes Anwachsen der Durchbiegung in diesem Versuch mit zwängender Mittenpresse. Die etwas höhere Normalkraftbeanspruchung bewirkt bei den bereits großen Durchbiegungen das schnellere Wachstum der Verformungen. Nach ca. 2 Stunden drücken die Mittenpressen nur noch mit der Mindesthaltekraft, welche in diesem Fall deutlich niedriger ist als die Zwangkräfte der Außenpressen.

Danach ist die 150te Minute von Interesse. Ab diesem Zeitpunkt werden planmäßig die Kolben sämtlicher Zwangpressen nicht weiter eingezogen. Sofort entwickeln sich an den Außenpressen steigende Druckkräfte; die Durchbiegungsentwicklung geht aber stetig weiter. Hieraus läßt sich eindeutig ableiten, daß bei sehr stark durchgebogenen Platten - in Plattenmitte erreicht die Durchbiegung bereits den doppelten Betrag der Plattendicke - kein direkter Zusammenhang mehr besteht zwischen der Größe der Zwangkräfte an den Außenpressen und der Durchbiegungszunahme in Feldmitte.

Erkenntnis 4: $w_{\square} \neq f(N_{Zw}, \text{Außenpressen})$ bei großen w_{\square}

Vielmehr wird folgendes Druckring-Modell untermauert:

Die Zwangkräfte, die von den Außenpressen in die Platten eingeleitet werden, verleihen den Platten in den randnahen Zonen eine erhöhte Steifigkeit. Sie spannen das Bauteil quasi vor. Inmitten dieses vorgespannten Ringes befindet sich fast ohne Normalkraftbeanspruchung das Plattenzentrum, dessen weitere Verformung u. a. abhängt von der Temperaturentwicklung und von dem Grad seiner Einspannung in diesen Druckring.

Die Steifigkeit und das weitere Ausdehnungsbestreben der randnahen Zone sind jedoch so groß, daß das "Einfrieren" des Verschiebungszusandes

in der 150ten Minute unmittelbar zur Steigerung der Zwangkräfte führt. Diese Unstetigkeiten in der Verschiebungs- und Zwangkraftentwicklung wirkt sich im Plattenzentrum nicht mehr aus.

Nun ist aber zu klären, wie sich das Verhalten der schwach gezwängten Platten Q1/84 und Q8/84 mit diesem Modell beschreiben läßt.

Auch bei der schwächeren Dehnbehinderung und einer höheren Belastung kann sich der Druckring bilden, obwohl sich die Platten stärker verbiegen. Seine Steifigkeit ist aber geringer. Bewußt wird der "Vorspanngrad" durch die Wahl der Sollkurve für die Dehnbehinderung abgemindert. Bei der Platte Q 1/84 ist die Umlagerung der Zwangkräfte von den Mittenpressen auf die Außenpressen wesentlich früher und mit kleineren Kräften zu beobachten als bei der Platte Q 5/84.

Ebenso wie im Falle der 6 weggesteuerten Pressen (Q 1/84) bauen sich auch dann an den Mittenpressen die Zwangkräfte ab, wenn allein diese Pressen weggesteuert werden (Q 8/84). Die freiwerdenden Kräfte können sich jetzt nicht auf die nun kraftgesteuerten Außenpressen umlagern, denn die Außenpressen geben dem Verformungsbestreben der Platte leicht nach und nehmen keine zusätzlichen Zwangkräfte mehr auf. Nach ca. 1 Stunde können auch die Mittenpressen nur noch mit der Haltekraft gefahren werden, und der Grad der Dehnbehinderung entspricht an keinem Randpunkt mehr der Sollkurve; d. h.: am Angriffspunkt der Mittenpressen würde gemäß der Sollkurve ein größerer Dehnweg freigegeben als an der Platte überhaupt noch entsteht.

Ab der 60ten Minute werden in beiden "schwach" gezwängten Versuchen von den Mittenpressen nur noch die Haltekräfte in die Platten eingeleitet; die gesamte Normalkraftbeanspruchung ist jedoch ebenso wie die Haltekraft bei der Platte Q 1/84 größer. An den Seitenmitten eingeleitete Zwang-Druckkräfte fließen teilweise durch stärker durchgebogene Plattenbereiche und vergrößern damit die Durchbiegungen.

Beobachtung 2: $w_{\square} = f(N_{Zw}, \text{Mittenpressen})$ bei großen w_{\square}

Das etwas frühere Versagen der Platte Q 1/84 ist mit den höheren Zwangkräften in Verbindung mit den großen Durchbiegungen zu erklären.

3.3.4 Bedeutung der einzelnen Pressen für den Versuchsablauf

Bei großen Durchbiegungen findet eine Umlagerung der Zwangkräfte von den Mittenpressen zu den Außenpressen statt. Die Mittenpressen werden entlastet, weil die großen Durchbiegungen im Plattenzentrum einen Kraftfluß zur Mitte der Ränder hin erschweren, und weil die Pressen durch die Schiefstellung den Kräften ausweichen!

In der Anfangsphase des Versuchs Q 5/84 kann die hohe Zwangskraft der Mittenpressen das Biegeverhalten im Vergleich zu dem der Platte Q7/84 nicht beeinflussen, obwohl die Pressen noch weit unterhalb der Querschnittsmitte wirken. Die wirksame Rotationsbehinderung und die Wirkung der Zusatzmomente aus der Theorie II. Ordnung heben sich gegenseitig auf.

Beobachtung 3: $w_m \neq f(N_{Zw}, \text{Mittenpressen})$ bei Versuchsbeginn bei kleinen w_m

Bereits in der Anfangsphase der Brandversuche kann sich trotz großer Exzentrizität der Zwangskraft der Plattenrand verdrehen. Das Zwangmoment ist für eine wirkungsvolle Rotationsbehinderung vom Beginn der Versuche an zu gering. Die Zwangkräfte werden von der wenig verformten Platte in diesem Versuchsstadium leicht aufgenommen. Im Druckring-Modell des vorigen Abschnittes spielt die Mittenpresse auch keine Rolle.

Ein weiterer Grund für den Abbau der Zwangkräfte an den Mittenpressen kann gefunden werden, wenn man den Weg der weggesteuerten Zwangpressen (Q 7/84) mit den Ist-Wegen der Mittenpressen unter Haltekraft vergleicht (Bild 3.4).

Bis zur 45ten Minute verschiebt sich der Rand in der Mitte schneller als im Eckbereich. Die weiteren Verschiebungen erfolgen am gesamten Rand nahezu gleich; die Kurven verlaufen parallel. Die Verschiebungen werden also zunehmend von den Ecken her gesteuert. Je stärker aber die Außenpressen die Verschiebungen bestimmen, desto weniger Kraft ist erforderlich, um die Randmitten an der Ausdehnung zu behindern. Im Vergleichsversuch Q 5/84 kann man genau das am Abfall der Zwangkraft der Mittenpressen erkennen (Bild 3.3).

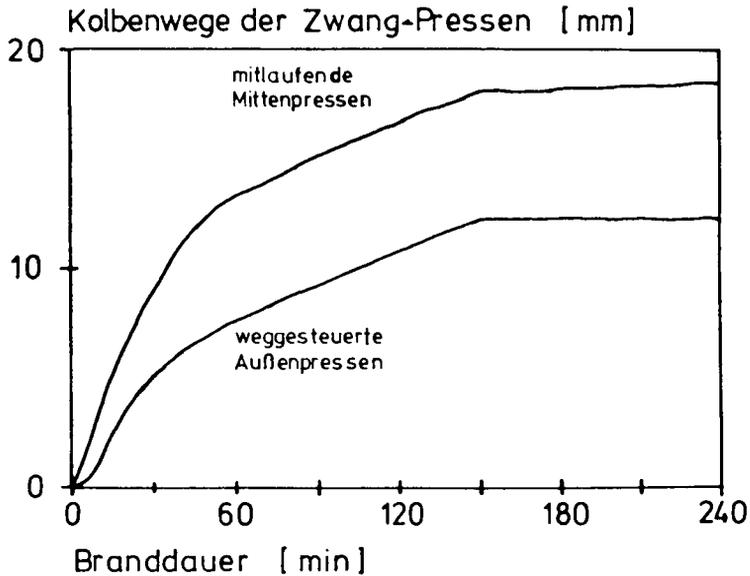


Bild 3.4: Randverschiebungen der Platte Q 7/84

Sind bei der Platte erst sehr große Durchbiegungen eingetreten, dann können die dort vorhandenen Mittenpressen eine weitere Randverdrehung kaum behindern. Wegen der durch die Abschaltung künstlich verstärkten Schwächung der Torsionssteifigkeit im Randbereich kann von den Außenpressen her die Verdrehbehinderung an den Seitenmitten nicht wirkungsvoll unterstützt werden. Wird die Randmitte in Richtung des Plattenfeldes hin verschoben, so ist dazu ebenfalls keine große Kraft mehr erforderlich. Die Platte gibt dem nach und reagiert mit einer Vergrößerung der Durchbiegungen. Bei der Platte Q 5/84 bewirkt die zusätzliche Behinderung der Randverschiebung auch in der Mitte der Rander nur etwas größere Durchbiegungen im Feld, ohne daß bedeutende Kräfte letztlich im Spiel sind.

Beobachtung 4: $w_m = f(u \text{ an den Seitenmitten})$ bei großen w_m

3.3.5 Auswirkung der Schiefstellung der Zwang-Pressen

Sowohl die obigen Überlegungen als auch Messungen haben gezeigt, daß eine Schiefstellung der Zwang-Pressen von der Randverdrehung abhängt und im wesentlichen auf die mittleren Pressen beschränkt bleibt. Daraus resultiert in Randmitte eine Abminderung der Dehnbehinderung, indem einerseits ein geringfügig größerer horizontaler Weg von den Pressen freigegeben wird, und sich andererseits die Stelle, an dem die Dehnbehinderung ansetzt, nach oben wandert und wegen des Hebelarm-Effektes die Dehnbehinderung an Wirksamkeit verliert.

Die vorstehende Erörterung hat ergeben, daß wegen der Gelenkkette am Pressenrand an den Seitenmitten die Rotationsbehinderung stark vermindert ist. Die Zwangmomente an den Seitenmitten können sich im Versuch kaum entwickeln, während dagegen bei durchlaufenden Platten über den Auflagerlinien die Zwangmomente bis zum Fließmoment des Querschnitts anwachsen können.

Eine wirksamere Rotationsbehinderung an den Seitenmitten hätte die Durchbiegungen sämtlicher Plattenversuche vermindert und damit auch die Tragfähigkeitsdauer positiv beeinflußt.

Auch bei durchlaufenden Platten entstehen die maximalen Zwangkräfte in der Nähe der Ecken, nachdem bereits bestimmte Durchbiegungen aufgetreten sind. Insofern verstärkt das Ausweichen der Pressen im Versuch einen Vorgang, der ebenso bei praktisch vorkommenden Systemen eintritt.

Im Hinblick auf die angestrebten Erkenntnisse aus den Versuchen, nämlich den Einfluß hauptsächlich der Zwangkräfte auf das Biegeverhalten zu erkennen, ist festzustellen:

Durch die Verringerung der wirksamen Rotationsbehinderung wird in den Versuchen der Einfluß der Zwangkräfte bei der Stabilisierung der Platte hervorgehoben.

Obwohl sich bei wirksamerer Rotationsbehinderung die Platten weniger durchgebogen hätten, können mit den durchgeführten Versuchen fundierte Aussagen über die Wirkungsweise und zur Bedeutung der Zwangkräfte gemacht werden!

Mit Hilfe der bestehenden Versuchsanlage lassen sich also auch mit ausweichenden Zwang-Pressen in der Mitte der Ränder die erstrebten grundlegenden Erkenntnisse zum Einfluß von Dehnbehinderungen auf das Trag- und Verformungsverhalten brandbeanspruchter Stahlbetonplatten erzielen!

3.4 Auswirkung einer teilweisen Dehnbehinderung

3.4.1 Allgemeines

Die bereits besprochenen Versuche haben ergeben, daß eine Erhöhung der Dehnbehinderung die Plattendurchbiegungen reduzieren kann. Dabei wurden im Falle der 15 cm dicken Platten nur die unteren Grenzwerte der möglichen Dehnbehinderung getestet. Da bei den Versuchen des vorausgegangenen Kapitels ebenfalls die statische Last verändert wurde, geht der Einfluß des Grades der Dehnbehinderung daraus noch nicht eindeutig hervor. In diesem Abschnitt werden nur solche Versuche miteinander verglichen, die sich ausschließlich im Grad der Dehnbehinderung unterscheiden. Der Sonderfall einer vollständigen Dehnbehinderung ist in diesem Kapitel jedoch noch ausgeklammert.

Es wird untersucht, ob sich das im Kapitel 3.3 geschilderte Tragmodell weiter untermauern läßt und inwieweit es von geometrischen Randbedingungen abhängt.

3.4.2 Einfluß einer schwachen Dehnbehinderung

Die Vorversuche des Kapitels 3.2 mit 15 cm dicken Platten werden ergänzt durch Untersuchungen, bei denen die Zwängung nun mit weggesteuerten Zwang-Pressen realisiert wird. Zusätzlich wird der Dehnbehinderungsgrad "schwächer" (s. Bild 2.5) näher betrachtet. Hierfür steht die Platte Q 3/82 zur Verfügung, deren Mittendurchbiegung im Bild 3.1 den Vergleichsplatten gegenübergestellt wird. Bei diesem Versuch schwächten umfangreiche Abplatzungen zwischen der 15ten und der 34ten Minute den Querschnitt erheblich, und die untenliegende Feldbewehrung wurde hierdurch direkt dem Feuerangriff ausgesetzt (Bild 3.5).

Man erkennt zunächst, daß trotz der Abplatzungen die Platte auch nach über 3 Stunden Brandbeanspruchung nicht versagt, und daß sich gegenüber ungezwängten oder nur durch die Haltekraft stabilisierten Platten unter gleicher äußerer Last zu jedem Zeitpunkt geringere Durchbiegungen entwickeln.

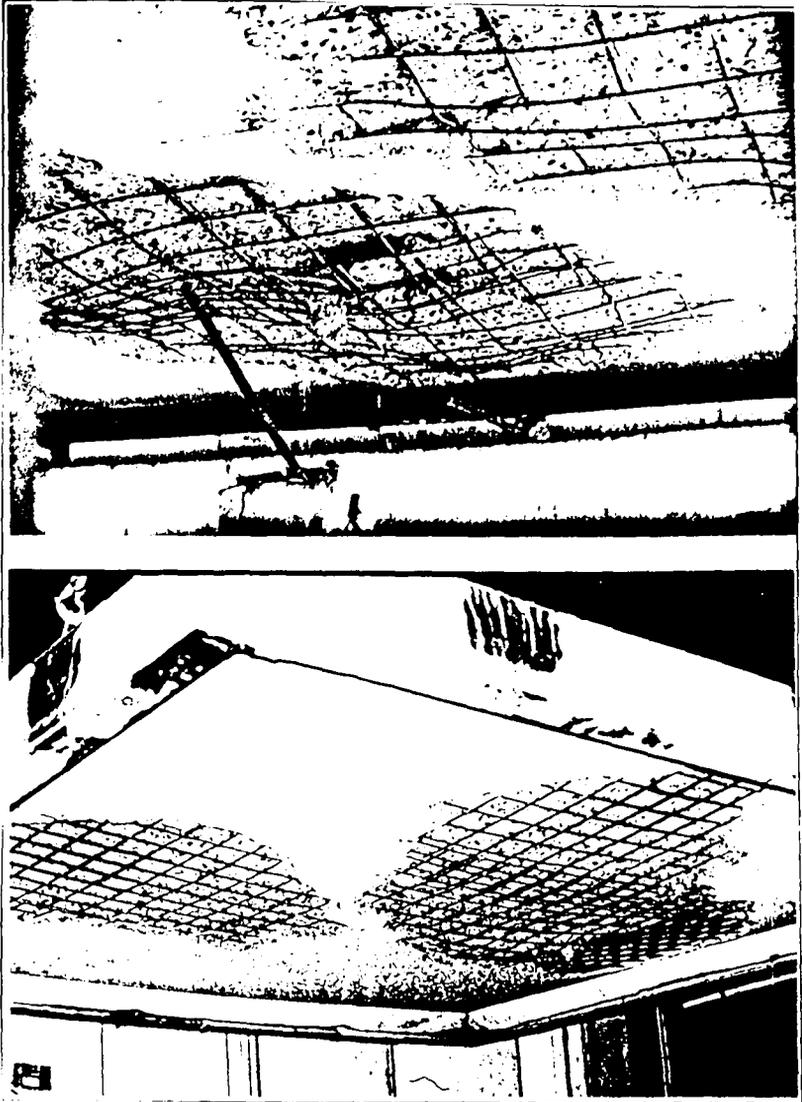


Bild 3.5: Betonabplatzungen nach 15 bis 34 Versuchsminuten
während und nach dem Brandversuch bei der Platte Q 3/82

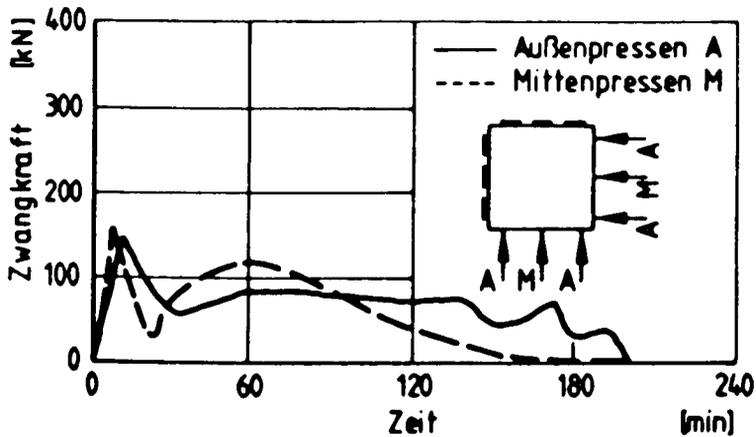


Bild 3.6: Zwangkräfte bei der Platte Q 3/82,
schwache Dehnbehinderung und Abplatzungen

Zunächst ist ein steiler Anstieg der Zwangkräfte zu beobachten mit größeren Kräften an den Mittenpressen (Bild 3.6). Durch die Abplatzungen fallen an allen Pressen die Zwangkräfte stark ab und liegen teilweise noch unter den Haltekraften der Vorversuche. Nach dem Abschluß der Abplatzungen können die Zwangkräfte wieder anwachsen. An den Mittenpressen ist wieder der typische Kraftabfall zu beobachten, während bis zum Versuchsende die Zwangkräfte an den Außenpressen auf niedrigem Niveau nahezu gleich bleiben.

Wegen der Abplatzungen muß beim Vergleich mit den anderen Versuchen beachtet werden, daß hier:

- * der Querschnitt von 15 cm auf ca. 10 bis 12 cm verringert ist;
- * der Rest-Querschnitt starker aber gleichmäßiger durchwärmt wird;
- * die Feldbewehrung rotglühend ohne Verbund unter der Platte hängt.

Für die Bildung eines Druckringes liegen aber auch bei diesem Versuch die notwendigen Voraussetzungen vor, da die Abplatzungen hauptsächlich den Zentrumsbereich betreffen und die randnahen Bereiche weitgehend unzerstört belassen. Obwohl die Zwangkräfte an den Außenpressen im Anschluß an die Abplatzungen nur noch die Größe der Haltekraft annehmen, wird in diesem Versuch die Durchbiegung der Feldmitte stärker re-

duziert als bei den bei den Vergleichsplatten Q1/82 und Q5/82. Das erstaunt um so mehr, wenn man gleichzeitig bedenkt, daß die Feldbewehrung praktisch ausgefallen ist.

Mit dem Druckring-Modell kann erklärt werden, wie die Platte auch ohne Feldbewehrung die Lasten abtragen kann: Die 16 Belastungspunkte befinden sich nämlich vorwiegend im Bereich des Druckringes, der durch den Vorspanneffekt im Brandversuch ausgesteift wird.

Nach dem Abschluß der Abplatzungen tritt sofort eine Verringerung der Durchbiegungszunahme ein. Der reduzierte Rest-Querschnitt wird stärker durchwärmt und besitzt eine wesentlich geringere Dehn- und Biegesteifigkeit als beispielsweise der entsprechende Bereich der Platte Q 1/82. Bei der Platte Q 3/82 kann vom Plattenzentrum daher auch nur eine verminderte Zwangbeanspruchung auf den tragenden Ring weitergeleitet werden. Wenn sich der randnahe Bereich aber weniger stark verformt, so stützt er das Feld stärker und die Mittendurchbiegung wird vermindert.

Der Versuch Q 3/82 hat das Druckring-Modell voll bestätigt und darüber hinaus gezeigt, daß bereits ein von außen nur relativ schwach gestützter Druckring in der Lage ist, die Versuchslasten über lange Branddauern hinweg zu tragen. Es ist außerdem sehr anschaulich klar geworden, daß bei dehnbehinderten Platten die Momentenumlagerungen so weit gehen können, daß im Feldbereich keine positiven Momente mehr existieren. Damit wird im gezeigten Extremfall die untere Bewehrung sogar überflüssig.

3.4.3 Einfluß einer stärkeren Dehnbehinderung

Die Versuchsserie mit 15 cm dicken Platten mußte wegen plötzlicher Auflagen zum Kranbetrieb abgebrochen werden. Daher wird der Vergleich der Dehnbehinderungsgrade "schwach" und "stärker" an 10 cm dicken Platten durchgeführt. Die Belastung wurde nicht verändert. Da sich der Hebelarm der inneren Kräfte um mehr als ein Drittel verringert, erhöht sich die Spannungsausnutzung der Biegezugbewehrung entsprechend. Die Zwang-Pressen werden wieder auf der Höhe der Plattenunterseite eingesetzt. Damit verringert sich die Ausgangs-Exzentrizität von 7,5 auf 5,0 cm.

Der Unterschied im Verformungsverhalten der beiden Platten Q 8/83 und Q 9/83 ist nur noch gering (Bild 3.7), dagegen sind die Zwangkräfte bei der stärkeren Dehnbehinderung deutlich höher und halten sich auch länger (Bild 3.8).

Erkenntnis 5: $w_m \neq f$ (Steigerung der DBH) bei dünneren Platten

Erkenntnis 6: $N_{Zw} = f$ (Steigerung der DBH) auch bei dünneren Platten

Die geringen Unterschiede der Mittendurchbiegungen sollen zunächst nicht weiter beachtet werden. Nun muß erklärt werden, warum die stärkere Dehnbehinderung das Verformungsverhalten nicht stärker beeinflußt hat.

Offenbar genügt bereits eine schwache Dehnbehinderung für die Entstehung des Druckringes. Eine weitere Aussteifung des randnahen Gebietes scheint demgegenüber für das Verformungsverhalten von untergeordneter Bedeutung zu sein. Eine Erhöhung des "Vorspanngrades" des randnahen Druckringes hat also nicht immer eine Reduzierung der Plattendurchbiegung zur Folge. Offenbar wird die optimale Steifigkeit bei den hier gegebenen Verhältnissen bereits mit kleinen Dehnbehinderungsgraden erzielt. **Hohe Normalkräfte können das Tragvermögen des Randstreifens also nicht beliebig steigern.**

Die positive Wirkung der beiden Dehnbehinderungsgrade wird deutlich, wenn die Versuchsdauer von ca. 120 Minuten den etwa 30 Minuten gegenübergestellt wird, nach denen bereits die kritische Temperatur von der

unteren Bewehrung überschritten worden ist. Ohne Dehnbehinderung hätten die Platten zu diesem Zeitpunkt versagt.

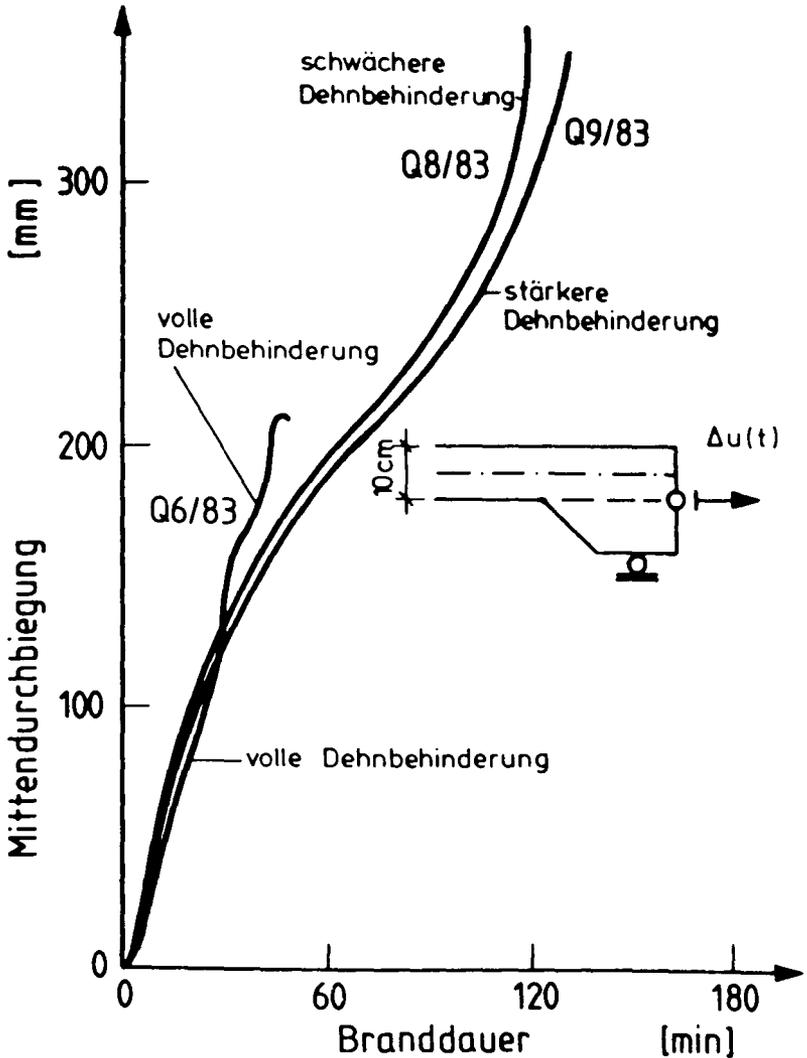


Bild 3.7: Einfluß des Grades einer exzentrischen Dehnbehinderung auf das Verformungsverhalten 10 cm dicker Platten

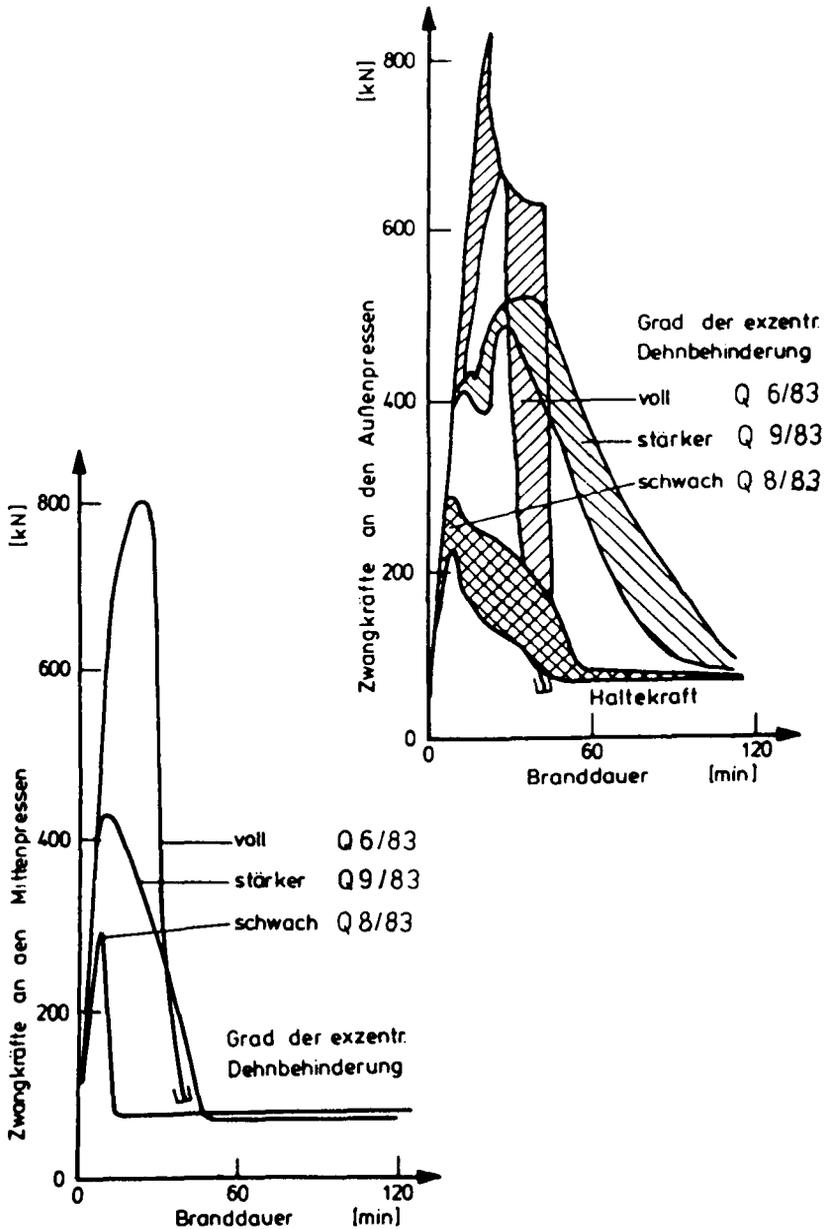


Bild 3.8: Einfluß des Grades einer exzentrischen Dehnbehinderung auf die Zwangskräfte 10 cm dicker Platten

Kontrollversuche mit überhöhter Belastung

Mit den Platten Q 2/84 und Q 4/84 wurde die Frage untersucht, ob eine Dehnbehinderung im günstigen Wirkungsbereich (nämlich zwischen Null und "voll") auch bei stark überhöhter Belastung eine große Tragfähigkeitsdauer hervorrufen kann. Beide Platten sind mit einer Nutzlast von über 220 kN beaufschlagt worden, wobei nun die Plattendicke 12 cm betrug.

Die Bestimmung der Bewehrungsausnutzung erfolgt unter der Annahme unbehinderter Randverdrehung (wegen der im Brandversuch gemessenen hohen Werte für die Randneigung) mit Hilfe der "Czerny-Tafeln" zur Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen und des k_h -Verfahrens ohne Längskrafteinfluß zur Bestimmung der erforderlichen Bewehrungsmenge. In Anlehnung an die gemessenen Festigkeiten ist von einem B35 ausgegangen worden. Danach ergibt sich gemäß DIN 4102, Teil 4:

$$\text{Ausnutzung} = \frac{\text{vorh. Spannung}}{\text{Zugfestigkeit}} = 0.84 \quad \text{des Stahls, und damit}$$

$$\text{crit } T = 350 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{für beide Bewehrungsrichtungen, wenn keine Spannungumlagerung eintritt.}$$

Nach weniger als 30 Minuten war diese Temperatur erreicht, und bei Versuchsende wurden dort über 700 °C gemessen.

Obwohl sich die freigegebenen Horizontalverschiebungen um den Faktor 2 unterschieden, ist das Verformungsverhalten nahezu identisch. Erst nach Überschreiten einer Mittendurchbiegung von ca. 12 cm biegt sich die stärker gezwängte Platte schneller durch als die weniger gezwängte. Der Versagenszeitpunkt liegt bei beiden Platten bei ca. 75 Minuten (s. Bild 3.10). Die Zwangskraftentwicklung (Bild 3.11) ist von Beginn der Versuche an direkt mit der Größe der freigegebenen Wege verknüpft.

An den Außenpressen sind die max. Kräfte bei halbem zugelassenen Weg ca. doppelt so groß wie bei schwacher Dehnbehinderung. Im Falle der

stärkeren Zwängung fallen die Zwangskräfte rasch nach dem Erreichen des Maximums ab (nach ca. 45 Minuten). Bei dieser Platte sind daraufhin die Wege festgehalten worden, so daß sich sofort wieder an allen Pressen die Kräfte aufbauen konnten.

Zu diesem Zeitpunkt lag die Mittendurchbiegung über 15 cm, so daß nur noch unbedeutende Anteile der Zwangslängskräfte durch das Zentrum geleitet wurden. Es ist auch eine schnellere Verformung sichtbar, die auf den nun beginnenden Abbau der Druckaussteifung in den Plattenecken zurückzuführen ist.

Der Beton versagt an der kalten Oberfläche infolge zu hoher Druckbeanspruchung. Das Bild 3.9 zeigt die Risse und die Bereiche der Druckzerstörungen an der unbeflammten Oberfläche zum Zeitpunkt des Bauteilversagens. Die Zwang-Pressen befanden sich an den oberen und rechten Seiten dieser Draufsichten.

Die schwächer gezwängte Platte versagt etwa 5 Minuten vor der stärker gezwängten Vergleichsplatte, welche sich im Versagemoment fast 40 cm durchgebogen hatte.

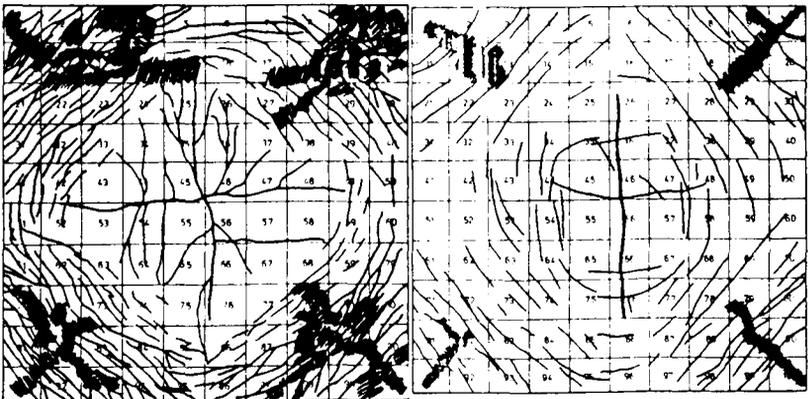


Bild 3.9: Rißbild der Platten Q 2/84 und Q 4/84 zum Versuchsende

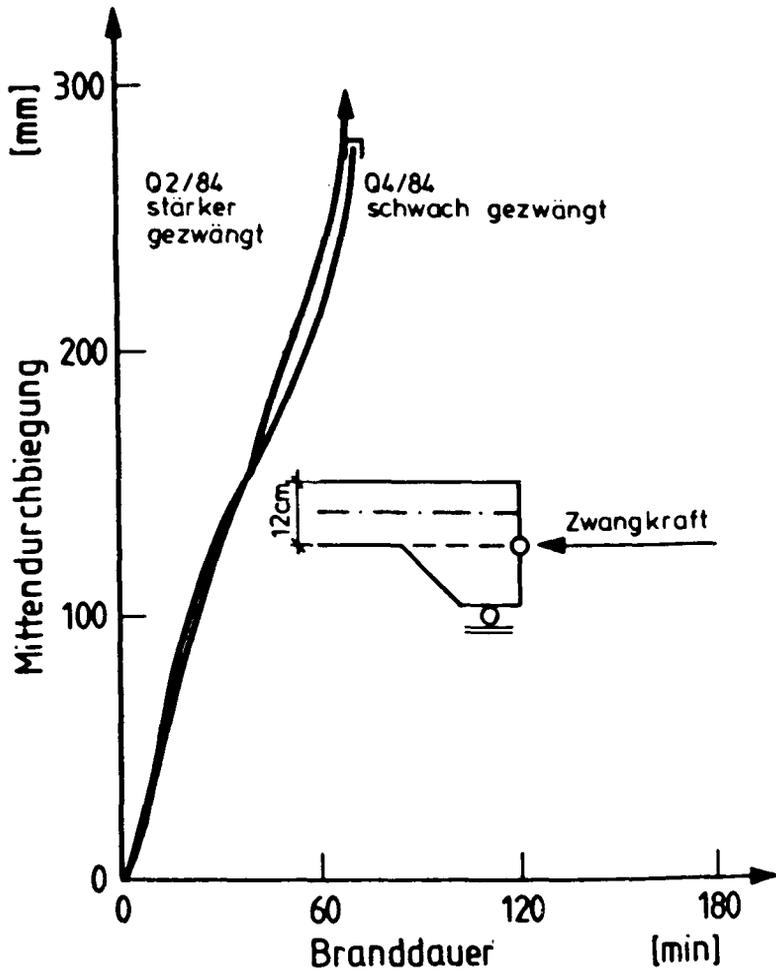


Bild 3.10: Verformungen stark überbelasteter Platten bei unterschiedlichem Grad einer exzentrischen Dehnbehinderung

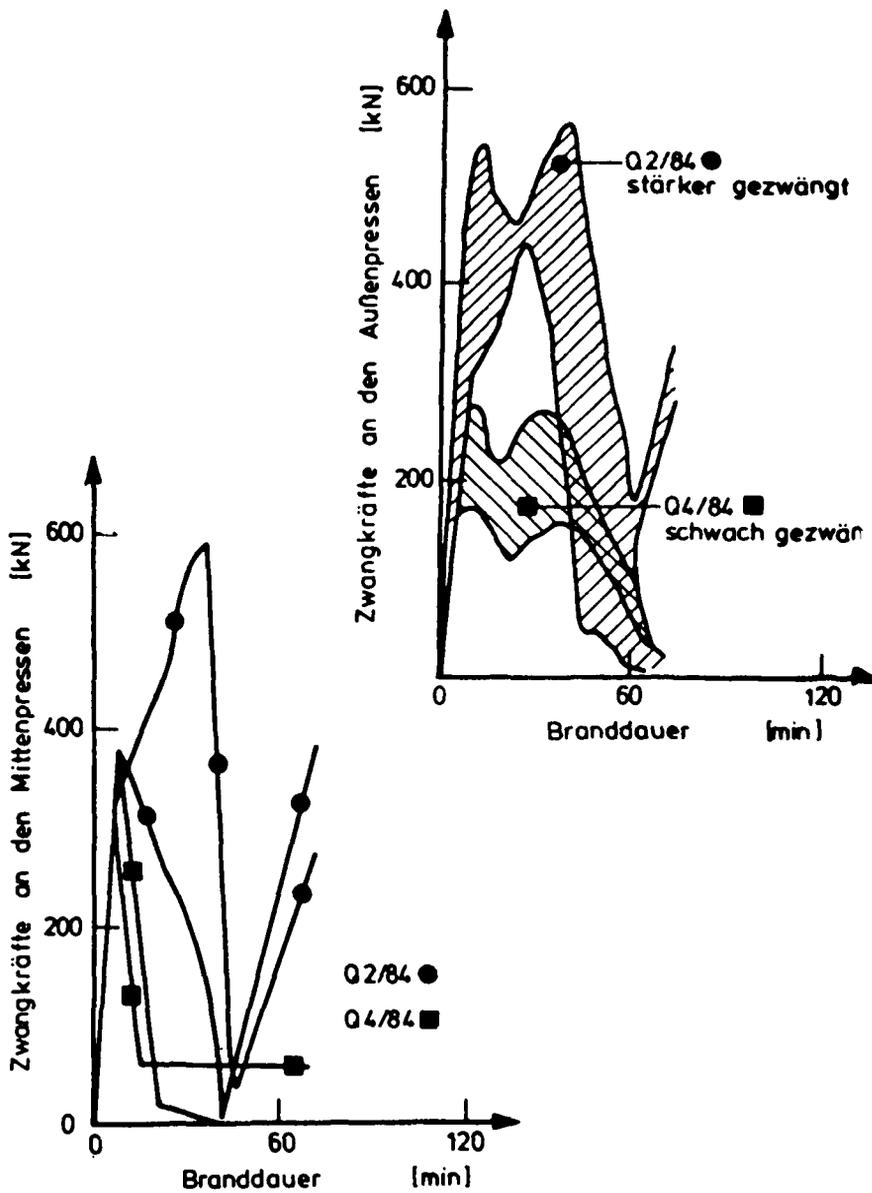


Bild 3.11: Zwangkräfte stark überbelasteter Platten bei unterschiedlichem Grad einer exzentrischen Dohnbehinderung

3.4.4 Zusammenfassung

Die Plattenversuche haben gezeigt, daß eine mäßige Dehnbehinderung, die noch einen gewissen horizontalen Verschiebungsweg ermöglicht, das Verformungsverhalten gegenüber einer ungezwängten Platte positiv beeinflußt. Die Durchbiegungen werden durchweg verringert und die Tragfähigkeitsdauer erhöht. Dazu sind keineswegs sehr große Kräfte erforderlich. Vielmehr kommt es darauf an, daß der freien Verformbarkeit überhaupt ein Widerstand entgegengesetzt wird. Die Höhe der Zwangskraftgrößen ist dann lediglich die Folge aus der Temperaturbeanspruchung, den Steifigkeiten der Bauteile und der genauen Lage der Resultierenden aus den Zwangspannungen am verformungsbehinderten Rand.

Dieser positive Effekt kann auch noch nach Abplatzungen aktiviert werden. Typische Abplatzungen können nach 15 bis 30 Minuten Branddauer erwartet werden, wenn die Bauteile wegen ihres geringen Alters oder wegen eines besonderen Umgebungsklimas große Feuchtigkeitwerte in den äußeren Betonzonen aufweisen.

3.5 Auswirkungen einer vollständigen Dehnbehinderung

3.5.1 Allgemeines

Teilweise dehnbehinderte Platten bilden bei Brandbeanspruchung den vorgespannten Druckring aus, wie er im Tragmodell des Kapitels 3.2 beschrieben wird. Seine Tragfähigkeit bewirkt das günstige Verformungsverhalten solchermaßen gezwängter Platten. Es hat sich aber auch gezeigt, daß eine weitere Verbesserung durch die Erhöhung der Zwängung auf Grenzen stößt. Beim Grenzfall der vollständigen Dehnbehinderung sind die maximalen Zwangkräfte zu erwarten. Es ist interessant zu ergründen, in wieweit die maximal möglichen Dehnbehinderungen noch in das Tragmodell passen. Damit werden dann die Untersuchungen zum Einfluß des Grades der Dehnbehinderung abgerundet und abgeschlossen. Weitergehende Ausführungen zur vollständigen Dehnbehinderung sind in /21/ enthalten.

3.5.2 Vergleich mit teilweisen Dehnbehinderungen

Im Bild 3.7 ist die Mittendurchbiegung der vollständig dehnbehinderten Platte Q 6/83 mit eingetragen. Aus dem Vergleich mit den beiden teilweise dehnbehinderten Platten lassen sich sofort **drei verallgemeinerungsfähige Aussagen** machen:

- a. Die vollständige Dehnbehinderung kann bei dem gewählten Versuchsaufbau die Durchbiegung nur in der Anfangsphase des Brandversuches um einen geringen Betrag weiter vermindern.
- b. Übersteigt die Mittendurchbiegung den Betrag der Plattendicke, so ist keine Reduzierung der Durchbiegungen gegenüber einer teilweisen Dehnbehinderung mehr möglich.
- c. **Extreme Dehnbehinderungen können die Standsicherheit des beflamten Bauteils gefährden.**

In diesem Fall verbiegt sich die Platte sprunghaft, nachdem die Durchbiegungen die Größe der Plattendicke überstiegen haben und versagt dann wesentlich vor den beiden Vergleichsplatten. Statt die Tragfähigkeit des Randstreifens weiter zu erhöhen, bewirkten die von der vollständigen Dehnbehinderung hervorgerufenen hohen Zwangkräfte nun ein plötzliches Druckversagen im randnahen Gebiet. Das Versagen des

Randes trat in diesem Fall nach ca. 30 Minuten auf. Mit einem einzigen lauten Knall wurden bedeutende Teile des Betons von der Plattenunterseite weggesprengt. Im Gegensatz zu den Abplatzungen bei der Platte Q 3/82 ist dieses Ablösen von Beton nicht hauptsächlich vom Wasser mitbegründet, sondern es handelt sich hier um die ungünstige Kombination von zu hohen Druckspannungen mit hohen Temperaturen.

Entsprechende Versuche haben gezeigt, daß eine Erhöhung der Nutzlast in der Lage ist, die hohen Druckspannungen der unteren Betonschichten soweit abzubauen, daß die zerstörerischen Betonabsprengungen erst nach einer längeren Branddauer auftreten. Höhere Lasten verlängern also bei extremen Dehnbehinderungen die Tragfähigkeitsdauer /21/.

Bei den großen Biegeverformungen und den extremen Zwangkräften (maximal ca. 1200 kN pro Presse, Q 3/83 und Q 4/83 /21/) wirken die Zusatzmomente aus Th. II. Ordnung stark durchbiegungsfördernd. Dem steht nur ein geringer Rotationswiderstand gegenüber. Eine andere, nur durch ihr Eigengewicht belastete Platte (Q 2/83) versagte nach den Betonabsprengungen nicht; vielmehr bog sie sich daran anschließend wieder zurück /21/.

In der Baupraxis werden Dehnbehinderungen i. a. so stark reduziert, daß die hier beobachteten Versagensmechanismen nicht zu erwarten sind. Sie stellen ein eher theoretisches Problem dar. Verformungen auch der kalten Umgebungsbauteile infolge Ribbildung reichen aus, um die Zwangdruckkräfte unter ein kritisches Maß zu senken. Zu dieser Erkenntnis kommen schon 1966 SELVAGGIO und CARLSON /27/ nach entsprechenden Brandversuchen.

3.6 Die partiell beflamte Platte

3.6.1 Allgemeines und Zielsetzung

Der standardmäßige Versuchsaufbau mit sechs horizontal an zwei Plattenrändern exzentrisch angreifenden Pressen zur Simulation einer Behinderung der freien Längsdehnung und der freien Endverdrehung basiert auf zwei Grundvoraussetzungen:

1. Das Maß einer Dehnbehinderung (d.h. die Größe des im Versuch freizugebenden Weges an einem Punkt des Endquerschnittes) kann in etwa realistisch, bezogen auf eine Gesamtsituation, rechnerisch vorhergesagt werden.
2. Im Versuch läßt sich mit Hilfe von Pressen dieses erkannte Ausdehnungsverhalten in etwa realitätsnah an einem Bauwerksausschnitt herbeiführen.

Zumindest die zweite Forderung konnte bei den Standard-Versuchen nur bedingt erfüllt werden. Die Zwangpressen machen die Randverdrehung mit. Dadurch entstehen verminderte Zwangskräfte und auch die Rotationsbehinderung wird abgebaut.

