

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

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Direktoren:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. K. Kordina

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

**VERSUCHE ZUR FESTIGKEIT
UND VERFORMUNG VON BETON
UNTER ZWEIAXIALER BEANSPRUCHUNG
UND HOHEN TEMPERATUREN**

von

Christian Ehm

Heft 71

BRAUNSCHWEIG

1986

ISSN 0178-5796



**UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK**

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

Eingereicht am: 13.05.1985
Mündliche Prüfung am: 18.12.1985

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Schneider

Vorwort

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

Mein Dank gilt daher den Herren Professoren Dr.-Ing. Dr.-Ing. eh. K. Kordina und Dr.-Ing. F.S. Rostásy für die in jeder Hinsicht großzügig gewährte Möglichkeit, die Einrichtungen des von ihnen geleiteten Instituts zur Durchführung der Untersuchungen zu nutzen.

Die Arbeit baut auf Untersuchungen auf, die im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Sonderforschungsbereiches 148 "Brandverhalten von Bauteilen" durchgeführt wurden. An dieser Stelle sei daher der fördernden Institution gedankt.

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. habil. U. Schneider für zahlreiche Hinweise und die Bereitschaft, die Berichterstattung zu übernehmen. Ebenso gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. F.S. Rostásy für die Durchsicht der Arbeit und die Berichterstattung.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz möchte ich mich für die jederzeit gute Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere danke ich Herrn H.-J. Wolff für die umsichtige und sorgfältige Durchführung der zahlreichen schwierigen Versuche.

Braunschweig, im Dezember 1985

Christian Ehm

<u>Inhalt</u>	Seite
1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Stand der Kenntnisse	5
3. Entwicklung und Bau einer Versuchsanlage für zweiachiale Betonversuche bei hohen Temperaturen	15
3.1 Allgemeines	15
3.2 Probekörper	15
3.3 Belastungsrahmen	16
3.4 Lasteintragungs konstruktion	18
3.4.1 Anforderungen	18
3.4.2 Vergleichsuntersuchungen mit unterschiedlichen Lasteintragungen	20
3.4.3 Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit	23
3.5 Belastungsregelung	25
3.6 Ofen und Heizungsregelung	27
3.7 Meßsysteme und Meßwerterfassung	29
3.7.1 Belastungsmessungen	29
3.7.2 Verformungsmessungen	29
3.7.3 Temperaturmessungen	31
3.7.4 Meßwerterfassung	32
4. Versuchsprogramm	33
4.1 Ziel	33
4.2 Parameter der Untersuchungen	34
4.2.1 Beton	34
4.2.2 Mechanische Beanspruchungen	35
4.2.3 Thermische Beanspruchungen	35
4.3 Temperatur - Last - Programme und Durchführung der Versuche	35
5. Ergebnisse der Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten	39
5.1 Allgemeines	39
5.2 Bruchverhalten	39
5.3 Zweiachiale Hochtemperaturdruckfestigkeit	42

5.4	Druckfestigkeitsverhalten bei 150°C	49
5.5	Bruchgrenzkurven	54
5.5.1	Bedeutung der Bruchgrenzkurven	54
5.5.2	Analytische Formulierung der Bruchgrenzkurven	54
6.	Ergebnisse der Untersuchungen zum Verformungs- und Relaxationsverhalten	57
6.1	Allgemeines	57
6.2	Verformungen bei stationären Temperaturen	57
6.2.1	Dehnungen in den Hauptachsen	57
6.2.2	Volumenverformungen	66
6.2.3	Querdehnzahlen	69
6.2.4	Arbeitsvermögen	71
6.3	Verformungen unter instationärer Temperatur- beanspruchung	74
6.3.1	Gesamtverformungen	74
6.3.2	Kritische Temperaturen	77
6.3.3	Mechanisch verursachte Verformungsanteile	78
6.3.4	Volumenverformungen	81
6.4	Zwängungskräfte bei vollständiger Dehnungs- behinderung	84
7.	Ein rißmechanisches Modell zur Diskussion des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Normalbeton	88
7.1	Allgemeines	88
7.2	Verhalten der einzelnen Betonbestandteile	88
7.2.1	Zementstein	88
7.2.2	Zuschlag	89
7.2.3	Poren- und Rißsysteme	90
7.3	Rißbilder in beanspruchten Normalbetonprobe- körpern	97
7.4	Spannungsverteilungen in beanspruchtem Normalbeton	99
7.5	Kräfteverläufe und Verformungsverhalten	103
7.6	Rißmechanismen und ihre Auswirkungen auf das Festigkeitsverhalten	105
8.	Zusammenfassung und Ausblick	111
9.	Literatur	116

Abkürzungen und Indices

Abkürzungen

A	Arbeitsvermögen	J
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
F	Belastungskraft	N
H	Haltezeit	h
V	Volumen	mm ³
T	Temperatur	°C
dT/dt	Temperaturanstieg	K/min
a	Probekörperabmessung	mm
r	Radius	µm
s	Verformungsweg	mm
t	Zeit	min
α	Belastungsgrad	%
β	Festigkeit	N/mm ²
ε	Dehnung	‰
κ	Belastungsverhältnis σ_2/σ_1	-
μ	Querdehnzahl $ \varepsilon_3/\varepsilon_1 $	-
σ	Hauptspannung	N/mm ²

Indices

1, 2, 3	Richtung der Hauptachsen
0,3	Eigenschaft bei 0,3 β ₀
T	Eigenschaft bei der Temperatur T
o	Ausgangseigenschaft
p	Prisma
v	Volumen
crit	kritisch, Versagen
el	elastisch
kr	Kriechen
mech	mechanisch
therm	thermisch
tot	total
u	Bruch

1. Einleitung und Problemstellung

Das Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter hohen Temperaturen wird vom Hochtemperaturverhalten des Betons maßgeblich beeinflusst. Aus diesem Grund sind bereits umfangreiche Untersuchungen über den Einfluß hoher Temperaturen auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Betons durchgeführt worden.

Hohen Temperaturen ist der Beton z.B. in Bauwerken der Energietechnik und in besonderem Maß im Fall eines Brandes ausgesetzt.

Dabei unterliegt der Beton unterschiedlichen Temperaturschichten. In Energiebauwerken herrschen, nach einer kurzen Aufheizphase, im wesentlichen stationäre Temperaturverhältnisse. In brandbeanspruchten Bauwerken treten fast ausschließlich instationäre Temperaturverläufe auf.

Die mechanische Beanspruchung des Betons in einem Bauteil ist zum größten Teil mehraxial. Einaxiale Spannungszustände lassen sich nur in Bereichen von stabförmigen Bauteilen wie z.B. Stützen finden. Zweiaxiale Beanspruchungsfälle kommen überwiegend in flächenartigen Bauteilen wie z.B. Decken vor.

Für materialkundlich orientierte Untersuchungen des Verhaltens unbewehrten Betons unter unterschiedlichen mechanischen und thermischen Beanspruchungen haben sich Versuchsarten als vorteilhaft herausgestellt, durch die sich Spannungs-Verformungsbeziehungen in Abhängigkeit von Spannungszustand und stationären oder instationären Temperaturen gewinnen lassen. Von Interesse ist dabei hauptsächlich das Verhalten unter Druckbeanspruchung.

Bei der Durchführung dieser Untersuchungen führen Versuche bei Raumtemperatur unter einaxialen Bedingungen bei geringstem Aufwand an versuchs- und meßtechnischer Ausstattung zu reproduzierbaren und vergleichbaren Ergebnissen. Die Versuchsführung unter diesen Bedingungen wurde deshalb auch ver-

einheitlich, und die Ergebnisse dieser Versuche dienen als Bezugsgrößen für weitergehende Untersuchungen.

Die Versuchstechnik für Untersuchungen unter zwei- oder dreiachsender mechanischer Beanspruchung bei Raumtemperatur erfordert bereits einen großen Aufwand, um zu exakten Materialkennwerten unter genau eingehaltenen Bedingungen zu gelangen.

Der versuchstechnische Aufwand vergrößert sich beträchtlich, wenn bei höheren Temperaturen als Raumtemperatur experimentiert wird. Aus diesem Grund wurden bisher stationäre und instationäre Hochtemperaturversuche im wesentlichen nur unter einaxialen Bedingungen im Druckbereich durchgeführt. Verformungsmessungen blieben dabei oft wegen unzureichender apparativer Ausstattungen auf die Richtung der belasteten Achse beschränkt.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen ist bekannt, daß sich bei Raumtemperatur das Verhalten von Beton unter zweiachsender Beanspruchung wesentlich von dem unter einaxialer Beanspruchung unterscheidet. Zugleich wurde bei diesen Versuchen aber auch deutlich, daß die Versuchsanlage und die Versuchsdurchführung erheblichen Einfluß auf die Ergebnisse haben. Als besondere Einflußgrößen stellten sich dabei die Gestalt der Probekörper und die Art der Lasteintragung heraus.

Die Änderungen der einaxialen Eigenschaften von Beton unter dem Einfluß hoher Temperaturen sind ebenfalls im großen und ganzen bekannt. Die wichtigsten Einflußfaktoren sind dabei naturgemäß thermischer Art.

Hochtemperaturuntersuchungen an Beton unter zweiachsender Beanspruchung wurden wegen des damit verbundenen versuchstechnischen Aufwands nur vereinzelt durchgeführt. Der Kenntnisstand über das Verhalten von Beton unter zweiachsender Beanspruchung und hohen Temperaturen basiert daher zum weitaus größten Teil auf theoretischen Überlegungen. In einaxialen Hochtemperaturversuchen und in zweiachsenden Raumtemperatur-

versuchen gewonnene Ergebnisse wurden auf zweiachiale Hochtemperaturverhältnisse extrapoliert. Dabei stellt sich aber die Frage, ob dieses Vorgehen zu richtigen Ergebnissen führt. Eine Antwort darauf konnten nur experimentelle Untersuchungen bringen, bei denen die mechanischen und thermischen Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind.