Mindestens ebenso wichtig wie dieser Zusammenhang ist das Fehlen einer kontinuierlichen Einleitung von Zwangsschnittgrößen in das betrachtete Deckenfeld. Der Fluß der Zwangsschnittgrößen wird durch die Lage der Pressen und Widerlager künstlich zu bestimmten Punkten hin geleitet.

In diesem Versuch wurde auf die horizontal zwängenden Pressen vollkommen verzichtet und die Platte an drei Seiten von einem zusätzlichen sehr stark bewehrten Stahlbetonkranz umgeben (Bild 3.12). Die Dehnsteifigkeit dieses ca. 1 m breiten hoch bewehrten Kranzes entspricht einem üblich ($A_s = 2 * 3,77 \text{ cm}^2 / \text{m}$) bewehrten Deckenfeld von ca. 10 m Breite, wenn nur die Dehnsteifigkeit der Bewehrung angerechnet wird; unter Beachtung der Zugfestigkeit des Betons - ungerissener Zustand I - von ca. 1,50 m Breite. Damit wird ein Dehnbehinderungsgrad erreicht, der in etwa zwischen den Graden "schwach" und "stärker" (Bild 2.5) liegt. Im Brandversuch wird dieses Gebiet nicht beflammt. Durch vertikale Kragarmfesthaltungen wird eine sehr effektive Rotationsbehinderung des eigentlichen Plattenrandes erreicht.

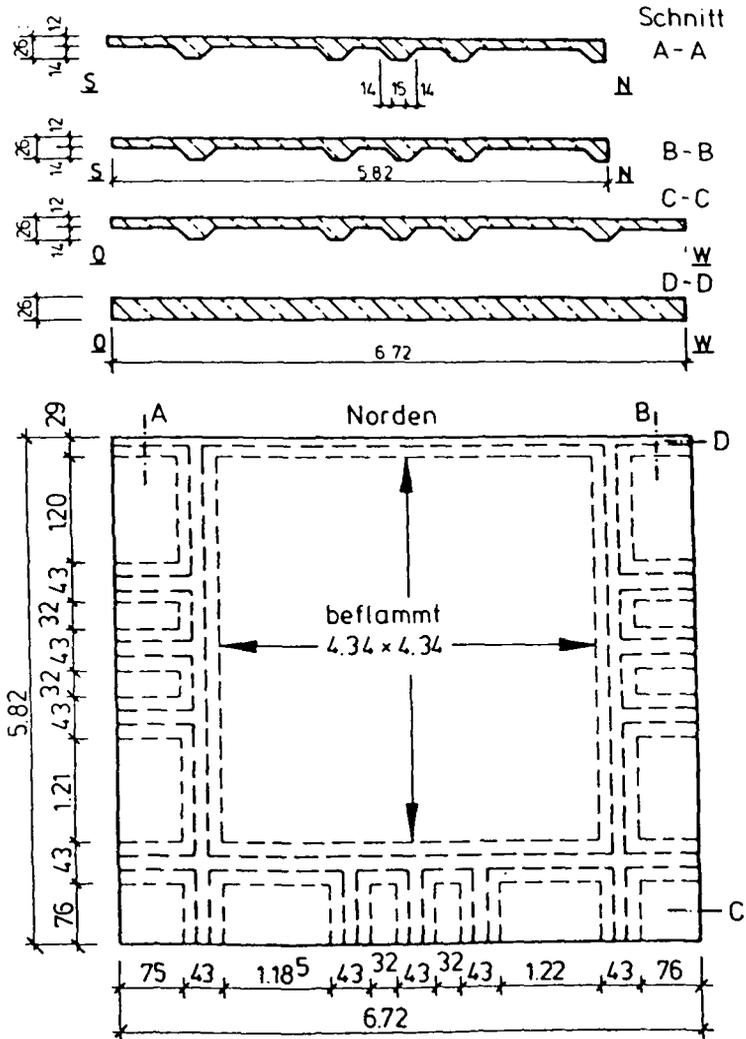


Bild 3.12: Plattensystem S 1/86

mit nicht beflamtem Randstreifen an 3 Seiten

Dieser Versuch soll Auskünfte zu folgenden Aspekten liefern:

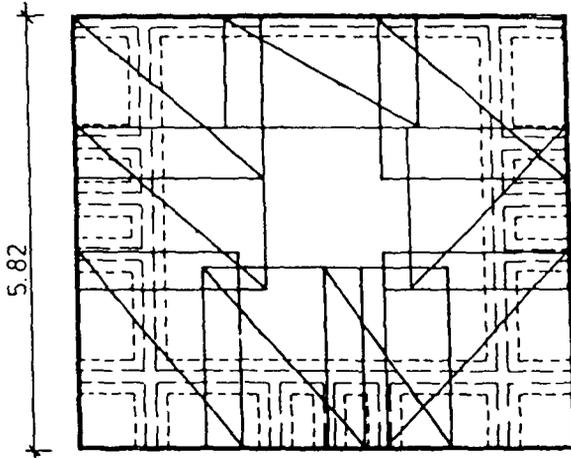
1. Ribbildung am Übergang kalt/warm,
2. "schwache" bis "stärkere" Behinderung der thermischen Längsdehnung bei gleichzeitig realistischer Rotationsbehinderung über den Auflagerlinien,
3. kontinuierliche Einleitung von Zwangsschnittgrößen über die Auflagerlinien hinweg.

3.6.2 Versuchskörper

Das Plattensystem S 1/86 besteht im wesentlichen aus einer 12 cm dicken Standardplatte die jedoch an 3 Seiten von einem hoch bewehrten Stahlbetonstreifen umgeben ist (Bild 3.12). Das innere Plattenfeld ist mit geschweißten Baustahlmatten BSt 500/550 RK oben und unten bewehrt, wobei die obere Bewehrung über die Auflagerlinien hinweggeführt worden ist (Bild 3.13). Wie im realen Bauwerk soll sie die im Brandversuch anwachsenden Stützmomente aufnehmen. Die umlaufende Bewehrung des Stahlbetonkranzes ist im Bild 3.15 mit angedeutet. Sie verläuft parallel zu den Seiten des später beflamnten Plattenfeldes und bewirkt die Möglichkeit, einen äußeren Zugring um das beflamnte Feld herum während der Brandbeanspruchung entstehen zu lassen. Die Zwang-Zugkräfte im Zugring lassen sich abschätzen, wenn Informationen über die Stahldehnungen vorliegen. Dazu sind an mehreren Meßquerschnitten Dehneßstreifen an die Bewehrungsstäbe appliziert worden.

An den Ecken der angevouteten Querbalken wird am Bauteilrand eine vertikale Randverformung behindert. Am Süd- und am Westrand sind starre Haltekonstruktionen angebracht worden, die jedoch eine horizontale Ausdehnung zulassen. Am Ostrand sind zwei Pressen verwendet worden, um über die Haltekraft Kenntnis zu erhalten. Bild 3.14 enthält die wesentlichen Angaben zu den vertikalen Randfesthaltungen. Da der Nordrand nicht an einem Stahlbetonstreifen angeschlossen ist, kann hier die Rotationsbehinderung nur behelfsmäßig vorgenommen werden. Über U-Eisen wird ein Zwangmoment in den Querschnitt eingetragen, über dessen Größe keine Aussage möglich ist.

Obere Bewehrung , Matten Q 377



Untere Bewehrung , Matten Q 377

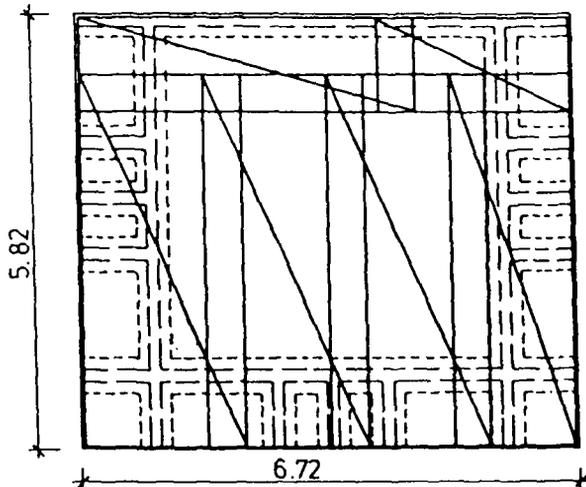


Bild 3.13: Biegebewehrung mit BSt 500/550 RK

Im Brandversuch wurde die Platte über 5 Stunden gemäß der ETK aus DIN 4102, Teil 2 erwärmt. Abplatzungen, wie im Vergleichsversuch Q 3/82 (Abschnitt 3.4) traten nicht auf.

3.6.3 Versuchsbeobachtungen

3.6.3.1 Zwangbeanspruchung am Rand des beflamten Plattenfeldes

Die vertikalen Haltekräfte am Ende des ausragenden Streifens erreichen bereits nach ca. 25 Minuten ihre Maximalwerte. Dabei werden an der nördlichen Presse etwas höhere Werte gemessen, weil hier das Bestreben des Randes, sich zu verdrehen, wegen des fehlenden Kragstreifens im Norden größer ist (Bild 3.14).

Bis zum Versuchsende nach ca. 300 Minuten sinken die Kräfte langsam wieder bis auf diejenige Anfangskraft ab, mit der die Pressen vor Versuchsbeginn auf die Platte aufgesetzt worden sind.

Gemeinsam leiten die beiden Pressen eine maximale Kraft von ca. 70 kN aus behinderter Verformung in das Bauteil ein. Teile davon wirken auf die ebenfalls mit Pressen fixierten Ecken. Das maximale Zwangmoment aus dieser Festhaltung kann bei einem Hebelarm von ca. 115 cm bis zum oberen inneren Ende der Voute mit 80,50 kNm abgeschätzt werden. Es muß auf den gesamten Rand verteilt werden. Eine Gleichverteilung auf die statische Länge von 4,75 m Länge ergibt für diesen Rand eine maximale Momentenbeanspruchung von ca. 17 kNm/m.

Da der gegenüberliegende Westrand an drei Punkten gehalten wurde, sind dort andere Zwängungen möglich. Im kritischen Querschnitt an dieser Westseite sind die obliegenden Stäbe der Matte Q 377 zerrissen. Das dazu erforderliche Biegemoment beträgt maximal ca. 17 kNm/m. Dieser Wert ergibt sich mit

$$B_S = 550 \text{ N/mm}^2$$

$$A_S = 377 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$h = 0,8 * (12 - 1,5 - 0,3) = 8,16 \text{ cm}$$

Normalkraft = Null

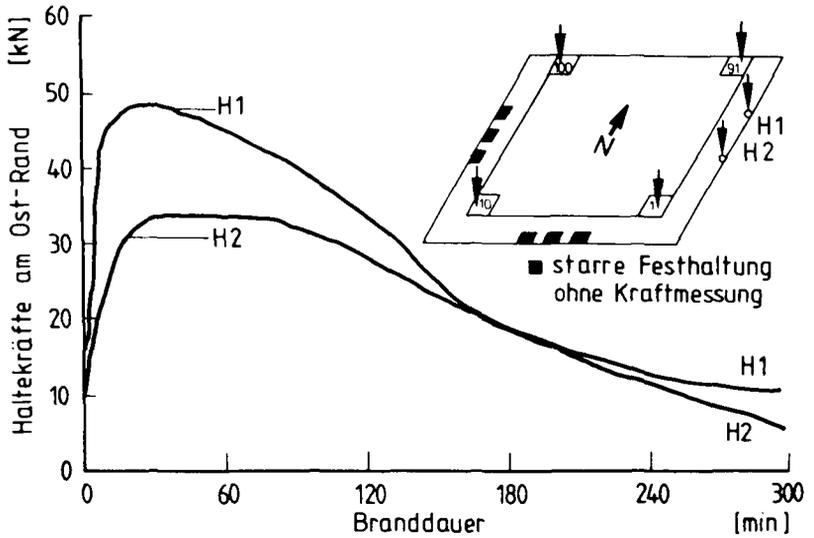


Bild 3.14: Haltekräfte am Ostrand

Das so abgeschätzte Grenzmoment stimmt mit dem für den Ostrand bestimmten Wert für das Maximalmoment überein. Das Zerreißen der Bewehrung geschah vorwiegend um die 40. Versuchsminute. In dieser Zeit treten auch am Ostrand die maximalen Haltekräfte auf.

Nur am Westrand sind die Bewehrungsstäbe gerissen. Jedoch kann für den Ost- und den Südrand angenommen werden, daß sich nach ca. 40 Minuten die Querschnitte plastisch verformen konnten.

Die Beanspruchung auf Zug des kalten Kragens in seinen Längsrichtungen steigt im Brandversuch rasch bis zur 40. Minute an. Alle Dehnmeßstreifen an allen Längsseiten zeigen zu diesem Zeitpunkt einen starken Abfall der Dehngeschwindigkeit. Die sieben Stäbe $\varnothing 28 \text{ mm}$ werden um ca. $0,85 \text{ ‰}$ gedehnt (Bild 3.15). Daneben sind im "Randbalken" am Übergang heiß/kalt 3 weitere Bewehrungsstäbe $\varnothing 28 \text{ mm}$ sowie 4 $\varnothing 16 \text{ mm}$ vorhanden, für die ein ähnliches Dehnverhalten angenommen wird. Daraus ergibt sich eine Zugkraft im Kragen von ungefähr $6960 \text{ mm}^2 \cdot 210,0 \text{ kN/mm}^2 \cdot 0,00085 = 1240 \text{ kN}$. Im weiteren Versuchsgang steigt sie bis ca. $1,25/0,85 \cdot 1240 = 1830 \text{ kN}$ an.

Die Dehnungen der nahe am Außenrand liegenden Stäbe ist deutlich größer als die der weiter innen liegenden. Kontrollmessungen mit zwei an einem Stab an gegenüberliegenden Seiten angebrachten Dehnmeßstreifen zeigen, daß eine schwache horizontale Stahlkrümmung im Eckbereich des Randes nach der 40. Minute einsetzt. Der lange Rand verkrümmt sich dagegen wesentlich stärker. Dabei nimmt die Krümmung nach außen hin zu.

Der Abfall der Haltekräfte am Rand nach 60 Minuten erklärt sich mit der temperaturbedingten Entspannung der oberen Bewehrung. Diese ist zwischen der 30. und 60. Minute ungefähr 100 °C warm. Danach steigt ihre Temperatur gleichmäßig bis auf ca. 400 °C nach 300 Minuten an.

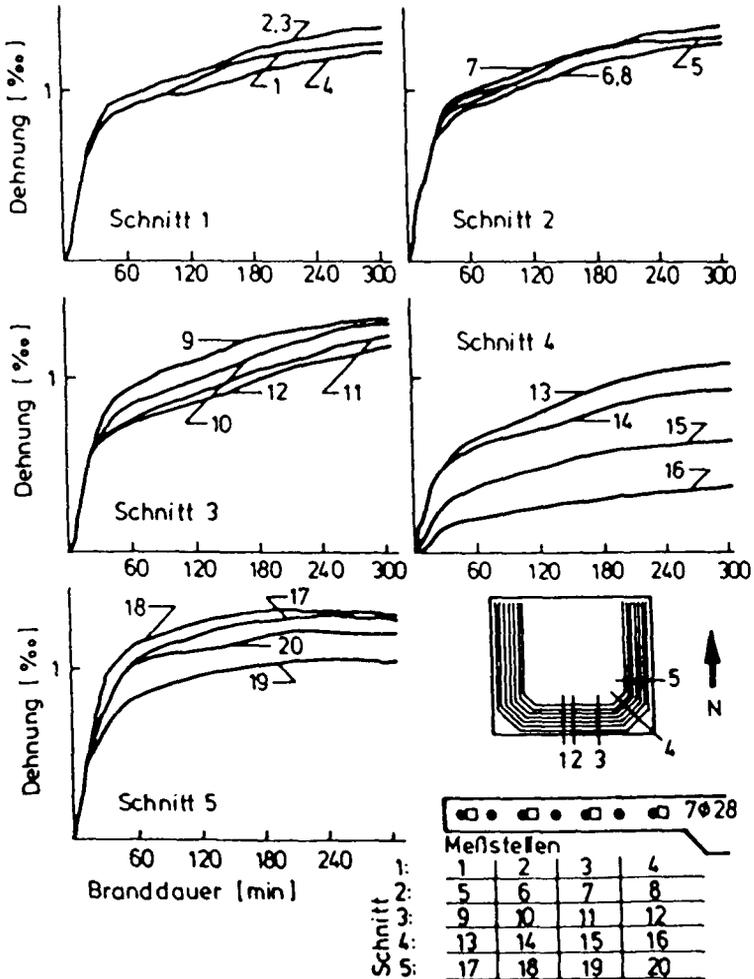


Bild 3.15: Bewehrung des Randstreifens zur Aufnahme von Zugkräften aus innerem Zwang beim Brandversuch und gemessene Stahldehnungen

3.6.3.2 Verformungen des Randes

Die an den Rändern gemessenen Plattenausdehnungen zeigt das Bild 3.16. Nach anfänglich rasch zunehmenden Werten verlangsamt sich die Ausdehnung ab der 40. Minute. Die Verschiebung des Südrandes ist wesentlich größer als die des Ostrand, weil der Nordrand exzentrisch zur Plattenmittenebene unverschieblich gehalten wird. So erzeugen die Verdrehungen des Nordrandes eine Verschiebung der gesamten Platte nach Süden. Hieraus resultieren Meßwertverfälschungen an den Meßpunkten 19 und 20, deren Werte durch die Verschiebung abgemindert worden sind.

Der Einfluß des Kragstreifens geht aus dem Vergleich der Verschiebungen nach Osten an den Punkten 1 und 15 hervor: im Süden sind deutlich geringere Werte gemessen worden als im Norden, wo kein kalter Randstreifen existiert.

Die Messungen zeigen auch, daß die Verschiebungen der Seitenmitten größer sind als die der Ecken. Für die Schmalseiten ist aus den Einzelmessungen für einen Zeitpunkt das Verschiebungsfeld mit im Bild 3.16 dargestellt. Kontrollmessungen von Dehnungen an 2 gegenüberliegenden Seiten eines Bewehrungsstabes bestätigen diese Krümmung. Die Relativverschiebung der Enden des langen Randstreifens im Süden bezogen auf die gerade Länge seiner Bewehrung ergibt in guter Näherung Dehnwerte in der Größenordnung der Meßwerte von Bild 3.15. Der zeitliche Verlauf der Dehnungen stimmt mit der Entwicklung der Verschiebungen überein.

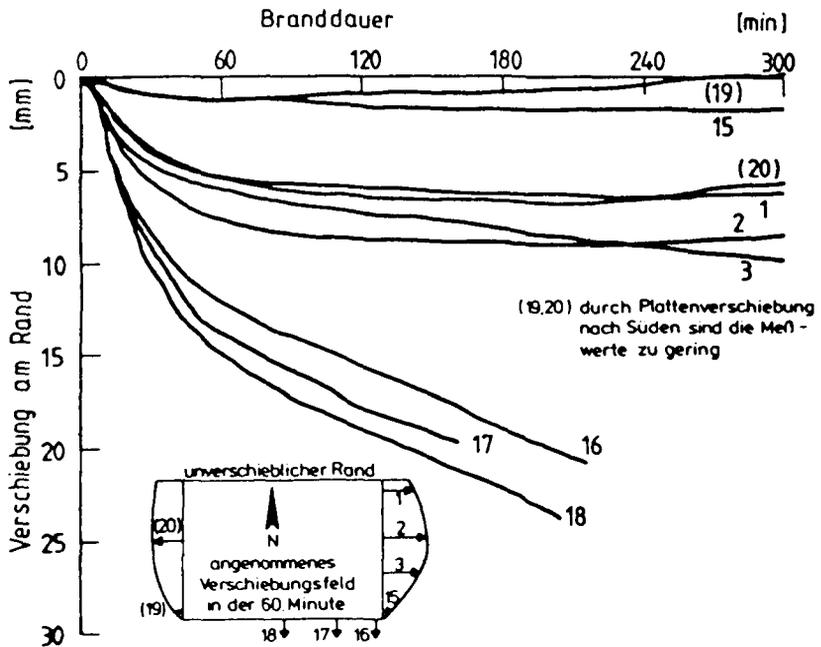


Bild 3.16: horizontale Wege an 3 Plattenrändern -
die Verschiebungen des Süd-Randes (Mst. 16 - 18)
sind in der Darstellung des Verschiebungsfeldes
nicht enthalten

3.6.3.3 Verformungen des beflamten Plattenfeldes

Die Platte biegt sich in der Mitte des beflamten Gebietes in den ersten 20 Minuten rasch durch. Danach verlangsamt sich die weitere Verformung bedeutend. Erst nach ca. 3 Std. Branddauer ist die Verformungsgeschwindigkeit wieder geringfügig größer. Auch nach über fünf Stunden ETK-Beflammung ist erst eine Mittendurchbiegung von weniger als 250 mm entstanden und die Verformungsgeschwindigkeit läßt ein baldiges Versagen noch nicht erwarten (Bild 3.18).

Die warmen Eckbereiche, die an zwei Seiten von kalten Kragstreifen eingefaßt sind, biegen sich in den ersten 30 Minuten leicht nach unten durch. Danach geht diese Verformung wieder zurück, und nach 300 Minuten haben sie sich gegenüber der Lage nach dem Kaltbelasten sogar nach oben bewegt.

An der Entwicklung der Nord-Süd-Biegelinie ist deutlich der Einfluß des kalten Randstreifens und das bereits oben beschriebene Entstehen des plastischen Gelenks zu erkennen. Die Behinderung der Verdrehung am Südrand ist auch nach dem Erreichen des plastischen Moments größer als die konstruktive Randeinspannung am Nordrand. Diese Biegelinie ist nicht symmetrisch, sondern zeigt im Norden größere Durchbiegungen (Bild 3.17).

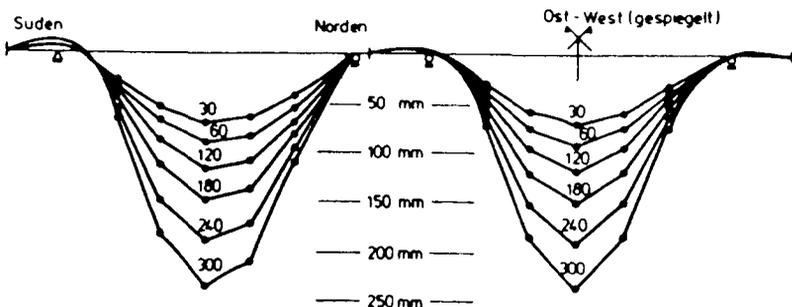


Bild 3.17: Biegelinien nach verschiedenen Branddauern

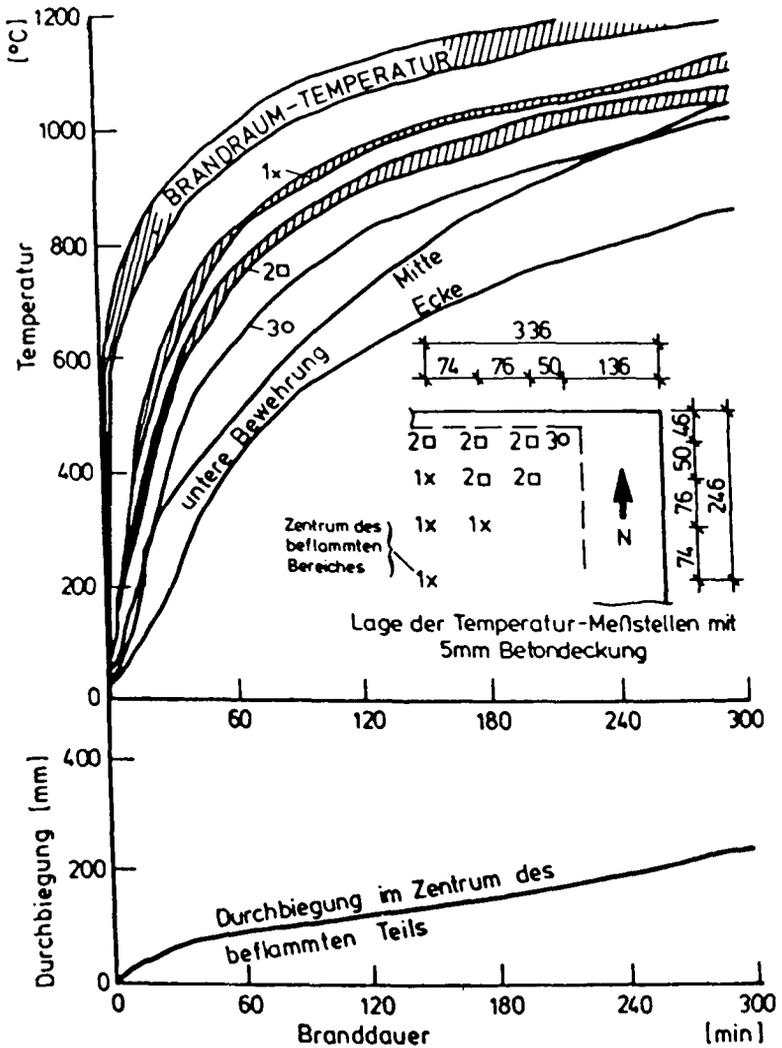


Bild 3.18: Temperaturen und Mittendurchbiegung

3.6.3.4 Bauteiltemperaturen

Das Bild 3.18 zeigt die Temperaturbeanspruchung dieser 12 cm dicken Platte und stellt gleichzeitig die Entwicklung der Durchbiegung im Zentrum des beflamten Teils dar. Auf der Höhe der untenliegenden Bewehrung wurden 500 °C nach 60 Minuten erreicht. Zum Versuchsende nach über 300 Minuten wurden dort ca. 900 °C gemessen. Es ist keine bestimmte Temperatur der unteren Bewehrung zu erkennen, bei der sich das Verformungsverhalten der Platte entscheidend ändert.

An dem mittleren der drei O 28 im umlaufenden Randbalken gemessenen Temperaturen zeigen, daß dort 150 °C nicht überschritten worden sind und daß ein steiler Temperaturgradient im Randbalken zur Ecke hin vorliegt.

Der auskragende Stahlbetonstreifen hat sich praktisch nicht erwärmt.

Die Temperaturen an der unbeflammten Oberfläche lagen nach einer Stunde bei ca. 100 °C. Je nach der flächenmäßigen Ausdehnung der Wasserpfütze trat die weitere Erwärmung nach 75 bis 150 Minuten ein. Die Maximaltemperaturen betragen ca. 270 °C zum Ende des Brandversuches.

2.6.3.5 Ribbildung (Bilder 3.19)

Bereits etwa drei Minuten nach Beginn des Brandversuchs entwickelten sich an der kalten Oberfläche Risse parallel zu den Kragstreifen an allen drei betreffenden Rändern. In den folgenden Minuten entwickelten sich parallel dicht dazu weitere Risse. Erst nach ca. 10 Minuten setzte eine Ribbildung in den Ecken ein (Diagonalrisse). Gleichzeitig konnten erste feine Risse am kalten Kragstreifen beobachtet werden. Sie verlaufen quer zur Streifenlängsrichtung.

Bis zur 160. Minute verdichtet sich das gesamte Ribnetz. Im beflamten Gebiet bleibt das unbewehrte Zentrum praktisch rissfrei, darum herum ist ein kreiskörniges Ribbild entstanden. Die Randstreifen sind quer und in den Ecken diagonal gerissen. Das Südost-Gebiet des Kragstreifens konnte wegen des Versuchsaufbaus nicht so genau eingesehen werden, daß auch hier Risse entdeckt werden konnten. Gleichwohl ist

die Annahme berechtigt, daß auch hier Risse vorhanden waren.

Nach der 160. Minute war das Rißbild voll entwickelt.

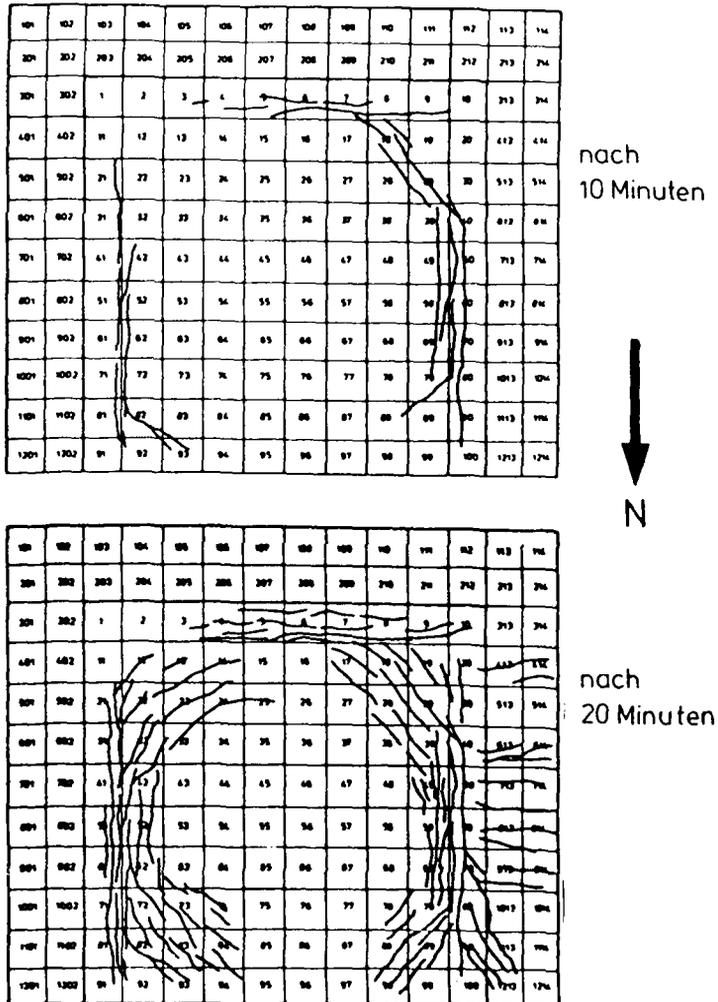


Bild 3.19a: Rißbildung an der unbeflammten Oberfläche

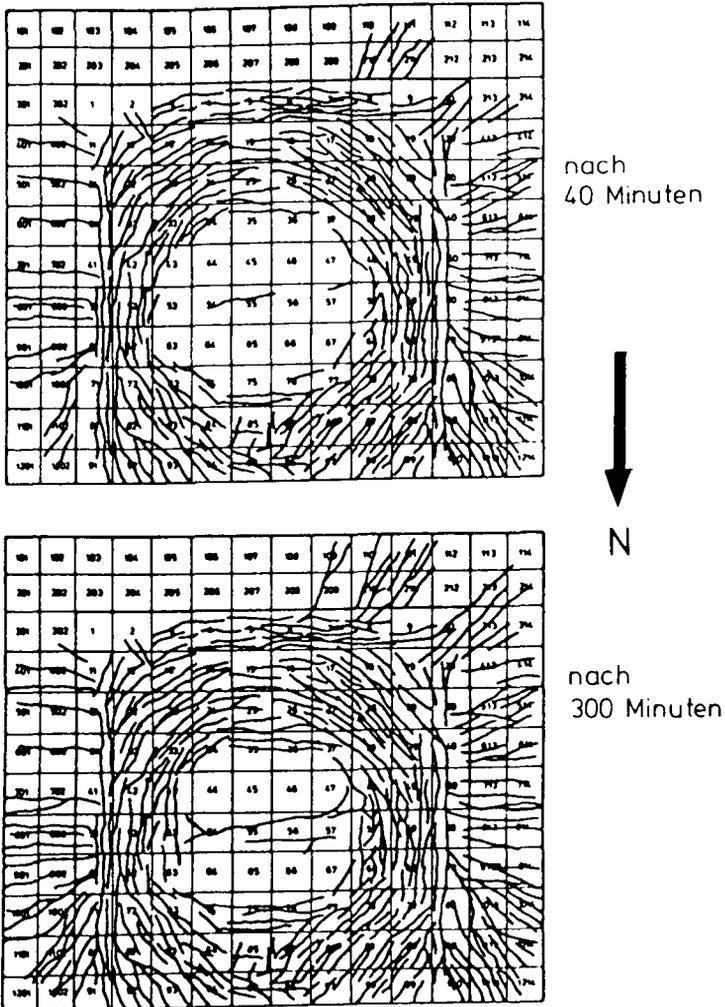


Bild 3.19b: Rißbildung an der unbeflammten Oberfläche

3.6.4 Erkenntnisse aus diesem Versuch

Dieser Versuch bestätigt in hohem Maße die Erkenntnisse aus den Versuchsserien mit dehnbehinderten liniengelagerten Quadratplatten.

Wichtig für das *Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten* sind die Randbedingungen des statischen Teilsystems. Kann eine freie Randverdrehung wirksam behindert werden, so werden die Plattendurchbiegungen drastisch verringert. Je weiter die obere Bewehrung in das beflamte Feld hineinreicht, um so weiter reicht der rückdrehende Einfluß der Verdrehbehinderung am Rand.

Die untenliegende Feldbewehrung verliert bei den vorliegenden Verhältnissen vollkommen an Bedeutung. Selbst bei einer ca. 900 °C heißen Feldbewehrung ist keine Zunahme der Verformungsgeschwindigkeit zu erkennen.

Dieser Versuch ist bewußt so konzipiert worden, daß keine Längsdruckkräfte aus Zwangwirkung von außen senkrecht zu den Rändern in das Plattenfeld eingeleitet wurden. Es ist also nicht notwendig, daß solche Kräfte den Plattenquerschnitt bis hin zum Zentrum überdrücken müssen, um die Tragfähigkeit über lange Branddauern hinweg zu gewährleisten.

Mit diesem Versuch wird ein Modell für das Tragverhalten von Stahlbetonplatten unter Brandbeanspruchung bestätigt, das bereits mit Hilfe der vorausgegangenen Versuchsserien entwickelt worden ist. Es stützt sich auf die Erfahrung aus den Standard-Versuchen und enthält bereits eine Annahme bezüglich einer realistischen Verteilung der äußeren Lasten. In der Praxis werden die Hauptplattenlasten nicht im Zentrum stehen. In den Versuchen ist eine gleichförmige Flächenlast simuliert worden, indem die Gesamtlast in 16 Punkten eingeleitet worden ist /21/. Im Zentralbereich erfolgt keine Krafteinleitung. Die Folge davon ist eine Begrenzung der Anwendbarkeit dieses Modells auf die geometrischen Verhältnisse, wie sie z.B. im Wohnungsbau vorliegen. Bei wesentlich größeren Stützweiten (wenn nennenswerte Lastanteile nicht mehr auf dem Druckring stehen) soll dieses einfache Tragmodell keine Anwendung finden.

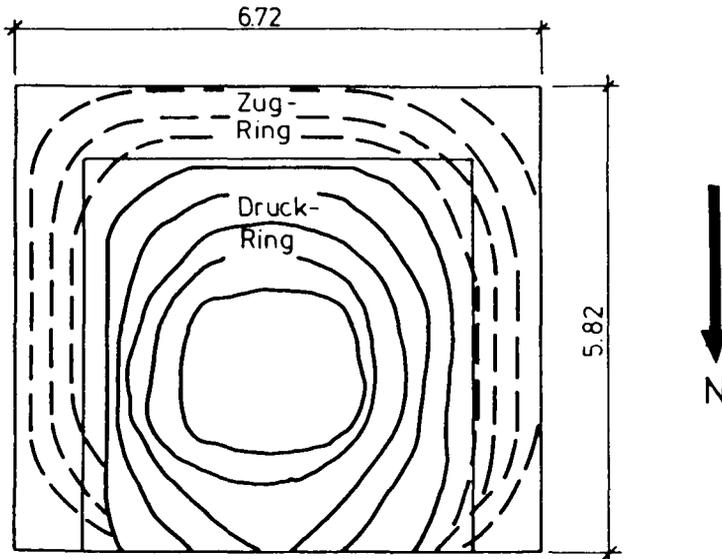


Bild 3.20: Verlauf von Scheibenkräften aus Zwang
aus dem voll entwickelten Ribbild abgeleitet

Parallel zu den Rändern eines dehnbehinderten, beflamten Plattenfeldes entstehen im brandbeanspruchten Teil Druckkräfte. Innerhalb dieser Streifen verläuft die Druckkraft auf leicht gekrümmter Bahn um die Ecken herum. Aus der Existenz von Rissen an der Oberfläche von Betonbauteilen kann noch keine Aussage über die Größe von Normalkräften abgeleitet werden, zumal wenn gleichzeitig Biegemomente auftreten, denn die Zustände im Querschnittsinneren bleiben dieser Betrachtungsweise verschlossen. Daher ist der wirkliche Verlauf der Zwangkräfte theoretisch zu klären. Dies geschieht im Abschnitt 5.2.3.2. Eine Schwierigkeit bei der Übertragung erkannter Zusammenhänge auf veränderte Situationen wird anhand des Zwangkraftflusses veranschaulicht: Während bei den Standard-Versuchen durch die Außenpressen ein erheblicher Kraftfluß **über Eck** entsteht, laufen bei diesem praxisnäheren Bauteil die Zwangkräfte tatsächlich **in die Ecken hinein**. Analytisch gewonnene Kraft- und Momentenverläufe bei unterschiedlichen Ausdehnungsbehinderungen mit Pressen sind am Schluß des Kap. 5 gezeigt.

Diese Druckkräfte stehen im Gleichgewicht mit den Zugkräften in nicht beflamten, umgebenden Bauteilen, die die Ausdehnung behindern. Insgesamt befindet sich der betrachtete Bauwerksausschnitt im Gleichgewicht der Kräfte. Im hier besprochenen Plattensystem mußten die kalten Kragstreifen Zugkräfte aufnehmen können (Bilder 3.20 und 3.21).

Die Breite der Druck- und Zugringe hängt stark von den Abmessungen des Gesamtsystems und von der Möglichkeit des randnahen beflamten Teilbereiches ab, sich nach unten zu verbiegen. Je größer derjenige Anteil des brandbeanspruchten Feldbereiches ist, in welchem wegen lediglich geringer Biegeverformungen hohe Scheibenkräfte entstehen können, desto günstiger wirkt sich dieser Effekt auf das Trag- und Verformungsverhalten aus. Lasten, die auf diesen randnahen Druckringen stehen, können darüber sicher abgetragen werden. Dabei leistet die untenliegende Bewehrung keinen nennenswerten Beitrag. Diese Randstreifen sind zwar zur Mitte hin geneigt, werden aber wegen des günstigen Eigenspannungszustandes nicht versagen.

Umgeben von einem Druckring befindet sich der oben unbewehrte Zentralbereich. Er ist praktisch frei von äußeren Lasten, kann sich fast ungehindert gemäß den thermischen Beanspruchungen verbiegen und damit entspannen. Von ihm gehen auf die Umgebung kaum Kraftwirkungen aus. Es ist trotz der Risse (keine durchgehenden Trennrisse) so fest mit seiner Umgebung verbunden, daß ein Einsturz nicht befürchtet werden muß. Das Eigengewicht des Zentralbereiches kann auf diese Weise sehr lange getragen werden. Zusätzliche Lasten sind jedoch in Plattenmitte kaum aufzunehmen. Der Innenbereich wird bei längeren Branddauern und großen Durchbiegungen praktisch zwängungsfrei.

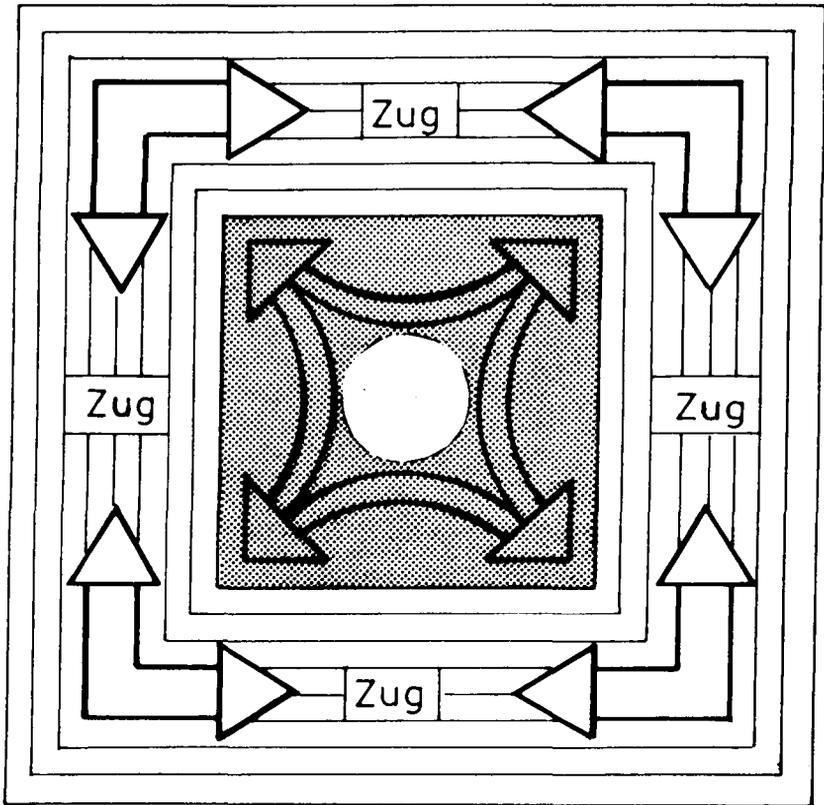


Bild 3.21: vereinfachter rechnerischer Zwangkraft-Zustand
mit Zwangkraftentspannung im Feldbereich (s. Bild 5.10)

3.7 Resumee aus den Versuchen

3.7.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die im Kapitel 3 besprochenen Versuchsergebnisse belegen eindeutig den hohen Einfluß von Dehnbehinderungen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten im Brand.

Bereits kleinste Zwangdruckkräfte sind in der Lage, die Durchbiegung deutlich zu verringern und die Tragfähigkeitsdauer zu erhöhen. Dazu sollten sie möglichst in der Nähe der Ecken und unterhalb der Mittelebene angreifen. Diese Zwangkräfte unterstützen im beflamten Teil die Bildung eines "vorgespannten" ringförmigen Teilbereiches, in dessen Mitte das wesentlich weichere Zentrum eingebettet ist.

Bei sehr niedrigen Zwängungsgraden wirkt sich eine Erhöhung der Dehnbehinderung tragfähigkeitsfördernd aus. Eine weitere Steigerung des Grades der Dehnbehinderung macht sich beim Verformungsverhalten und bei der Tragfähigkeitsdauer nicht mehr wesentlich bemerkbar.

Erst bei vollständiger Dehnbehinderung führen andere Mechanismen zu neuen Ergebnissen. Extrem hohe Zwang-Druckkräfte können zum Druckbruch des Betons führen. Besonders gefährdet ist der randnahe Bereich und damit die Tragfähigkeit des Bauteils. Die Verformungen werden in der Zeit vor dem Druckbruch des Betons durch die hohen Zwangkräfte bei den durchgeführten Versuchen nicht wesentlich stärker vermindert als bei den teilweisen Dehnbehinderungen.

Die positiven Auswirkungen von Dehnbehinderungen auf das Brandverhalten sind mit Versuchen nachgewiesen worden, wobei die Dehnbehinderung auf 2 unterschiedliche Arten realisiert worden ist. Bei den "Standard-Versuchen" simulieren horizontal wirkende Zwang-Pressen die Reaktion von Bauteilen, die den untersuchten, beflamten Plattenteil umgeben. Mit diesem Versuchstyp sind zum fraglichen Themenkreis systematische Untersuchungen durchgeführt worden, deren Ergebnisse die oben angegebene zusammenfassende Schlußfolgerung gestatten. Die wenig effektive Rotationsbehinderung machte spezielle Anstrengungen für die Bewertung der Versuchsergebnisse erforderlich. Diese "Standard-Versuche" werden ergänzt um einen Sonderversuch, bei dem die

Zwängung durch ein tatsächlich vorhandenes kaltes Gebiet erfolgt. Dieser Versuch bestätigt in hohem Maße die wesentlichen Erkenntnisse aus den vorangegangenen "Standard-Versuchen".

Im einzelnen läßt dieser Versuch weitergehende Schlußfolgerungen zu:

Bei rechteckigen Strukturen konzentrieren sich die Zwangkräfte in den Ecken, während die Rotationsbehinderung vorwiegend an den Seitenmitten auftritt. Beim System S 1/86 sind beide Verformungsbehinderungen realitätsnah verwirklicht. Aus dem Vergleich der Ribentwicklung beider Versuchstypen läßt sich folgern, daß die Rotationsbehinderung von Beginn der Brandbeanspruchung das Plattenverhalten wesentlich beeinflusst. Zunächst entstehen Biegerisse am äußersten Rand des beflamten Teils parallel zu den Auflagerlinien. Später ist die Rotationsfähigkeit des Querschnittes erschöpft und die Stützbewehrung reißt. Ohne Stahlzugkräfte über die Auflagerlinien hinweg stellt sich eine Querschnittsbeanspruchung ein, wie sie ähnlich auch bei den "Standard-Versuchen" mit Hilfe der exzentrisch angeordneten Pressen erzielt wird. Da jedoch nicht an allen Rändern die Bewehrung gerissen ist, konnte eine effektive Rotationsbehinderung über die gesamte Versuchsdauer von ca. 5 Stunden wirken. Das spätere Einsetzen der Bildung von Diagonalrissen in den Ecken weist auf Momentenumlagerungen hin.

Die Zwangkräfte treten dort am stärksten auf, wo der Verformungswiderstand (also die Steifigkeit) am größten ist. Bei rechteckförmigen Platten sind das die Ecken.

Runde Strukturen weisen solche Steifigkeitsunterschiede nicht auf. Hier stellt sich der Zwang am Rand des beflamten Teils gleichmäßig ein. Die Zwangbeanspruchung ist vergleichbar mit der Spannungsbeanspruchung eines unter Innendruck stehenden Rohres. Tangentiale Zugkräfte in der Rohrwandung bilden aus der Umlenkung das Gleichgewicht zu den radialen Druckkräften ("Faßformel": $Zug = Radius \cdot Innendruck$).

Der homogene Kraftverlauf wird durch die einspringenden Ecken rechteckförmiger Strukturen punktuell gestört und es entstehen im Bereich der Ecken die maximalen Zwangkräfte.

Der "Innendruck" wird ganz erheblich abgebaut, sobald sich Verformungen aus der Platten/Scheiben-Ebene heraus einstellen. Dann wird die thermische Ausdehnung zwar weiterhin an den Rändern behindert, aber das Bauteil dehnt sich trotzdem aus und kann sich dadurch den Zwangkräften weitgehend entziehen. Bei gleichbleibendem Randabstand ist die Länge eines stark durchgebogenen Bauteils größer als seine Sehne. Bei stabförmigen Bauteilen (hier: Plattenstreifen) kann so eine vollständige Entspannung eintreten, während bei Flächentragwerken und der in allen Richtungen gleich wirkenden thermischen Beanspruchung diese Entspannung vorwiegend im Zentrumsbereich der Struktur eintritt. Wie bei den "Standard-Versuchen" werden demnach die auf das durchgebogene Zentrum hin gerichteten Druckkräfte wesentlich stärker reduziert als die senkrecht dazu verlaufenden.

Diese Zusammenhänge führen zu den wichtigen Schlußfolgerungen:

- a. Bei einseitig temperaturbeanspruchten Deckenfeldern kann sich die Platte durch Biegeverformungen den Zwangkräften entziehen. Damit ist die Gefahr eines Stabilitätsversagens (Beulen) nurmehr von theoretischer Bedeutung!
- b. Obwohl sich das Zentrum entspannt, bleiben am Rand Teile der Zwangkraft weiter wirksam. Sie steifen den Randbereich aus und erhöhen damit die Tragfähigkeit des Bauteils.
- c. Bei gleichen Schlankheitsverhältnissen führen die thermischen Belastungen in Form von $M (T_{\text{oben}} - T_{\text{unten}})$ und $N (T_0)$ bei unterschiedlichen Stützweiten zu verschiedenen Durchbiegungen und damit zu veränderten Zwangkraft-Zuständen. Es liegt also nicht nur eine Schlankheits-Abhängigkeit sondern darüber hinaus außerdem eine reine Spannweiten-Abhängigkeit vor.
- d. Nur für theoretische Fälle ist eine so wenig verformbare Umgebung denkbar (totale Dehnbehinderung), daß die Größe der Zwangkräfte zu einem Materialversagen des Betons in Gestalt eines explosionsartigen Druckbruches führen.

Gerade auch im Hinblick auf die Spannweiten-Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse ist die Realitätsnähe der durchgeführten Bauteilver-suche von großer Bedeutung. Teilbrände in einem zimmerartig gegliederten Gebäude umfassen Bereiche in der Größenordnung der geprüften Bauteile. Somit lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse direkt auf solche Situationen anwenden!

Die Übertragbarkeit auf größere Bereiche kann nur noch unter zu Hilfe-
nahme abgesicherter theoretischer Methoden erfolgen. Wichtig ist eine
gute Abschätzung des Umfanges der Normalkraftentspannung im Platten-
zentrum, da für die Tragfähigkeitsdauer des beflamnten Plattenteils
die Erhöhung der Biegesteifigkeit durch die Zwangdruckkräfte bei hohen
Branddauern zum ausschlaggebenden Faktor wird. Je größer der beflamme-
te Bereich ist, desto schwächer ist der Grad der Dehnbehinderung und
desto genauer ist der Normalkraft-Zustand zu bestimmen (s.o.). Hohe
Tragfähigkeitsdauern können i. a. stets erwartet werden, wenn die
Nutzlasten am Rand in der Nähe der Auflagerlinien stehen.

Im folgenden Kapitel 4 wird ein Rechenverfahren beschrieben, welches
für die theoretischen Untersuchungen dieser Probleme entwickelt werden
mußte. Zuvor soll aber auf die begrenzte Eignung der Versuchsergeb-
nisse als Verifikationsobjekte für die "Eichung" dieses Programms hin-
gewiesen werden.

3.7.2 Nachrechenbarkeit der Versuche und offene Fragen

Der Wunsch nach einem geeigneten Verfahren, mit dem sich die disku-
tierten Vorgänge nachvollziehen und vorhersagen lassen wird aus den
bereits geschilderten Gesichtspunkten heraus verständlich. Das kom-
plexe Zusammenwirken verschiedenartiger Einflußparameter läßt zunächst
nur eine umfassende Berechnung unter Berücksichtigung all dieser Fak-
toren geeignet erscheinen. Für Vereinfachungen stehen aufgrund der
experimentell gewonnenen Daten noch zu wenig Informationen bereit.

Im Zentrum der numerischen Untersuchungen muß das gleichzeitige Auf-
treten der Scheibenwirkung (Dehnbehinderung) und der Plattenwirkung
(Biegeverformungen und Rotationsbehinderung) stehen. Beide Komponen-
ten des Gesamtverhaltens beeinflussen sich gegenseitig (Theorie II.
Ordnung, verzerrte Mittelebene) und hängen stark von der Bauteilgröße
und den Lagerungsbedingungen der Struktur ab.

Neben unvermeidlichen Streuungen bei den Materialkennwerten und den
konstruktiven Details rufen insbesondere die im strengen Sinne nicht
exakt definierten Randbedingungen hinsichtlich der lokalen Dehn- und
Rotationsbehinderung durch die zwei Mittenpressen bei den

"Standard-Versuchen" Rechenabweichungen hervor. Für die Verifikation des entwickelten Programms ist daher das zuletzt besprochene System S 1/86 von besonderer Wichtigkeit. Die Genauigkeitserwartungen an die Rechenergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der "Standard-Versuche" müssen also für Fälle mit großen weggesteuerten Dehnbehinderungen stark relativiert werden (s. Abschnitt 2.6.3.2).

Die Frage nach dem tatsächlichen Verlauf der Zwangsschnittgrößen ist durch die Versuchsergebnisse noch nicht abschließend geklärt (Bilder 3.20 und 3.21). Mit dem verifizierten Verfahren soll diese offene Frage beantwortet werden. Ebenfalls ist auch im Hinblick auf die Realitätsnähe der "Standard-Versuche" der Einfluß des Umfanges einer Zwängung zu klären.

Von wirtschaftlichem Interesse können rechnerische Erkenntnisse zur Bedeutung der Bewehrung für das Brandverhalten sein.

4. Rechenmodell

4.1 Aufgaben und Ziele der Berechnungen

Die Möglichkeiten, mit Hilfe von Bauteilversuchen das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten im Brand zu erforschen und zu beurteilen, sind begrenzt. Sowohl die hohen Kosten als auch die einschränkenden Vorgaben durch die Versuchseinrichtungen lassen Versuche nur in einem engen Parameterraum zu. Dabei streuen die Versuchsergebnisse wegen unvermeidlicher Abweichungen der Istzustände von den geplanten Sollzuständen. Mit den Versuchen können aber punktuell als *wesentlich angenommene Zusammenhänge überprüft werden und Pilotversuche liefern erstmals Erkenntnisse im Neuland.* Allerdings lassen sich mit Versuchen längst nicht all die Größen von der Art und Anzahl her messen, die zum Verständnis des Bauteilverhaltens wünschenswert und zum Teil nötig sind.

Im Gegensatz dazu lassen sich einzelne Parameter durch rechnerische Untersuchungen kostengünstig auf ihre Wirksamkeit hin überprüfen. Auf rechnerischem Wege sollten sich auch solche Situationen beurteilen lassen, deren versuchstechnische Klärung einen angemessenen Aufwand bei weitem übersteigt. Einfache Modelle zum Tragverhalten können durch wirklichkeitsnähere Berechnungsmethoden gewonnen oder kontrolliert werden. Der Gültigkeitsbereich von Näherungsverfahren kann untersucht werden. **Schwerpunkt der eigenen Untersuchungen ist der Einfluß von Dehnbehinderungen auf das Bauteilverhalten.**

Zuvor ist jedoch der Nachweis der Gültigkeit des Programms erforderlich. Hierfür eignet sich in hervorragender Weise die Nachrechnung von Versuchen. Die wesentlichen Verhaltensweisen müssen von der Rechnung wiedergegeben werden.

Mit der Nachrechnung von Versuchen kann die Deutung der Versuchsergebnisse differenzierter erfolgen. Somit wird es möglich, die komplizierten Beanspruchungszustände im Inneren der Bauteile zu verstehen und zu beurteilen. Nicht meßbare oder nicht gemessene Größen lassen sich in der Rechnung verfolgen.

Über die versuchsbegleitenden Berechnungen hinausgehend soll das Rechenverfahren anwendbar sein auf nicht experimentell prüffähige Situationen, die sonst nur allein mit Hilfe von Erfahrungswerten ingenieurmäßig beurteilt werden können. Das Programm soll als Handwerkszeug für den Fachmann zur Beurteilung praxisnaher Fragestellungen geeignet sein.

Damit sind die Zielvorgaben des theoretischen Teils dieser Arbeit fest umrissen:

- * Entwicklung eines Rechenverfahrens zur Untersuchung brandbeanspruchter Stahlbetondecken, wobei die zu untersuchenden Strukturen möglichst wenig einschränkende Bedingungen zu erfüllen haben.
- * Formulierung allgemeingültiger Aussagen zum Einfluß von praxisnahen Verformungsbehinderungen auf das Trag- und Verformungsverhalten der direkt vom Brandgeschehen betroffenen Teilstruktur.
- * Den Vertrauensbereich berechneter Zustände und Einschränkungen des Anwendungsbereiches des Programms angeben.

4.2 Vorüberlegungen zur Wahl des Rechenmodells

Das Verhalten von Scheiben bei Längskraftbeanspruchung und von Platten bei Biege- und Längskraftbeanspruchung wird von Differentialgleichungen beschrieben. Für linear-elastisches Material existieren analytische Lösungen, wenn die Form und die Randbedingungen der Struktur bestimmte Bedingungen erfüllen.

Berechnungen brandbeanspruchter Stahlbetonplatten müssen jedoch das komplizierte nichtlineare Verhalten des Stahlbetons berücksichtigen und sollen außerdem für beliebige ebene Strukturen durchgeführt werden können. Im Querschnitt selber entsteht im Brandfall eine stark nichtlineare Temperaturverteilung. Einerseits nimmt mit der Temperatur die Verformbarkeit der Materialien zu und deren Festigkeit ab, andererseits ist die thermische Ausdehnung eine Ursache für Verformungen. Die von der Temperatur abhängigen Materialeigenschaften bestimmen sowohl das Verformungsverhalten als auch die Schnittgrößenentwicklung und das Versagen der innerlich statisch unbestimmten Flächentragwerke.

Das Rechenmodell muß in der Lage sein, gleichzeitig die Scheiben- und die Plattenwirkung des Systems zu erfassen.

Die Entscheidung fiel für die **Methode der finiten Elemente**. Mit Dreiecken lassen sich "beliebig" berandete Geometrien nachbilden und eine horizontale Schichtung der Elemente macht eine beliebig genaue Erfassung der Zustände in der Dickenrichtung möglich. Mit dem **Schichtenmodell** läßt sich der gekoppelte Platten/Scheiben-Zustand (Biegung mit Normalkraft) unter Berücksichtigung der Schwerlinien-Wanderung einfach modellieren, der sich bei nichtlinearem Materialverhalten und Ribbildung einstellt. Dabei muß die Hauptspannungsrichtung (bzw. Ribrichtung) innerhalb des Querschnitts nicht konstant sein. So kann das 3-dimensionale Problem mit 2-dimensionalen finiten Elementen erfolgreich gelöst werden.

Ein Rechenprogramm, das diese Voraussetzungen erfüllt, wurde von Prof. MEHLHORN zur Verfügung gestellt. Für die rechnerische Untersuchung der gestellten Aufgabe war im wesentlichen die Entwicklung und der Einbau von temperaturabhängigen Materialgesetzen erforderlich.

Bei anderen zum Beginn der eigenen Arbeit bereits bestehenden Rechenprogrammen, die die oben genannten Bedingungen ebenfalls erfüllen, wären gleichermaßen Veränderungen erforderlich gewesen, um den inzwischen gestiegenen Wissenstand über das Materialverhalten bei hohen Temperaturen und die Theorie II. Ordnung einzubauen. Außerdem standen sie nicht zur Verfügung. Genannt seien hier die Arbeiten von NIZAMUD-DIN /10/ und ARMAGHANI /11/. Beide verwenden geschichtete Dreieckselemente zur Untersuchung von brandbeanspruchten Platten aus Stahlbeton. Sie beschäftigen sich aber nicht mit der Wirkung von Behinderungen der freien Randverformung. Allerdings scheinen beide Programme für solche Probleme anwendbar zu sein. Ein Rechenprogramm von KIEL /12/ steht inzwischen für die hier gestellten Aufgaben ebenfalls bereit; es konnte aber für die eigenen Berechnungen noch nicht verwendet werden.

Wegen der in /12/ und /13/ ausführlich erörterten Fragen der Problematik von geometrisch und stofflich nichtlinearen Rechenprogrammen und temperaturabhängigen Rechengesetzen für das Materialverhalten können sie in dieser Arbeit weitgehend gekürzt dargestellt werden.

Elementare Beziehungen wie z. B. die angesprochenen Differentialgleichungen oder Spannungs- und Dehnungstransformationen können den einschlägigen Standardwerken der Festkörpermechanik entnommen werden.

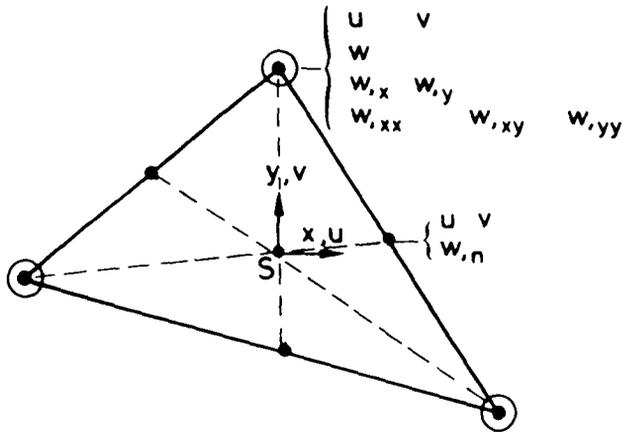
4.3 Beschreibung des gewählten Rechenmodells

4.3.1 Das finite Platten-Scheiben-Element

Finite Elemente unterteilen die zu untersuchende Struktur in endliche Teilgebiete. Beim Weggrößenverfahren wird die Verformungsfigur innerhalb der Elemente durch geeignete Funktionen angenähert. Die Freiwerte dieser Formfunktionen ergeben sich aus den Weggrößen derjenigen Punkte, an welchen die finiten Elemente miteinander unter strenger Beachtung der Kontinuität verbunden werden (den Knotenpunkten). Grundsätzlich gilt, daß die Annäherung an den tatsächlichen Zustand bei feinerer Diskretisierung steigt. Ansatzfunktionen mit einer höheren Anzahl von Freiwerten können auch kompliziertere Verformungsfelder darstellen. Elemente mit höheren Ansatzfunktionen können daher mehrere Elemente mit einfachen Formfunktionen ersetzen.

Die Herleitung von Steifigkeitsmatrizen mit dem Prinzip der virtuellen Arbeiten ist in der Literatur (z. B. in /18/ und /19/) hinreichend beschrieben und nicht Thema dieser Arbeit. Hier genügt die Beschreibung der wesentlichen Eigenschaften des verwendeten Elementes. Es basiert auf der KIRCHHOFF'schen Theorie dünner Platten.

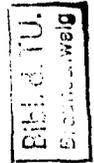
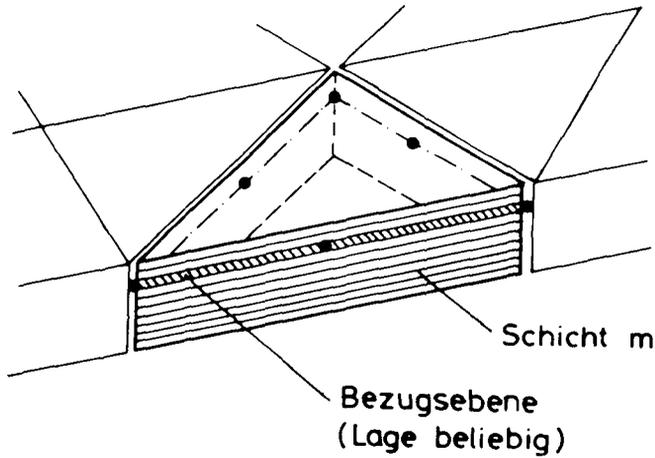
Das hier verwendete dreieckförmige finite Platten-Scheiben-Element besitzt insgesamt 33 Freiheitsgrade; 21 für die Plattenverformungen und 2 mal 6 für die Scheibenverformungen in x- und in y-Richtung. Es gehört in die Klasse der konformen Elemente mit theoretisch gesicherten Konvergenzeigenschaften für beliebige Konfigurationen. KRISTJANSSON /19/ wendete es erfolgreich für die stofflich und geometrisch nichtlineare Berechnung von Stahlbetonplatten unter Normaltemperaturbedingungen an. Die 3 voneinander unabhängigen Ansatzfunktionen sind vollständige dreihinvariante Polynome einmal 5ten Grades für die Platte und zweimal 2ten Grades für die Scheibe. Die Elemente werden an 6 Knotenpunkten starr miteinander verbunden. An den 3 Eckpunkten werden je 8 Weggrößen und an den 3 Knoten auf den Mitten der 3 Seiten werden je 3 Weggrößen benutzt. Das sind zusammen 33 Weggrößen. Als Weggrößen werden die Verschiebungen in den 3 Raumrichtungen des kartesischen Koordinatensystems, die Neigungen in x- und in y-Richtung der Ecken und in Normalenrichtung an den Seitenmitten sowie die Krümmungen in x-, y- und xy-Richtung in den Ecken verwendet (Bild 4.1).



FREIHEITSGRADE		
FÜR DIE	AN DEN	
	ECKEN	MITTENKNOTEN
VERSCHIEBUNGEN	u, v, w	u, v
NEIGUNGEN	w_x, w_y	w_n
KRÜMMUNGEN	w_{xx}, w_{xy}, w_{yy}	

ANSATZ FÜR DIE	VOLLST. POLYNOM	ZAHL DER UNBEKANNTEN
PLATTENVERFORMUNGEN	5. GRADES	21
SCHEIBENVERFORMUNGEN	2. GRADES	12

Bild 4.1: Freiheitsgrade und Ansatzfunktionen des
 Finiten Platten/Scheiben-Elementes



Finites Dreieckelement
mit n Schichten
und $7 \times n$ Integrationspunkten ($IP_1 \dots IP_7$) $\times n$

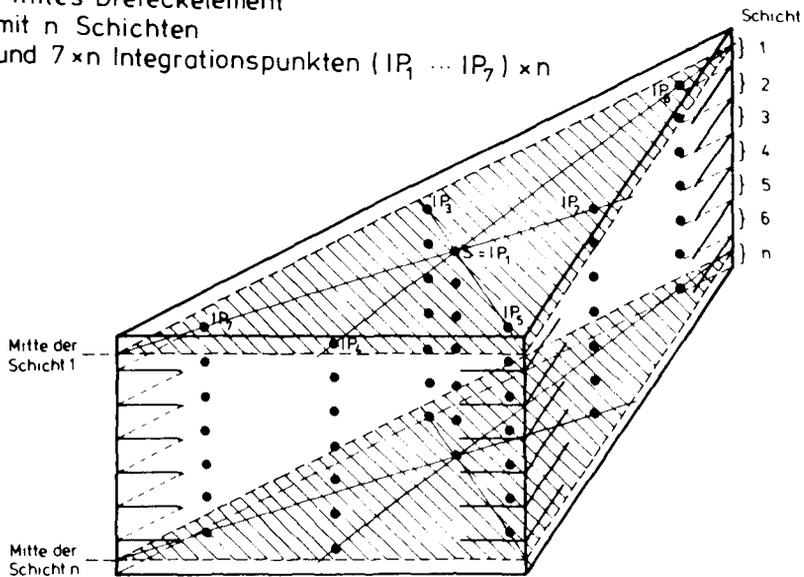


Bild 4.2: Querschnittsdiskretisierung in ebene Schichten
mit jeweils 7 Integrationspunkten

Im Inneren der Elemente wird die Diskretisierung fortgesetzt. Eine beliebig feine Unterteilung in horizontale parallele **Schichten** erlaubt eine gute Berücksichtigung der nichtlinearen Temperaturverteilung im Querschnitt und der von der Temperatur abhängigen Materialeigenschaften (Bild 4.2). Über die Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte werden die scheibenartigen Schichten zu dem Gesamtquerschnitt zusammengefaßt. Dabei wird starrer Verbund angenommen. Spannungen entstehen ausschließlich in den Scheibenebenen, deren Integration zu den Schnittgrößen Normalkraft und Biegemoment führt.

Innerhalb jeder solchen Schicht wird an 7 Integrationspunkten die Dehnung aus der Verformungsfigur ermittelt. Damit wird der Ortsabhängigkeit der Dehnung (Polynom 3ten Grades) in ausreichendem Maße Rechnung getragen, mit dem Ziel innerhalb der Elementgebiete die lokalen Steifigkeitsverhältnisse gut zu erfassen. Die Verwendung relativ großflächiger Elemente macht diese weitergehende Unterteilung des Kontinuums erforderlich.

Bei den Integrationen über das Volumen der Elemente werden den Integrationspunkten Gewichte nach GAUSS (siehe /18/) zugeordnet, während sich die Gewichte der Schichten aus den Schichtdicken ergeben. Die **Elementsteifigkeit für geometrisch lineare Untersuchungen** ergibt sich zu:

$$\underline{\underline{K}}_0 = \int_V \underline{\underline{B}}^T * \underline{\underline{D}} * \underline{\underline{B}} \, dV$$

Darin ist B die ortsabhängige Verknüpfung zwischen den 33 Knotenweggrößen des betreffenden Elementes (Vektor rho) und den ortsabhängigen Dehnungen (Vektor Epsilon):

$$\underline{\underline{eps}}(x,y,z) = \underline{\underline{B}}(x,y,z) * \underline{\underline{rho}}$$

mit

$$\underline{\underline{eps}}(x,y,z) = \begin{matrix} ! & \text{eps}_{xx} & ! & ! & u_{,x} & ! & ! & w_{,xx} & ! \\ ! & \text{eps}_{xy} & + & \text{eps}_{yx} & ! & = & ! & u_{,y} + v_{,x} & ! & - & z * ! & w_{,xy} & + & w_{,yx} & ! \\ ! & \text{eps}_{yy} & ! & ! & v_{,y} & ! & ! & w_{,yy} & ! \end{matrix}$$

Darin ist z der Abstand der Schichtmitte von der Bezugsebene.

Diese Steifigkeitsmatrix ist quadratisch und symmetrisch zur Hauptdiagonalen aufgebaut. Die Elemente lassen sich ordnen nach der reinen Scheibensteifigkeit $\underline{\underline{K}}_{SS}$, der reinen Biegesteifigkeit $\underline{\underline{K}}_{PP}$ der Platte und der kombinierten Steifigkeit $\underline{\underline{K}}_{SP} = \underline{\underline{K}}_{PS}$:

$$\underline{\underline{K}}_0 = \begin{matrix} & ! & \underline{\underline{K}}_{SS} & \underline{\underline{K}}_{SP} & ! \\ & ! & & & ! \\ & ! & \underline{\underline{K}}_{PS}^T & \underline{\underline{K}}_{PP} & ! \end{matrix}$$

Da in $\underline{\underline{K}}_{SP} = \underline{\underline{K}}_{PS} = -z \int_V \underline{\underline{B}}_S^T * D * \underline{\underline{B}}_P dV$ eine lineare Abhängigkeit der Steifigkeit von z existiert, sind Platten- und Scheibenverhalten i. a. aneinander gekoppelt. Nur bei zur Bezugsebene symmetrischem Materialverhalten ist das Integral $I = \int_H z * E dz$ gleich Null. Nur dann sind Biege- und Scheibenwirkung entkoppelt. Dieser Ausnahmefall tritt bei der Untersuchung von Stahlbetonplatten praktisch nicht auf.

Die Beanspruchung durch Lasten wird ausschließlich an den Knoten in das System eingetragen. Die Lasten bestehen aus äußeren Platten- und Scheibenlasten (Kräfte und Momente) und aus Temperaturlasten. Die Temperaturlasten berücksichtigen die thermische Dehnung als Anfangsverformung und werden als äquivalente Knotenkräfte der Elemente bestimmt. Die ergeben sich für jedes Element aus:

$$\underline{\underline{P}}_{th} = - \int_V \underline{\underline{B}}^T * D * \epsilon_{th} dV$$

mit in jeder Richtung gleichgroßer thermischer Dehnung

$$\underline{\underline{\epsilon}}_{th} = \begin{matrix} ! & \epsilon_{th,x} & ! \\ ! & 0 & ! \\ ! & \epsilon_{th,y} & ! \end{matrix}$$

Der Zusammenhang zwischen allen angreifenden Kräften und der Systemverformung wird durch die Steifigkeit des Systems bestimmt:

$$\underline{\underline{K}}_0 * \underline{\underline{r}}_ho = \underline{\underline{P}} + \underline{\underline{P}}_{th}$$

mit $\underline{\underline{K}}$ als Steifigkeitsmatrix, der zentralen Größe der Berechnungen. Dieses System linearer Gleichungen ist die Summe aller Gleichgewichts-

bedingungen. Es kann nach dem Einbau der Randbedingungen gemäß CHOLESKY (aus /20/) gelöst werden, solange mit der Steifigkeitsmatrix eine i. a. positiv definite Koeffizientenmatrix vorliegt.

Als Differenz zwischen der Gesamtdehnung aus dem Verformungsfeld und der thermischen Dehnung ergibt sich die spannungserzeugende Dehnung. Die Spannungen lassen sich aus dem Produkt der in Sekantenformulierung angegebenen Materialmatrix mit diesen spannungserzeugenden Dehnungen berechnen:

$$\text{sig}(x,y,z) = D(\text{eps}_{\text{sig}}, \text{Temp.}) * \text{eps}_{\text{sig}}(x,y,z) \quad \text{mit}$$

$$\text{eps}_{\text{sig}}(x,y,z) = \text{eps}_g(x,y,z) - \text{eps}_{\text{th}}(\text{Temp.}, z) \quad \text{mit}$$

$$\text{Temp.}(\text{Zeit}, z)$$

4.3.2 Berücksichtigung geometrischer Nichtlinearitäten

4.3.2.1 Gleichgewicht am verformten System

Bei brandbeanspruchten Biegebauteilen mit behinderter Längsverformung treten im allgemeinen gleichzeitig bedeutende Normalkräfte und Durchbiegungen auf. In solchen Fällen muß das Gleichgewicht der Kräfte am verformten System gebildet werden (Theorie II. Ordnung). Unter der Voraussetzung kleiner Verformungen wird dafür mit dem Prinzip der virtuellen Arbeiten eine zusätzliche symmetrische Initialspannungsmatrix $\underline{\underline{K}}_{sig}$ abgeleitet, die die Steifigkeit des Systems nun von der vorhandenen Längskraft abhängig macht.

$$\underline{\underline{K}}_{sig} = \int_V 2 * \underline{\underline{B}}_{NL}^T * \underline{\underline{D}} * \underline{\underline{B}}_{NL} dV$$

$$(\underline{\underline{K}}_0 + \underline{\underline{K}}_{sig}) * \underline{\underline{rho}} = \underline{\underline{P}} + \underline{\underline{P}}_{th}$$

Zugkräfte erhöhen die Steifigkeit und vermindern die Durchbiegungen, während Druckkräfte die Steifigkeit vermindern. Grenzwert für die Druckkraft ist das Stabilitätsversagen (Knicklast / Beullast) des Gesamtsystems.

Bild 4.3 zeigt das berechnete nichtlineare Last/Verformungs-Verhalten eines Plattenstreifens unter Druckbeanspruchung. Im Falle "a" ist eine äußere Last und im Falle "b" eine vollständig unterdrückte Anfangsdehnung $\underline{\underline{eps}}_0$ die untersuchte Beanspruchung. Mit einer geringen Störlast $\underline{\underline{P}}_v$ wird das Stabilitätsproblem in ein Spannungsproblem umgewandelt. Die Biegelinie aus $\underline{\underline{P}}_v$ allein enthält die erste Knickfigur. Aus dem Diagramm wird deutlich, daß die Durchbiegung bei hohem Drucklastniveau überproportional mit der Druckbeanspruchung wächst, von der Störlast hängt sie direkt proportional ab. Alle Kurven laufen asymptotisch auf den Grenzwert (die Knicklast) zu. Beim Erreichen der Knicklast wird das zu lösende Gleichungssystem singulär und ein Stabilitätsversagen wird damit angezeigt.

Für die Berechnung der Initialspannungsmatrix muß die Matrix $\underline{\underline{B}}_{NL}$ bekannt sein. Mit Hilfe von $\underline{\underline{B}}_{NL}$ werden die Dehnungen in zweiter Näherung aus den Biegeverformungen ermittelt. Sie hängt jedoch direkt vom Verformungszustand selber ab, und darum muß die Lösung auf iterativem

Wege gefunden werden (auch bei linear elastischem Materialverhalten).

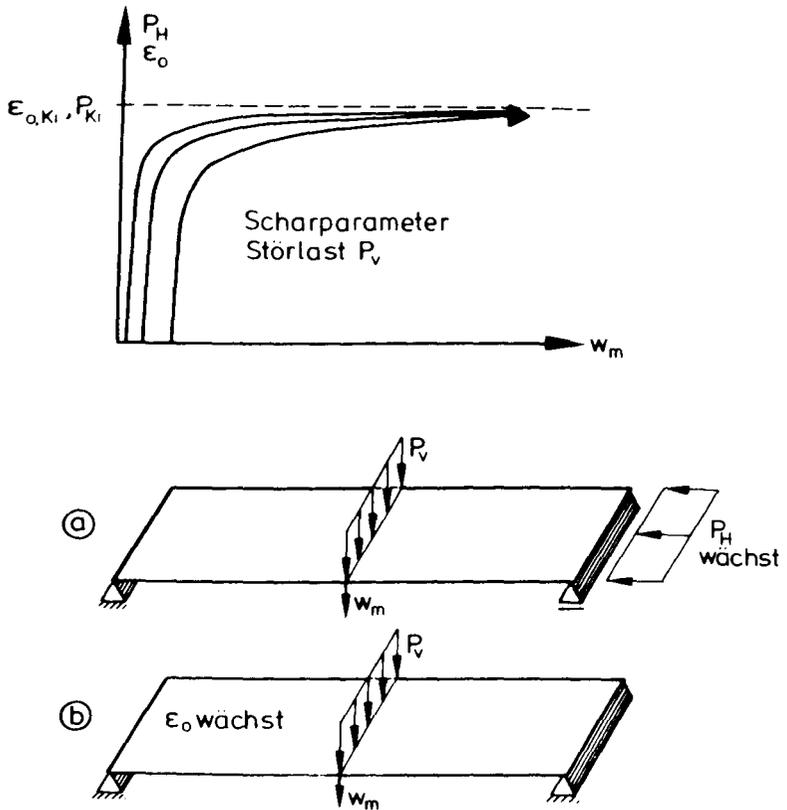


Bild 4.3: Last/Verformungs-Beziehungen bei Biegung mit Längsdruck unter Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung

4.3.2.2 Berücksichtigung großer Rotationen

Die erweiterte Untersuchung der virtuellen Änderung eines Verzerrungszustandes führt zu den Integralen

$$\underline{\underline{K}}_1 = \int_V (\underline{\underline{2}}^* \underline{\underline{B}}_{NL}^T * \underline{\underline{D}} * \underline{\underline{B}} + \underline{\underline{B}}^T * \underline{\underline{D}} * \underline{\underline{B}}_{NL}) dV \quad \text{und}$$

$$\underline{\underline{P}}_1 = \int_V \underline{\underline{2}}^* \underline{\underline{B}}_{NL}^T * \underline{\underline{sig}}_0 dV$$

Erst bei großen Rotationen wird B_{NL} so groß, daß diese Werte Einfluß auf das Rechenergebnis gewinnen. Da die Matrix K_1 unsymmetrisch ist, wird sie zusammen mit den Verformungen aus dem vorangegangenen Iterationsschritt gemeinsam mit dem Vektor P_1 auf der Lastseite des Gleichungssystems berücksichtigt:

$$(\underline{\underline{K}}_0 + \underline{\underline{K}}_{sig}) * \underline{\underline{rho}} = \underline{\underline{P}} + \underline{\underline{P}}_{th} + \underline{\underline{P}}_1 - \underline{\underline{K}}_1 * \underline{\underline{rho}}_{(i-1)}$$

Die Auswirkungen der so erweiterten Gleichgewichtsbeziehung auf das rechnerische Systemverhalten zeigt Bild 4.4 im Vergleich zu dem Ergebnis einer Berechnung ohne Berücksichtigung von großen Rotationen. Der an beiden Enden gelenkig und unverschieblich gelagerte Biegebalken biegt sich rechnerisch weniger stark durch, wenn er mit Berücksichtigung großer Rotationen untersucht wird. Bei Platten entsteht dieser Effekt auch bei frei verschieblichen Rändern.

Hier entstehen

$$\underline{\underline{eps}}_{NL} = \underline{\underline{B}}_{NL} * \underline{\underline{rho}}$$

$$\underline{\underline{eps}}_{NL} = \begin{pmatrix} 0.5 * w_{,x}^2 \\ w_{,x} * w_{,y} \\ 0.5 * w_{,y}^2 \end{pmatrix} = 0.5 * \begin{pmatrix} w_{,x} * w_{,x} \\ w_{,x} * w_{,y} + w_{,y} * w_{,x} \\ w_{,y} * w_{,y} \end{pmatrix}$$

stets Dehnungen, die zusammen mit dem angenommenen Hooke'schen Materialverhalten zu steifigkeitssteigernden Zugkräften führen.

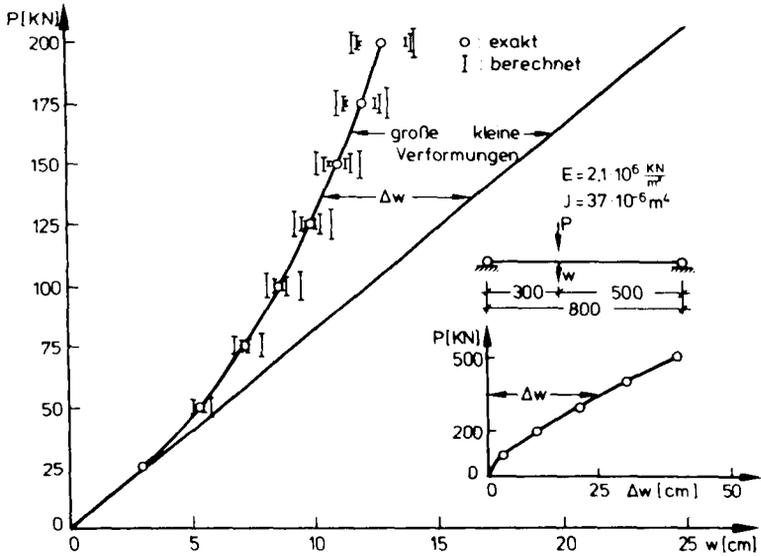


Bild 4.4: Last/Verformungs-Beziehung bei Biegebeanspruchung unter Berücksichtigung großer Rotationen

4.3.3 Das Iterationsverfahren

Die in den vorigen Abschnitten angegebenen Gleichungen gelten für ein linear-elastisches Materialverhalten. Sie sind ebenfalls anwendbar, wenn das nichtlineare Last/Verformungs- bzw. Spannungs/Dehnungs-Verhalten linearisiert wird. Die lineare Ersatzfunktion für die nichtlinearen Zusammenhänge muß auf iterativem Wege gefunden werden. Die Beanspruchung der Struktur wird schrittweise gesteigert und die nichtlinearen Größen durch entsprechend angepaßte Konstanten (lineares Verhalten) ersetzt. Eine ausführliche Diskussion möglicher Iterationsverfahren muß und kann hier entfallen. Die Ausführungen beschränken sich auf die Beschreibung des im Programm PLAFEU verwendeten **Sekantenverfahrens**.

In jeder "Laststufe" wird das System mit der gesamten zugehörigen Belastung untersucht. Dabei wird die Materialmatrix so verändert, daß sie eine lineare Beziehung zwischen der zuvor gefundenen Dehnung und dem vom nichtlinearen Materialgesetz zugeordneten Spannungszustand beschreibt. Dieser Rechenzyklus innerhalb einer "Laststufe" wird so lange wiederholt, bis die Änderungen ein vorgegebenes Maß unterschreiten. Die Änderungen betreffen die einzelnen Steifigkeitsmatrizen und bis auf die statischen Lastanteile alle Komponenten des Lastvektors.

Dieses Verfahren aus der Gruppe der Iterationsverfahren mit einer Veränderung der Steifigkeitsmatrix hat gegenüber dem konkurrierenden Tangenten-Verfahren neben manchen Nachteilen entscheidende Vorteile:

- auch zu den Punkten auf dem absteigenden Ast einer Spannungs/Dehnungs-Beziehung gehört eine positive Sekantensteifigkeit
- die Ribbildung des Betons wird ausschließlich über das Materialgesetz berücksichtigt

Die Nachteile liegen in:

- der teilweise langsamen Konvergenz
(kann bei Forschungs-Programmen hingenommen werden)
- Stabilitätsversagen bei nichtlinearem Materialverhalten ist nicht

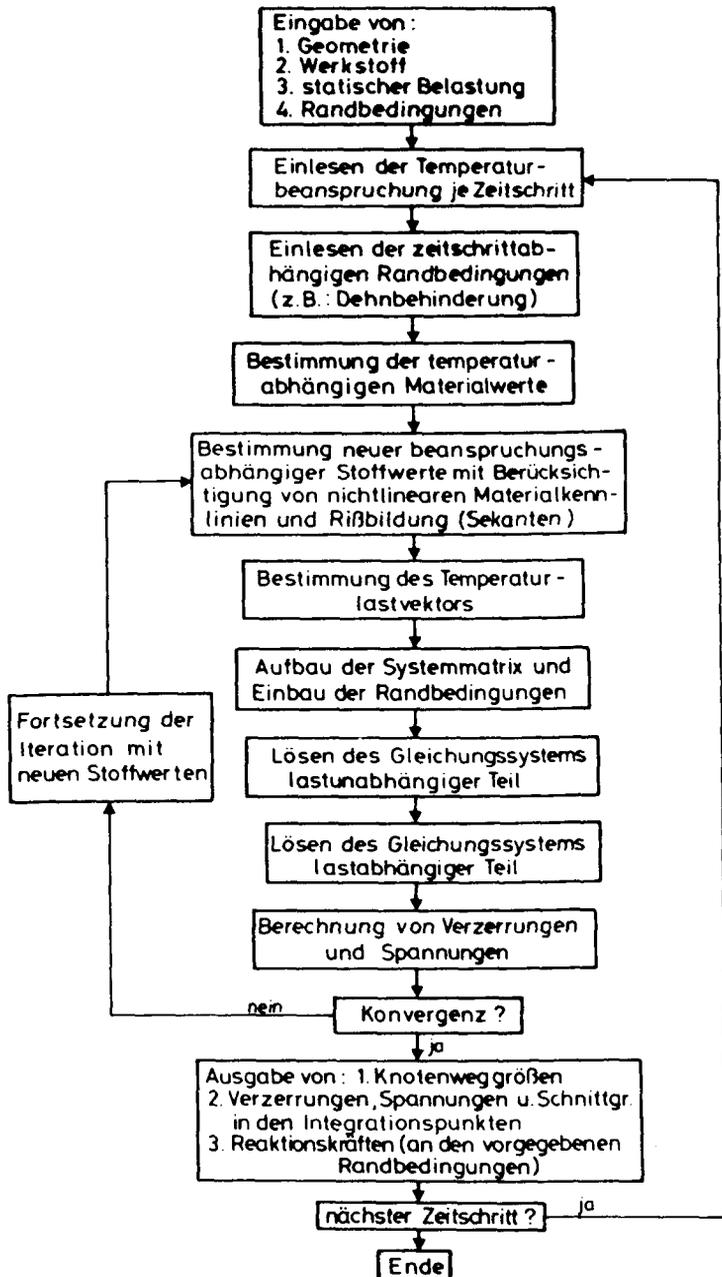


Bild 4.5: Ablaufdiagramm des Programms PLAFEU

eindeutig erkennbar

(Stabilitätseffekte werden durch die großen temperaturbedingten Verformungen i. a. überdeckt und werden bewußt aus diesen Untersuchungen ausgeklammert.)

4.3.4 Programmstruktur

Die Gliederung des Programms PLAFEU in spezielle Prozeduren und die Reihenfolge deren Abarbeitung (Bild 4.5) ist für die programmierte Berechnung nach dem Weggrößenverfahren typisch und muß hier nicht begründet werden. Einzelne spezielle Punkte sollen aber dennoch hervorgehoben werden:

Zunächst fällt die äußere **Zeitschleife** auf, die den kontinuierlichen Brandablauf in eine Reihe von einzelnen Zeitpunkten zerteilt, mit dazu gehörenden dann als stationär betrachteten Temperaturverteilungen im Querschnitt und speziellen Randbedingungen für die Struktur. Erst durch die Vorgabe der von der Zeit abhängigen Weggrößen wird die Nachrechnung derjenigen Bauteilversuche überhaupt möglich, bei denen am Rand Weggrößen von außen zeitabhängig eingepreßt wurden.

Im Rechengang wird jeweils bei der Bestimmung der Materialkennwerte vom zuletzt ermittelten Zustand ausgegangen. Das trifft sowohl für die neue Iteration innerhalb einer Zeitschleife als auch auf die erste Iteration des neuen Zeitschrittes zu. Dieses Verfahren darf nicht verwechselt werden mit der Berücksichtigung der Spannungsgeschichte, wobei die Formulierung der Spannungs/Dehnungs-Beziehung selbst vom zuletzt ermittelten Zustand abhängt. Hier wird das Material außer bei der Ribbildung als temperaturabhängig und nichtlinear aber als hyperelastisch betrachtet. Es gibt keine Abhängigkeit vom Spannungspfad, wie sie zur Berücksichtigung der Spannungsgeschichte nötig wäre.

Für ausgewählte Zeitschritte erfolgt die Ausgabe der Ergebnisse. Der gesamte Rechengang kann nach jedem beliebigen Zeitschritt unterbrochen werden und eine Ausgabe liefern, die als Eingabe für eine neue, weitergehende Rechnung dient.

Durch die Neuberechnung der Steifigkeitsmatrix und das Lösen des li-

nearen Gleichungssysteme bei jeder Iteration ist das Programm sehr rechenzeitintensiv.

Ein Querschnittsversagen wird vom Programm nicht selbst erkannt; sondern es ergeben sich Durchbiegungen in der Größenordnung bis zu mehreren Metern und eine Konvergenz wird nicht mehr erreicht, sobald die aktuelle Tragfähigkeit von den Lasten überschritten wird. Ein Programmabbruch wegen eines nicht lösbaren Gleichungssystems muß aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens nicht unbedingt ein Stabilitätsversagen der Struktur bedeuten. Kleinere Zeitschritte führen i. d. R. zu numerisch stabilen Rechnungen (siehe Abschnitt 4.5).

4.4 Rechenwerte des Materialverhaltens

4.4.1 Allgemeines

Die Reaktion eines Materials auf mechanische Beanspruchungen kann mit Hilfe von geeigneten Spannungs/Dehnungs-Beziehungen der sogenannten Spannungs/Dehnungs-Linien (SDL) oder auch Arbeitslinien (AL) beschrieben werden. Sowohl für den Beton als auch für den Stahl sind diese Linien nicht linear. Unter dem Einfluß hoher Temperaturen verlieren Beton und Stahl an Festigkeit und erlangen eine größere Verformbarkeit. Das Verhalten unter Hochtemperaturbedingungen der im Stahl- und Spannbetonbau verwendeten Baustoffe ist in den vergangenen Jahren ausgiebig im Sonderforschungsbereich 148 erforscht worden. Aus den dort gewonnenen Erkenntnissen sind die von der Temperatur abhängigen SDL abgeleitet.

Im Hochtemperaturbereich ist der Einfluß der Versuchsbedingungen auf das Versuchsergebnis noch ausgeprägter als bei Raumtemperatur. Ohne auf weitere Einzelheiten dieser Problematik näher einzugehen, muß jedoch der sogenannte Warmkriechversuch kurz erklärt werden, da ausschließlich dessen Resultate Grundlage für die eigenen Rechengesetze sind.

Im Warmkriechversuch wird ein Probekörper einer zeitlich konstanten Spannung ausgesetzt, während die Temperatur mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit (hier 2 K/min) erhöht wird, bis daß die Materialprobe versagt. Die Verformungen der Proben werden kontinuierlich gemessen. Das Ergebnis ist eine Verformungs/Zeit-Kurve bzw. wegen der Zeit/Temperatur-Kopplung eine Verformungs/Temperatur-Kurve und die kritische Temperatur, bei der die Probe versagt (Bild 4.6).

Dieser Versuchstyp liefert besonders geeignete Ausgangsdaten für die Beschreibung des Materialverhaltens im brandbeanspruchten Bauteil, weil hier ebenfalls eine instationäre Temperaturbeanspruchung vorliegt. Die gemessenen Verformungen beinhalten bereits die Kriech- und Schwindanteile, so daß für deren Berücksichtigung lediglich folgende Annahme gemacht werden muß: Kriechen und Schwinden ist im Rahmen üblicher Aufheizgeschwindigkeiten bei brandbeanspruchten Bauteilen nahezu unabhängig von der Aufheizgeschwindigkeit.

Für die Formulierung des Betonverhaltens unter biaxialer Druckbeanspruchung sind neueste Erkenntnisse von EHM /22,23/ berücksichtigt worden.

Für die Bestimmung der Zwangsschnittgrößen und der Schnittkraftumlagerungen ist eine gute rechnerische Erfassung des wirklichen Kraft/Verformungs-Zusammenhangs unabdingbar. Die Verformungsentwicklung der Bauteile wird aber primär von der thermischen Beanspruchung - also von der Verteilung der thermischen Dehnung - bestimmt, so daß sich Modifikationen der temperaturabhängigen Arbeitslinien nur relativ schwach auf die berechneten Bauteilverformungen auswirken.

Die Erfahrung aus den eigenen Versuchsnachrechnungen zeigt eindeutig, daß eine bessere Annäherung berechneter Verformungsentwicklungen an Versuchsergebnisse kaum durch eine Veränderung bei den AL herbeigeführt werden kann. Insbesondere eine Berücksichtigung der Anisotropie des heterogenen Baustoffes Beton darf bei Hochtemperatur-Bedingungen für eine Druck/Druck-Beanspruchung ohne nennenswerten Verlust an "Wirklichkeitsnähe" durch eine Modellierung als isotroper und homogener Stoff ersetzt werden. Es ist allerdings wichtig, die Anfangssteifigkeit und das Erreichen der maximalen Spannung bei der zugehörigen Dehnung gut anzunähern. Für die numerische Stabilität des iterativen Rechenablaufes ist die Fortsetzung der AL über das Spannungsmaximum hinaus in Form eines abfallenden Astes von Bedeutung. Im Gegensatz zu den Verformungen reagieren die berechneten Schnittgrößen auf jede Veränderung bei den AL.

Alle AL werden hyperelastisch verwendet, d. h.: Entlastungen erfolgen auf der gleichen Linie wie die Belastungen. Wegen der Ableitung dieser Rechengesetze und der Art der verwendeten Baustoffversuche ist die Anwendbarkeit beschränkt auf Verhältnisse mit konstanter oder steigender Temperatur und konstanten oder steigenden Dehnungen.

Entsprechend ihrer Bedeutung wird nachfolgend die thermische Ausdehnung als ein maßgeblicher Faktor für die Berechnungen ausführlich behandelt, während die anderen Materialeigenschaften dagegen nur kurz besprochen werden.

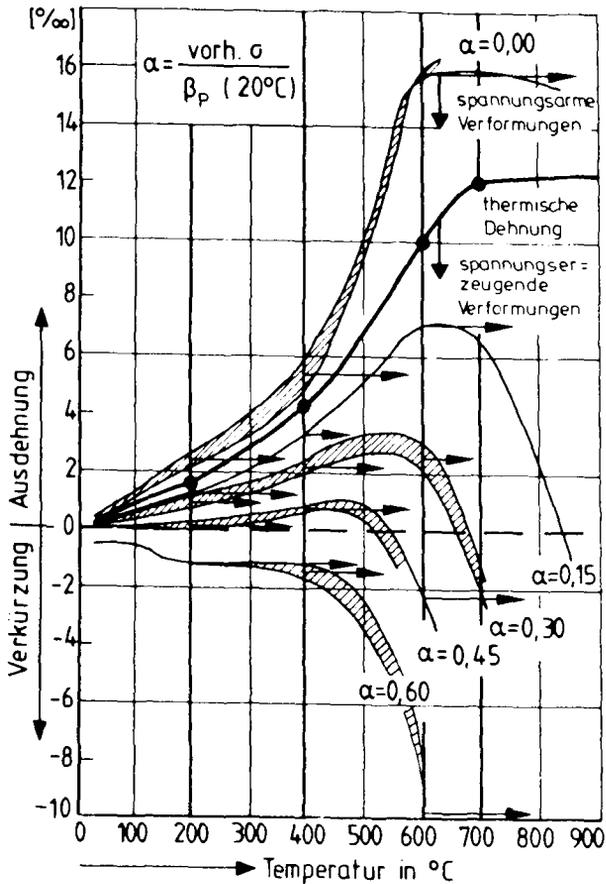


Bild 4.6: Ergebnisse von Warmkriechuntersuchungen /28/
Verformungen belasteter Proben bei Aufheizung und
daraus ermittelte **thermische Dehnung**

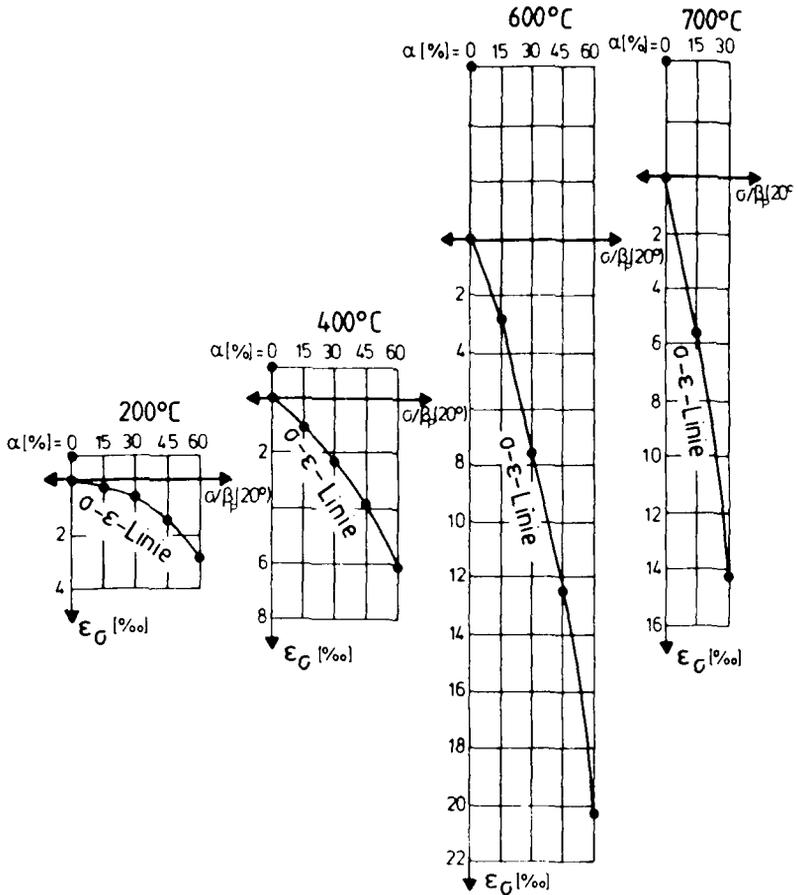


Bild 4.6: Konstruktion von AL aus Warmkriechversuchen und Ermittlung der "spannungsarmen Anfangsverformung"

4.4.2 Thermische Dehnung

Sowohl für Beton als auch für den Werkstoff Stahl finden sich in der Literatur Angaben über die thermische Ausdehnung auch bei hohen Temperaturen. Für die eigenen Berechnungen wird die von RICHTER /24,29/ formulierte Beziehung für Bewehrungsstähle verwendet.

Die Rechenfunktion für die thermische Dehnung des Betons - hier ausschließlich eines Betons mit vorwiegend quarzitischen Zuschlägen - bedurfte einer Umformulierung. Die aus der Literatur verfügbaren Angaben sind definitionsgemäß an unbelasteten Proben gewonnen worden. Das Bild 4.6 zeigt, wie aus den Resultaten der Warmkriechversuche temperaturabhängige SDL abgeleitet werden. Es enthält die Verformungen der unbelasteten Probe und die entwickelte Rechenfunktion für die thermische Dehnung. Daraus wird offensichtlich, daß bereits kleinste Spannungsbeanspruchungen den Beton besonders im Hochtemperaturbereich erheblich verformen können. Die AL werden aber funktionell so beschrieben, daß im aufsteigenden Ast kein Wendepunkt entsteht. Die gewählte Funktion kann also nicht den gesamten Spannungsbereich mit der gleichen Güte beschreiben. Die Hauptanwendung der AL liegt im mittleren Spannungsbereich, so daß die Verformungen bei extrem niedriger Spannungsausnutzung bereits bei der Formulierung der thermischen Dehnung berücksichtigt werden können.

Die beim Beton festgestellte hohe Verformbarkeit bei geringer Lastausnutzung resultiert aus der thermisch bedingten Gefügelockerung des inhomogenen Materials. Zuschlag und Zementstein haben unter Temperatureinwirkung unterschiedliches Ausdehnungsverhalten: der Zementstein schrumpft, während sich die Zuschlagkörner ausdehnen. Insgesamt überwiegt aber der Einfluß des Zuschlages und bestimmt die thermische Dehnung des Festbetons.

Beim Stahl sind derartige Reaktionen nicht beobachtet worden. Daher wird bei den Berechnungen dieser Arbeit für die Bewehrung die an unbelasteten Proben gemessenen thermischen Dehnungen berücksichtigt.

4.4.3 Beschreibung des Betonverhaltens

4.4.3.1 Mechanische Werkstoffeigenschaften

Im Bild 4.7 ist der Einfluß der Temperatur auf die wichtigsten mechanischen Kenngrößen des Betons dargestellt. Dabei ist:

- * β_p die Festigkeit: diejenige Spannung, bei welcher der Beton zu der angegebenen Temperatur im Warmkriechversuch versagt /28/.
- * $E(T)$ der E-Modul: die Anfangssteifigkeit bei einaxialer Lasterrhöhung einer vorher erwärmten Betonprobe /28/.
- * ϵ_{sp} die Dehnung, bei der die maximale Spannung von der AL erreicht wird. Diese Verformung wurde im Warmkriechversuchen kurz vor dem Versagen der Probe gemessen.
- * ϵ_{sth} : die bereits besprochene thermische Ausdehnung unter Berücksichtigung der Stauchungen, die von geringsten Druckspannungen verursacht werden.
- * ϕ_k die Kriechzahl, die das Verhältnis der Kriechverformungen zur elastischen Verformung gemäß dem temperaturabhängigen E-Modul angibt /28/.

Bemerkung: Bei der eigenen Formulierung der AL ist das Übergangskriechen /28/ bereits enthalten. Dazu wird als Anfangssteigung stets der Ausdruck

$$E(T)_{\text{Kriechen}} = E(T) / (1 + \phi_k(T))$$

verwendet.

Die Ergebnisse jüngster Warmkriechuntersuchungen bei biaxialer Belastung von EHM /22,23/ wurden ausgewertet und für die Formulierung der AL numerisch aufbereitet (Bild 4.8)

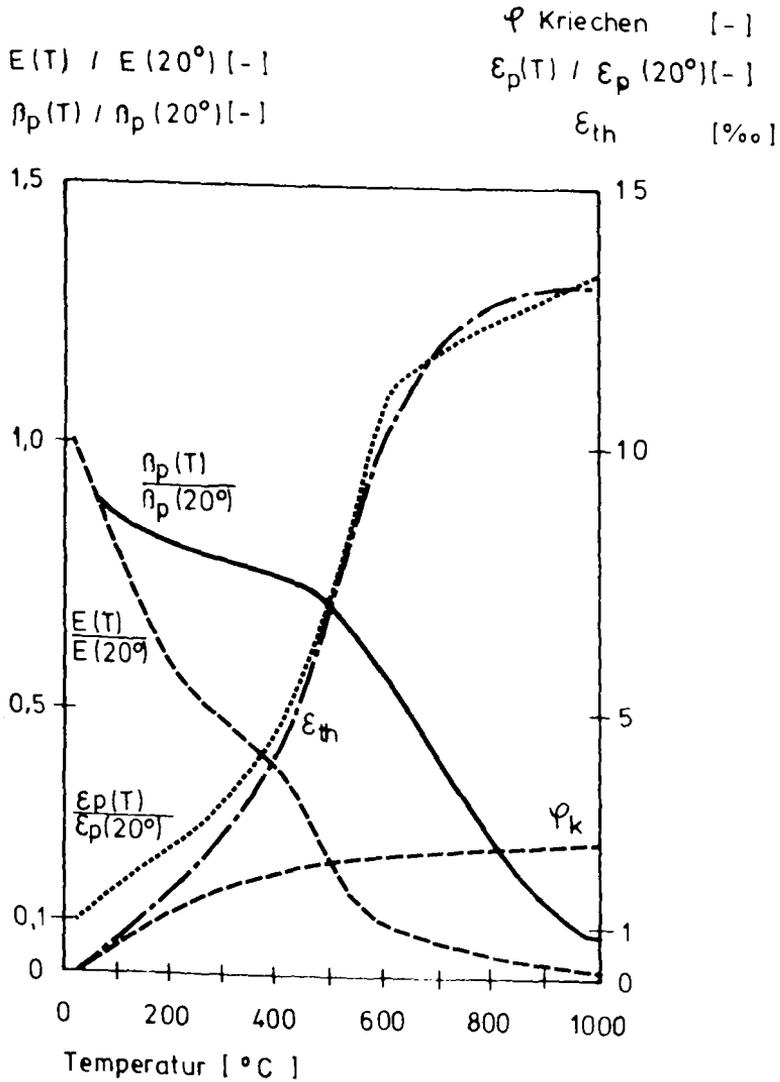


Bild 4.7: Einfluß der Temperatur auf Betonkennwerte

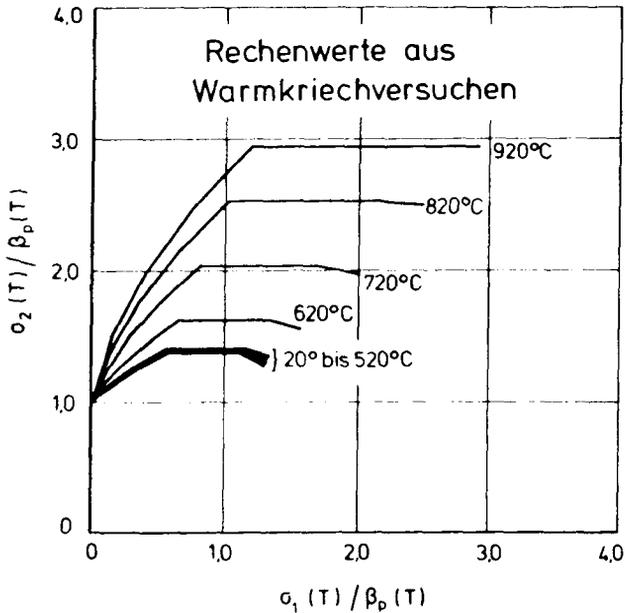
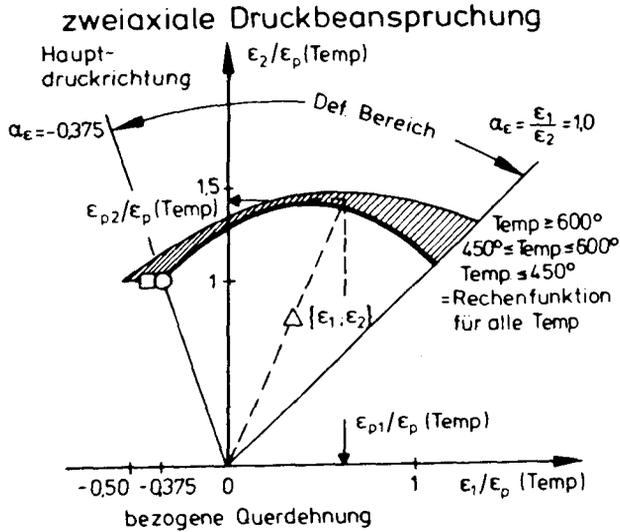


Bild 4.8: Darstellung numerisch aufbereiteter Betoneigenschaften Festigkeit und Verformung vor dem Versagen aus WKV /22,23/

4.4.3.2 Grundform der Arbeitslinie für Beton

Der typische Verlauf einer Beton-AL ist im Bild 4.9 dargestellt. Der Teil 1 wird festgelegt von den temperaturabhängigen Materialkennwerten, während die Kennwerte der Teile 2 bis 4 jenseits des Spannungsmaximums frei vorgebbare Größen sind, die den abfallenden Ast definieren.

Die mathematische Form für den aufsteigenden Ast zeigt Bild 4.10 in einem x/y-Koordinatensystem. Es sind die Graphen der Funktion und die Werte ihrer Steigung eingetragen. Mit drei Beispielen wird die Möglichkeit der Funktion gezeigt, verschiedene Verhältnisse wiederzugeben.

In diesem Bild entspricht die y-Achse der auf die Festigkeit bezogenen Spannung und die x-Achse der Dehnung, bezogen auf ϵ_{sp} . Die Anfangssteigung - der E-Modul - bestimmt allein den Verlauf der Kurve im angegebenen Definitionsbereich 1.

Beispielhaft demonstriert das Bild 4.11 für einen in 2 Richtungen gestauchten Beton die Möglichkeit der gewählten Formulierung, verschiedene Verhältnisse wiederzugeben. Aus diesem Bild geht auch die mathematische Formulierung hervor: bei biaxialer Druckbeanspruchung wird demnach für die Hauptdruckrichtung 22 der Zusammenhang

$$\sigma_{22} = f(\epsilon_{22})$$

zwischen der Hauptdruckspannung und der kleineren Hauptdehnung gebildet. Die Richtungsabweichung zwischen den Hauptspannungen und den Hauptdehnungen ist durch die Verwendung eines Ersatz-E-Moduls E^* berücksichtigt. Wegen der unterstellten Isotropie im Druck/Druck-Bereich dürfen die aus der Elastizitätstheorie bekannten Verhältnisse übernommen werden:

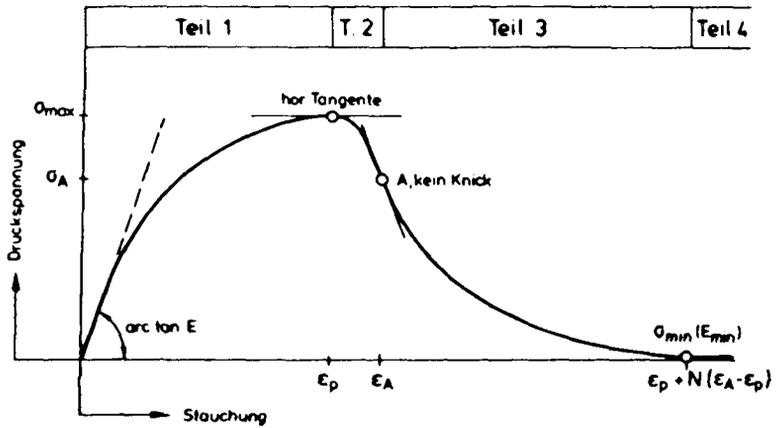


Bild 4.9: SDL für Beton: Rechengesetz mit Eingangsgrößen

$$\begin{aligned}
 y &= 1 - (1-x)^a & 0 \leq x \leq 1 \\
 y' &= a \cdot (1-x)^{a-1} & 0 \leq y \leq 1 \\
 y'(x=0) &= a & 1 \leq a \leq \infty \\
 x &= 1 - (1-y)^{1/a}
 \end{aligned}$$

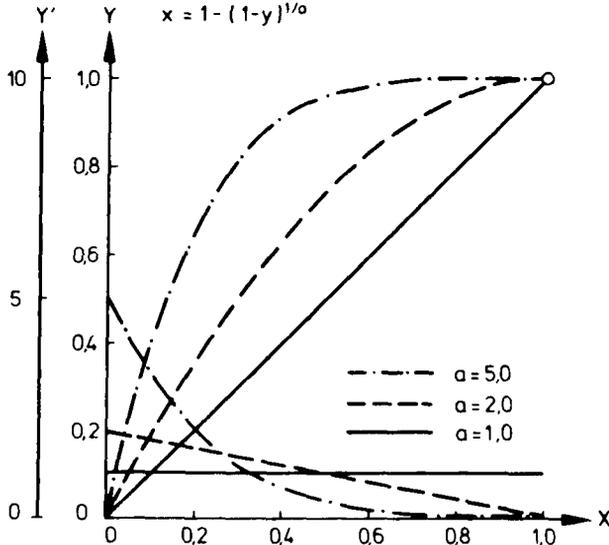


Bild 4.10: SDL, Teil I: mathematischer Ansatz auch für die 1. Ableitung und die Umkehrfunktion

$\text{alfa}_{\text{eps}} = \text{eps}_{11} / \text{eps}_{22}$ mit eps_{11} größer, gleich eps_{22}

$\text{alfa}_{\text{sig}} = \text{sig}_{11} / \text{sig}_{22}$ mit sig_{11} größer, gleich sig_{22}

$$\text{alfa}_{\text{eps}} = \frac{\text{alfa}_{\text{sig}} - \text{QDZ}_S}{1 - \text{QDZ}_S * \text{alfa}_{\text{sig}}}$$

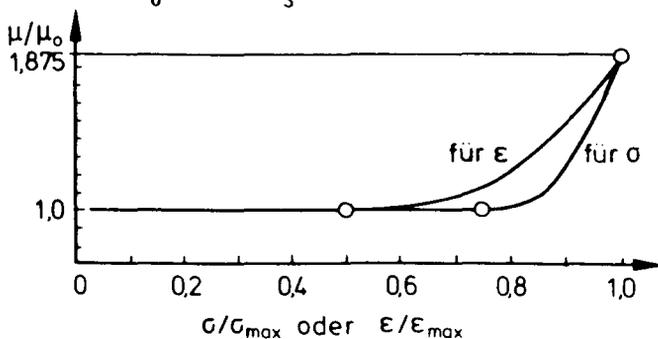
$$\text{alfa}_{\text{sig}} = \frac{\text{alfa}_{\text{eps}} + \text{QDZ}_S}{1 + \text{QDZ}_S * \text{alfa}_{\text{eps}}}$$

$$E^* = E_S / (1 + \text{alfa}_{\text{eps}} * \text{QDZ}_S)$$

Des weiteren wird die Festigkeitssteigerung bei biaxialen Druckverhältnissen sowie die entsprechenden Verformungen beachtet (Bild 4.8).

Aus dem ermittelten Zustand $\text{sig}_{22} / \text{eps}_{22}$ wird der **Sekanten-E-Modul** E_S bestimmt und zusammen mit der lastabhängigen **Querdehnzahl** (QDZ_S) in die **Werkstoffmatrix** D_S eingesetzt:

$$D_S = \frac{E^*}{1 - \text{QDZ}_0^2} * \begin{matrix} ! & 1.0 & 0.0 & \text{QDZ}_S ! \\ ! & 0.0 & (1 - \text{QDZ}_S^2)/2 & 0.0 ! \\ ! & \text{QDZ}_S & 0.0 & 1.0 ! \end{matrix}$$



4.4.3.3 Beispiele für Spannungs/Dehnungs-Beziehungen

Im Bild 4.12 sind die Spannungen in der Hauptdruckrichtung dargestellt, wie sie sich ergeben, wenn der Beton in zwei Richtungen weggesteuert gestaucht wird. Dabei bleibt das Verhältnis der Hauptdehnungen unverändert. Im oberen Teil des Bildes entspricht das Hauptdehnungsverhältnis der angenommenen Querdehnzahl des Betons. Es wird erkennbar, daß die maximale Spannung über der einaxialen Druckfestigkeit liegt und auch die zugehörige Verformung ist größer.

Da der angegebene Dehnungspfad nicht zu einem Versagen bei ϵ_{p2} führen kann, bauen sich Querdruckspannungen auf, sobald die wirksame Querdehnung behindert wird. Das ist ab ca. 50 % von ϵ_{p2} der Fall. Der dann vorliegende zweiachsigel Spannungszustand hat eine höhere Festigkeit zur Folge.

Im Bild 4.13 ist die Größe dieser Querdruckspannung gezeigt. Zu einem Dehnungspfad mit noch kleineren Hauptdehnungsverhältnissen gehören Zugspannungen in Querrichtung. Im Modell wird die Druckfestigkeit nicht weiter abgemindert. Wegen der Querdehnung fallen die Hauptrichtungen für die Spannungen und die Dehnungen nicht zusammen.

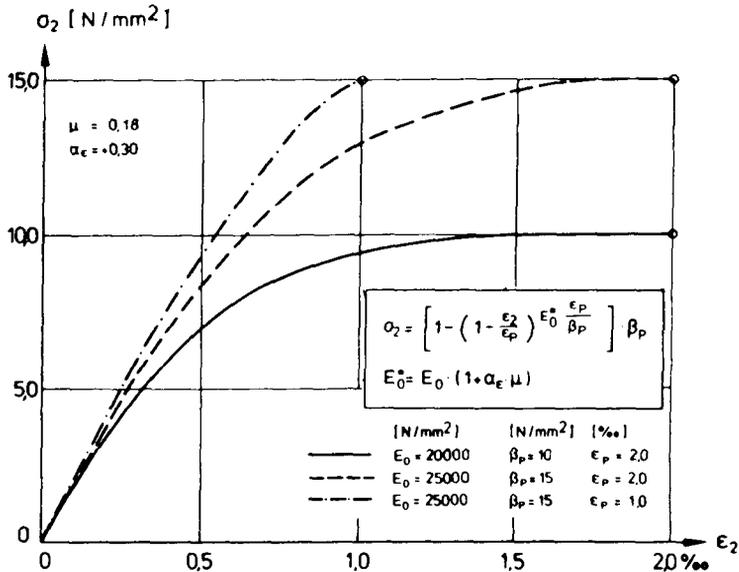


Bild 4.11: SDL, Teil I: Formulierung und Beispiele

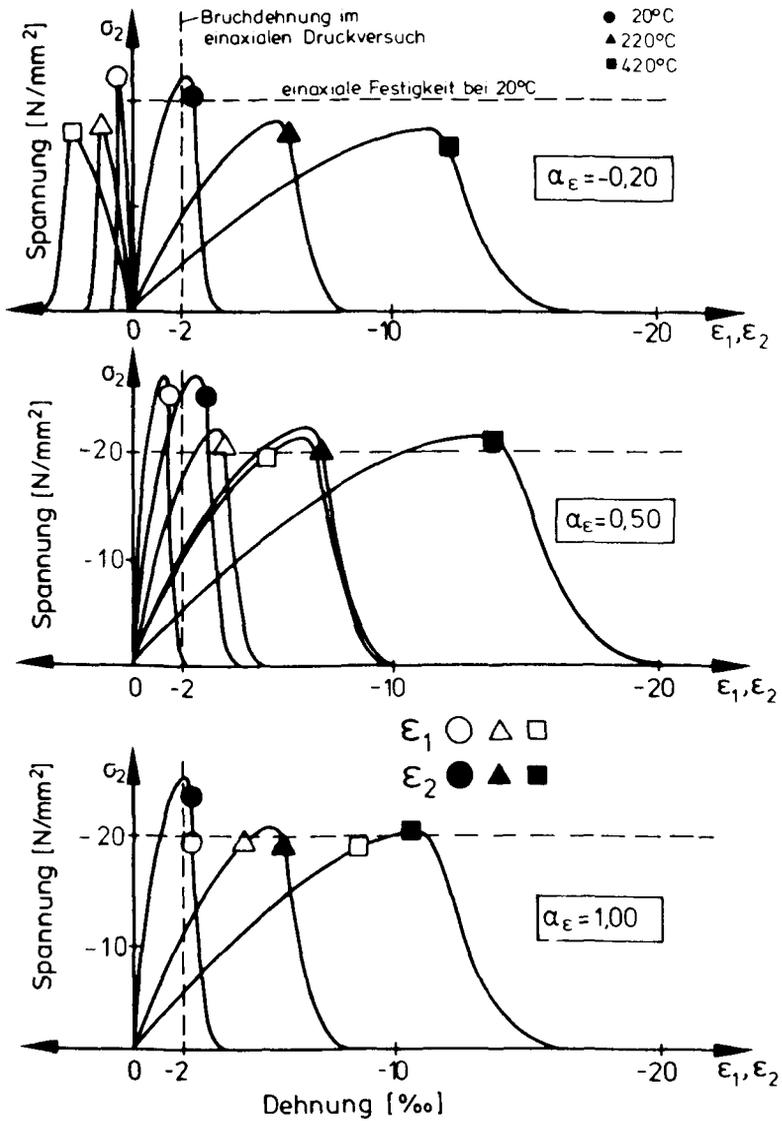


Bild 4.12: Beispiele für Beton-Arbeitslinien

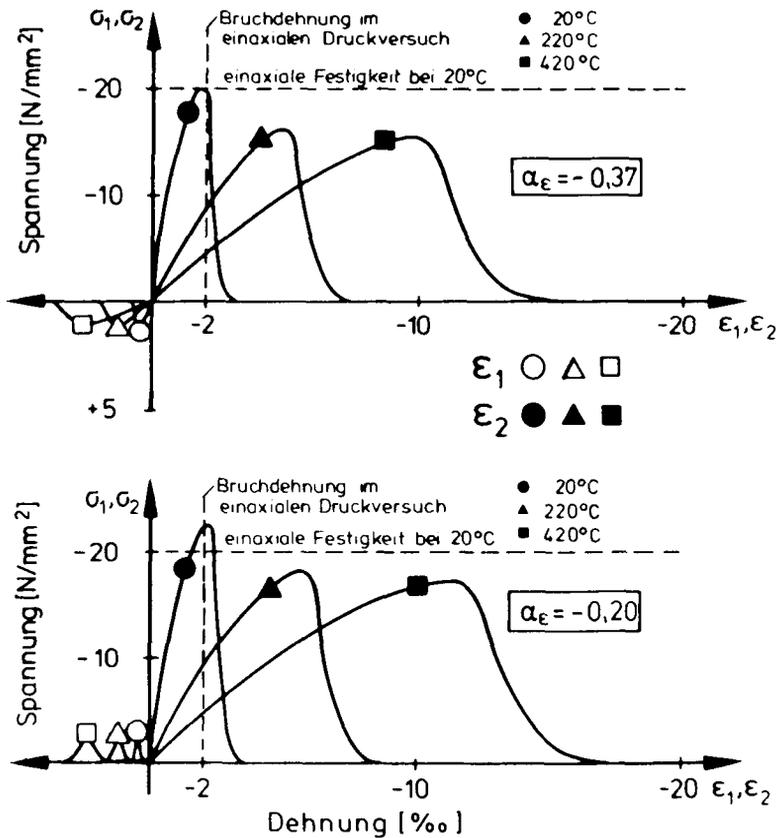


Bild 4.13: Spannungs/Dehnungs-Beziehungen von Beton bei Steigerung der Stauchungen mit konstantem Verhältnis der Hauptdehnungen

4.4.3.4 Ribbildung

Aus der Zugfestigkeit und dem E-Modul ergibt sich eine "Ribdehnung" $\epsilon_{s_{Rib}}(T) = \beta_Z(T) / E_0(T)$, nach deren Überschreiten der Beton als gerissen gilt. Bis zur Zugfestigkeit wird dem Beton linear-elastisches Materialverhalten unterstellt. Mit Hilfe des "tension stiffening" wird integral über eine größere Fläche das Zusammenwirken der Baustoffe Beton und Stahl im Zugbereich erfaßt. Die AL des Betons fällt linear auf Null ab. Die Länge des abfallenden Astes ist frei vorgebar (Bild 4.14) - "verschmierte Risse im Element".

In der numerischen Behandlung erfolgt nach dem Aufreißen eine getrennte, anisotrope Darstellung der beiden Hauptrichtungen. Hierbei werden die SDL für einaxiale Beanspruchung verwendet. Gleichzeitig sinkt der Schubmodul rapide, rechnerisch nach einer Hyperbelfunktion, ab. Mit G_S wird die Möglichkeit des Betons beschrieben, Schubspannungen über rauhe Ribufer hinweg zu übertragen. Das Tragverhalten der untersuchten Systeme ist - wie Vergleichsrechnungen zeigen - nahezu unabhängig von der Größe des Schubmoduls.

Die Beschreibung erfolgt schichtweise in den Koordinaten der Hauptdehnungen mit den folgenden Beziehungen:

$$D_S = \begin{bmatrix} E_{S11} & 0.0 & 0.0 & \\ 0.0 & G_S & 0.0 & \\ 0.0 & 0.0 & E_{S22} & \\ & & & \end{bmatrix}$$

$$E_{S11} = \text{sig}_{11} / \epsilon_{s_{11}} \quad \text{und} \quad E_{S22} = \text{sig}_{22} / \epsilon_{s_{22}}$$

$$G_S = f_G * E_0 / 2(1 + \alpha Z_0) \quad \text{mit}$$

$$f_G = 1 / (1 + k * 0,10 * (\epsilon_{s_{11}} - \epsilon_{s_{Rib}})), \quad k=0,1,2,\dots,50!,\dots$$

Zur Sicherstellung der numerischen Stabilität sind für die Hauptdiagonalelemente der Materialmatrix positive Mindestwerte nahe Null implementiert.

Die Beachtung der Zugfestigkeit des Betons in den heißen Querschnittsteilen beeinflusst das Rechenergebnis nur geringfügig. Zum einen nimmt die ohnehin geringe Zugfestigkeit mit steigender Temperatur rasch ab, zum anderen ergeben sich aus der nichtlinearen Dehnungsverteilung im Querschnitt Betondehnungen in einer Größenordnung, bei der ein Mitwirken des Betons auf Zug zwischen den Rissen nicht mehr unterstellt werden kann.

Anders liegen die Verhältnisse in den kalten Zonen. Die Zugfestigkeit kalter Umgebungsbauteile um ein beflamtes Gebiet herum wird bei Berücksichtigung der Betonzugfestigkeit bedeutend gesteigert. Sie bestimmt den Grad der Dehnbehinderung für das beflamte Gebiet und darüber dessen Verformungen und Schnittgrößen.

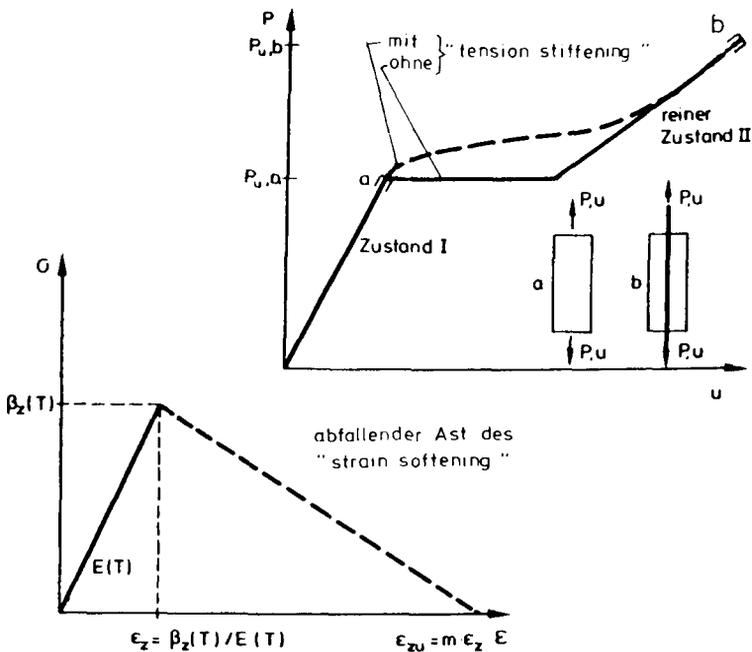


Bild 4.14: Berücksichtigung der versteifenden Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen (Tension-Stiffening)

4.4.4 Beschreibung des Stahlverhaltens

Die von RICHTER /24/ aus Warmkriechversuchen entwickelten Rechengesetze für die Stahlbewehrung sind unverändert in dem Programm **PLAFEU** implementiert. Die Stahlarbeitslinien gelten für den gesamten Dehnungsbereich ohne Einschränkung und sind durch einen nahezu horizontalen Verlauf bei großen Dehnungen charakterisiert. Ein Zerreißen der Bewehrung - also ein plötzlicher Spannungsabfall bei einer bestimmten Reißdehnung - kann mit diesen Linien daher nicht erfaßt werden (Bild 4.15).

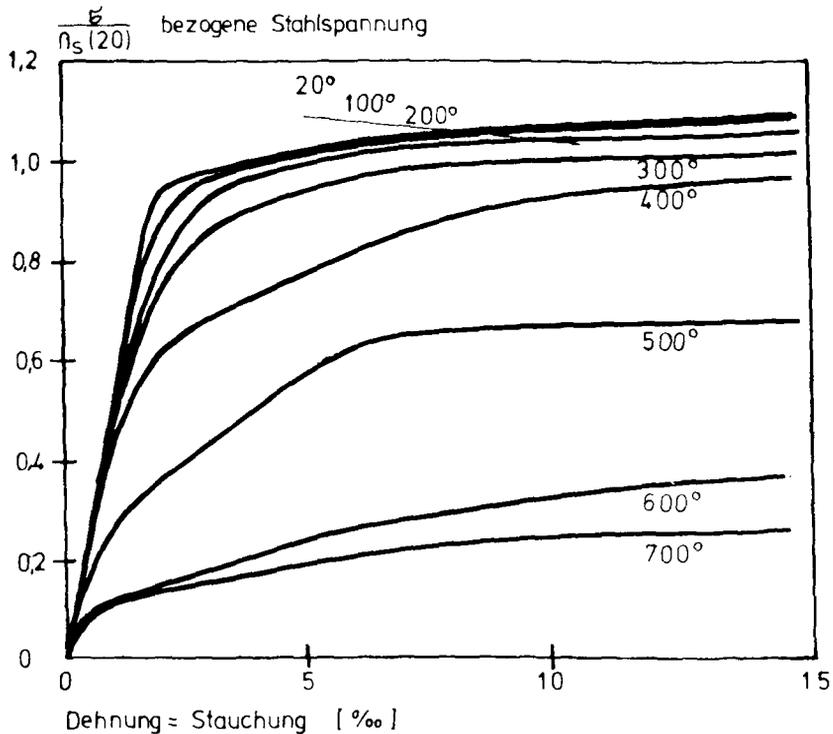


Bild 4.15: Temperaturabhängige SDL für die Bewehrung ($\beta_s = 420 \text{ N/mm}^2$)
nach RICHTER /24,29/

4.5 Kritische Betrachtung des Rechenprogramms

Das hier aufbereitete und vorgestellte Rechenprogramm **PLAFEU** (Platten im Feuer) dient in dieser Arbeit zur theoretischen Begleitung der in den vorangegangenen Kapiteln besprochenen Bauteilversuche. Für die Realisierung standen neben den elementaren Grundlagen der Kontinuumsmechanik 3 solide Bausteine zur Verfügung:

- * wesentliche Vorarbeiten und Erkenntnisse aus den WALTER'schen Untersuchungen im Rahmen des SFB 148 zur nichtlinearen Programmierung zum gleichen Problemkreis /8/; die vorliegende Arbeit ist als konsequente Fortsetzung und Erweiterung der WALTER'schen ausgelegt und ausgeführt,
- * neueste Erkenntnisse über das Baustoffverhalten unter hohen und instationären Temperaturbeanspruchungen aus dem SFB 148,
- * ein Finites Platten/Scheiben-Element, dessen geometrisch und physikalisch nichtlineare Anwendbarkeit auf Stahlbetonplatten unter Einschluß der Ribbildung des Betons als gesichert gelten kann /19/.

Auf der Basis der elastischen Grundversion des Programms DUPLA /9,19/ bauen die eigenen Erweiterungen auf. Das Sekantenverfahren hatte sich bereits bei WALTER /8/ bewährt und erweist sich auch nach einigen Modifikationen in den eigenen Berechnungen als stabil. Zur Verbesserung der Rechenergebnisse in Sinne einer genaueren Anpassung an die in den "Standard-Versuchen" (Kap. 2 und 3) gemessenen Werten, wurden verschiedenste Modelle und Versionen für das hochgradig nichtlineare Materialverhalten implementiert, welche zum Teil auch momentan noch zur Verfügung stehen. Angeregt wurden diese Anstrengungen u. a. durch die Ergebnisse der Materialforschung im SFB, wo EHM /22/ zunächst mit Warmdruckversuchen bei Hochtemperatur-Verhältnissen einen extremen Anstieg der biaxialen Betonfestigkeit gefunden hat. Für solche Werte ist das WALTER'sche Betonmodell nicht ausgelegt.

Erst die Berücksichtigung der Werte aus den später durchgeführten Warmkriechversuchen (WKV) ließ eine Weiterentwicklung in die richtige Richtung erkennen.

Inzwischen hat sich aus den Testrechnungen ergeben, daß der Schubmodul G und die Beton-Zugfestigkeit in heißen Querschnitten sowie die Beweh-

nung bei dehnbehinderten Platten nur von geringem Einfluß auf das Rechenenergebnis sind. Außerdem wurde deutlich, daß Veränderungen des genauen Verlaufes der SDL_n sich solange kaum auf die Verformungsrechnung auswirken, wie das Maximum und die Anfangssteigung unverändert erhalten bleiben.

Versuche, einen Randbalken-Einfluß rechnerisch zu untersuchen sind gescheitert. Das Finite Element erzeugt an der Übergangslinie zwischen Randbalken und Plattenfeld (=Elementgrenze) gleiche Krümmungen aufgrund des Verformungsansatzes. Mit diesem Element lassen sich solche Sprünge im Steifigkeitsverlauf praktisch nicht mehr wirklichkeitsnah berücksichtigen! Über die Auswirkungen auf die Biegemomente bei den nachfolgend behandelten Fällen wird im Abschnitt 5.2.3.1 näher eingegangen. In diesem Zusammenhang sei auf die erfolgreiche Anwendung dieses Elementes bei der nichtlinearen Berechnung von Stahlbetonplatten unter Einfluß der Ribbildung /19/ hingewiesen.

Bei den Erweiterungen auf geometrische Nichtlinearitäten in 2 Stufen entstand der Eindruck, daß die Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung von wesentlich größerer Bedeutung ist als die Beachtung großer Rotationen. Dieses entspricht auch den Erwartungen. Eine Abschätzung bei linearem Materialverhalten ist in /13/ gegeben. Allgemeingültige Aussagen zu diesem Aspekt für die speziellen Fragen bei brandbeanspruchten Platten können aber aufgrund der existierenden Rechenerfahrungen zur Zeit noch nicht gemacht werden. Allerdings wurde beobachtet, daß sich vergleichbare Rechnungen verhältnismäßig gering in den Weggrößen aber dafür stärker in der benötigten Anzahl der Iterationsschritte unterscheiden. Daher ist bei den Rechenbeispielen des Kapitels 5 nur noch mit kleinen Rotationen gerechnet worden.

Die Konvergenz wird durch den Vergleich der ermittelten Veränderung der Weggrößen mit einem vorgegebenen Schrankenwert festgestellt. I. a. wurde als Schranke 1% vorgegeben. Dieser Wert erscheint zunächst sehr grob für das Sekantenverfahren mit der typischen langsamen Konvergenz bei weichen Systemen. Bei der Festlegung der Genauigkeitsanforderung an die anzustrebende Lösung sollte aber immer auch das gesamte Problem als Ganzes gesehen werden:

- * Das Sekantenverfahren benötigt für die folgende "Laststufe" nicht zwingend eine möglichst exakte Beschreibung der Zustände aus der vorhergehenden Belastung, sondern es nähert grundsätzlich von jedem beliebigen Startvektor ausgehend das Ziel an.
- * Die Vorgabe von Randbedingungen basiert auf idealisierenden Annahmen. Gerade dort, wo Bauteilausdehnungen und deren Behinderungen das Biegeverhalten maßgeblich mitbestimmen, ist bei der Vorgabe von Verschiebungsweggrößen äußerste Aufmerksamkeit dringend geboten. Änderungen an dieser Stelle, die zunächst vernachlässigbar erscheinen, können das Resultat in wesentlich höherem Maße beeinflussen als veränderte Konvergenzeigenschaften.
- * Das Materialmodell verwendet zwar experimentell abgesicherte Grunddaten, es ist aber als Rechenmodell nicht in der Lage, das Verhalten der Baustoffe unter den komplexen Beanspruchungen physikalisch genau zu beschreiben. Abweichungen zwischen Modell und Wirklichkeit sind auch hier natürlich. Bei den tatsächlich vorkommenden Schnittkraftumlagerungen treten auch mechanische Entlastungen des Materials auf. Während ein Spannungsabfall bei gleichbleibender bzw. steigender spannungserzeugender Dehnung ϵ_{sig} aufgrund eines temperaturbedingten Festigkeitsverfalls vom Programm gut erfaßt wird, sind Entlastungsvorgänge bei sinkendem ϵ_{sig} problematisch. Entlastungen dieser Art werden hyperelastisch aufgefaßt und damit bestenfalls grob an die tatsächlichen Verhältnisse angenähert.
- * Im Iterationsprozeß werden die Steifigkeitsmatrix und die äquivalenten Ersatzknotenkräfte aus der thermischen Dehnung gleichzeitig verändert. Dabei können sich ungünstige "Zwischen-Zustände" ergeben, die bei geometrisch nichtlinearen Berechnungen zu einem Programmabbruch führen: es entstehen höhere Druckkräfte bei gleichzeitig sinkender Steifigkeit. Durch die Wahl kleiner Zeitschritte wird die Rechnung stabiler. Hier können Schritte von:
 5 Minuten bis zur 30ten Brandminute und von
 10 Minuten bis zur 60ten Brandminute und von
 15 Minuten bis zur 120ten Brandminute als Richtwerte empfohlen werden.
- * Die Diskretisierung muß aus Rechenzeit- und -kapazitätsgründen begrenzt werden. Die Schichtzahl macht sich bei der Rechenzeit kaum bemerkbar, da die Zeit für das Aufstellen der Steifigkeitsmatrix von der Schichtzahl kaum abhängt und an dieser Stelle der größte Anteil der Rechenzeit verbraucht wird. Es hat sich gezeigt, daß der Quer-

schnitt bereits gut diskretisiert ist, wenn in den Druckzonen ca. 3 Schichten existieren. Das ist ab einer Gesamtschichtzahl von 10 bis 15 gesichert. Dünnere Schichten in der Nähe der Oberflächen können im Einzelfall den Zustand zwar besser erfassen als gleiche Schichtdicken, das Gesamtergebnis wird aber nicht im gleichen Maße positiv beeinflusst.

Die Elementzahl kann wegen der hochwertigen Formfunktion so niedrig wie zur Erfassung der System- und Belastungsmerkmale nötig sein. Das System ist ausreichend genau diskretisiert, wenn alle punktuellen Systembeanspruchungen (Auflager und Lasten) an Eckknoten wirken. Bereiche stark unterschiedlicher Beanspruchungen sollen auch im Bereich unterschiedlicher Elemente liegen (Spannungskonzentrationen, Temperaturbereiche).

Das Programm bietet die Möglichkeit, durch eine exzentrische Anordnung der Bezugsebene, ausmittige Widerlager leicht und global zu erfassen (Bild 4.2). Von der Anwendung dieses Verfahrens muß dringend abgeraten werden. Es entstehen systematische Überschätzungen der Systemsteifigkeit, was durch die Erweiterung auf exzentrische Randbedingungen einfach und sicher verhindert wurde /13/.

Die Genauigkeitserwartungen an die Rechenergebnisse sollen bei den Weggrößen u , v und w nicht höher als um ca. 15% liegen. Bei der Bestimmung von Spannungen und Schnittkräften kommen noch die Ungenauigkeiten der Stoffmodelle hinzu. Eine Verbesserung der Rechenergebnisse bei der Verformungsberechnung durch die Veränderung der Stoffmodelle ist schwierig und nur begrenzt möglich (s. o.). Es ist zu bedenken, daß mit der spannungserzeugenden Dehnung i. a. eine relativ große Differenz kleiner Zahlen gegeben ist (nämlich: $\epsilon_{sig} = \epsilon_g - \epsilon_{th}$). Große Differenzen kleiner Zahlen führen grundsätzlich zu numerischen Problemen.

Im folgenden Kapitel 5 wird die Verifizierung des Programms durch Versuchsnachrechnung durchgeführt und auf interessante Aspekte des Rechenverfahrens am konkreten Beispiel eingegangen. Die Leistungsfähigkeit wird gezeigt und weitergehende Erkenntnisse über das Trag- und Verformungsverhalten brandbeanspruchter Stahlbetonplatten werden gewonnen.

5. Rechnerische Untersuchungen

5.1 Allgemeines

Mit Hilfe von rechnerischen Untersuchungen wird in diesem Kapitel gleichzeitig die Leistungsfähigkeit des Programms **PLAFEU** (**Pl**atten im **F**eu) demonstriert und anhand detaillierter Betrachtungen der Rechenergebnisse ein tieferes Verständnis der Vorgänge im Inneren brandbeanspruchter Stahlbetonplatten geschaffen.

Bei der Diskussion der Rechenergebnisse wird am konkreten Beispiel auf spezielle Rechenannahmen und Einschränkungen hingewiesen.

Die im Abschnitt 5.2 gezeigte Programmanwendung ist die rechnerische Begleitung des Brandversuches des zuletzt im Kapitel 3 besprochenen Plattensystems S 1/86 mit partieller Beflammung. Dieser Versuch eignet sich in besonderem Maße für die erforderliche Verifizierung des Programms, da hier die geometrischen Randbedingungen im Vergleich zu den Platten der anderen Brandversuche wesentlich besser definiert sind. Außerdem ist dies der einzige Brandversuch, in dem ein brandbeanspruchtes Deckenfeld mit realistischen Ausmaßen an kalte Umgebungsbauteile monolithisch angeschlossen ist. Die Bearbeitung der eigentlichen Aufgabe des Programms, nämlich die Analyse von partiell brandbeanspruchten Deckenplatten, wird im Anschluß an die Programm-Verifizierung mit der weitergehenden rechnerischen Begleitung dieses Versuches beispielhaft und ausführlich demonstriert.

Daraufhin erfolgt im Abschnitt 5.3 eine spezielle Untersuchung zur Bedeutung einzelner Versuchsparameter.

Im Abschnitt 5.4 werden entsprechend der "Standard-Versuche" die günstigen Auswirkungen bereits kleinster Zwangkräfte auf das Verformungsverhalten und die Tragfähigkeitsdauer auch rechnerisch eindeutig nachgewiesen. Die Verläufe der Hauptschnittgrößen unter Standard-Versuchsbedingungen werden angegeben. Mit der abschließenden Beurteilung der Wirklichkeitsnähe der Versuchsergebnisse im Abschnitt 5.4.5 wird eine solide Basis geschaffen für die zusammenfassende und verallgemeinernde Auswertung der gesamten Untersuchungen im Folgekapitel 6.

5.2 Analyse des Plattensystems S 1/86

5.2.1 Diskretisierung der Struktur (Bild 5.1)

Dem System werden Symmetrieeigenschaften unterstellt, obwohl die Versuchsplatte nur an 3 Seiten von einem kalten "Kragen" umgeben ist. Außerdem sind diese Randstreifen im Versuch geringfügig unterschiedlich gegen Aufbiegen gehalten. Es wird nur ein Teilbereich modelliert, der in etwa dem "Süd-West-Viertel" der Versuchsplatte entspricht. Die voutenartigen Verstärkungen werden nicht erfaßt.

Die Struktur besteht aus 32 finiten Dreieckselementen mit jeweils 12 Betonschichten von je 1 cm Dicke. Die Stahlbewehrung ist für jede Richtung und Lage gesondert als Schicht mit einer äquivalenten Schichtdicke erfaßt.

Als Randbedingungen werden Knotenweggrößen zu Null gesetzt, d. h.: mögliche Verformungen werden verhindert. Hierbei handelt es sich um Verschiebungen in x, y und z-Richtung und um Plattenverdrehungen.

Die Temperaturbeanspruchung wird anhand der gemessenen Erwärmung vorgegeben. Dazu dienen 3 Temperaturbereiche in denen der Querschnitt jeweils gleichartig durchwärmt wird; der kalte Außenrand, das heiße Innenfeld und dazwischen ein ebenfalls heißer Bereich, dessen Temperaturen jedoch unter denen des Innenfeldes liegen.

Diese Rechnung wurde nach der Theorie II. Ordnung durchgeführt; große Verformungen wurden hier nicht berücksichtigt.

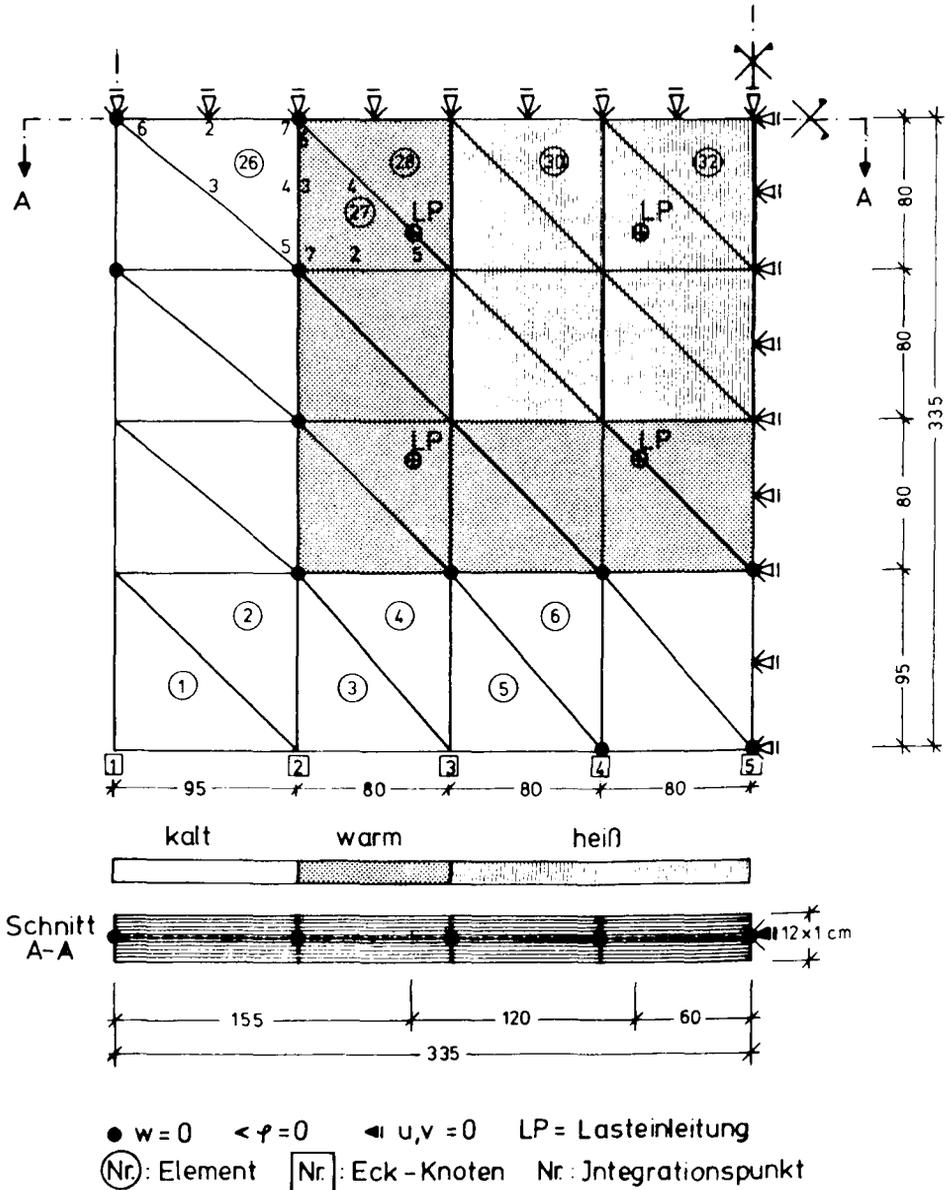


Bild 5.1: Diskretisierung des Plattensystems S 1/86

5.2.2 Verifizierung des Programms durch Versuchsnachrechnung

5.2.2.1 Allgemeines

Zur Verifizierung wird der Vergleich berechneter Werte mit im Versuch gemessenen Größen verwendet. Behandelt werden vornehmlich die ersten 2 Stunden des über 5stündigen Brandversuches, weil sich in diesem Zeitraum die entscheidenden Vorgänge abspielen.

Zunächst werden die Verschiebungen und Durchbiegungen verglichen.

Anschließend erfolgt die Gegenüberstellung von Kraftgrößen und Dehnungen.

5.2.2.2 Vergleich von Weggrößen

Dem Bild 5.2 ist die Güte der ermittelten Plattenverformung anhand der Durchbiegungsentwicklung im Plattenzentrum zu entnehmen.

Die berechnete "Mittendurchbiegung" liegt im Mittel ca. 1 bis 2 cm unter dem gemessenen Wert; das sind Abweichungen in der Größenordnung von 15%. Solche Differenzen zwischen gemessenen und gerechneten Wegen sind bei brandbeanspruchten, statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonbauteilen als gering zu bewerten. Die Verringerung der Durchbiegungsgeschwindigkeit nach 30 Minuten Branddauer wird vom Programm richtig wiedergegeben.

Die Abweichungen lassen sich zudem tendenziell erklären: die Verformung vor dem Brandbeginn wird überschätzt, weil die Zugfestigkeit des Betons in diesem Rechenlauf nicht berücksichtigt ist und die größeren gemessenen Durchbiegungen während des Brandverlaufes können mit dem Fehlen eines Kragstreifens am Nordrand des Bauteils erklärt werden, was bei der Berechnung ebenfalls nicht berücksichtigt wurde.

Ferner ist zu bedenken, daß bei der Versuchsplatte an einigen Stellen in der Mitte des West-Randes die Stützbewehrung nach 40 Minuten zerissen ist, was die Rotationsbehinderung schwächte und die Randverdrehung erleichterte. Ein Zerreißen der Bewehrung kann aufgrund der

Spannungs/Dehnungs-Linie für den Stahl (Bild 4.15) nicht in der Rechnung erfaßt werden. In der Rechnung werden auch äußerst großen Dehnungen noch Spannungen zugeordnet.

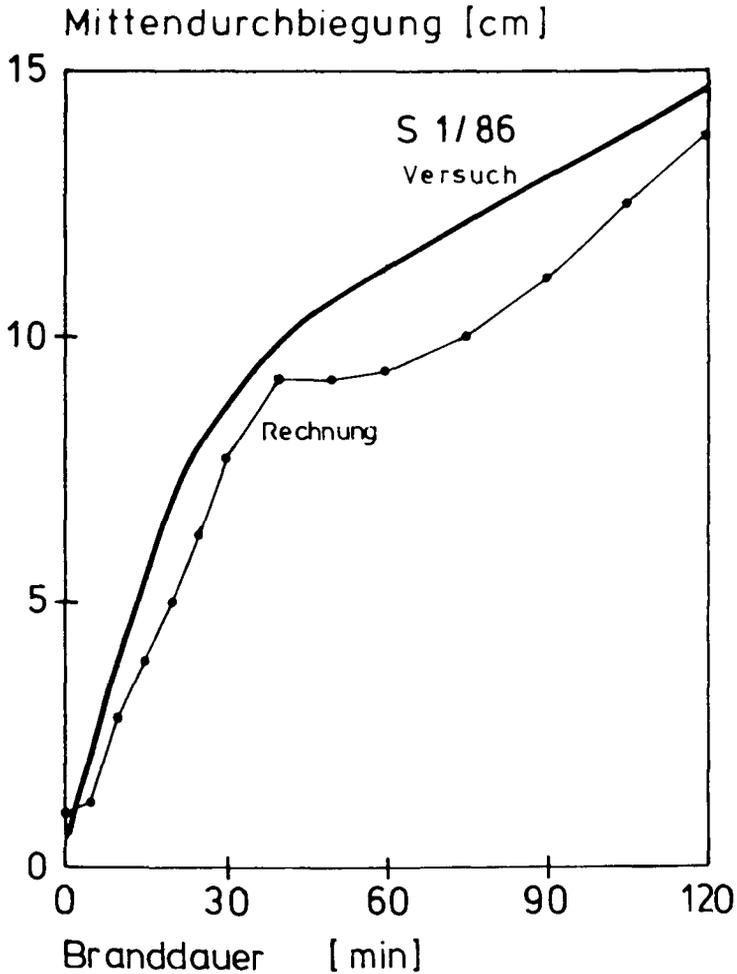


Bild 5.2: Vergleich von Biegeverformungen

Im Bild 5.4 sind Randverschiebungen in ihrer zeitlichen Entwicklung dargestellt und im Bild 5.3 das Verschiebungsfeld der Struktur.

Der Vergleich dieses Rechenergebnisses mit den Werten der Bilder 3.1 und 3.18 zeigt, daß auch die Scheibenverformungen gut wiedergegeben werden. Sowohl die auffallende Verlangsamung der Ausdehnungen in der 40ten Minute als auch die Größenordnung der Verschiebungen entsprechen den Versuchswerten. Die Form der ausgedehnten Scheibe stimmt mit den gemessenen Werten überein.

Verschiebungsfeld

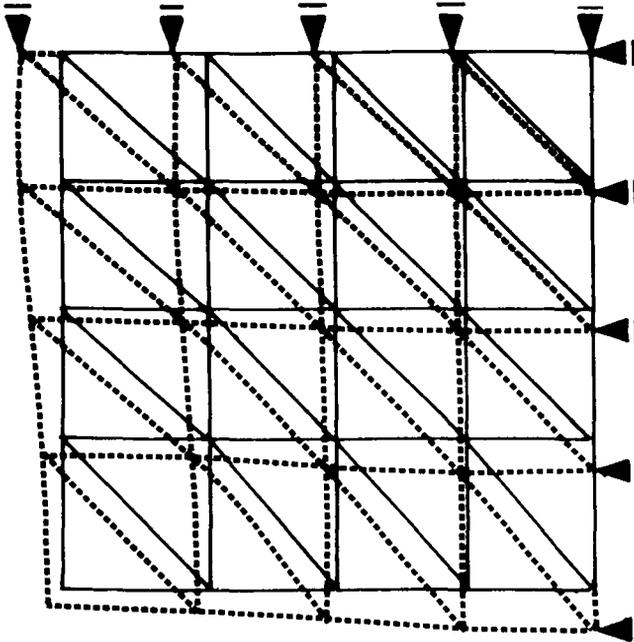


Bild 5.3: berechnetes Verschiebungsfeld

Randverschiebung [mm]

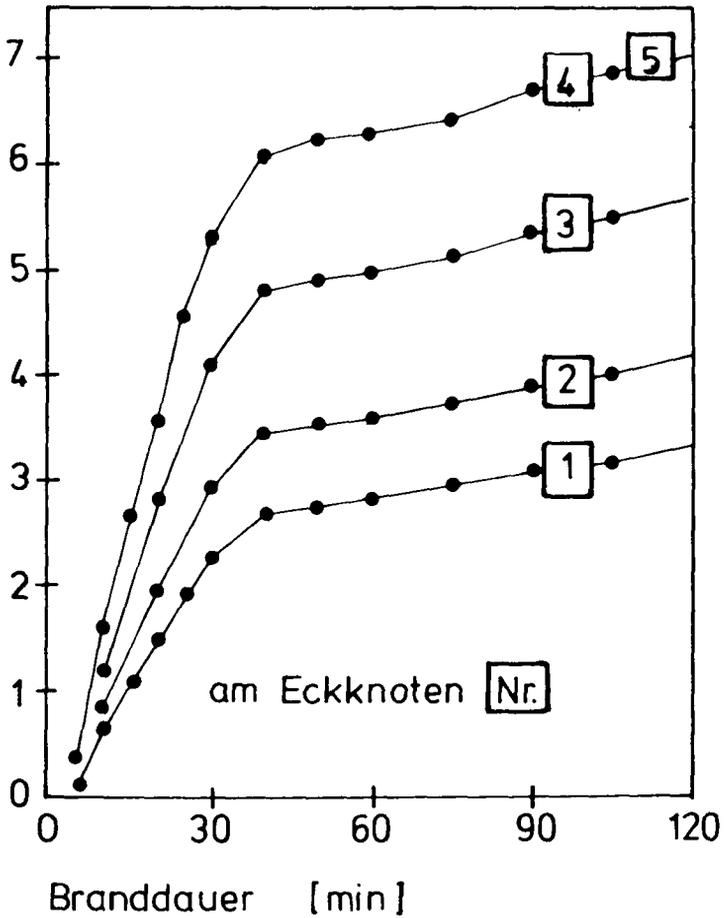


Bild 5.4: berechnete Randverschiebungen

5.2.2.3 Vergleich von Kraftgrößen

Im Versuch wurden die 4 Eckpunkte des direkt beflamten Bereiches gegen Abheben gehalten. Ebenso die in Bild 3.14 eingezeichneten Stellen am kalten Kragen. Im Bild 5.5 werden den gemessenen Kräften die rechnerisch ermittelten Auflagerreaktionen bei starrer Festhaltung gegenübergestellt.

Zunächst ist festzustellen, daß bereits die gemessenen Kräfte Streuungen unterliegen aufgrund des nicht perfekt symmetrischen Versuchsaufbaues und aufgrund der Nachregelung der Pressen erst bei Erreichen bestimmter Grenzwerte für die Vertikalbewegung an den gehaltenen Stellen. Außerdem spielt die Ribbildung im Bauteil eine wesentliche Rolle bei der Entstehung dieser Haltekräfte, und diese Ribbildung tritt im Brandversuch nicht vollkommen gleichzeitig an "geometrisch gleichwertigen" Stellen ein.

Unter diesem Gesichtspunkt gibt die Rechnung das Kräftespiel gut wieder. Sowohl die Größe der Kräfte wird getroffen als auch die zeitliche Entwicklung mit einem steilen Anstieg bis zum Erreichen des Kraftmaximums und einem mehr oder weniger steilen Abfall der Kräfte.

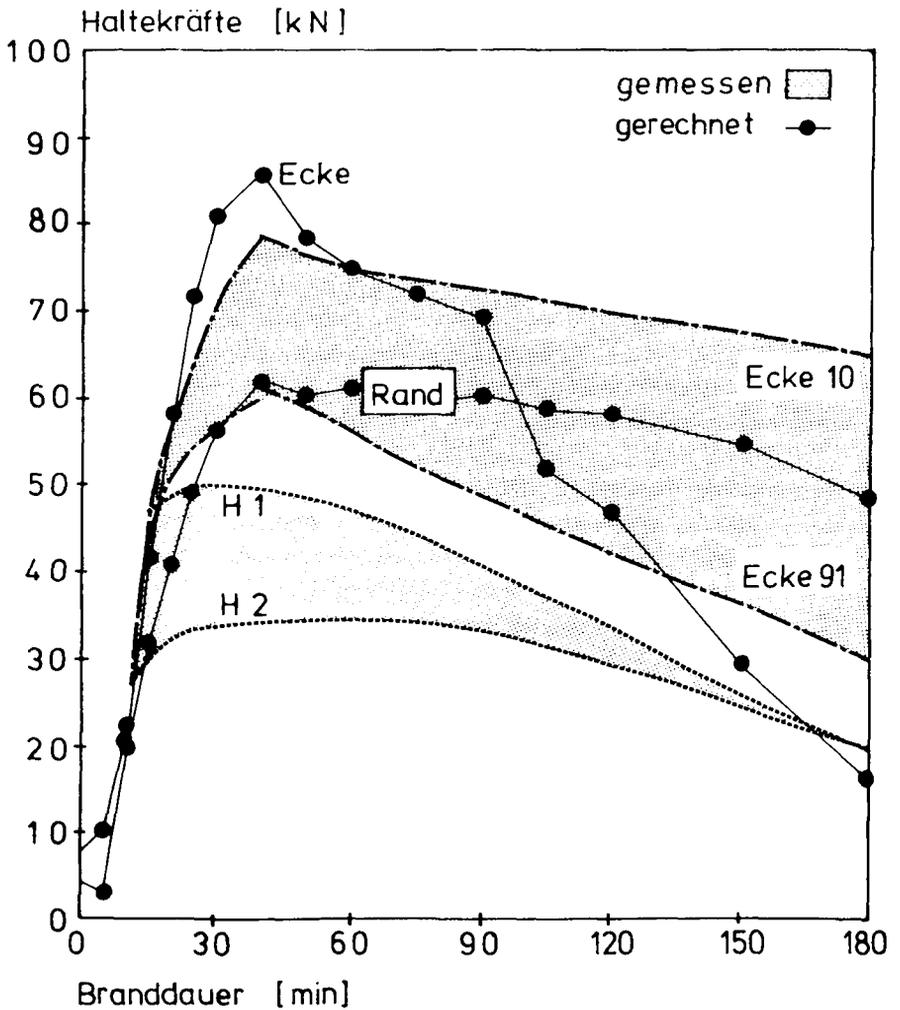


Bild 5.5: Vergleich einzelner Reaktionskräfte

5.2.2.4 Rißbildung

Während des Brandversuchs sind solche Risse aufgezeichnet worden, die mit dem bloßen Auge aus einer Entfernung von mehr als 1,5 m erkannt werden konnten. Insbesondere die Risse im heißen Bereich waren wegen des Austretens von Wasser und Wasserdampf gut zu erkennen. Eine Messung der Rißbreite war unter den gegebenen Umständen selbstredend unmöglich (Bild 3.19).

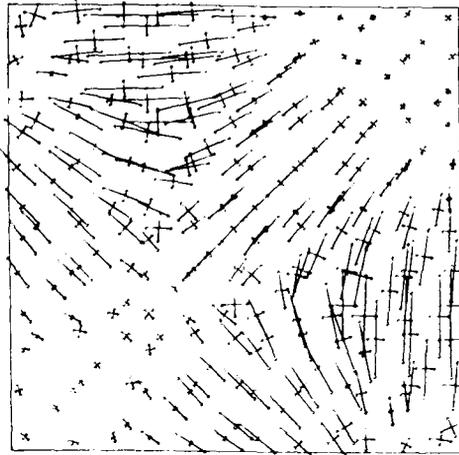
Im Bild 5.6 sind die Hauptdehnungen der am weitesten oben liegenden Betonschicht für alle $32 * 7 = 224$ Integrationspunkte dargestellt. Dieses Bild soll lediglich demonstrieren, daß das Programm den Beton genau so aufreißen läßt, wie es im Brandversuch beobachtet wurde. Zwischen den beiden Zeiten (der 15ten und der 60ten Minute) ändert sich wie bei der Versuchsplatte lediglich der Betrag der Dehnungen, nicht aber deren Richtung.

Es gibt zwei rißfreie Bereiche: das Plattenzentrum (oben rechts) und die kalte Ecke (unten links). Die Diagonale dazwischen ist stark gerissen. Deutlich wird in diesem Bild die "Ausstrahlung" der Randfesthaltung. Im Versuch sind entgegen der Rechnung keine Schrägrisse in der Nähe der äußeren Haltepunkte festgestellt worden. Hier zeigt sich, daß die Rechnung die Haltewirkung überschätzt, was auch schon aus der zu hoch ermittelten Haltekraft hervorging.

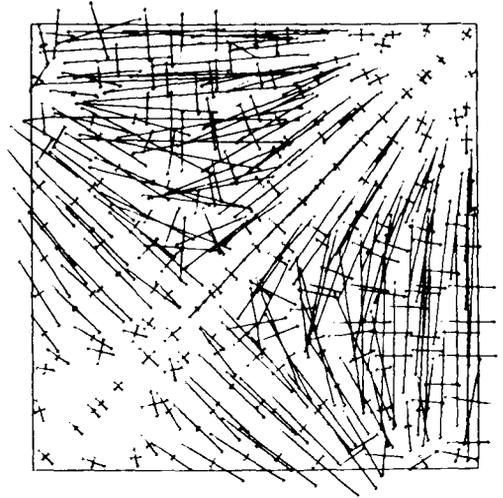
Die Risse über den Lagerlinien und im erwärmten Randbereich sind richtig erkannt. Der kalte Rand ist ebenfalls quer zu seiner Längsrichtung aufgerissen, jedoch gibt es Abweichungen in der Richtung im Bereich der oben erwähnten Schrägrisse.

Den Stützmomenten entsprechend berechnete Risse in Längsrichtung des kalten Kragstreifens sind im Versuch nicht sichtbar geworden. Kurze, rechnerisch nicht berücksichtigte, stark bewehrte Querbalken (Bild 3.12) ermöglichen im Versuch einen rissefreien Momentenfluß zu den Haltepunkten am Bauteilrand hin.

Hauptdehnungen



nach 15 Minuten



nach 60 Minuten

Bild 5.6: Hauptdehnungen in der obersten Betonschicht

5.2.2.5 Dehnungen im kalten Bereich

Das Dehnverhalten der massiven Bewehrung im kalten Kragen wurde im Versuch meßtechnisch verfolgt. Die aufgenommenen Werte (Bild 3.15) werden mit den berechneten (Bild 5.7) verglichen. Dabei ist zu beachten, daß im Schnitt 4 aus Bild 3.15 die Langsdehnung der über Eck verlegten Stäbe aufgetragen ist, während im Bild 5.7 alle Dehnungen parallel zur Kante dargestellt ist.

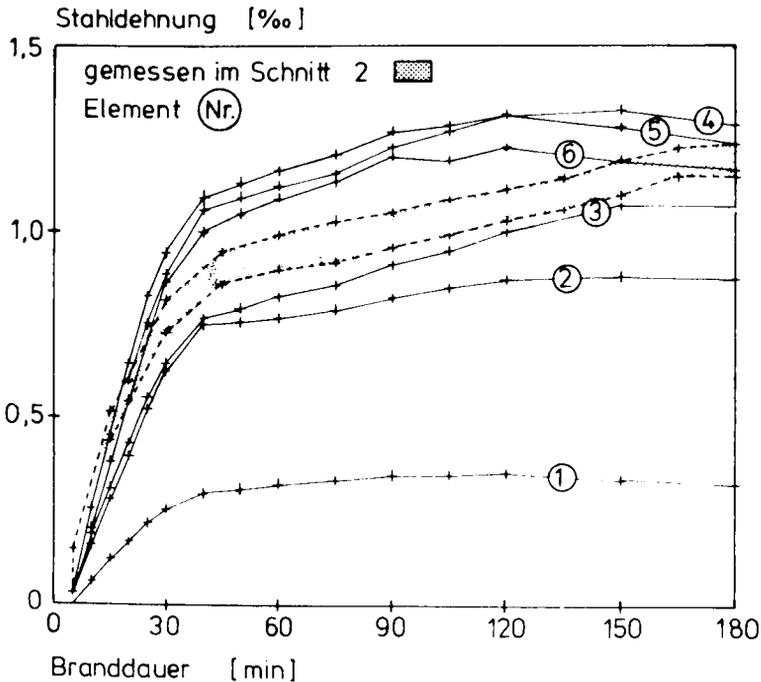


Bild 5.7: Vergleich der Stahldehnungen in kalten Kragen

Die Rechnung gibt die Dehnungsentwicklung überzeugend wieder. Sowohl der zunächst steile Anstieg als auch die Größe im anschließenden flachen Bereich der Kurven wird gut erfaßt. Ebenfalls deutet das Erkennen des "Knickpunktes" in der Dehnungsentwicklung zur 40ten Minute auf eine hohe Leistungsfähigkeit des Programms hin. Zur Veranschaulichung ist das Streuband der Meßkurven vom Schnitt 2 mit in das Bild 5.7 aufgenommen.

Die zu vergleichenden Dehnwerte unterscheiden sich im flachen Bereich der Kurven um ca. $0,20^{\circ}/\text{oo}$. Diese Abweichung entspricht der Abweichung bei den Durchbiegungen. Wie aus dem Bild 3.15 hervorgeht, waren die Dehnmeßstreifen seitlich an den Stäben befestigt und zwar an der Innenseite zum beflamnten Plattenteil hin. Kontrollmessungen an der gegenüberliegenden Stabseite einiger ausgewählter Stäbe haben teilweise höhere Dehnwerte ergeben. Im Falle des Meßpunktes 8 waren diese Unterschiede aufgrund der Stabkrümmung innerhalb der Scheibenebene maximal und betragen ab der 40ten Minute ca. $0,20^{\circ}/\text{oo}$.

5.2.2.6 Beurteilung der Programm-Verifikation

Die rechnerische Begleitung des Brandversuches mit dem partiell beflamnten Plattensystem S 1/86 hat eine überzeugende Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Werten ergeben. Das trifft gleichermaßen für Weggrößen sowohl des Scheiben- als auch des Plattenverhaltens zu. Des weiteren weist auch der Vergleich einzelner Kraftgrößen und der Stahldehnungen auf die Wirklichkeitsnähe der durchgeführten Berechnungen hin. Die Verifizierung ist somit gelungen und wird hier abgeschlossen.

In den folgenden Abschnitten soll nun die weitere Auswertung dieses Rechenergebnisses die grundsätzlichen Abläufe innerhalb partiell brandbeanspruchter Stahlbetonplatten veranschaulichen. Dabei werden aber ebenfalls wichtige Aspekte zur Beurteilung dieses theoretischen Modells besprochen.

Anmerkung

Für diese Berechnung wurde selbstverständlich die gemessene Einbauhöhe der Bewehrung verwendet. Allerdings schwankt diese gerade bei der Verwendung von Mattenbewehrung, was u. a. auch durch die Übergreifungsstöße verursacht wird. Die obenliegende Stützbewehrung ist ein wesentlicher Faktor für die Rotationsbehinderung des beflamten Feldes. Durch die Vorgabe einer etwas geringeren Einbauhöhe hätte die berechnete Plattendurchbiegung den Versuchswerten angepaßt werden können. Dadurch wäre der Druck auf den Kragstreifen abgemindert worden und auch die Stahldehnung hätte sich den Meßwerten weiter angenähert (s. Abschnitt 5.3.1).

5.2.3 Schnittgrößenumlagerungen partiell brandbeanspruchter Platten

5.2.3.1 Gleichgewicht an Elementgrenzen

Momentengleichgewicht

Zunächst wird das Stützmoment auf der Symmetrielinie betrachtet.

Im Bild 5.8 ist dafür zunächst die Entwicklung der spannungserzeugenden Stahldehnungen und der dazu gehörenden Spannungen gezeigt.

An dieser Stelle war die Bewehrung offensichtlich im kalten Gebrauchszustand kaum ausgenutzt. Bereits in den ersten 15 Minuten der Brandbeanspruchung wächst die Stahlspannung der oberen Bewehrung steil an und erreicht fast schon die Fließgrenze. Die Dehnungen wachsen nach dem Erreichen der Fließgrenze weiter, und zwar im heißen Bereich schneller und höher als im kalten. Auf der kalten Seite muß sich aus Gleichgewichtsgründen der Stahl nur bis zur 5 ‰ Grenze dehnen, was die Rechnung auch perfekt wiedergibt.

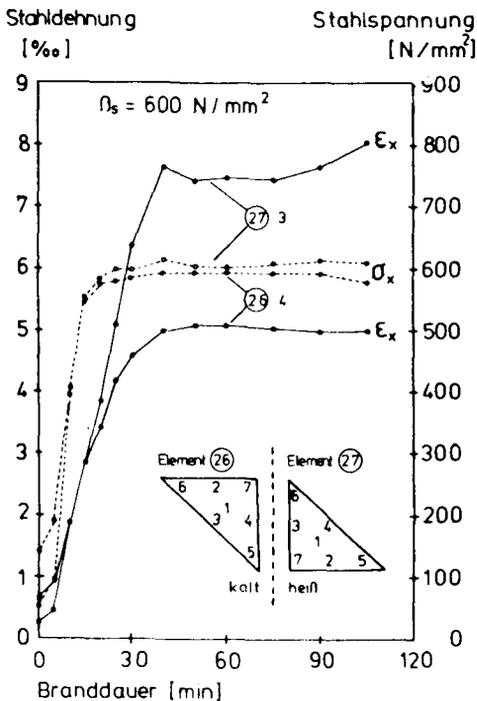


Bild 5.8:
lokale Stahlbeanspruchung

Dieses Bild zeigt sehr schön, daß auch in unmittelbarer Nähe der Elementengrenze bei stark unterschiedlichen Elementsteifigkeiten und -beanspruchungen in der Bewehrung die gleiche Spannung herrscht. Das Spannungsgleichgewicht am Bewehrungsstab wird also auch elementübergreifend von der Rechnung sichergestellt.

Im Bild 5.9 ist nun die Entwicklung des Stützmomentes ebenfalls in den gleichen 2 eng beieinander liegenden Integrationspunkten der Elemente 26 und 27 dargestellt. Auch hier ist der steile Anstieg bis zum Fließmoment nach ca. 30 Minuten zu erkennen, das von da an erhalten bleibt. Wichtig ist das rasche Anwachsen auf den 6fachen Betrag des Momentes im kalten Zustand.

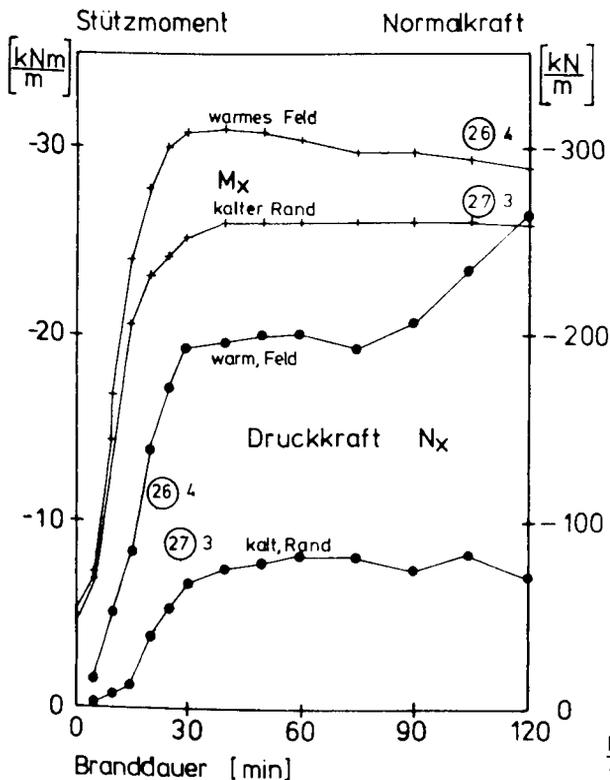


Bild 5.9:
lokale
Schnittgrößen

Mit diesem Bild soll die Genauigkeit der in einem extrem komplizierten Querschnitt rechnerisch bestimmten Schnittgrößen diskutiert werden. Die beiden Punkte, für die das Stützmoment aufgetragen ist, liegen nicht perfekt am gleichen Ort, sondern ca. 11 cm voneinander entfernt im Bereich einer sehr steilen Momentengradienten (hohe Querkraft), was bereits einen Teil des Unterschiedes von ca. 15% zwischen den Beträgen erklärt. Das Gleichgewicht der Momente wird also näherungsweise erfüllt. Damit wird aber auch deutlich, daß auch aufwendige FE-Rechnungen die wirklichen Verhältnisse nur annähern. Die Erwartungen an die Genauigkeit der errechneten Zahlenwerte sollen nicht allzu hoch gesteckt werden. Die maximalen Auswirkungen der von der Formfunktion erzwungenen Gleichheit der Krümmungen jenseits von Elementgrenzen führt also zu Momentensprüngen deutlich unterhalb von 15%. Außerdem reduzieren die folgenden Überlegungen weiterhin diese Zahl:

Bereits bei der Formulierung der Materialgesetze mußten für das Materialverhalten Rechengesetze gefunden werden, die die Wirklichkeit bestenfalls gut annähern. Fügt man nun bei der Schnittkraftermittlung die sehr ungleich in den 2 Querschnitten verteilten Spannungen zusammen, so soll ein Ungleichgewicht in der angegebenen Größenordnung an den Grenzen sehr unterschiedlich steifer und beanspruchter Elemente hingenommen werden können.

Diese Momentendifferenz ließe sich weiter verringern, indem einerseits die Anzahl der Schichten erhöht wird (Verbesserung der Querschnittsdiskretisierung) und andererseits durch eine Verschärfung des Konvergenzkriteriums. Die erste Möglichkeit erfordert einen mit der Schichtzahl linear steigenden Speicherbedarf im Rechner und der zweite Weg führt zu einer unwirtschaftlich langen Rechenzeit. Trotz allem bleibt aber noch die Tatsache, daß mit elementweise konstanten Steifigkeiten gearbeitet wird. Diese Elementsteifigkeit ergibt sich zwar aus einer Mittelbildung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Materialsteifigkeiten an den Stellen der 7 Integrationspunkte, jedoch wird die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Systems unter Verwendung nur dieses gewichteten Mittels bestimmt.

Längskraftgleichgewicht

Wesentlich ungenauer als die Stützmente scheinen die Normalkräfte berechnet zu werden. Das Gleichgewicht der Kräfte ist scheinbar nicht hergestellt. Aus Richtung des heißen Feldes wird die Grenzlinie zwischen den Temperaturbereichen stärker gedrückt als von der kalten Seite! Dieses scheinbare Ungleichgewicht der Kräfte verschwindet aber sofort, wenn man sich an die Verhältnisse beim Rohr mit Innendruck und an die "Faßformel" erinnert (Abschn. 3.7.1). Die Längszugkräfte im schwach gekrümmten Kragen gleichen durch **Umlenkkräfte** die fehlenden Anteile aus!

Die berechneten Stahldehnungen im Zugband (Bild 5.7: Elemente 2; 3 und 4; 5; 6) bestätigen die theoretisch ermittelte Umlenkung des Zugbandes vollständig. Die Werte schaffen also zusammengenommen wieder das Kräftegleichgewicht (Abschn. 5.2.3.3).

Die Größenordnungen werden folgendermaßen abgeschätzt: Der Radius eines Ersatzkreises, der das heiße Gebiet begrenzt, beträgt ca. 240 cm. Aus der Normalkraftdifferenz von etwa 120 kN/m ergibt sich ein "Innendruck" von 1,2 kN/cm. Soll das "ringförmige" Zugband diesen Innendruck aufnehmen, so ist dafür eine Zugkraft von ca. 290 kN erforderlich. Die vorhandene Bewehrung mit einem $E \cdot A = 1470 \text{ kN}$ müßte um ca. $0,20 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ an den Seitenmitten stärker gedehnt werden als in der Nähe der Eckbereiche. Genau das geht auch aus dem Bild 5.7 hervor.

Der Vergleich mit experimentell gewonnenen Daten (Bild 3.15: Schnitte 1/2 und 3) untermauert die Umlenkkraft-Theorie. Im ecknahen Schnitt 3 liegen teilweise geringere Stahldehnungen vor als in der Mitte des Kragens. Die höheren Umlenkkräfte in der Rechnung erklären sich mit der unberücksichtigten Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen. Die Scheibensteifigkeit wird also unterschätzt, was zu höheren Längs-Dehnungen aber auch zu einer verstärkten Verkrümmung / "Aufblaseffekt" mit der dazugehörenden höheren Umlenkkraft führt.

Wichtiger als die perfekte Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen ist zunächst für die Verifikation des Programms die Feststellung, daß das Gleichgewicht der Kräfte korrekt vom Programm auch bei komplizierten Verhältnissen gefunden wird. Nebenbei wird der Aufwand deutlich, den die logische Kontrolle der Rechenergebnisse erfordert.

Zusammenfassung

Das Ziel, nämlich das Verhalten der Platte unter Brandbeanspruchung zu studieren, wird aber auch mit der dargestellten Genauigkeit gut erreicht. Solche Berechnungen ergänzen die experimentellen Untersuchungen und dienen der Vertiefung und Erweiterung eines bestehenden Kenntnisstandes. Die Bewertung der Ergebnisse muß auch unter Berücksichtigung der Genauigkeit von im Versuch meßbaren Größen vorgenommen werden. Die Streubreite bei den tatsächlichen Kraftgrößen beträgt, wie aus dem Bild 5.5 hervorgeht, bis zu 100%.

5.2.3.2 Momentenumlagerungen

Nachdem nun die Veränderung der Schnittgrößen an einem Punkt verfolgt wurde, wird nun die gesamte Platte betrachtet. Im Bild 5.10 sind die Hauptmomente für die Branddauern von 0; 15; 30; 60; 120 und 180 Minuten dargestellt. In der Bildecke unten links befindet sich jeweils die kalte Ecke und oben rechts das beflamte Plattenzentrum.

Im Plattenzentrum liegen positive Momente in beiden Richtungen vor, die an der Plattenunterseite Zugspannungen erzeugen. Um das Zentrum herum besteht ein ringförmiger Bereich mit positiven Momenten in Ringrichtung und negativen senkrecht auf den Rand hin gerichteten Momenten. Letztere nehmen als Stützmomente ihre maximalen Werte an in der Mitte der Auflagerlinien und im Eckbereich auf der Diagonalen vor dem gehaltenen Eckpunkt. Der außenliegende Kragstreifen ist kenntlich durch eine sehr niedrige Momentenbeanspruchung. Lediglich im Bereich der gehaltenen Punkte an der Bauteilkante ist die Stützwirkung an den negativen Hauptmomenten zu erkennen (0te Minute).

15 Minuten später hat sich das Bild vollkommen geändert. Sofort fallen die sehr hohen negativen Stützmomente im heißen randnahen Bereich auf. Über der Auflagerlinie wird das Maximalmoment erreicht. In der Nähe der Seitenmitte entsteht eine Durchlaufwirkung infolge der Festhaltung am Bauteilrand.

Auch auf der Diagonalen sind die negativen Momente stark gewachsen, jedoch ist im gehaltenen Eckpunkt selbst die Momentenbeanspruchung

sehr gering. Im nicht gestützten Teil des freien Randes im Eckbereich entstehen negative Momente, die von dem Flächentragwerk infolge des Querabtrags auch ohne die entsprechenden Auflager aufgenommen werden können.

Von besonderem Interesse ist das Plattenzentrum. Hier hat inzwischen eine Momentenumkehr stattgefunden. Die Beanspruchung der Momente erzeugt nun nach 15 Minuten auf der beflamten Unterseite Druckspannungen. Daraus wird deutlich, daß die thermische Dehnung als "treibende Kraft" des Verformungsgeschehens nicht in der Lage war, das Bauteil ungehindert zu verformen. Die entstandenen Verformungen bleiben zu gering, um die thermische Dehnung spannungslos aufzunehmen. Die aus der behinderten thermischen Dehnung entstandenen Druckspannungen an den Plattenunterseiten schaffen im Zentrum negative Momente. Nach 15 Minuten Branddauer gibt es im beflamten Bereich keinen Punkt mehr mit einer Beanspruchung durch positive Biegemomente.

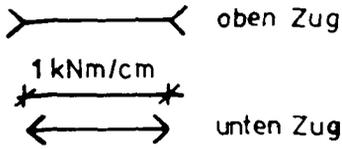
Nach 30 Minuten hat sich das Bild stabilisiert. An den Auflagern ist gerade das Fließmoment erreicht. Die Plattenecke hebt sich etwas stärker und dem entsprechend entstehen an der Kante positive Momente in der Nähe des äußeren Haltepunktes. Deutlich ist der Momentenfluß zu den äußeren Haltepunkten zu erkennen. Auch jetzt herrschen überall negative Momente im beflamten Teil. Dieser Zustand bleibt rechnerisch während der ersten 2 Stunden des Brandes erhalten.

Rechnerisch entstehen in Feldmitte nach 2 Stunden erste minimale positive Momente in Ringrichtung, während quer dazu radial noch negative Momente existieren. Die Durchbiegung hat jetzt den Betrag der Plattendicke erreicht.

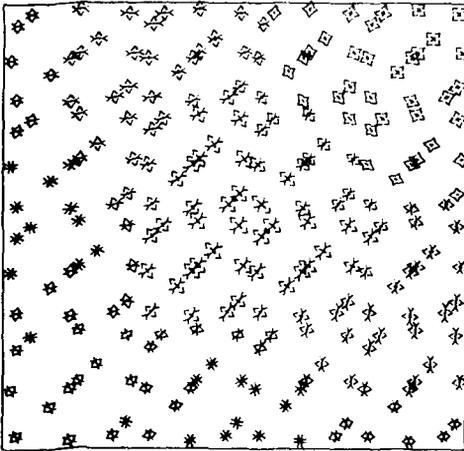
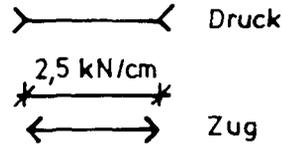
Nach 180 Minuten wird im Plattenzentrum bereits ein kleiner Bereich vollständig von positiven Momenten beansprucht. Um das Zentrum herum verlaufen ringförmig positive Momente bereits bis in die Nähe der Auflagerlinien heran. Auf der Diagonalen haben die Momente sehr stark abgenommen.

Auf positive Feldmomente wird im Abschnitt 5.3.2.3 näher eingegangen.

Hauptmomente

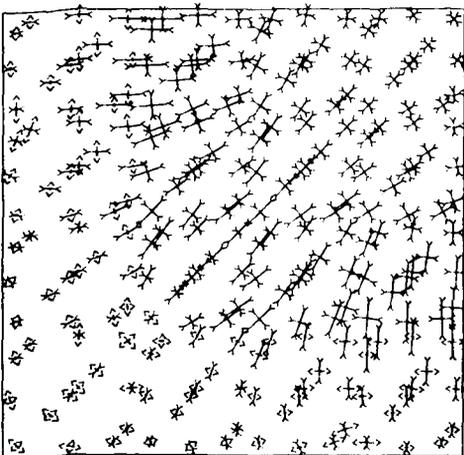
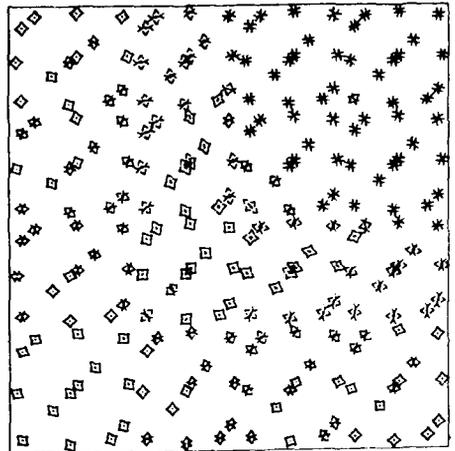


Hauptnormalkräfte



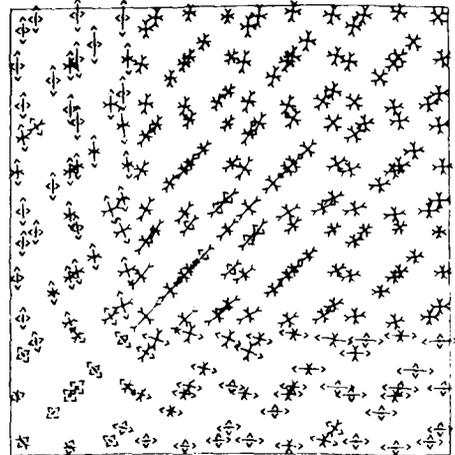
nach

0 Minuten

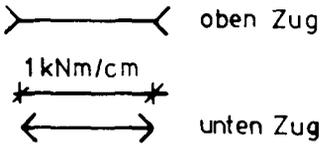


nach

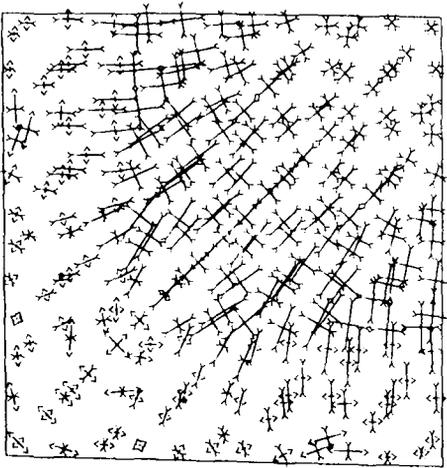
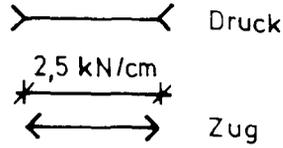
15 Minuten



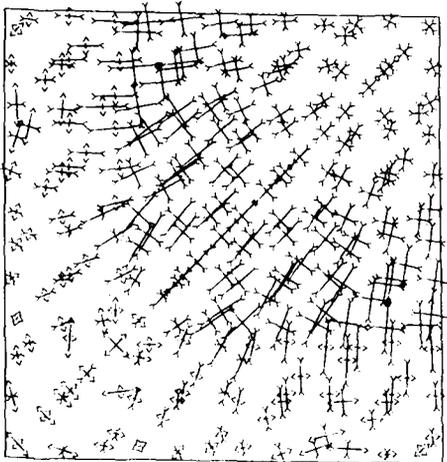
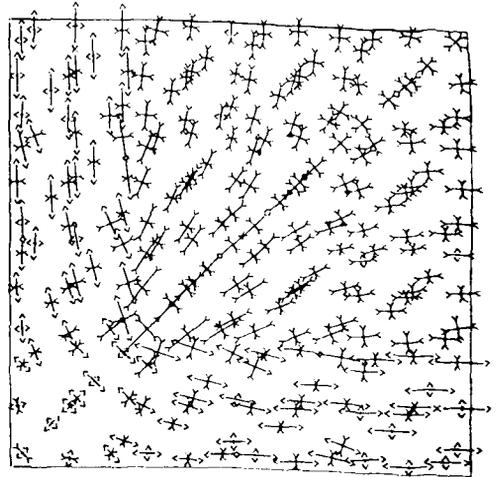
Hauptmomente



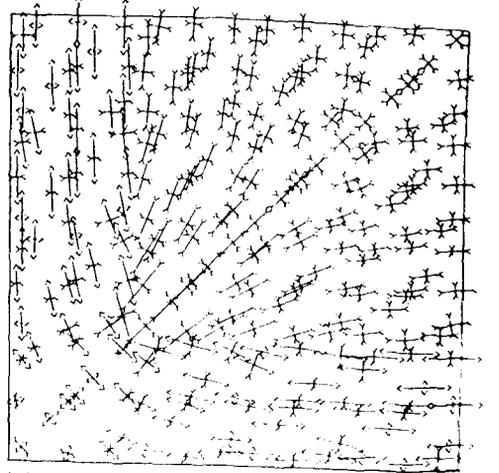
Hauptnormalkräfte



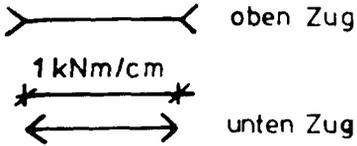
nach 30 Minuten



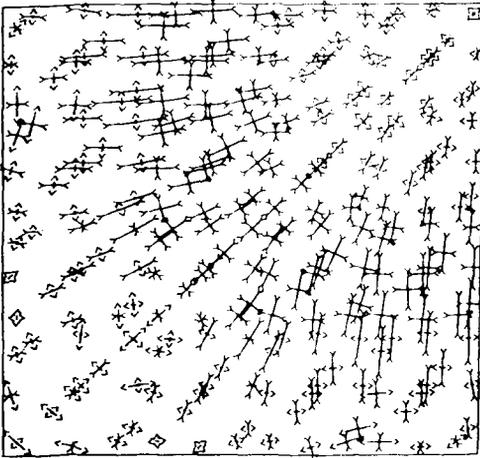
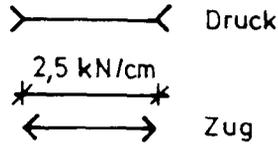
nach 60 Minuten



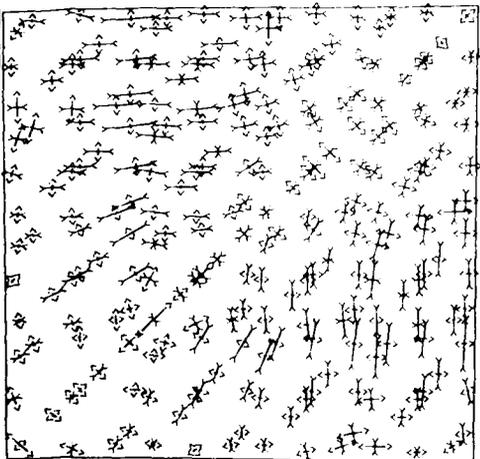
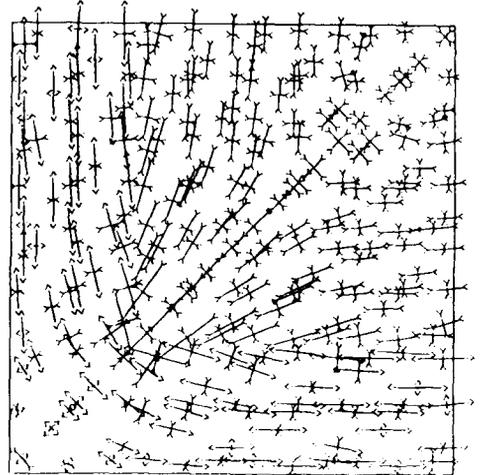
Hauptmomente



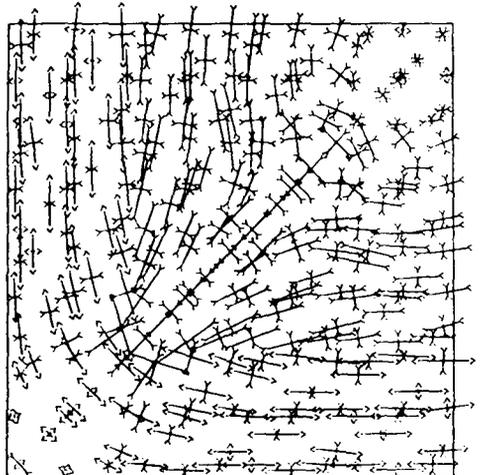
Hauptnormalkräfte



nach 120 Minuten



nach 180 Minuten



5.2.3.3 Normalkraftumlagerungen

Die Hauptnormalkräfte im Bild 5.10 zeigen bereits in der 15ten Minute das zu erwartende Bild: der kalte Kragstreifen wird von dem beheizten Feld gedehnt und dem zu Folge bilden sich wegen der massiven Längsbewehrung parallel zu den Bauteilrändern Zugkräfte aus. Diese umfließen den gehaltenen Eckpunkt auf einer gekrümmten Bahn.

An der Grenzlinie zwischen dem kalten und dem heißen Teil ist die Zugkraft am größten und baut sich zum freien Rand hin trotz der geringen Breite des Streifens etwas ab (Umlenkkräfte: Pkt. 5.2.3.1).

Im beflamten Bereich herrschen an jedem Ort Druckkräfte, welche vorwiegend auf die Ecken zustreben. Während der kalte Kragstreifen dem Quer-Druck aus dem Feld an den Seitenmitten nach außen hin unter Bildung von Umlenkkräften ausweicht (s. Bild 5.3), wird die Ecke von der Längsdehnsteifigkeit der Zugbänder an großen Verschiebungen gehindert. Auf diese Ecke zu müssen also auch die Hauptdruckkräfte aus dem Feld gerichtet sein.

Dieses Ergebnis steht weitgehend im Einklang mit den logischen Überlegungen zum Kraftfluß im Kapitel 3. Jedoch führt die Interpretation der Biegerisse als Richtungsanzeiger für Längskraftverläufe in den Eckbereichen zu einer falschen Vorstellung im Detail über die Normalkraftbeanspruchung (vergl. Bilder 3.20 und 3.21). Allein aufgrund des Ribbildes lassen sich Aussagen zum Kraftfluß nur schwer machen. Risse sind vornehmlich an der kalten Oberfläche der Struktur zu erkennen und sagen allein noch wenig aus über den Verlauf von Schnittgrößen, besonders dann nicht, wenn wie im Brandfall Momente und Normalkraftwirkung gleichzeitig mit Temperaturbeanspruchungen auftreten. Wie im Kapitel 3 vermutet, treten tatsächlich auch Normalkräfte quer zur Diagonalen auf; aber sie sind in diesem Fall von untergeordneter Bedeutung. Wie ein Keil drückt dagegen das Plattenfeld in die Ecke und erzeugt entsprechende Kräfte.

Im weiteren Verlauf des Brandes wachsen die Normalkräfte zunächst gleichförmig an.

Zur 120ten Brandminute zeichnet sich bereits eine Entspannung des

Plattencentrums ab, die nach 3 Stunden das Bild prägt. Während im Plattencentrum die Normalkraft abnimmt, ist dies im randnahen beflamnten Teil nicht der Fall und im kalten Zugring bleibt die Kraft konstant.

Der Brandversuch hat aber gezeigt, daß die Zugkräfte sogar während der gesamten 5 Stunden noch anwachsen. Im randnahen Bereich muß also die Druckkraft ebenfalls angestiegen sein. Das Nichterkennen dieser Tendenz mag mit der Formulierung der Temperaturbeanspruchung für den randnahen Bereich erklärt werden. Rand- und Eckbereich werden rechnerisch gleich erwärmt gemäß der Temperaturentwicklung am etwas wärmeren Rand. Im Eckbereich tritt die Durchwärmung des Querschnittes verzögert ein.

5.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Das komplizierte Verhalten des im Brandversuch geprüften partiell beflamnten Plattensystems S 1/86 wurde überzeugend nachgerechnet.

Rasch entwickeln sich Zwangmomente und Zwanglängskräfte, die das Verformungsverhalten der Platten bestimmen. Die Zwangmomente führen in der Rechnung nach 30 Minuten zum Stahlfließen der oberliegenden Stützbewehrung genau dort, wo im Brandversuch nach 40 Minuten der Stahl sogar gerissen ist. Diese hohen Stützmomente führen zur vollständigen Entlastung der Feldbewehrung, da im gesamten beflamnten Bereich negative Momente vorliegen.

Bewertung der Dehnbehinderung:

Der kalte Randstreifen von knapp einem Meter Breite läßt Verschiebungen bis zu ca. 7 mm zu; dabei sind die Verdrehungen am freien Rand vernachlässigbar klein. Der Vergleich dieser Werte mit den Sollkurven für die horizontalen Zwangpressen der Brandversuche (s. Bild 2.5) zeigt, daß hier annähernd bereits die Verhältnisse des Dehnbehinderungsgrades "stärker" vorliegen. Auf der Pressenseite ist stets der Verschiebungsweg für die gesamte Platte freizugeben, weil die gegenüberliegenden starren Widerlager keine Verschiebung zulassen. Der o. a. Vergleich muß also mit den 0,5fachen Sollwerten aufgestellt werden.

Die Sollkurven steuern die zeitliche Verschiebungsentwicklung in der Tendenz tatsächlich so, wie Versuch und Rechnung mit dem System S 1/86 dies für partiell beflamnte Deckenplatten ergeben haben. Damit belegt die Untersuchung des Systems S 1/86 nachträglich die Wirklichkeitsnähe der Plattenversuche mit durch Pressen behinderten Längsverformungen.

Der Verlauf der Druckkräfte im beflamnten Plattenteil des Systems S 1/86 weist relativ geringe Druckkräfte aus, die auf die Mitte des Randes zustreben. Demgegenüber entsteht eine Kraftkonzentration im Eckbereich. Diese Entwicklung der Zwangkräfte wird ähnlich auch durch die Zwangpressen erzeugt, wo sich in der Randmitte auch aufgrund des Ausweichens der Pressen die Zwangkräfte abbauen. Mit dem Plattensystem ist eindeutig belegt, daß bei den gegebenen Steifigkeitsverhältnissen im beflamnten Bereich Druckkräfte vorwiegend parallel zu den Grenzlinien zwischen heißen und kalten Bereichen auftreten und nicht etwa senkrecht direkt auf diese Linien zu. Erst im Eckbereich münden die Kraftflußlinien verstärkt in das kalte Gebiet ein.

Um diese Normalkraft-Verhältnisse mit Pressen nachzubilden, sind die Mittenpressen der Versuchsanlage von untergeordneter Bedeutung. Sie erzeugen vielmehr ein Zwangmoment zur direkten Rotationsbehinderung, das aber mit den oben besprochenen Abweichungen vom jetzt bekannten Geschehen.

Aus den Dehnungen der Bewehrung im kalten Kragen des Systems S 1/86 läßt sich die Zwangkraftentwicklung abschätzen. Es ergibt sich ein maximaler Wert nach 5 Stunden Branddauer von ca. 1800 kN (s. Kap. 3) je Kragstreifen. Aus Gleichgewichtsgründen muß also die Zwangkraft auf der halben Breite des beflamnten Bereiches ebenfalls in der Größenordnung von 1800 kN liegen. Die in den Standardversuchen gemessenen Pressenkräfte bei Verwendung der Sollkurve für "stärker" gezwängte Platten bleiben noch unter diesem Betrag. Außerdem wachsen die Pressenkräfte nicht stetig an, sondern sie fallen nach dem Erreichen einer maximalen Zwangkraft wieder ab.

Die Ursachen für diese Diskrepanz zwischen den beiden Versuchstypen ist darin zu sehen, daß sich die durch Zwangpressen gehaltenen Platten stärker verbiegen können als das Plattensystem mit einer kontinuierli-

chen Fortsetzung des Bauteils über die Brandraumgrenzen hinaus. Die bei den Standardversuchen verstärkte Normalkraftentspannung und die reduzierte Rotationsbehinderung an den Seitenmitten ergeben höhere Plattenverformungen als bei tatsächlichen Verhältnissen unter Wahrung der Kontinuität des Bauteils.

Weitere rechnerische Untersuchungen:

Dieses System konnte der Normbrandbeanspruchung im Versuch über 5 Stunden standhalten, ohne daß sich ein Bauteilversagen angekündigt hat. Aufgrund des Achsabstandes der untenliegenden Feldbewehrung muß diese Platte jedoch nach der Brandschutznorm DIN 4102 in die Feuerwiderstandsklasse F 60 eingeordnet werden. Bei der hier durchgeführten Beurteilung der Tragfähigkeit wird das Temperaturkriterium bewußt nicht beachtet.

Das Bild 5.9 hat anschaulich gemacht, in welchem Maße die Stützmomente dieser Konstruktion anwachsen konnten. Nun erhebt sich die Frage, wie sich das Verhalten des Systems ändert, wenn die Stützbewehrung vermindert wird.

Ausdrücklich wird in der DIN 1045 sogar der vollständige Fortfall einer obenliegenden Bewehrung zugelassen. Diese Möglichkeit wurde dann auch bei der Festlegung der Mindestachsabstände in DIN 4102 berücksichtigt.

Danach wird untersucht, wie sich die Verhältnisse ändern, wenn das gesamte System in eine dehnsteife Umgebung integriert ist. Denkbar ist eine Fortsetzung der Deckenscheibe bis zu einem starren Widerlager. Aus den bislang gewonnenen Erkenntnissen ist bekannt, daß die kalte Umgebung vorwiegend durch Zugkräfte parallel zur Grenzlinie zwischen kaltem und heißem Bereich am Tragverhalten beteiligt ist. Dennoch soll untersucht werden, wie sich eine Konstruktion auswirkt, die senkrecht zu dieser Grenzlinie Druckkräfte entstehen läßt, weil sie die Ausdehnung der beflamten Platten direkt behindert.

5.3 Parameterstudie am System S 1/86

5.3.1 Verminderte Stützbewehrung

Die Stützbewehrung ist im kalten Gebrauchszustand nur zu einem Sechstel ausgenutzt. Im folgenden wird die Frage untersucht, wie sich das Verhalten des Plattensystems ändert, wenn das Ausmaß der möglichen Momentenumlagerungen reduziert wird. Hierfür wird der Bewehrungsgehalt von $3,77 \text{ cm}^2/\text{m}$ auf $2,21 \text{ cm}^2/\text{m}$ - also auf 56% des Ausgangswertes - reduziert.

Im Bild 5.11 sind die Durchbiegung in Feldmitte und die Verschiebungen in der Mitte des Randes und an den Ecken des Systems für die beiden untersuchten Stützbewehrungen eingetragen. Wie erwartet, führt eine geschwächte Rotationsbehinderung zu erhöhten Biegeverformungen. Allerdings entstehen die zusätzlichen Durchbiegungen innerhalb der ersten 40 Minuten des Brandes. Danach entwickeln sich die Plattendurchbiegungen unabhängig von der Menge der Stützbewehrung mit der gleichen Geschwindigkeit im dargestellten Zeitraum weiter.

Ebenso wie die Durchbiegungen wachsen die Randverschiebungen bei verminderter Stützbewehrung während der ersten 40 Brandminuten schneller und bis auf einen höheren Betrag. Im weiteren Verlauf des Brandes ist die Verschiebungsgeschwindigkeit unabhängig von der Stützbewehrung. Dies trifft jedoch nicht auf die kalten Eckbereiche zu; dort ist keine Änderung aufgetreten, weil die starke Längsbewehrung der Randstreifen nicht verändert worden ist (Bild 5.11).

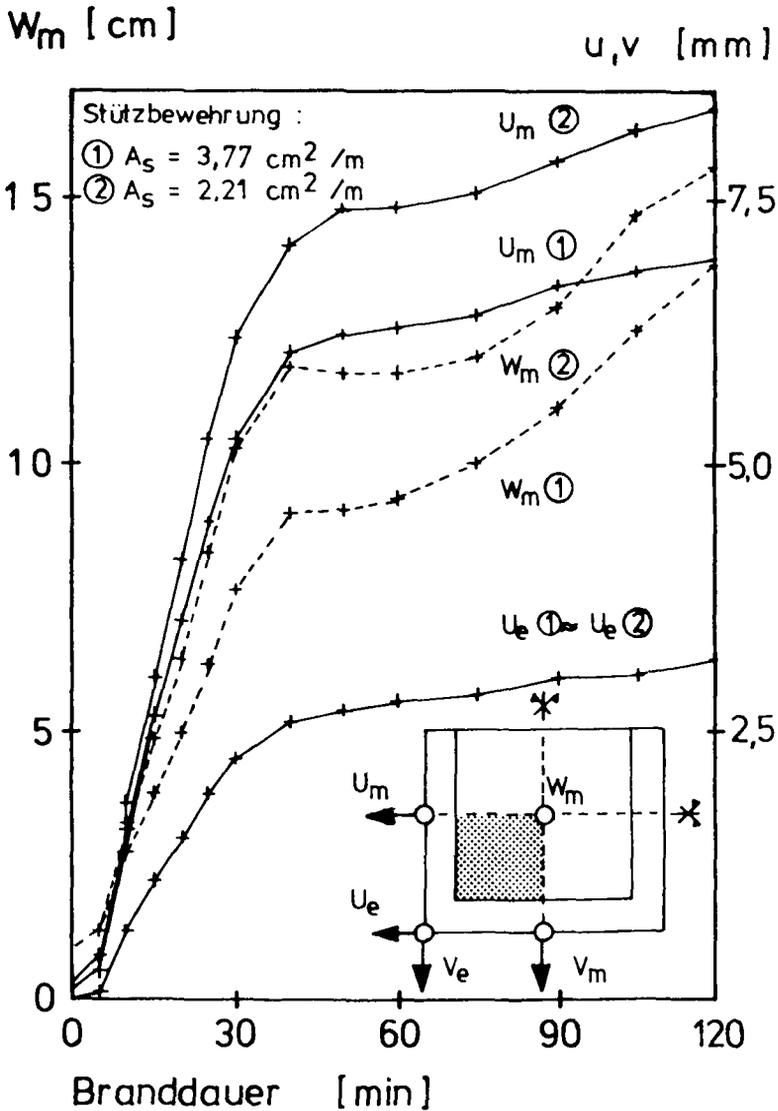


Bild 5.11: Verformungen bei unterschiedlicher Stützbewehrung

Über den beflamten Bereich der Platte hinweg verbindet im randnahen Bereich die kalte obere Bewehrung die sich gegenüberliegenden kalten Randstreifen miteinander. Wie in einem vorgespannten Balken erzeugt hier die Relativverschiebung der "Balkenenden" eine Zugbeanspruchung, wobei die Bewehrung durchaus in einer Beton-Druckzone liegen kann. Bei praktisch gleich großem Ausdehnungsbestreben der Platte ist mit der Reduktion der Stützbewehrung diese innere Dehnbehinderung ebenfalls geschwächt worden. Darauf reagiert die Platte mit größeren Ausdehnungen bei gleichbleibenden Eckverschiebungen (Bild 5.12).

Der Einfluß der Stützbewehrung auf die Verformungen ist erkennbar, aber an dem schon bekannten charakteristischen Verhalten hat sich nichts wesentlich verändert. Das gilt wie für die Verformungen auch für die Schnittkraftumlagerungen.

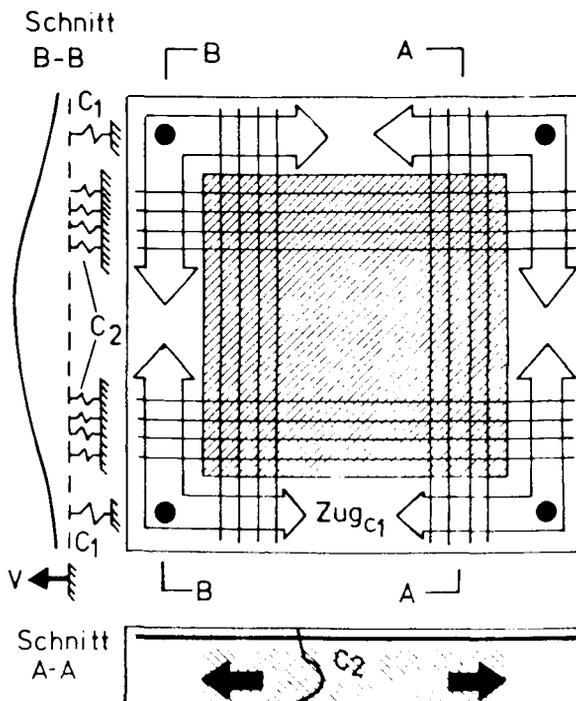
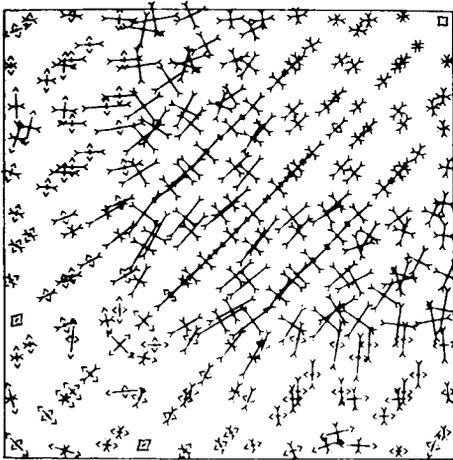
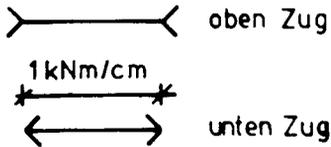


Bild 5.12: innere Dehnbehinderung bei durchlaufender Stützbewehrung

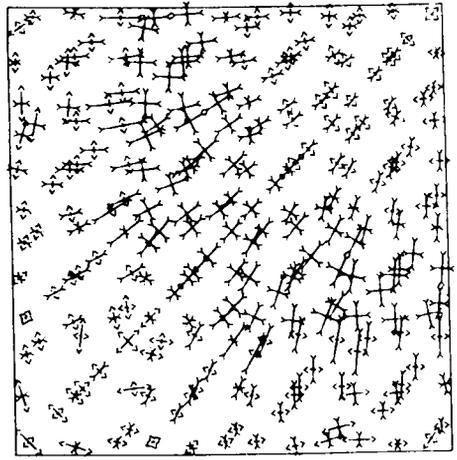
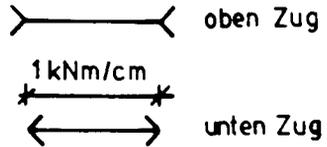
Die Hauptschnittkräfte werden daher für diesen Fall nicht ausführlich dargestellt, jedoch sollen für die 30te und die 120te Brandminute die Hauptschnittgrößen besprochen werden (Bild 5.13):

Hauptmomente



nach 30 Minuten

Hauptmomente



nach 120 Minuten

Bild 5.13: Hauptmomente bei verminderter Stützbewehrung

Hauptmomente nach 30 Minuten:

Über der Auflagerlinie ist das Stützmoment tatsächlich weniger stark angestiegen. Aufgrund unterhalb der Bezugsebene angreifender Druckkräfte kann jedoch auch bei verminderter Stützbewehrung ein erhebliches negatives Stützmoment entstehen, so daß der Bewehrungseinfluß an der Mitte der Ränder auf die Momentenumlagerungen von relativ geringer Bedeutung ist. Auf den gestiegenen relativen Anteil dieser Druckkräfte an den Stützmomenten ist auch der etwas uneinheitlichere Verlauf der Wirkungsrichtungen zurückzuführen. In der Nähe der gehaltenen Ecken können sich die negativen Hauptmomente unverändert bilden, da an dieser Stelle auch bei der stärkeren oberen Bewehrung die Beträge der Stützmomente über den Auflagerlinien nicht erreicht worden sind.

Das gesamte beflamnte Gebiet ist auch jetzt im Bereich ausschließlich negativer Momentenbeanspruchung, welche allerdings zum Zentrum hin stärker abnimmt. Größere Durchbiegungen führen schneller zu einer *Entspannung in Feldbereich*.

Hauptmomente nach 120 Minuten:

Sowohl bei der stärkeren als auch bei der reduzierten Stützbewehrung haben sich im Verlauf des Brandes die positiven Momente im beflamnten Plattenteil gleichartig entwickelt, so daß jetzt kein wesentlicher Unterschied mehr zu erkennen ist.

Dagegen können sich die Stützmomente in der Nähe der Auflagerlinien bei der stärkeren Stützbewehrung länger und auf hohem Niveau halten; der Normalkraftanteil geht in diesem Falle bereits erheblich zurück. Auf der Diagonalen haben sich auch im weiteren Verlauf des Brandes keine bewehrungsabhängigen Veränderungen bei den Momentenumlagerungen ergeben.

Normalkräfte:

Die Normalkräfte im Kragen haben sich trotz größerer Plattenausdehnung nicht verändert. Entscheidend für die Zugkräfte im Randstreifen ist die Relativ-Verschiebung der Ecken. Diese ist aber trotz einer veränderten Stützbewehrung gleich geblieben. Der Querdruck auf diese Randstreifen ist allerdings etwas abgefallen (s. o.).

Zusammenfassung

Diese Rechnung hat ergeben, daß die Stützbewehrung zwar die Steifigkeit und damit das Trag- und Verformungsverhalten des Bauteils beeinflußt, daß aber andererseits die Dehnbehinderung aus dem Zusammenwirken heißer und kalter Teile den Einfluß der Stützbewehrung zu einem Sekundäreffekt degradiert.

Der Grad der Dehnbehinderung und damit die Normalkraftentwicklung hängt ab von der Dehnsteifigkeit des kalten Randstreifens. Dieses Rechenergebnis zeigt, wie wenig die eigentlichen Ausdehnungen der Platte - gemessen an den Mitten der Ränder - über die Wirkung einer Dehnbehinderung aussagt. Die stützende Wirkung der Normalkräfte geht vorwiegend von den Ecken aus und nicht von den Seitenmitten. Trotz größerer Plattenausdehnung sind die Normalkraftumlagerungen gleich geblieben!

Dieses Rechenergebnis ist auch für eine korrekte Bewertung einer genauen Verschiebungsbehinderung an den Seitenmitten bei den Standardversuchen wichtig. Es untermauert die Auffassung, daß eine vergrößerte Verschiebungsmöglichkeit an den Seitenmitten die Dehnbehinderung den wirklichen Verhältnissen bei solchen partiell beflamten Rechteckplatten näherbringt, an die relativ schmale, kalte Scheiben angrenzen.

5.3.2 Erhöhte Dehnbehinderung bei geringerer Stützbewehrung

5.3.2.1 Allgemeines

Der beflamte Bereich eines partiell beflamten Deckenfeldes wird von Zwangdruckkräften beansprucht, weil im kalten Bereich um den beflamten Teil herum Ringzugkräfte entstehen. Das Kräftespiel ähnelt dem bei einem Ring unter Innendruck. Dabei entstehen durchaus nennenswerte Randverschiebungen - vornehmlich an den Mitten der Seiten. Eine Erhöhung der Dehnsteifigkeit des Zugringes führt zur Verstärkung der Dehnbehinderung. Bei Stahlbetondecken ist dies möglich durch

- * Erhöhung der Bewehrung
- * Vergrößerung des umgebenden kalten Feldes
- * Erhöhung der Zugfestigkeit des Betons bzw. der Bauteilabmessungen.

Grundsätzlich nimmt die Deckenscheibe die Zwangsschnittgrößen als Eigenspannungszustand auf, ohne Reaktionskräfte an angrenzenden Widerlagern hervorzurufen (Dehnfugen). Dabei entsteht unabhängig von dem Verhältnis zwischen dem kalten und dem heißen Bereich der bereits beschriebene Kraftverlauf des Systems S 1/86.

Nun soll entgegen dem natürlichen Verhalten eines Plattenfeldes angenommen werden, die Ausdehnung des beflamten Bereiches wird direkt behindert; d. h.: es entstehen nicht vornehmlich Ringzugkräfte in der kalten Umgebung sondern Druckkräfte, die vom beflamten Teil direkt geradlinig auf Widerlagerkonstruktionen zustreben. Diese Widerlager verhindern die Verschiebung des Deckenfeldes. In diesem Falle ist die Dehnsteifigkeit der Scheibe in bezug auf Druckkräfte von Bedeutung.

Für die folgenden Berechnungen wird angenommen, rings um das bereits bekannte System S 1/86 existiere ein solches starres Widerlager. Die gesamte Teilfläche zwischen dem System und der Widerlagerkonstruktion wird durch Dehnfedern simuliert. Die Steifigkeit dieser Federn (auf die Einheitsbreite bezogen) ergibt sich zu

$$c = E \cdot D / L; \quad D = \text{Dicke} \quad \text{und} \quad L = \text{Länge.}$$

Es ist sofort ersichtlich, daß die Dehnsteifigkeit kleiner wird, je weiter das Widerlager vom beflamten Bereich entfernt ist; je größer also die kalte Umgebung ist.

Es werden für den Fall der direkten Dehnbehinderung 2 Situationen untersucht (Bild 5.14).

1. die Widerlager befinden sich direkt am freien Rand des Systems. Damit wird der Grenzfall der starren Verschiebungsbehinderung jenseits des schmalen Betonrandstreifens simuliert ($c = 170000 \cdot 12 / 1 = 2\,000\,000 \text{ kp/cm}$ pro lfd. cm $\approx 2\,000\,000 \text{ kN/m}$ pro lfd. cm).
2. die Widerlager haben einen Abstand von 10 m vom freien Rand des Kragstreifens ($c = 2\,000 \text{ kN/m}$ pro lfd. cm).

Die Federn befinden sich ohne Exzentrizität auf der Höhe der Mittelebene am Rand. Es werden keine weiteren Veränderungen bei den Randbedingungen und bei der Belastung gemacht.

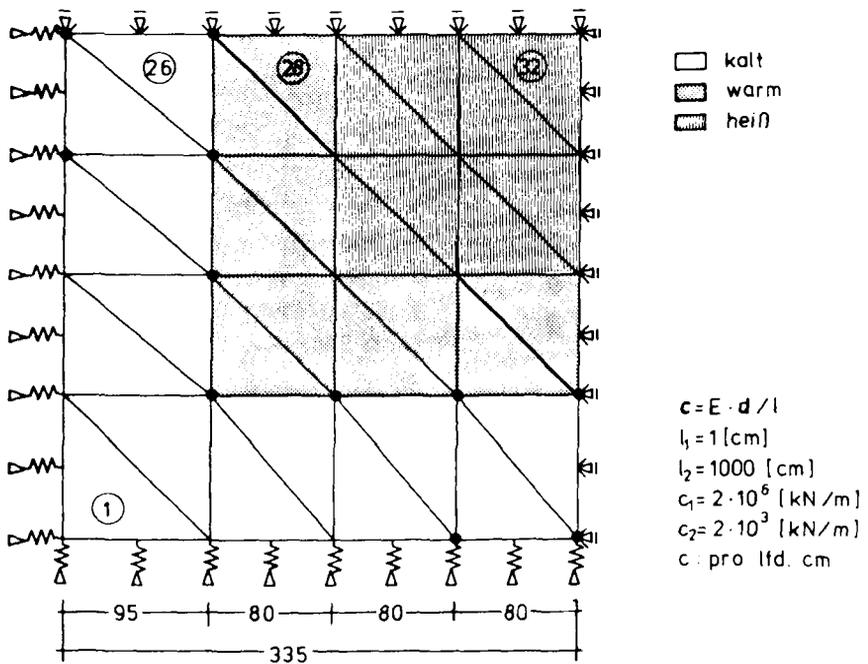


Bild 5.14: System und Randbedingungen bei erhöhter Dehnbehinderung

5.3.2.2 Starre Widerlager unmittelbar am freien Rand

Weggrößen

Die direkte Wirkung der sehr steifen Federn auf die Ausdehnungen geht aus dem Bild 5.15 hervor: Der ehemals freie Rand kann sich praktisch nicht mehr verschieben. Jedoch treten an der Grenzlinie zwischen dem heißen und dem kalten Bereich Verschiebungen auf. Sie sind in der Randmitte am größten und im Eckbereich am kleinsten. Das entspricht dem bekannten Ausdehnungsbestreben; allerdings sind hier die Beträge der Verschiebungen um eine 10er Potenz kleiner als ohne die sehr steifen Dehnfedern (starre Widerlager).

U [mm]

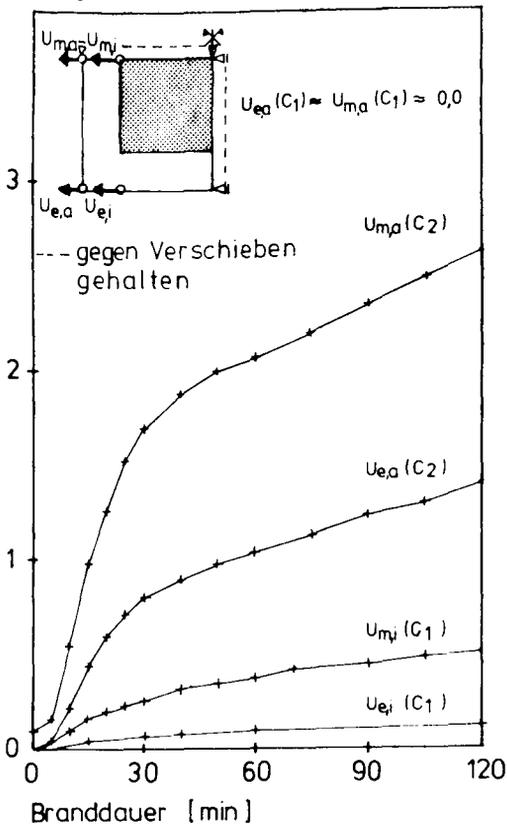


Bild 5.15: Randverschiebungen bei erhöhter Dehnbehinderung

Bei der Mittendurchbiegung (Bild 5.16) fällt zunächst auch das langsamere Wachstum auf. Nach 30 Minuten hat sich die Platte erst um ca. 1,7 cm durchgebogen. Das ist etwa 1/7 des Wertes bei freier Randverschieblichkeit. Nach der 30ten Minute kehrt sich aber die Durchbiegungsentwicklung sogar um: die Platte wird wieder gerade. Nach ca. 3 Stunden hat sie sich sogar um einen kleinen Betrag nach oben gewölbt.

Solche Rückbiegungsvorgänge sind nicht nur rein theoretisch möglich, sondern auch experimentell nachgewiesen: die Platte Q 2/83 hat bei ebenfalls vollständiger Dehnbehinderung (allerdings ohne Nutzlast) genau diese Verformungsgeschichte durchlaufen.

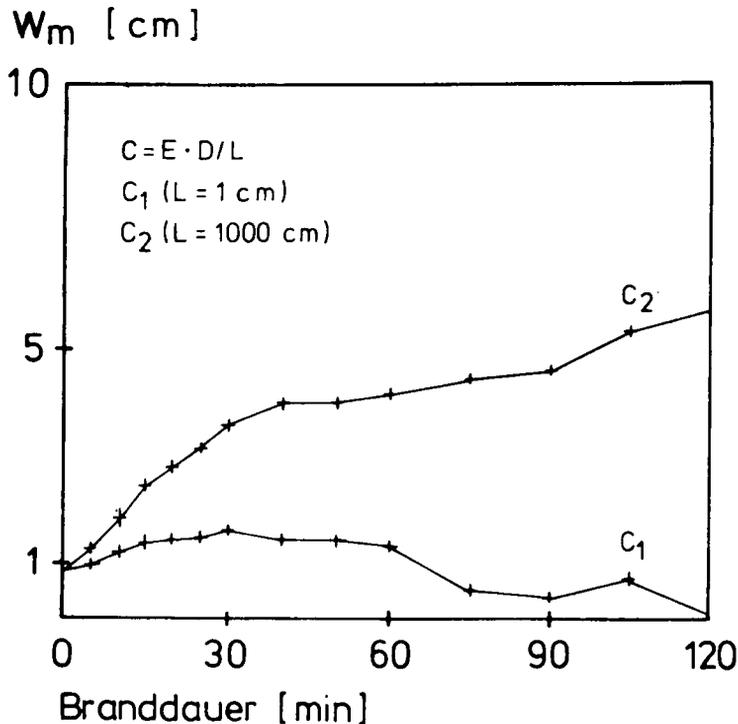


Bild 5.16: Durchbiegung bei erhöhter Dehnbehinderung

Kraftgrößen

Im Bild 5.17 sind nebeneinander die Hauptnormalkräfte und die Hauptmomente gezeigt.

In dieser Phase des Brandablaufes bleibt sowohl bei den Momenten als auch bei den Längskräften die Längsrichtung der kalten Randstreifen praktisch beanspruchungslos. Dagegen ist ein Kraftfluß auf dem kürzesten Weg quer über den Randstreifen hinweg zu den starren Widerlagern deutlich. Im beflamnten Feld entstehen rasch gleichmäßig hohe Druckkräfte und negative Momente.

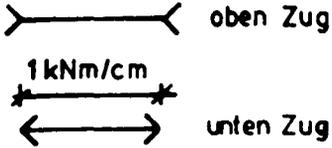
Während die Normalkräfte nach einem raschen Anstieg auf hohem Druckniveau verharren, wird bei den Momenten zwischen der 30ten und der 60ten Minute ein Maximalwert erreicht (negative Momente). Danach kehrt sich die weitere Momentenentwicklung um, und nach 2 Stunden Branddauer ist das gesamte Feld von positiven Momenten beansprucht. Nach 3 Stunden Branddauer haben die positiven Momente in der Feldmitte den Betrag des kalten Ausgangszustandes ca. um das 2fache überstiegen, und das bei nunmehr kaum noch tragfähiger Feldbewehrung. Dieser Zustand wird im folgenden näher untersucht.

Querschnittsbeanspruchung:

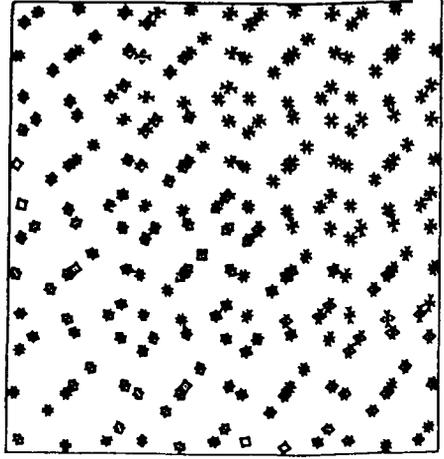
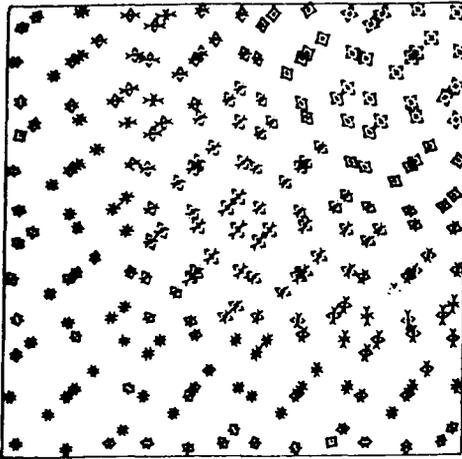
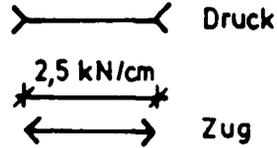
Im Bild 5.18 sind für die Betonschichten die spannungserzeugenden Dehnungen und die Spannungen in x-Richtung für die Schwerpunkte der Elemente 26, 28 und 32 für die bereits besprochenen 6 Branddauern dargestellt. Diese Punkte liegen auf einer Linie nahe der Symmetrieachse.

Das kalte Randelement zeigt während der Anfangsphase des Brandes das Hochwandern der Spannungs-Resultierenden bei ständig wachsenden Krümmungen. Daran anschließend bauen sich die Krümmungen und Momente weiter ab bei ansteigender Druckbeanspruchung. Dabei bleiben die Dehnungen noch unter $10/100$, so daß der Beton noch im "linearen" Bereich der Arbeitslinie beansprucht wird. In Querrichtung ist der Randstreifen geradlinig gerissen, so daß hier ein einaxialer Beanspruchungszustand in der betrachteten x-Richtung vorliegt. Zunächst aufgerissene Querschnittsteile werden später überdrückt und verhalten sich rechnerisch wie das ungerissene Material. Im kalten Randstreifen ist die Gesamtdehnung identisch mit der spannungserzeugenden Dehnung; damit ist die Krümmung direkt erkennbar.

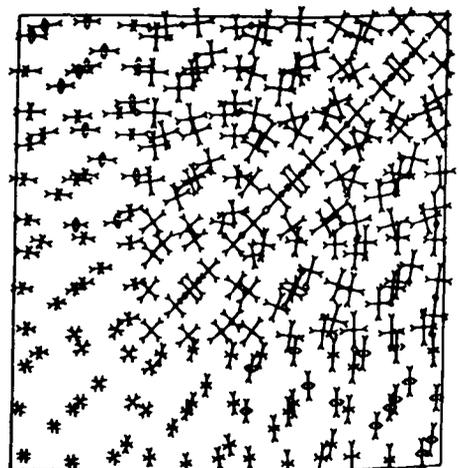
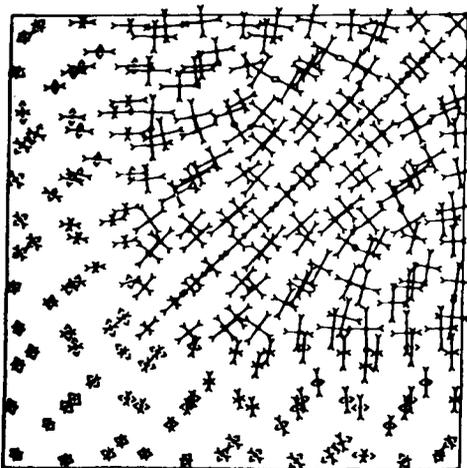
Hauptmomente



Hauptnormalkräfte

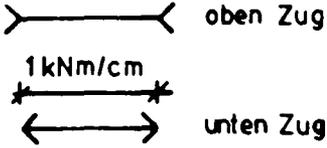


nach 0 Minuten

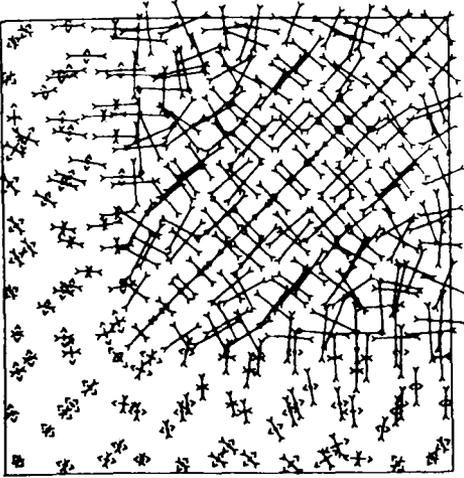
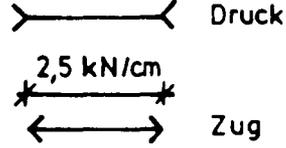


nach 15 Minuten

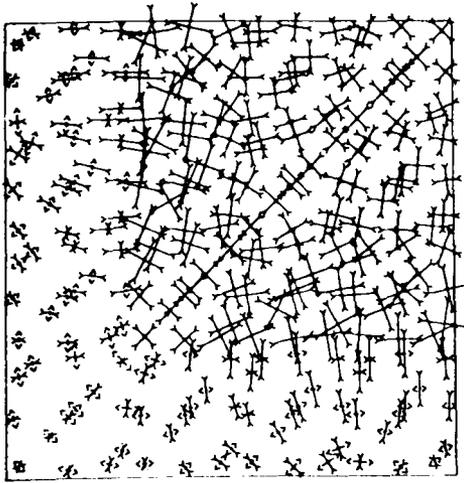
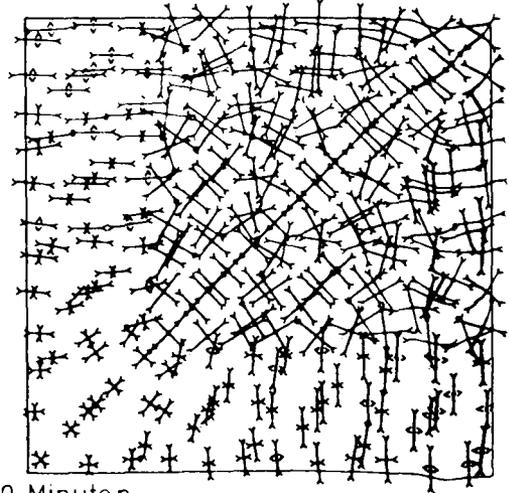
Hauptmomente



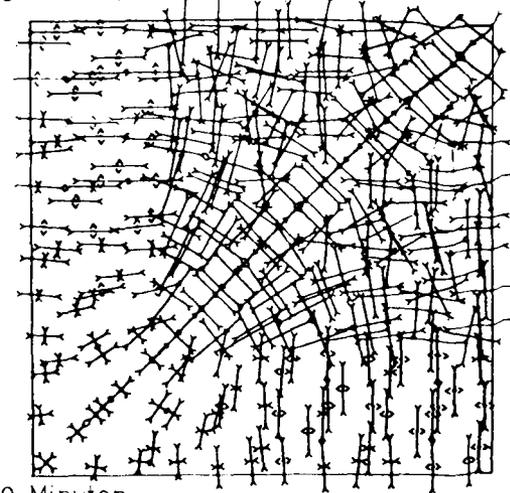
Hauptnormalkräfte



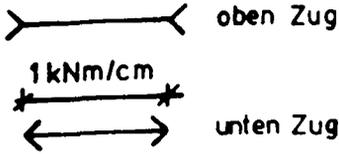
nach 30 Minuten



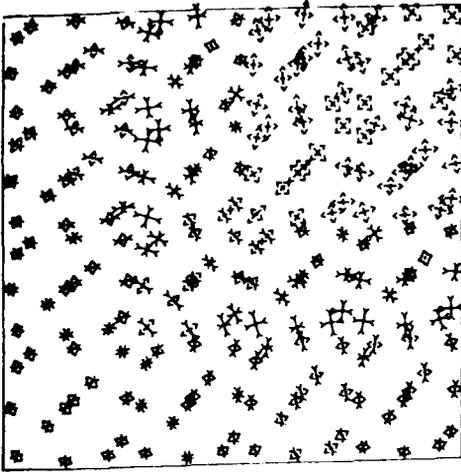
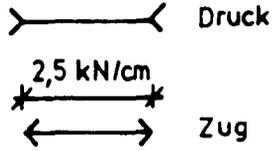
nach 60 Minuten



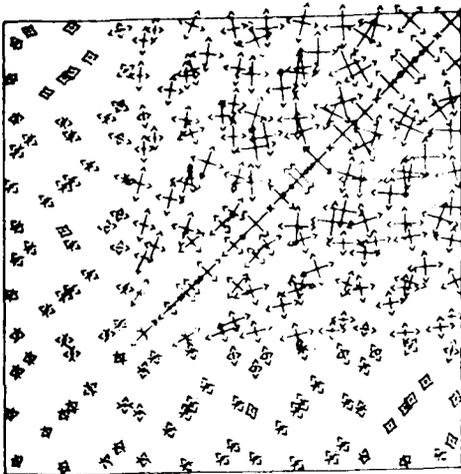
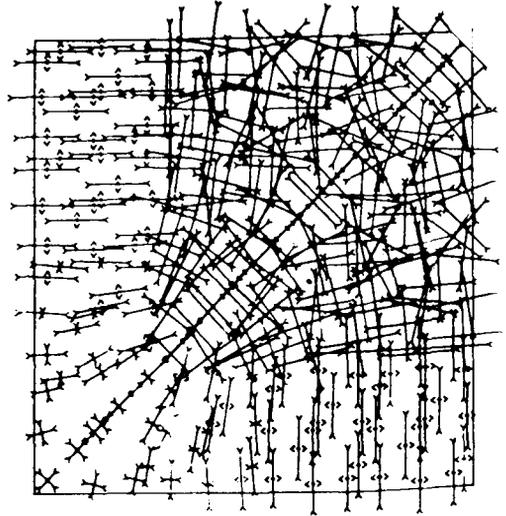
Hauptmomente



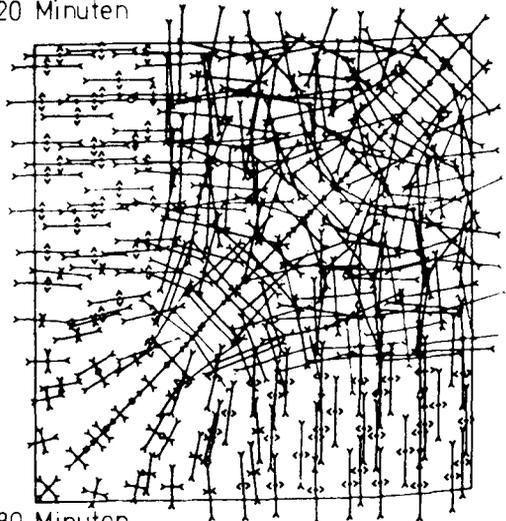
Hauptnormalkräfte



nach 120 Minuten



nach 180 Minuten



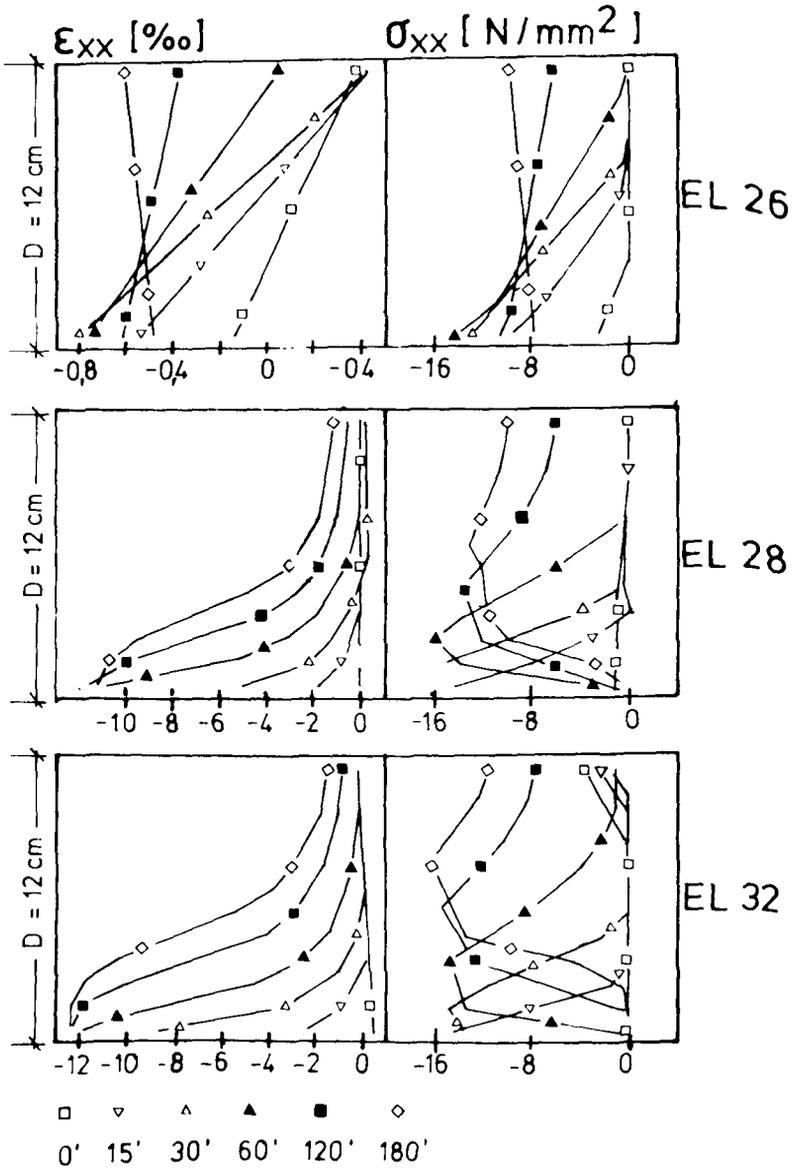


Bild 5.18: Querschnitts-Beanspruchungen

Bei den beiden heißen Elementen 28 (am Rand) und 32 (in der Mitte) ist die spannungserzeugende Dehnung der um die thermische Dehnung verminderte Teil der Gesamtdehnung. Bei genauem Hinsehen sind die 2 unterschiedlichen Temperaturbereiche anhand der verschiedenen thermischen Dehnungen zu erkennen. Der Spannungs/Dehnungs-Zusammenhang ist nun nicht mehr linear. Hier macht sich einerseits der starke Abbau der Festigkeit bei hohen Temperaturen bemerkbar, andererseits erreichen die spannungserzeugenden Stauchungen auch Werte um $10^0/00$.

Es wird deutlich, daß in den untenliegenden Schichten die Druckspannungen bei stärkerer Aufheizung rasch abfallen, während sie in der Nähe der unbeflammten Oberfläche weiter anwachsen. Nach einer bestimmten Branddauer ist diese innere Spannungsumlagerung so weit fortgeschritten, daß die Druckspannungsergebnisse oberhalb der Plattenmittenebene liegt. Dann haben die Momente ihr Vorzeichen gewechselt: es sind positive Momente entstanden.

Dieser Vorzeichenwechsel bei den Momenten ist ein Zeichen dafür, daß an der unverformten Bezugsebene gerechnet wird und nicht mit den tatsächlichen Querschnittshauptachsen, deren genaue Lage von dem Beanspruchungszustand des hochgradig nichtlinearen Materials abhängig ist. Im vorliegenden Falle ist die Hauptachse offenkundig durch die "Aufweichung" der unteren Betonschichten nach oben gewandert.

Die zugehörige Verknüpfung von Momenten und Normalkräften wird im Rechenmodell von den gemischten Gliedern der Steifigkeitsmatrix $K_{\text{Platte,Scheibe}}$ herbeigeführt (Abschnitt 4.3.1).

Das Entstehen von positiven Momenten ist also ein Ausdruck für die Druckentlastung im unteren Querschnittsbereich wegen starker Materialerweichung, während gleichzeitig höher liegende Schichten bei wachsender Temperaturbeanspruchung mehr gezwängt werden.

Anmerkung:

Im Bild 5.18 sind die Spannungs- und Dehnungszustände der einzelnen Schichten auf der Höhe der Schichtmitten geradlinig miteinander verbunden, so daß Spannungs- und Dehnungsgradienten innerhalb der Schichten entstehen. Das Programm rechnet aber mit konstanten Werten pro Schicht. Eine korrekte Wiedergabe der treppenartigen Kurvenverläufe hätte dieses Bild unübersichtlich gemacht.

Aus der Sicht der numerischen Integration hätte eine Verwendung der Zustände an den Schichtgrenzen (statt derjenigen in den Schichtmitten) solche Gradienten berücksichtigt und damit den Genauigkeitsgrad der Integralbildung gesteigert; dafür wäre nur ein "Schichtwert" mehr erforderlich und der Rechenzeitaufwand für die einfachen Operationen wäre unerheblich gewesen. Die Verwendung gemessener Temperaturen zwingt aber zu dem praktizierten Verfahren, da an der beflamten Oberfläche keine Temperaturen gemessen worden sind. Untersuchungen zu den Anforderungen an die Integrationsgenauigkeit haben außerdem zu den entsprechenden Anmerkungen des Abschnitts 4.5. geführt.

5.3.2.3 Starre Widerlager 10 m vom Systemrand entfernt

Weggrößen:

Die weicheren Federn lassen wieder Randverschiebungen zu (Bild 5.15), die nach 2 Stunden in der Randmitte Werte von ca. 2,5 cm erreichen. Damit reduziert diese Federung die Verschiebungswege auf etwa 1/3 der Werte bei freier Verschieblichkeit (Bild 5.11). An dem charakteristischen zeitlichen Verlauf der Entwicklung ändert sich durch die Federn hingegen nichts.

Die Durchbiegungen (Bild 5.16) wachsen zwar langsam, aber ständig; es tritt keine Rückbiegung mehr ein.

Kraftgrößen:

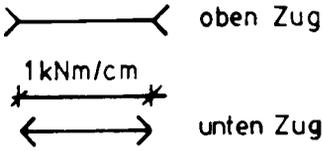
Im Bild 5.19 sind wie für den vorher besprochenen Fall mit quasi vollständiger Dehnbehinderung wieder die Hauptmomente und -normalkräfte dargestellt.

Auch bei der elastischen Behinderung der Verschieblichkeit entstehen bereits in der Anfangsphase des Brandes erhebliche Druckkräfte und negative Momente. Im kalten Rand wirkt aber bei den hier vorliegenden Randbedingungen die massive Ringbewehrung wieder mit, und es entstehen sofort wieder die bereits bekannten Ringzugkräfte. Im Feld deutet sich eine Normalkraftentspannung nicht an; dies ist auch erklärbar, wenn man bedenkt, daß unter den Bedingungen des Brandversuches (Bild 5.10) ein Abbau der Druckkräfte im engeren Bereich um die Feldmitte herum erst ab dem Erreichen einer Mittendurchbiegung von ca. 18 cm nach 3 Stunden Branddauer erkennbar ist.

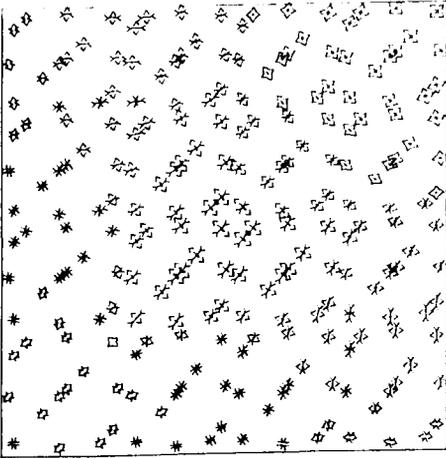
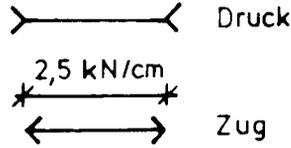
Die sich bei den ebenfalls noch sehr geringen Durchbiegungen rasch entwickelnden negativen Zwangmomente überlagern im gesamten Feldbereich wieder vollständig die Lastmomente. Im Randbereich müssen sie zum "freien Rand" hin auf Null abnehmen, da die elastischen Federn in der Höhe der Querschnittsmitte angeordnet sind und somit kein Randmoment einleiten.

Der Abbau der Zwangmomente im Feldbereich setzt ungefähr gleichzeitig ein wie im vorigen Fall; die positiven Momente erreichen nun aber trotz größerer Mittendurchbiegung nicht mehr ganz die dortige Höhe, da

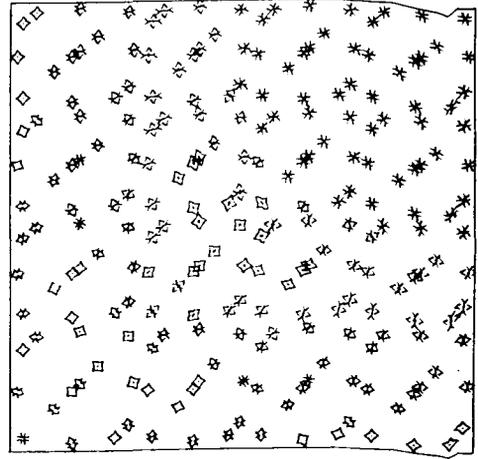
Hauptmomente



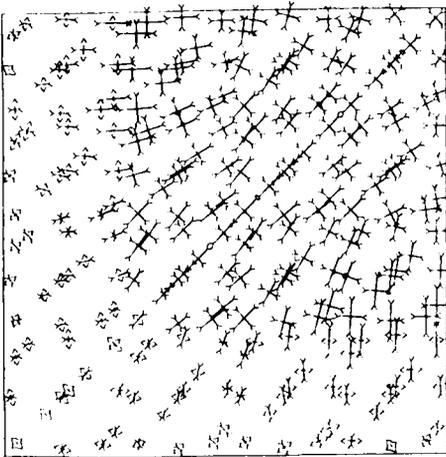
Hauptnormalkräfte



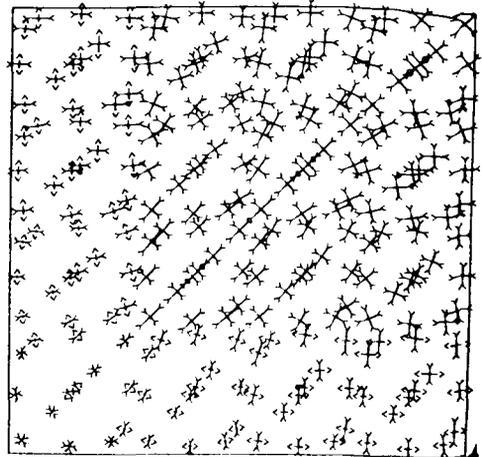
nach 0



Minuten

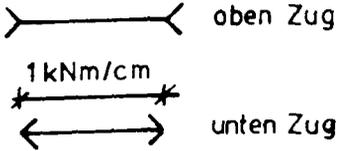


nach 15

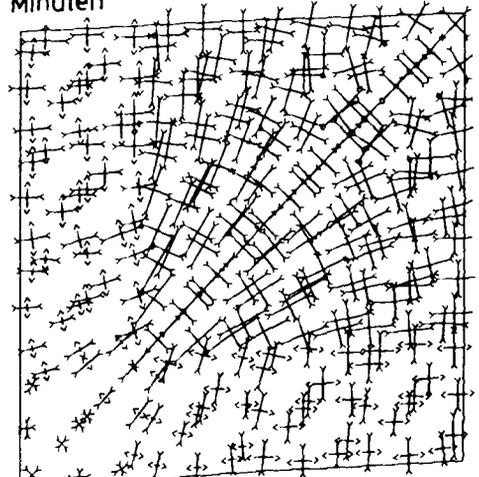
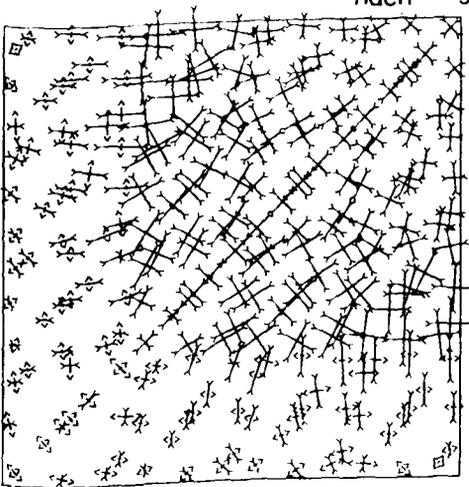
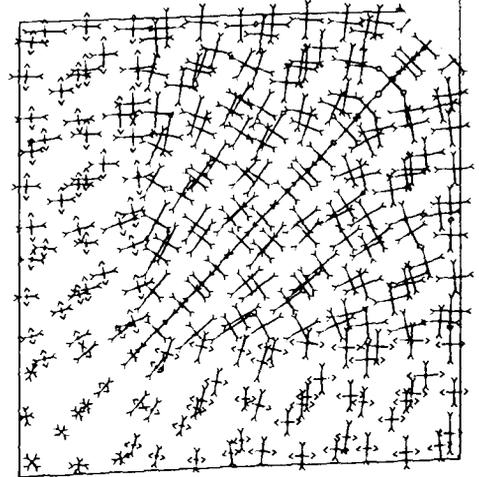
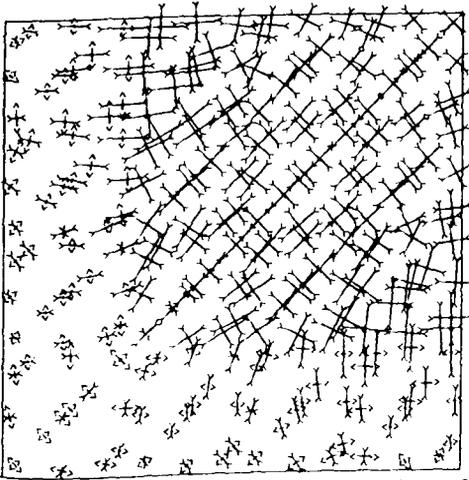
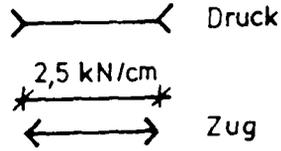


Minuten

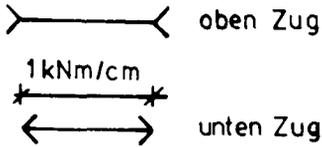
Hauptmomente



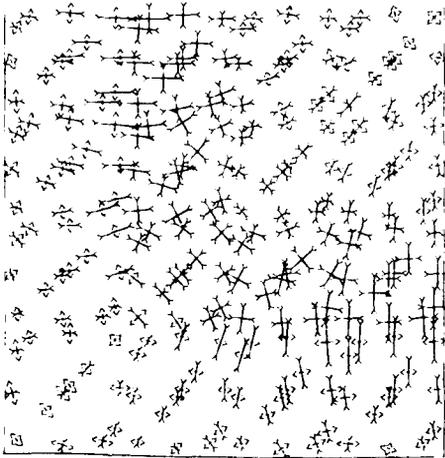
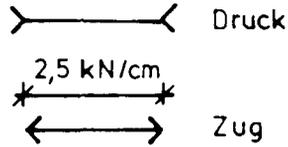
Hauptnormalkräfte



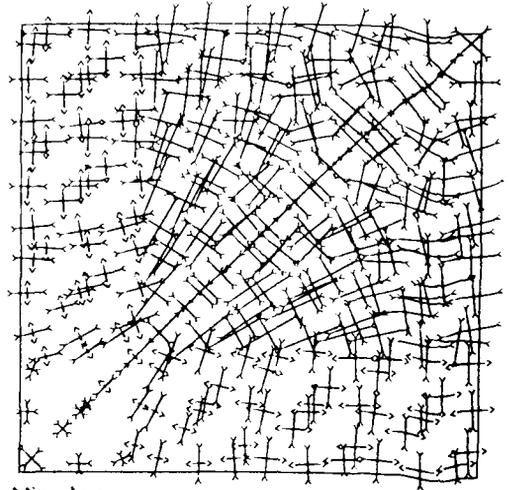
Hauptmomente



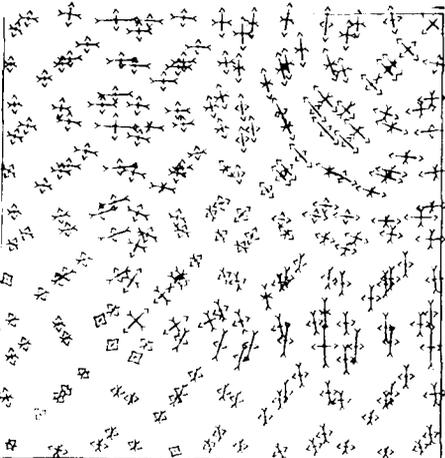
Hauptnormalkräfte



nach 120

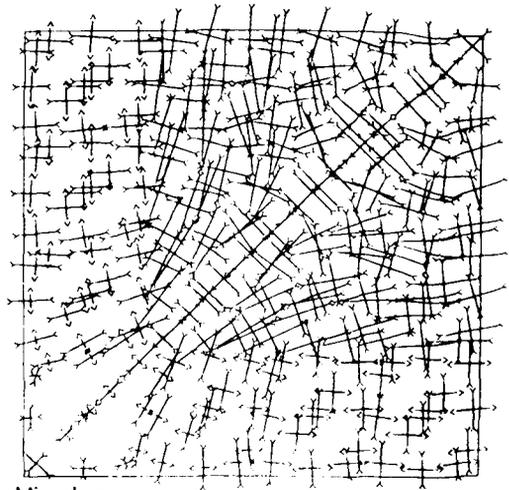


Minuten



nach

180 Minuten



nun die Zwangnormalkräfte wegen der Plattenausdehnung lediglich ein niedrigeres Niveau erreichen. Wiederum weisen die positiven Momente lediglich darauf hin, daß die Druckspannungsergebnisse über die Plattenmittenebene hinaus hochgewandert ist.

Sehr deutlich ist bei der 3stündigen Branddauer eine charakteristische Momentenbelastung zu erkennen:

Im Feld hat sich ein kreisförmiges Gebiet herauskristallisiert, in dem die Momente wie in einer Kreisringplatte wirken, welche auf einen Randstreifen aufgelegt ist. Der Wechsel im Momentenfluß ist im Bild 5.20 verdeutlicht.

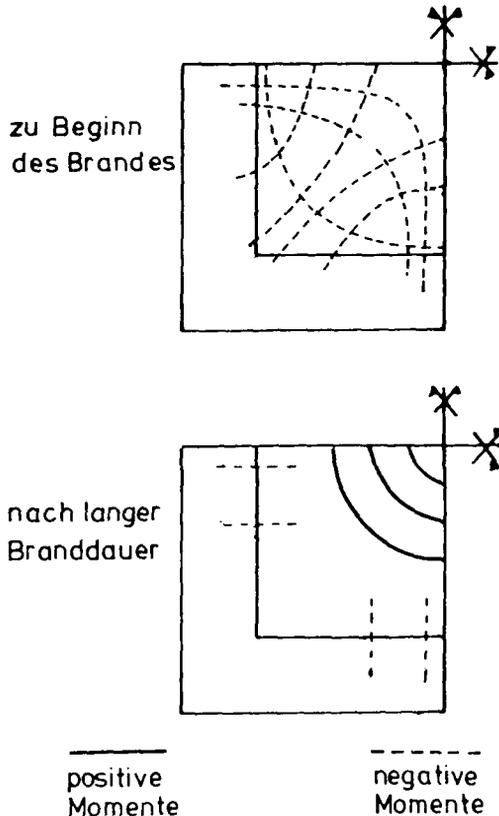


Bild 5.20: Hauptmomentenrichtungen zu verschiedenen Branddauern bei verstärkter Dehnbehinderung

5.3.2.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen dieses Abschnittes haben deutlich gemacht, daß eine Erhöhung der wirksamen Ausdehnungsbehinderung auch ganz entscheidend das Biegeverhalten des beflamten Teils beeinflusst. Im Grenzfall einer vollständigen Dehnbehinderung sind kaum Durchbiegungen entstanden, und bei einer durch Dehnfedern gemäßigten Verstärkung der "natürlichen" Dehnbehinderung ist immer noch eine starke Verminderung der Biegeverformungen festzustellen.

Als direkte Folge der Dehnbehinderung entstehen Zwangdruckkräfte. Da an der beflamten Plattenunterseite die thermischen Dehnungen am größten sind, entstehen bei einer Behinderung der freien thermischen Ausdehnung auch an der Plattenunterseite die größten Zwangspannungen. Bezogen auf die Mittelebene der Platten bilden sich also negative Zwangmomente, die den Momenten aus dem kalten Anfangszustand entgegenwirken und vornehmlich die untenliegende Feldbewehrung entlasten.

Im weiteren Verlauf des Brandes wird der Querschnitt stärker durchwärmt und auch in höher liegenden Schichten können sich Zwangdruckspannungen einstellen, während gleichzeitig aufgrund der bereits fortgeschrittenen thermisch bedingten Materialentfestigung im unteren Querschnittsbereich die Zwangspannungen trotz steigender thermischer Dehnungen rapide abfallen. Somit erklärt sich der Rückgang des negativen Zwangmomentes bei weiter wachsenden oder gleichbleibenden Zwangdruckkräften. Auch dann, wenn die Resultierende der Zwangdruckspannungen oberhalb der Plattenmittelebene liegt - wenn also positive Zwangmomente vorliegen - wirkt die Dehnbehinderung in den hier gezeigten Fällen durchbiegungshemmend, weil nämlich die tatsächliche Lage der Querschnittshauptachse ebenfalls nach oben gewandert ist, da die unteren Betonschichten mit den niedrigen Steifigkeiten keinen nennenswerten Beitrag mehr zur gesamten Querschnittssteifigkeit leisten.

Bei linear elastischem Material bewirkt das Entfernen einer unteren Schicht der Dicke dh ein Hochwandern der Schwerlinie um $dz = 0,5 \cdot dh$.

Für das nichtlineare Material wird dieser Zusammenhang anhand der Spannungsverteilung von Bild 5.18 diskutiert. Es interessieren hierbei die Elemente 28 und 32. Bei den Branddauern von 120 und 180 Minu-

ten ist die Dicke des praktisch nicht mehr tragenden Querschnittsreiches an der Plattenunterseite anhand der Spannungslosigkeit gut zu erkennen.

Am randnahen Element Nr. 28 ist diese ausgefallene Schicht weniger dick als beim Element Nr. 32 in der Plattenmitte. Daraus ergibt sich zwangsläufig, daß im Plattenzentrum die Hauptachse auch weiter nach oben gewandert ist als am Rand. Die Druckspannungsergebnisierende liegt am Rand tiefer als im Plattenzentrum. Damit ist klar, daß die Druckkraft auf einer nach oben gewölbten Bahn die Platte durchläuft. **Es hat sich ein Druckgewölbe gebildet.** Solche Druckgewölbe haben die positive Eigenschaft, äußerst hohe Tragfähigkeiten zu schaffen, und das auch bei schwach nach unten durchgebogenen Platten. Auf diesem Tragmechanismus beruht die bekanntermaßen sehr hohe Tragfähigkeit kalter Platten, wenn ihre Randverschiebung behindert wird. Bei erwärmten Platten mit behinderter Randverschiebung wird der Effekt der Tragfähigkeitssteigerung offensichtlich noch durch die Entwicklung thermischer Zwangkräfte verstärkt.

5.4 Rechnerische Begleitung der Standard-Versuche

5.4.1 Allgemeines

Dem Grundgedanken der experimentellen Untersuchungen folgend wird unter dem Punkt 5.4 der Einfluß unterschiedlicher Dehnbehinderungsgrade auf das Trag- und Verformungsverhalten der "Standard-Platten" versuchsbegleitend analysiert.

Am Ende dieses Abschnitts wird untersucht, ob und mit welcher Güte die bestehende Versuchsanlage die bei partiell beflamnten Deckenplatten erkannten Verhältnisse simulieren kann. Die wichtigste Frage dabei ist folgende:

Wie entwickelt sich das Kräftespiel bei reiner Zwängung durch Druck quer zum Rand der Versuchsplatte ohne die Erfassung von Ringzugkräften außerhalb des beflamnten Bereiches?

Was bewirkt also die fehlende Kontinuität an den Auflagerlinien bei den "Standard-Versuchen"?

5.4.2 Ungezwängte Quadratplatten

Stellvertretend für ungezwängte Platten werden die Versuchsplatten Q 5/82 und die Platte 1 rechnerisch begleitet. Der Unterschied zwischen den beiden Platten besteht hauptsächlich in der Menge der Feldbewehrung (Abschnitt 3.2). Dagegen ist der Einfluß des Randbalkens und einer mittig eingeleiteten Mindestzwangskraft von untergeordneter Bedeutung. Letztere ist in der Rechnung selbstverständlich berücksichtigt.

Beim direkten Vergleich der experimentell und rechnerisch gewonnenen Durchbiegungs/Zeit-Beziehungen (Bild 5.21) fallen sofort mehrere Punkte auf:

1. Das Versagen der beiden Platten wird vom Programm nicht erkannt. Bei der Platte 1 ergibt sich zum Zeitpunkt des Versuchsendes eine deutliche Beschleunigung der Durchbiegung und nachfolgend extreme Verformungen. Bei der Platte Q 5/82 zeigt die Rechnung ein langsa-

2. Die Charakteristik der Durchbiegungsentwicklung der beiden Platten wird von der Rechnung so wiedergegeben wie im Versuch ermittelt. Zu Beginn des Brandes sind die berechneten Durchbiegungen etwas kleiner als die gemessenen; später überschätzt das Programm die Mittendurchbiegung um etwa 5 cm.

Ganz deutlich wird aber aus den 4 Kurven dieses Bildes die Bedeutung der Ausnutzung der unten liegenden Bewehrung für das Trag- und Verformungsverhalten. Eine geringere Bewehrungsausnutzung verringert die Plattenverformungen im Anschluß an die Anfangsphase des Brandes und erhöht die Tragfähigkeitsdauer.

Die Tragfähigkeit der Bewehrung nimmt rechnerisch schneller ab als in den beiden Versuchen. Bereits eine relativ geringfügige Verlagerung der Bewehrung weiter in das Innere des Querschnitts hinein bewirkt eine deutlich langsamere Erwärmung und damit eine verzögerte Abnahme der Festigkeit. Für die systematische Überschätzung der Plattendurchbiegung muß eine Abweichung der tatsächlichen Bewehrungslage von der Soll-Lage angesehen werden. Die Überlappung der Bewehrungsmatten im Bereich der Stöße sowie der Einbau der Umfassungsbügel bewirken i. a. eine Vergrößerung des Achsabstandes der Bewehrung. Die Vielzahl der eingebauten Abstandhalter läßt ein Unterschreiten des Vorgabemaßes auch lokal kaum zu. Die direkt an der Feldbewehrung gemessenen Temperaturen liegen unter den für diese Rechenläufe angenommenen Temperaturen.

Kontrollrechnungen mit weiter nach oben gelegter Feldbewehrung bestätigen diese Überlegungen; die Durchbiegungen sind einheitlich geringer. Die genaue Höhenlage der Bewehrung bei den Versuchsplatten ist nicht flächendeckend mit der für "exakte" Nachrechnungen erforderlichen Genauigkeit nachgemessen worden, so daß eine Angleichung der rechnerischen Kurven an die gemessenen nur mit Hilfe spekulativer Annahmen hinsichtlich des wirksamen Achsabstandes gelingt. In diesem Sinne durchgeführte Berechnungen bestätigen voll den hohen und bekannten Einfluß des Achsabstandes auf des Verhalten ungezwängter Platten.

5.4.3 Minimal aber exzentrisch gezwangte Quadratplatten

Bereits im Kap. 3.2 ist am Beispiel der beiden Platten Q 1/82 und der Platte 1 der unerwartet hohe Einfluß minimaler Zwangungen auf das Trag- und Verformungsverhalten nachgewiesen und diskutiert worden.

Aus dem Bild 5.22 geht nun hervor, daß auch rechnerisch bereits die zunächst für vernachlässigbar gering gehaltenen, exzentrischen Mindesthaltekräfte der Pressen das Plattenverhalten deutlich verändern: die Durchbiegung der Platte wird spürbar verringert und die Tragfähigkeitsdauer erhöht. Die Auswirkungen dieser minimalen Zwängung ähneln den Auswirkungen einer Erhöhung des Bewehrungsgrades bzw. einer Erhöhung des Achsabstandes der Bewehrung.

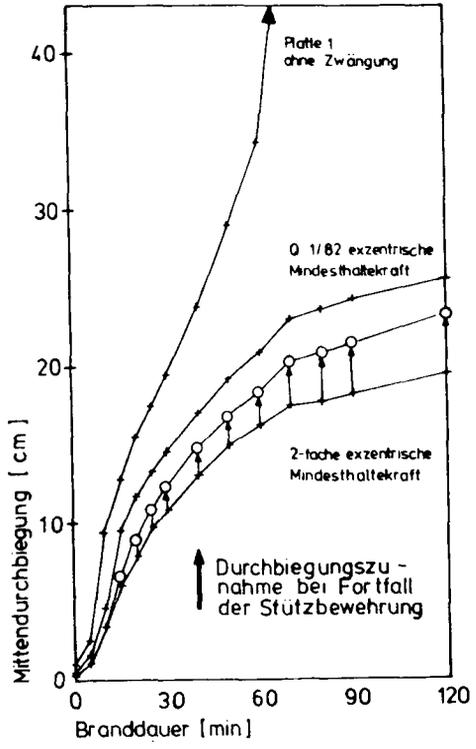


Bild 5.22: Einfluß minimaler, exzentrischer Druckkräfte auf die Durchbiegungen

Im Versuch wirkte an den Pressen die sich aus dem Öldruck im Zylinder ergebende, konstant gehaltene Zwangskraft, die um den Betrag der Reibung in der Presse zu vergrößern ist. Diese Reibungskräfte werden bei der unteren Kurve berücksichtigt, indem die Mindesthaltekraft von ca. 3,5% der Pressen-Nennkraft verdoppelt wird. Reibungskräfte in dieser Größenordnung sind durchaus realistisch bei den hier gegebenen Bedingungen.

Die Entwicklung der Hauptmomente und -normalkräfte (Bild 5.23) macht diesen positiven Effekt verständlich:

Die von den ecknahen Außenpressen eingeleiteten Druckkräfte laufen "über Eck" zum nächstliegenden Zwangungspunkt. Diese Druckstreben in den Plattenecken quer zu den Plattendiagonalen steifen die Plattenecken aus und erhöhen somit deren Tragfähigkeit. Diese ausgesteiften Ecken ziehen die Biegemomente auf sich und leiten eine Momentenumlagerung zu gunsten des Plattenfeldes ein. Bei der hier vorliegenden äußerst schwachen Behinderung der freien Verformbarkeit bleibt das Plattenzentrum jedoch während der gesamten Versuchsdauer im Bereich positiver Momente.

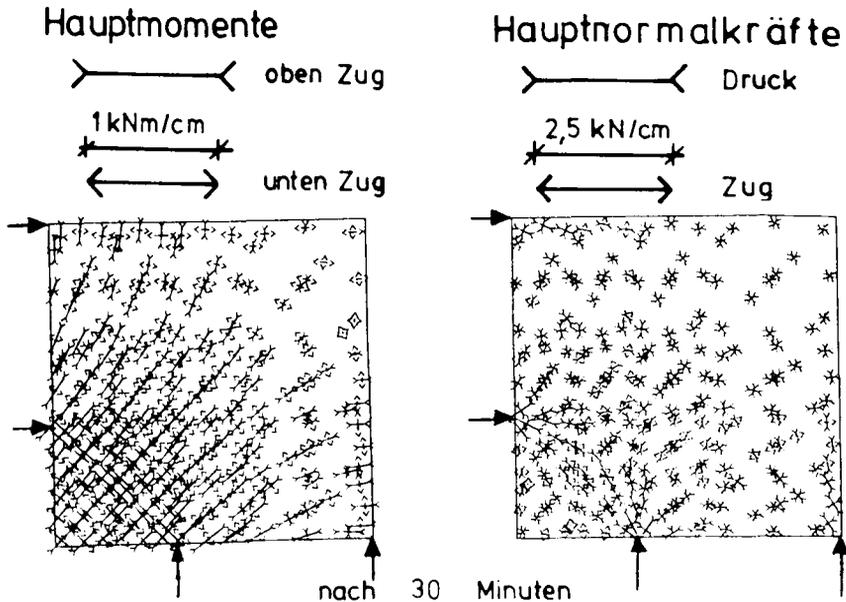


Bild 5.23: Schnittkräfte bei minimaler, exzentrischer Haltekraft

Variation: gleiche Platte, ohne Stützbewehrung

Die nachfolgend diskutierten Rechenergebnisse sind nicht durch Versuche abgesichert. Es handelt sich um den oben besprochenen Fall, jedoch ohne obenliegende Stützbewehrung in der Platte. Dabei interessiert wie im Abschnitt 5.3.1 die Frage, ob und in welchem Ausmaß auch ohne Stützbewehrung die bedeutsamen Umlagerungen von Momenten und Normalkräften möglich und wirkungsvoll bleiben - jetzt aber bei veränderter Realisierung der Dehn- und Rotationsbehinderung.

Bereits der Vergleich der Durchbiegungs/Zeit-Kurven zeigt, daß auch praktisch ohne Stützbewehrung, also allein durch die exzentrisch eingeleiteten Mindesthaltekräfte, die Platte gegenüber der freien Lagerung eine erhöhte Tragfähigkeitsdauer erhält. Dabei bleiben die Durchbiegungen trotz einer unverkennbaren Vergrößerung noch im Rahmen der von der Platte Q 1/82 vorgegebenen Größenordnung (Bild 5.22). Auch unter den Randbedingungen der "Standard-Versuche" ergibt sich rechnerisch die dominierende Rolle der Zwängung im Vergleich zum Bewehrungseinfluß.

Wieder ist im Bild 5.24 deutlich zu erkennen, daß die von den Außenpressen eingeleiteten Haltekräfte über Eck zum benachbarten Haltepunkt streben. Die Größe der Zwangkräfte wächst in den ersten Brandminuten zwar etwas an, bleibt danach aber wegen der vorgegebenen Kraft-Randbedingungen konstant. Insgesamt ergibt sich wieder ein deutlich unter Druckkräften stehender Eckbereich bei einem fast entspannten Feld mit lediglich geringen Druckkräften. Obwohl keine Bewehrungsseisen nahe der kalten Oberfläche Zugspannungen aufnehmen können, entstehen sofort mit den Zwangdruckkräften auch negative Zwangmomente vorwiegend im Eckbereich. Während die Stützbewehrung im zuvor besprochenen Fall für ein "geordnetes" Momentenfeld sorgt, wird hier eine Momentenkonzentration in der Nähe der Ecke deutlich.

Quer zur Diagonale - also über Eck - bilden sich positive Momente. Senkrecht dazu sind wieder negative Momente entstanden, durch die das Feld entlastet wird. Diese negativen Hauptmomente lassen sich nur mit Zwangdruckkräften erklären, deren Wirkungslinie unterhalb der rechnerischen Bezugsebene - bei diesen Rechnungen stets die Plattenmittenebene - liegt.

Die Druckstreben zwischen den ecknahen nachgiebigen Widerlagern bilden offensichtlich "innere Widerlager" für den gesamten beflamten Bereich. Das machen diejenigen Hauptdruckkräfte deutlich, die in das Feld hinein weisen. An der Druckstrebe wird die Ausdehnung der Platte behindert. Die Zwangkräfte wirken unterhalb der Mittenebene und erzeugen somit negative, d. h. stützende Momente, die den Feldbereich entlasten.

Dieses Rechenbeispiel zeigt das hohe Ausmaß bereits scheinbar untergeordneter lokaler Behinderungen der thermischen Ausdehnungen auf das Trag- und Verformungsverhalten. Da die Zwangdruckkräfte vorwiegend nahe der beflamten, unteren Oberfläche wirken, entstehen negative Zwangmomente auch ohne eine Stahlbewehrung im oberen Querschnittsbereich (Bild 1.3).

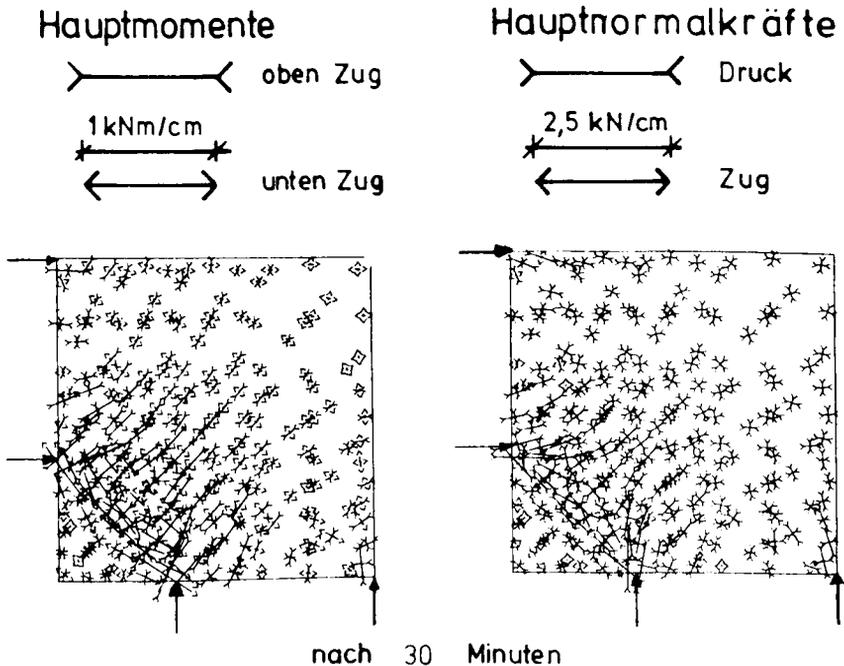


Bild 5.24: Schnittkräfte bei minimaler, exzentrischer Haltekraft bei einer Platte ohne Stützbewehrung

5.4.4 Weggesteuert gezwangte Quadratplatten

5.4.4.1 Verformungen bei verschiedenem Umfang der Zwangung

In diesem Abschnitt wird nun die weggesteuerte Zwangung untersucht. In 3 Rechenläufen wird ein zeitabhängiger Verschiebungsweg entsprechend der Sollkurve für den Dehnbehinderungsgrad "schwach" (Bild 2.5) exzentrisch am unteren Plattenspiegel freigegeben. Die Rechnungen unterscheiden sich in der Anzahl der Randpunkte, an denen diese Dehnbehinderung wirkt. Dazu wird ausgehend von der Situation der "schwach" dehnbehinderten Platte Q 1/84 dem Verlauf der Hauptmomente und der Hauptnormalkräfte nachgegangen.

Einfluß der Anzahl der zwingenden Punkte auf das Plattenverhalten bei schwacher DBH

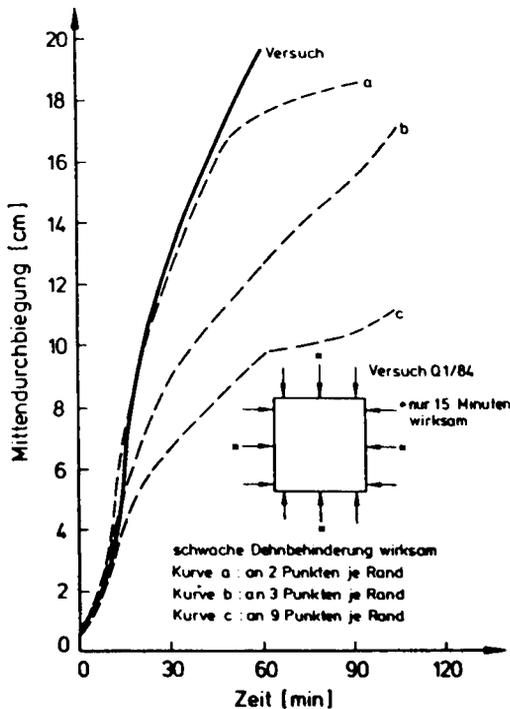


Bild 5.25: Durchbiegungen bei unterschiedlichem Umfang einer weggesteuerten Dehnbehinderung vom Grade "schwach"

Bevor in der folgenden Diskussion auf die Schnittgrößenverläufe eingegangen werden kann, muß das Biegeverhalten bei den unterschiedlichen Randbedingungen dargestellt und erläutert werden. Aus dem Bild 5.25 geht eindeutig folgendes hervor:

In den ersten Brandminuten verbiegt sich die Platte nahezu unabhängig vom Umfang der Zwängung. Erst später vermindern zusätzliche Festhaltungen die Durchbiegungsgeschwindigkeit. Nach 60 bis 90 Minuten Branddauer ist die Plattendurchbiegung bei einer Zwängung an allen Eckknoten am Strukturrand nurmehr halb so groß wie bei einer Zwängung ausschließlich im ecknahen Gebiet.

Der Vergleich der berechneten mit der gemessenen Durchbiegung belegt außerdem, daß in der Anfangsphase des Brandversuches alle eingesetzten Zwang-Pressen, später hingegen lediglich die Außenpressen Zwängungswirkung besitzen.

Die in den Bildern 5.26 und 5.27 gezeigten Kraftflußlinien wurden aus Darstellungen der Hauptschnittgrößen gewonnen, indem per Hand die Richtungspfeile miteinander verbunden worden sind. Aus diesen Bildern ist die Größe der Schnittkräfte nicht ablesbar; insbesondere wird das Ausmaß einer Normalkraftentspannung im Plattenzentrum nicht deutlich. Selbstverständlich müssen sich die Linien stets unter einem rechten Winkel schneiden. Die Ursache für die "unruhige" Linienführung als auch für nicht rechte Schnittwinkel liegt in der stückweisen Zeichnung per Hand.

5.4.4.2 Verlauf von Normalkräften im beflamten Teil (Bild 5.26)

Schwache Dehnbehinderung an drei Punkten pro Seite (Fall b)

Zunächst wird die quadratische Platte diskutiert, wenn sie an drei Punkten pro Rand einer schwachen Dehnbehinderung unterworfen wird. Im Frühstadium des Brandversuchs nach 10 Minuten Branddauer haben sich bereits Zwangkräfte gebildet, die an den "Haltepunkten" in die Platte eingeleitet werden. Zwischen den äußeren Punkten bilden sich sofort über den Ecken Druckstreben aus, die den größten Teil der Zwangkräfte beinhalten.

Berechnete Wirkungslinien der Zwangskräfte bei einer schwachen Dehnbehinderung

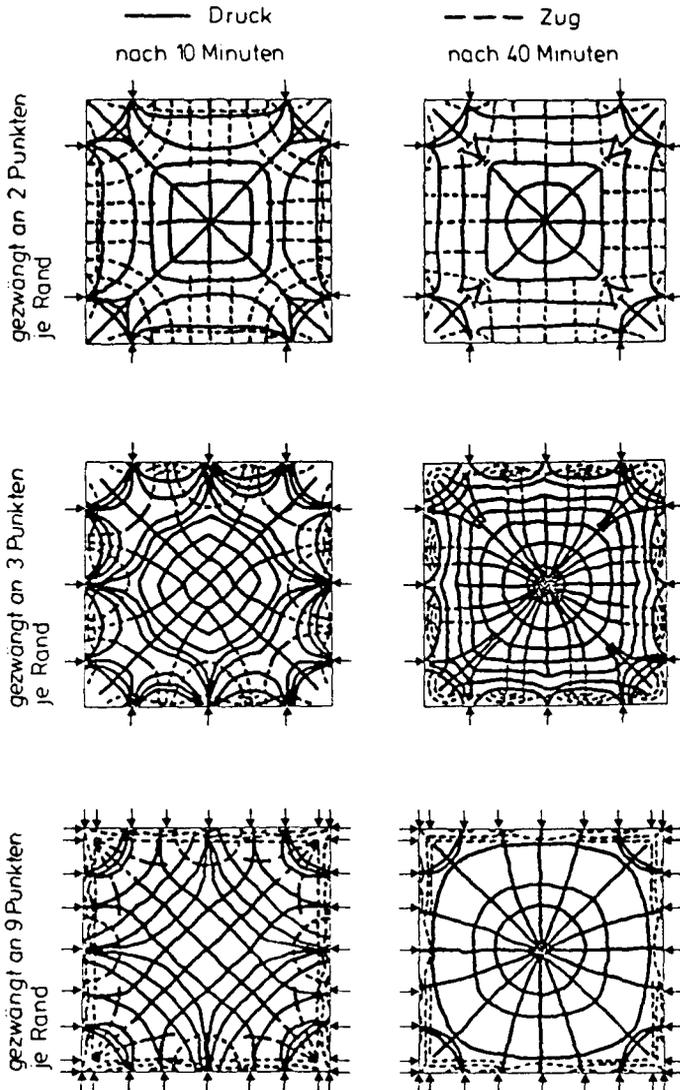


Bild 5.26: Normalkräfte bei unterschiedlichem Umfang der Zwangung

Die Zwangskräfte an den mittleren Punkten streben in drei Richtungen auseinander, nämlich einmal in zwei Druckbögen zu den direkt benachbarten äußeren Haltepunkten am gleichen Rand und zum anderen in einer geschwungenen Linie über die Diagonale zu den zwei zentralen Haltepunkten der angrenzenden Seiten.

Auffallend ist, daß bereits in diesem Stadium in der Plattenmitte nur Hauptdruckkräfte vorliegen. Die Krafttrajektorien geben den Fluß der punktuell eingeleiteten Zwangskräfte wieder. Daraus wird sichtbar, daß die nur wenig durchgebogene Platte einen inneren Widerstand gegen die thermische Längsdehnung durch die oben angesprochenen Druckbögen erfährt. Die Druckbögen zwischen jeweils zwei benachbarten Festhaltepunkten bilden für den weiter innen liegenden Bereich ein "inneres" Widerlager.

Der gesamte kalte Randbereich (von ca. 40cm Breite) wird parallel zu den Bauteilseiten gezogen. Quer zu den Druckbögen entstehen Querkzugkräfte um die mittleren Festhaltepunkte herum (noch sind hier die Zwangnormalkräfte am größten).

Nach ca. 40 Minuten Branddauer haben sich die Zwangskräfte an den mittleren Haltepunkten rechnerisch, wie auch im Versuch gemessen, wegen der einsetzenden Entspannung im Feld weitgehend abgebaut. Als Folge davon steigt die Bedeutung der Druckbögen über die Plattenecken für die Dehnbehinderung. Im Plattenfeld sind nun konzentrische Drucktrajektorien sichtbar, zu denen auch senkrecht Druckkräfte wirken. Diese Druckbeanspruchung ist jedoch auf niedrigem Niveau.

Parallel zu den Seiten ist wie vorher außen ein Zugstreifen vorhanden, neben dem nun aber ein Druckstreifen liegt, welcher sich gegen die diagonalen Druckbögen abstützt (vorgespannter Randstreifen).

Dieser Zusammenhang wird von den Versuchen untermauert. Das Bauteilversagen tritt bei geringer Dehnbehinderung und großer Durchbiegung nämlich stets dann ein, wenn an den Ecken die Druckbögen zerstört werden. Damit versagen diese "inneren Widerlager", und die Zwangsmomente können nicht mehr weiter existieren.

Wenn sich bei den Versuchen sehr große Durchbiegungen eingestellt haben, dann sind also die Lasten hauptsächlich über die von den Zwang-

kräften vorgespannten, parallel zum Rand verlaufenden Bereiche abgetragen worden, während das Innenfeld dann nicht mehr wesentlich zum Lastabtrag beitragen konnte. Für den Bereich des lastabtragenden Streifens zeigt die Spannungsverteilung parallel zum Rand, das Zustandekommen und die Wirkungsebene der Druckkräfte (hier nicht dargestellt).

Wegen der geringen Krümmung bilden sich unten Druckspannungen aus der behinderten thermischen Dehnung. Dabei wird die Betonfestigkeit nahezu erreicht. In den Fällen, in denen die zur Festigkeit gehörende Stauchung überschritten wird, tritt ein Spannungsabfall zur beflamten Oberfläche hin auf.

"Kontinuierliche" schwache Dehnbehinderung (Fall c)

Nach ca. 10minütiger Brandbeanspruchung sind fast die gleichen Durchbiegungen aufgetreten wie bei der punktuellen Dehnbehinderung. Der Verlauf der Normalkräfte hat sich jedoch geändert: Die an den Rändern entstehenden Zwangkräfte streben vollständig den entsprechenden Punkten der Nachbarränder zu. Da hier keine Kraftanteile zum direkt benachbarten Punkt am gleichen Rand fließen, sind die inneren Widerlager weiter zur Mitte gerückt und es ist besser ausgesteift und tragfähiger als im zuvor besprochenen Fall.

Nach ca. 40 min Branddauer sind die Zwangkräfte weiter gestiegen und die Kraftwirkungslinien verlaufen durch die Plattenmitte hindurch zur gegenüberliegenden Seite. Um das Zentrum herum sind bis auf die Randstreifen kreisförmige Druckkraftlinien zu sehen. Die vorher noch existierenden radialen Zugkräfte sind nun überdrückt, und der gesamte erwärmte Bereich befindet sich unter zweiachsigen Druckkräften.

Normalkräfte bei horizontaler Festhaltung nahe der Ecken (Fall a)

Die Berechnung dieses ungünstigeren Falls einer Anordnung von zwängenden Punkten erfolgt im Hinblick darauf, daß im entsprechenden Versuch die in der Mitte der Ränder gelegenen zwängenden Pressen bereits nach kurzer Versuchsdauer (15 Minuten) keine Zwangskraft mehr in die Platte

eingeleitet haben.

Auch bei dieser Anordnung der zwängenden Festhaltungen entstehen umlaufende Druckbögen. Jetzt aber bilden sich rechtwinklig dazu und um die Ecken herum verlaufende, relativ geringe Querkzugkräfte. Diese können von der im Bild 5.12 veranschaulichten inneren Dehnbehinderung durch die obenliegende Stützbewehrung hervorgerufen werden. Der kalte Randstreifen ist wie auch bei den anderen Zwängungsbedingungen längs unter Zug. Die sehr flachen Druckbögen stellen für den Innenbereich der Platten eine lediglich äußerst weiche Dehnbehinderung dar. Somit kann sich die Platte fast unbehindert längs der Ränder ausdehnen.

Die berechneten Durchbiegungen (a) entsprechen mit guter Genauigkeit den Durchbiegungen der Platte $Q 1/84$ (Bild 5.25).

Folgerungen:

Die erwärmte Platte will sich ausdehnen und stößt an den gehaltenen Punkten auf Widerstand. Liegen diese Haltepunkte dicht beieinander, so können sich bis an den Plattenrand im gesamten Feld zweiaxiale Druckkraftzustände entwickeln. Haben aber die Haltepunkte einen größeren Abstand zueinander, so müssen Teile der dort entstehenden Kräfte erst innere Druckbögen zu den Nachbarhaltepunkten aufbauen, die dann ihrerseits für den kleineren Restfeldbereich wie ein kontinuierliches Widerlager wirken.

Da diese "inneren" Widerlagerlinien jedoch wesentlich weicher reagieren als eng beieinander liegende gehaltene Randpunkte, fällt der Grad der Dehnbehinderung mit fallender Anzahl der gehaltenen Punkte. Eine Platte mit kontinuierlich gehaltenem Rand (wie im monolithischen Bauwerk) verhält sich also stets günstiger als eine Platte, die an einzelnen Punkten an ihrer thermischen Längsdehnung behindert wird (wie die hier geprüften).

5.4.4.3. Verlauf der Momente im beflamten Teil (Bild 5.27)

Schwach dehnbehinderte Platte an drei Punkten pro Seite (Fall b)

Nach 10 Minuten ETK-Beflammung steht der gesamte schnell kalte Randbalken unter dem Einfluß positiver Momente. Im gesamten erwärmten Plattenfeld haben bereits Momentenumlagerungen negative Momente in beiden Hauptmomentenrichtungen erzeugt. Die höchsten Stützmomente entstehen an den Mittenpressen, weil sich dort der Rand am stärksten verdrehen will und auf der ausgesteiften Diagonale zwischen den Außenpressen, wo auch nach 5 Minuten Branddauer die ersten Biegerisse erkennbar werden.

Nach 40 Minuten Versuchsdauer deuten bogenförmige Momentenwirkungslinien an, daß die Verdrehbehinderung vorwiegend auf den Randbereich beschränkt bleibt. Das Feld ist ringsum in diesen Randstreifen eingespannt.

Momentenfluß bei "kontinuierlichen" Randfesthaltungen (Fall c)

Die Momente streben wieder der Randmitte und den Ecken zu.

Bei höherer Branddauer geht die größte Rotationsbehinderung von den Ecken aus und in Plattenmitte ist die Reichweite auf einen schmalen Bereich beschränkt. Die Seitenmitte verliert an Bedeutung, da das Randmoment ausschließlich von der exzentrischen Zwangskraft aufgenommen wird, welche wegen der Normalkraftentspannung im Feld im Verhältnis zu den Eckbereichen ständig abnimmt.

Momentenfluß bei Dehnbehinderung nahe der Ecken (Fall a)

Im Frühstadium des Brandes zeigt sich der bereits bekannte Verlauf der Zwangmomente.

Später treten wegen der fehlenden Zwängung an den Seitenmitten die beim Fall (b) besprochenen Schnittkraftumlagerungen verstärkt ein.

Berechnete Wirkungslinien der Zwangsmomente bei einer schwachen Dehnbehinderung

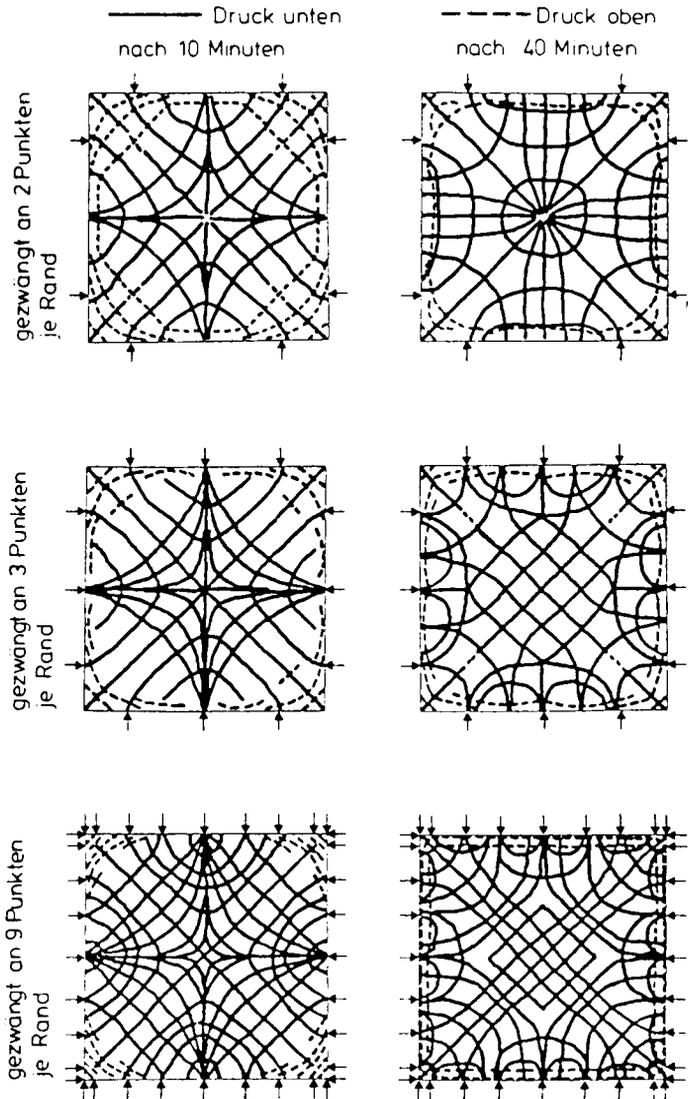


Bild 5.26: Momente bei unterschiedlichem Umfang der Zwangung

5.4.5 Wirklichkeitsnähe der Versuchsanordnung

Die Wirklichkeitsnähe der Versuchsanordnung wird hier bewertet durch einen Vergleich der berechneten Schnittgrößen innerhalb des beflamnten Plattenteils des Systems S 1/86 (Abschnitt 5.2.3) mit der Schnittgrößenentwicklung bei einer "schwachen" Zwängung durch Pressen (Abschnitt 5.4.4).

Die Standard-Versuche führen auf das **Druckring-Modell**, bei dem Druckstreben in der Nähe der Plattenecken die Existenz durch Zwang vorgepannter randnaher Bereiche gewährleisten (s. auch Abschnitt 3.3). Ein randnaher Druckring läßt sich auch aus den Wirkungslinien der Normalkräfte des Bildes 5.26 herauslesen. Damit passen Versuch und Rechnung zusammen.

Im Unterschied zu den Standard-Versuchsplatten streben in einem partiell beflamnten rechteckigen Deckenfeld die Druckkräfte auf die Ecken zu. Es entsteht zwar kein Druckring, jedoch wird ein randnaher, beflamnter Streifen von Zwangnormalkräften unabhängig vom Versuchstyp gleichermaßen günstig vorgespannt.

Bei den Standard-Versuchen fällt die Rotationsbehinderung an den Seitenmitten bei hohen Randverdrehungen gegenüber der Realität vorzeitig weg. Die Auswirkungen auf die Biegeverformungen sind bereits in den Abschnitten 2.6.3 und 3.3.5 erkannt worden und werden von den Berechnungen voll untermauert.

Die Berechnungen unter Punkt 5.4.4 bestätigen, daß die positiven Versuchsergebnisse gegenüber der Wirklichkeit sogar noch auf der sicheren Seite liegen und mit dem Versuchsmodell die Realität also sehr konservativ beurteilt wird.

Bei einer Verallgemeinerung der bislang sehr vorsichtig gedeuteten Versuchsergebnisse kann aufgrund der theoretischen Erkenntnisse nun relativ forsch und mutig vorgegangen werden!

6. Zusammenfassung und kritische Bewertung der Arbeit

6.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird am Beispiel eines etwa 5m * 5m großen, 4seitig liniengelagerten Plattenfeldes aus Stahlbeton untersucht, in wie weit sich das Trag- und Verformungsverhalten im Brandfall ändert, wenn an den Rändern dieser "Standardplatte" die freie Verformbarkeit eingeschränkt ist.

Die Ergebnisse einer Reihe von Großversuchen zeigen durchweg deutliche Verlängerungen der Tragfähigkeitsdauer bei gleichzeitig geringeren Verformungen, wenn die Zwangsschnittgrößen den Lastschnittgrößen entgegenwirken. Dabei reagieren die Platten empfindlich auf Normalkräfte, welche die Platten i. d. R. über lange Branddauern nahe der Brandbereichsgrenzen günstig vorspannen. Bereits kleinste Dehnbehinderungen sind in der Lage, diesen positiven Effekt zu bewirken. Die Biegezugspannungen im Platten-Feldbereich werden von den Zwangdruckkräften überdrückt, so daß die Feldbewehrung an Bedeutung in bezug auf die Tragfähigkeitsdauer während des Brandes verliert.

Zur theoretischen Begleitung der Experimente wurde ein geeignetes Rechenprogramm entwickelt, das unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften das Flächentragwerk als kombiniertes Platten-Scheiben-System behandelt. Mit den theoretischen Untersuchungen konnten die wesentlichen Versuchsergebnisse nachgerechnet und bestätigt werden.

Erst die vergleichende Betrachtung experimentell und theoretisch gewonnener Ergebnisse führt zu einem klaren und gesicherten Bild über die Vorgänge in den untersuchten Platten, weil sowohl die Versuche als auch die Rechnung nur Modelle der Wirklichkeit darstellen, deren Modelleigenschaften (Güte) erst festgestellt und bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Der unabdingbaren Klärung der Modelleigenschaften mußte ein großer Teil dieser Arbeit gewidmet werden.

Mit den durchgeführten Untersuchungen ist der bislang bestehende Erfahrungsraum über das Brandverhalten von Stahlbetonplatten entschei-

dend erweitert worden. Das Wirken von Zwangkräften wird eingehend studiert und besprochen. Allerdings konzentrieren sich die Erfahrungen auf Systeme ähnlich der Versuchsplatten, so daß eine Verallgemeinerung der Erkenntnisse dort auf Grenzen stößt, wo:

- * die Größe des beflamten Teiles wesentlich über die untersuchten 25m^2 hinausgeht (ab etwa 100m^2);
- * sich die Nutzlasten im Plattenzentrum konzentrieren;
- * die Struktur keinen rechteckigen oder kreisrunden Grundriß aufweist;
- * die Brandraumgrenzen nicht mit den Auflagerlinien des beflamten Plattenteils zusammenfallen;
- * das beflamte Gebiet nicht allseitig von unbeflammten Deckenteilen umgeben ist.

Für diese Fälle kann aber eine Studie mit mehreren Rechenläufen mit dem entwickelten Rechenprogramm **PLAFEU** zu einer realitätsnahen Vorstellung über die entscheidenden Vorgänge verhelfen.

Noch nicht abgesichert ist das Programm für Situationen, bei denen

- * keine starre Linienlagerung angenommen werden darf.

Für punktgestützte Platten wird die z. Zt. noch ausstehende experimentelle Absicherung in Kürze erfolgen /26/ und für eine nachgiebige Lagerung z. B. auf Unterzügen, die ebenfalls dem Feuer ausgesetzt sein können, wird allerdings auch in absehbarer Zukunft eine experimentelle Absicherung ausbleiben müssen.

Unzutreffende Ergebnisse müssen stets dort erwartet werden, wo

- * Schubverformungen entscheidend werden.

Rechnerische Untersuchungen auf dem hier entwickelten Wege sind nur bei weiteren umfassenden Programmerweiterungen möglich,

- * wenn Massenkkräfte wirken (dynamische Lasten) und
- * für vorgespannte Platten.

6.2 Verallgemeinerung der Ergebnisse

Die vorwiegend günstigen Auswirkungen kalter Umgebungsbauteile auf das Trag- und Verformungsverhalten des direkt beflamnten Teils einer Stahlbetonplatte, die bei dem hier ausführlich untersuchten Bauteil nachgewiesen worden sind, können auch bei ähnlichen in der Baupraxis vorkommenden Situationen als gesichert angenommen werden. Hierbei ist die Erkenntnis entscheidend, daß für eine wesentliche Verbesserung des Brandverhaltens bereits minimale Zwangkräfte ausreichen. Für das Entstehen solcher geringster Zwangsschnittgrößen liegen im Regelfall die erforderlichen Voraussetzungen bei praxisgerecht ausgeführten Geschoßdecken aus Ortbeton vor.

Selbst bei beflamnten Plattenteilen am Rand eines Geschosses reicht die Zwängung aus der an drei Seiten vorhandenen kalten Umgebung mit hoher Wahrscheinlichkeit für eine Verlängerung der Tragfähigkeitsdauer über den Zeitpunkt des Erreichens der kritischen Temperatur der Bewehrung nach DIN 4102 i. a. aus.

Liegt der beflamnte Teil in der Ecke eines Deckenfeldes, so kann mit einer rechnerischen Analyse der Gegebenheiten ebenfalls noch eine Tragreserve gefunden und aktiviert werden. Hier macht sich die Randaussteifung der Ecke bei gleichzeitig vorhandener Rotationsbehinderung der zwei gegenüberliegenden Ränder des beflamnten Gebietes bemerkbar. Von Unterzügen und Stürzen entlang der Außenränder eines Deckenfeldes kann nur in seltenen Fällen eine stützende Zwangwirkung erwartet werden, nämlich dann, wenn erhebliche Bewehrungsanteile "um die Ecke herum" in das Gebäudeinnere hineingeführt sind. Gerade an den Ecken des beflamnten Teils sollten die Zwangkräfte aktiviert werden. Die Rotationsbehinderung dieser balkenartigen Bauteile ist vernachlässigbar klein, da durch Ribbildung im Balken dessen Torsionssteifigkeit erheblich abnimmt.

Stützen weichen grundsätzlich dem Druck der Platten nahezu widerstandslos aus, da ihre Biegesteifigkeit (Systemlänge jetzt über 2 Geschosse) für derartige Querlasten zu gering ist. Sie können keine nennenswerten Zwängungen in der Platte hervorrufen.

Für beflamnte, von kalten Deckenteilen umgebenen Plattenbereiche kann aufgrund der festgestellten, i. a. äußerst hohen Tragfähigkeitsre-

serve für eine Fläche bis zu etwa 50m^2 (2-fache Größe der Versuchsplatten) ohne weiteren Nachweis und unabhängig von Ausführungs- bzw. Konstruktionsdetails eine Tragfähigkeitsdauer von mindestens 2 Stunden bei einer Normbrandbeanspruchung angenommen werden, solange die zulässigen Gebrauchslasten nicht überschritten werden und sich die Nutzlast nicht im Zentrumsbereich der Platten konzentriert.

Bei größeren beflamten Gebieten und dann ebenfalls vergrößerter Stützweite ist eine genauere Berechnung erforderlich, wenn für den Nachweis der Systemtragfähigkeit die Zwängungswirkungen herangezogen werden sollen. Dafür wird folgendes Vorgehen empfohlen:

Zunächst wird die fragliche Situation analysiert. Wichtige Ergebnisse sind die Zeit/Verformungs-Kurve und die Breite der Druckstreifen am Rand des beflamten Gebietes zu den interessierenden Branddauern. Ohne den Querschnitt oder die Temperaturbeanspruchung zu verändern, werden weitere Rechenläufe durchgeführt, für die die Systemabmessungen in beiden Richtungen vergrößert werden. Bei gleichbleibendem Verhältnis von beflamtem zu kaltem Plattenanteil verbiegt sich bei gleichem Temperaturgradienten (thermische Krümmung) die vergrößerte Platte stärker und die Normalkraftentspannung tritt eher und intensiver ein. Die nachzuweisende Tragfähigkeitsdauer sollte noch von einem System erreicht werden, dessen Systemabmessungen aus Sicherheitsgründen ca. um 10% bis 20% über denen der untersuchten Struktur liegen. Zu diesem Zeitpunkt sollte noch ein randnaher Druckstreifen der Breite $0,20 \cdot L$ erkennbar sein. Durch dieses Vorhaltemaß werden näherungsweise vom Programm evtl. zu günstig ermittelte Zustände abgedeckt sowie der außerordentlich hohen Bedeutung der Zwangdruckkräfte in ausreichendem Maße Rechnung getragen.

6.3 Ausblick und wünschenswerte weitere Arbeiten

In DIN 4102, Teil 4 werden in den Tabellen 12 und 13 für die Stahlbewehrung Mindestachsabstände zur beflamten Oberfläche hin angegeben. Für 4seitig gelagerte, 2achsrig gespannte, unbekleidete Stahlbetonplatten werden dort unabhängig von ihren Einbindungen in das gesamte Deckenfeld (frei aufliegend oder aber durchlaufend bzw. eingespannt) die gleichen Werte gefordert, wenn das Seitenverhältnis 1,5 nicht übersteigt.

Wie die Untersuchungen ergeben haben, führt das Zusammenwirken des beflamten Teils mit der Gesamtkonstruktion zwar zu einer weitgehenden Entlastung der Feldbewehrung, jedoch sollten aufgrund dieser Tatsache die o. a. Werte nicht abgemindert werden. Schließlich wurde bei dieser Arbeit unterstellt, daß nicht die gesamte Konstruktion vom Brand erfaßt wird, sondern daß das Feuer durch geeignete Maßnahmen auf einen kleineren Bereich des Gesamttragwerks beschränkt bleibt. Nach der bestehenden Brandschutzphilosophie muß jedoch auch für einen Vollbrand innerhalb eines Brandabschnittes die Standsicherheit der Konstruktion über bestimmte Branddauern gewährleistet sein.

Erst weitere Untersuchungen können zeigen, ob auch unter Vollbrandbedingungen die dann stark verminderte Zwängungsmöglichkeit der Systeme ausreicht, um die erforderliche Stabilität sicherzustellen. Erst dann könnte eine Reduzierung der z. Zeit geforderten Mindestachsabstände in Erwägung gezogen werden. Dabei müßten dann jedoch Einschränkungen in bezug auf die Größe und Stützweite der Plattenfelder gemacht werden.

Ganz anders sieht - wie bereits diskutiert - die Situation bei partieller Beflammung aus. In diesem Fall kann schon aufgrund der hier gewonnenen Erkenntnisse eine Berücksichtigung der Gesamttragwirkung erfolgen. Es ist denkbar, auf dieser Basis konkrete Möglichkeiten für die Praxis aufzubereiten, von den Mindestachsabständen der DIN 4102 im Einzelfall abzuweichen. Dabei sind die Voraussetzungen und Grenzen fest zu definieren und die Anforderungen der DIN 1045 zu beachten. Da im Regelfall die Bestimmungen der DIN 1045 die Höhenlage der Bewehrung vorgeben, kann von einer entsprechenden Änderung der DIN 4102 generell kein wirtschaftlicher Gewinn erwartet werden.

Bei weit gespannten Deckenfeldern und unter Vollbrandbedingungen kann vorerst noch nicht von so weitgreifenden Auswirkungen der Zwängungen ausgegangen werden. Für diese Fälle sind weitere numerische Untersuchungen wünschenswert.

Allerdings steht schon jetzt mit der "Bruchliniethorie" ein praktisches Rechenverfahren bereit /3/, mit welchem sich gegenüber den tabellarisierten Normanforderungen normgerechte, aber im Einzelfall wirtschaftlichere Lösungen begründen lassen. Dieser Nachweis erfolgt ohne die Berücksichtigung von Zwangsschnittgrößen.

Im Hinblick auf die Resttragfähigkeit brandbeanspruchter Stahlbetonbauteile sind noch eine Reihe interessanter Fragen offen. Speziell bei partiell beflamten Stahlbetonplatten kann die Tragfähigkeit nach dem Abkühlen erheblich gegenüber dem heißen Zustand abfallen, da einerseits die Vorspannwirkung der Zwangkräfte entfällt und andererseits die großen bleibenden Verformungen die vorhandene Bewehrung extrem beansprucht. Die eigenen Untersuchungen beschränken sich auf die Dauer des Brandes und klammern die Abkühlphase und die Beurteilung der Resttragfähigkeit aus.

In der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, die im Selbstverlag herausgegeben wird, sind bisher erschienen: (ISSN 0178-5796)

- Heft 1: Über das Verdunstungsverhalten und den Nachweis öligler Holzschutzmittel (Dissertation). (1962)
von Rolf Deters -vergriffen-
- Heft 2: Das Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Feuerangriff. (1963)
von Karl Kordina -vergriffen-
- Heft 3: Zur Stabilitätsfrage des Zweigelenkbogens mit biegeweichem Zugband und schlaffen Hängestangen (Diss.) (1963).
von Josef Eibl -vergriffen-
- Heft 4: Ein Verfahren zur Bestimmung des Vorspannverlustes infolge Schlupf in der Verankerung. Zur Frage der Temperaturbeanspruchung von kreiszylindrischen Stahlbetonsilos. (1964)
von Karl Kordina und Josef Eibl -vergriffen-
- Heft 5: Über den Schalungsdruck von Frischbeton (Diss.). (1964)
von Helmut Ertingshausen
- Heft 6: Transportphänomene in Betonporen (Diss.). (1966)
von Nils Valerian Waubke
- Heft 7: Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. (Diss.) (1967).
von Herbert Ehm -vergriffen-
- Heft 8: Möglichkeiten der Bestimmung der kritischen Last von Stab- und Flächentragwerken mit Hilfe ihrer Eigenfrequenz (Diss.). (1967)
von Joachim Steinert -vergriffen-
- Heft 9: Untersuchungen an dämmschichtbildenden Feuer-
schutzmitteln (Diss.). (1967)
von Axel Lämmke -vergriffen-
- Heft 10: Beitrag zur Frage der Kippstabilität aufgehängter Balkenträger und gerader, flächenartiger Träger (Diss.) (1968).
von Kamal Fouad Rafla -vergriffen-
- Heft 11: Die Traglast von offenen, kreisförmigen Stahlbetonquerschnitten - Brazier-Effekt - (Diss.). (1968)
von György Iványi -vergriffen-
- Heft 12: Brandverhalten verschiedener Bauplatten aus Baustoffen der Klassen A und B, insbesondere aus Baustoffen der Klasse A 2. (1969)
von Rüdiger Ottens -vergriffen-

- Heft 13: Zum Tragverhalten von kreisförmigen Doppelsilos unter Berücksichtigung der Eigensteifigkeit des Füllgutes. (Diss.) (1969).
von Günther Fuchs -vergriffen-
- Heft 14: Wände aus Holz und Holzwerkstoffen unter Feuerangriff. (1970)
von Claus Meyer-Ottens -vergriffen-
- Heft 15: Beurteilung von Bauwerksfestigkeiten an Hand von Betongütewürfeln und -bohrproben (Diss.). (1970)
von Ralf Lewandowski -vergriffen-
- Heft 16: Untersuchungen zur Frage der Rissesicherung von leichten Trennwänden aus Gips-Wandbauplatten. (Diss.) (1970).
von Fritz Joachim Neubauer -vergriffen-
- Heft 17: Brandverhalten von Bauteilen aus dampftgenartetem Gasbeton. (1970)
von Claus Meyer-Ottens und Karl Kordina
- Heft 18: Die Stahlblech-Holz-Nagelverbindung und ihre Anwendung - Grundlagen und Bemessungsvorschläge -. (Diss.) (1971).
von Wilfried Bödeker
- Heft 19: Bauaufsichtliche Brandschutzvorschriften - Beispiele für ihre Erfüllung bei Wänden, Brandwänden und Decken -. (1971)
von Claus Meyer-Ottens -vergriffen-
- Heft 20: Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbrückenpfeilern mit Rollenlagern (Diss.). (1972)
von Kurt Liermann
- Heft 21: Zum Trag- und Verformungsverhalten ebener Stockwerksrahmen aus Stahlbeton. (Diss.) (1972).
von Béla Jankó
- Heft 22: Zur Frage des Spannungsrißkorrosionsverhaltens kohlenstoffarmer Betonstähle in Nitratlösungen unter Berücksichtigung praxisnaher Verhältnisse (Diss.). (1972)
von Ulf Nürnberger
- Heft 23: Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. (Diss.) (1972).
von Claus Meyer-Ottens -vergriffen-
- Heft 24: Über die Steinkohlenflugasche und ihre Wirkung auf die Eigenschaften von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge im frischen und festen Zustand (Diss.). (1973)
von Hassan Taha El-Arousy

- Heft 25: Mechanismen der Spannungskorrosion von Spannstählen im Hinblick auf ihr Verhalten in Spannbetonkonstruktionen (Diss.). (1973)
von Günter Rieche
- Heft 26: Beitrag zur rechnerischen Ermittlung von Zwangsschnittgrößen unter Berücksichtigung des wirklichen Verformungsverhaltens des Stahlbetons (Diss.). (1974)
von Eckhard Tennstedt
- Heft 27: Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen (Diss.) (1973).
von Ulrich Schneider -vergriffen-
- Heft 28: Ein dreiparametrisches, komplexes Ultraschall-Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen (Diss.). (1974)
von Jürgen Neisecke -vergriffen-
- Heft 29: Traglastermittlung an Stahlbeton-Druckgliedern. (1974)
von Karl Kordina, Peter Maack und Olaf Hjorth
- Heft 30: Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit von Randbalken bei Stahlbetondecken. (1974)
von Josef Eibl und György Iványi -vergriffen-
- Heft 31: Stabilitätsnachweise von Rahmensystemen im Stahlbetonbau. (1974)
von Karl Kordina und Béla Jankó
- Heft 32: Ein Beitrag zur Frage der Festigkeiten und des Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten (Diss.) (1976).
von Olaf Hjorth -vergriffen-
- Heft 33: Traglastberechnung instationär thermisch belasteter Stahlbetondruckglieder mittels zwei- und dreidimensionaler Diskretisierung. (Diss.) (1976).
von Wolfram Klingsch -vergriffen-
- Heft 34: Thermische Zerstörung natürlicher Zuschlagstoffe im Beton (Diss.). (1977)
von Farid Djamous -vergriffen-
- Heft 35: Zur Frage des Trag- und Verformungsverhaltens ebener Stahlbetonrahmen im Brandfall (Diss.). (1977)
von Ataman Haksever -vergriffen-
- Heft 36: Ein Beitrag zur Traglastermittlung von vierseitig gelagerten Stahlbetonwänden (Diss.) (1977).
von Karl-Heinz Storkebaum
- Heft 37: Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall (Diss.). (1977)
von Rolf Bechtold

- Heft 38: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesbeton aus dem Wassereindringverhalten. (1978)
von Joachim Steinert
- Heft 39: Ein haufwerkstheoretisches Modell der Restfestigkeit geschädigter Betone (Diss.) (1978).
von Rolf Weiß
- Heft 40: Zum Schwingkriechen von Beton (Diss.). (1978)
von Willi Alda
- Heft 41: Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken mit rechteckigem Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion (Diss.). (1979)
von Manfred Teutsch
- Heft 42: Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. (Habil.-Schr.)(1979).
von Ulrich Schneider -vergriffen-
- Heft 43: Veröffentlichungen 1967 - 1979.(1979).
- Heft 44: Druckmessungen in Silozellen mit einer neu entwickelten Sonde. (1979)
von Karl Kordina und Helmut Fröning
- Heft 45: Ein Beitrag zur Zuverlässigkeit frei gelagerter Stahlbetonstützen unter genormter Brandeinwirkung. (Diss.) (1980).
von Volker Henke -vergriffen-
- Heft 46: Wärmebilanzrechnungen für Brandräume mit unterschiedlichen Randbedingungen (Teil I). (1981)
von Ulrich Schneider und Aysen Haksever -vergriffen-
- Heft 47: Partiiell brandbeanspruchte Stahlbetondecken - Berechnung des inneren Zwanges mit einem Scheibenmodell - (Diss.). (1981)
von Robert Walter
- Heft 48: Zum Verformungsverhalten gerissener Stahlbetonbalken unter Einschluß der Mitwirkung des Betons auf Zug in Abhängigkeit von Last und Zeit (Diss.). (1981)
von Björn Svensvik
- Heft 49: Veröffentlichungen 1967 - 1981.(1981).
- Heft 50: Die Steifigkeit und das Verformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegemoment, Querkraft und Axialkraft. (1982)
von Surendra K. Ojha
- Heft 51: Zusammenstellung und Anwendung Bayes'scher Verfahren bei der Stichprobenbeurteilung. (1982)
von Volker Henke

- Heft 52: Stahlbetonstützen mit Rechteckquerschnitten bei natürlichen Bränden (Habil.-Schr.TU Istanbul). (1982)
von Ataman Haksever
- Heft 53: Untersuchung des Riß- und Verformungsverhaltens segmentärer Spannbetonbauteile (Diss.). (1982)
von Vigo Weber ISBN 3-89288-017-4
- Heft 54: Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Bau-
stahl und Beton - Geklebte Bewehrung -. (Diss.)
(1982).
von Ernst-Holger Ranisch ISBN 3-89288-010-7
- Heft 55: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit
und Verformung von Beton. (Diss.) (1982).
von Günter Wiedemann -vergriffen-
- Heft 56: Ein geometrisch und physikalisch nichtlineares
Rechenmodell zur optimalen Biegebemessung ebener
Stahlbetonrahmen(Diss.)(1982).
von Reiner Timm ISBN 3-89288-018-2
- Heft 57: Untersuchungen über den Verbund zwischen Stahl
und Beton bei hohen Temperaturen (Diss.). (1983)
von Ulrich Diederichs ISBN 3-89288-019-0
- Heft 58: Wärmebilanzrechnungen in Verbindung mit Versuchen
in Brandräumen (Teil II). (1983)
von Ulrich Schneider ISBN 3-89288-020-4
- Heft 59: Wärmebilanzrechnungen in Brandräumen unter Be-
rücksichtigung der Mehrzonenmodellbildung
(Teil III). (1983)
von Dobbernack; Schneider ISBN 3-89288-021-2
- Heft 60: Verbesserungen und Erweiterungen von Ultraschall-
prüfverfahren zur zerstörungsfreien Fehlstellen-
und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen
(Diss.). (1983)
von Wolfgang Hillger ISBN 3-89288-014-X
- Heft 61: Zur Wirklichkeitsnähe der Lastannahmen in Silo-
vorschriften für Zellen aus Stahlbeton und Spann-
beton. (Diss.)(1984).
von Franz Blume ISBN 3-89288-013-1
- Heft 62: Das Durchstanzen von Platten aus Stahlbeton
- Tragverhalten, Berechnung, Bemessung - (Diss.).
(1984)
von Diedrich Nölting ISBN 3-89288-012-3
- Heft 63: Tragverhalten von Stahlbetonplatten im bauprakti-
schen Einbauzustand bei Brandbeanspruchung
(Diss.). (1985)
von Jürgen Wesche ISBN 3-89288-009-3
- Heft 64: Untersuchungen zur Technologie des Gleitschal-
lensbaus (Diss.). (1985)
von Siegfried Broese ISBN 3-89288-000-X

- Heft 65: Forschungsarbeiten 1976 -1983. (1984)
Hrsg.: Inst. für Baustoffe ISBN 3-89288-001-8
- Heft 66: Einfluß der Verbundart auf die Grenztragfähigkeit
von Spannbetonbalken. (Diss.)(1985).
von Josef Hegger ISBN 3-89288-002-6
- Heft 67: Zum Tragverhalten von Verankerungen für hochfeste
Stäbe aus Glasfaserverbundwerkstoff als Bewehrung
im Spannbetonbau (Diss.). (1985)
von Bernhard Kepp ISBN 3-89288-003-4
- Heft 68: Zum Einfluß hoher Temperaturen auf das Verbund-
verhalten von einbetonierten Bewehrungsstäben
(Diss.). (1985)
von Helmut Sager ISBN 3-89288-004-2
- Heft 69: Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beur-
teilung von Stützen aus Stahl und Beton (Diss.).
(1986)
von Rüdiger Haß ISBN 3-89288-005-0
- Heft 70: 17. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschus-
ses für Stahlbeton. März 1986. Kurzfassungen
der Beiträge. (1986) ISBN 3-89288-006-9
- Heft 71: Versuche zur Festigkeit und Verformung von Beton
unter zweiaxialer Beanspruchung und hohen Tempe-
raturen. (Diss.) (1986).
von Christian Ehm ISBN 3-89288-007-7
- Heft 72: Zum Riß- und Verformungsverhalten von stahlfaser-
verstärkten Stahlbetonstäben unter Längszug.
(Diss.). (1986).
von Kurt Hartwich ISBN 3-89288-008-5
- Heft 73: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Verbund und
Rißbildung von Stahlbetonbauteilen. (Diss.).
(1987).
von Jochen Scheuermann ISBN 3-89288-011-5
- Heft 74: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschrei-
bung der thermischen Schädigung von Beton.
(Diss.). (1987).
von Konrad Hinrichsmeyer ISBN 3-89288-015-8
- Heft 75: Fachseminar Neue Bemessungsregeln durch Änderung
der Stahlbeton- und Spannbetonvorschriften DIN
1045, DIN 4227. Kurzfassungen der Beiträge.
(1986). ISBN 3-89288-022-0
- Heft 76: Zum Einfluß erhöhter Temperatur auf Festigkeit
und Verformung von Beton mit unterschiedlichen
Feuchtegehalten. (Diss.). (1987).
von Harald Budejmann ISBN 3-89288-016-6

- Heft 77: Spannungen und bruchmechanische Vorgänge im Normalbeton unter Zugbeanspruchung. (Diss.). (1987).
von Fritz Großmann ISBN 3-89288-023-9
- Heft 78: Zum Einfluß des Verbundkriechens auf die Ribbreitenentwicklung sowie auf die Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen. (Diss.). (1987).
von Annette Rohling ISBN 3-89288-024-7
- Heft 79: Zwangrißbildung und Bewehrung von Stahlbetonwänden auf steifen Unterbauten. (Diss.). (1987).
von Wolfgang Henning ISBN 3-89288-025-5
- Heft 80: Zur Berechnung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Spannbetonbauteile unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen für die Materialgesetze (Diss.). 1987.
von Ekkehard Richter ISBN 3-89288-026-3
- Heft 81: Nichtlineare Berechnung ebener Stahlbetonflächen-tragwerke unter Einschluß von Brandbeanspruchung. (Diss.). (1987).
von Michael Kiel ISBN 3-89288-027-1
- Heft 82: Polymerspezifische Auswirkungen auf das Tragverhalten modifizierter zementgebundener Betone (PCC). (Diss.). (1988).
von Andreas Konietzko ISBN 3-89288-028-X
- Heft 83: Zum Trag- und Verformungsverhalten schlanker Stahlbetonstützen unter besonderer Berücksichtigung der schiefen Biegung (Diss.). (1988).
von Rainer Grzeschkowitz ISBN 3-89288-030-1
- Heft 84: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter partieller Brandbeanspruchung (Diss.). (1988).
von Jürgen Wiese ISBN 3-89288-031-X
- Heft 85: Traglastberechnung zweiachsig biegebeanspruchter Stahlbetonstützen unter Brandeinwirkung (Diss.). (1987). (1988).
von Karl Rudolph ISBN 3-89288-032-8