Zu diesem Zweck wurde eine Prüfanlage konzipiert, deren Bau und Erprobung für Untersuchungen im Druck-Druck-Bereich ein Ziel der vorliegenden Arbeit war. Ausführlich wird dabei auf das Problem der definierten Lasteintragung in die Probekörper eingegangen. Die Realisierung einer gleichmäßigen Temperaturverteilung und die Entwicklung hochtemperaturgeeigneter Meßsysteme sind weitere Schwerpunkte dieses Abschnitts.

Das mit dieser Anlage durchgeführte Versuchsprogramm beinhaltet die Versuche, die zur grundsätzlichen Klärung des zweiachsialen Hochtemperaturverhaltens von Beton notwendig sind. Normalbeton, Mörtel und Leichtbeton, die Betone mit besonders charakteristischen Kennwerten vertreten, sind deshalb die untersuchten Materialien.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden nach Festigkeitsverhalten und nach Verformungs- und Relaxationsverhalten unterteilt.

Im Festigkeitsteil werden die Ergebnisse der Untersuchungen bei stationären Temperaturen vor allem in Hinblick auf die Festigkeitserhöhung unter zweiachsialer Druckbeanspruchung betrachtet. Besonders ausführlich wird dabei auf den Temperaturbereich 70-200°C eingegangen, in dem das Festigkeitsverhalten wesentlich von der Zeit der Temperaturbeanspruchung abhängt.

Im Verformungsteil wird in stationäre und instationäre Temperaturbeanspruchung unterschieden. Bei stationären Temperaturen werden die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen angegeben. Aus den bei Aufheizung gemessenen Gesamtverformungen in den drei Achsen werden Volumenverformungen und Kriechver-

formungen berechnet.

Analytische Formulierungen des Festigkeits- und Verformungsverhaltens unter zweiaxialer Druckbeanspruchung bei konstanten Temperaturen schließen sich an die jeweiligen Kapitel an.

Im Schlußteil wird das Verhalten der einzelnen Bestandteile des heterogenen Systems Beton unter thermischer und mechanischer Beanspruchung dargestellt. Besonders ausführlich wird auf Poren- und Rißsysteme eingegangen.

Auf der Grundlage der Kenntnisse der Spannungsverteilungen und der Kräfteverläufe in beanspruchtem Beton wird mit Hilfe einer rißmechanischen Betrachtungsweise das zweiaxiale Hochtemperaturdruckfestigkeitsverhalten zumindest phänomenologisch interpretiert.

2 Stand der Kenntnisse

Untersuchungsergebnisse über das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton unter kurzzeitiger zweiachialer Druckbeanspruchung und hohen Temperaturen liegen bisher nur in Form eines kurzen vorläufigen Berichtes vor /1/. Der Autor stellt bei Temperaturen bis zu 600°C eine Erhöhung der Festigkeit unter zweiachialer Beanspruchung gegenüber der Festigkeit unter einachialer Beanspruchung fest. Diese Festigkeitserhöhung ist bei höheren Temperaturen größer als bei Raumtemperatur. Die Verformungsmessungen werden wegen nicht zufriedenstellender Technik als nicht reproduzierbar bezeichnet.

In /2/ wird eine Prüfanlage beschrieben, mit der mehrachiale Untersuchungen bei Temperaturen bis zu 500°C durchgeführt werden können. Ergebnisse werden aber nur von Kalibrierversuchen bei Raumtemperatur mitgeteilt.

Von Untersuchungen mit einer "Triaxialen Hochtemperatur-Torsions-Prüfanlage", die von Bazant entworfen wurde /3/, liegen noch keine Ergebnisse vor.

Kriechuntersuchungen unter zweiachialer Beanspruchung bei Temperaturen bis zu 100°C wurden im Hinblick auf die Anwendung von Beton im Spannbetondruckbehälterbau durchgeführt.

Arthanari und Yu /4/ stellten eine Abnahme der Kriechverformungen von scheibenförmigen Probekörpern im Temperaturbereich von 20-80°C fest, wenn die Probekörper nicht einachial, sondern symmetrisch zweiachial belastet wurden.

McDonald /5/ führte mehrachiale Kriechuntersuchungen im Temperaturbereich bis zu 66°C an zylinderförmigen Probekörpern durch. Die Kriechverformungen längs der am stärksten belasteten Achse waren stark vom Spannungsverhältnis abhängig. Sie wurden durch einen dreiachialen Spannungszustand um 16% und durch einen zweiachialen Spannungszustand um 29% des Wertes unter einachialer Spannung vermindert.

Auch Aschl et al. /6/ stellten bei erhöhten Temperaturen bis zu 80°C durch die Behinderung des Querkriechens eine Reduzie-

zung des Kriechens in Längsrichtung fest.

Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen an Mörtel und Beton unter mehraxialer Beanspruchung bei Raumtemperatur sind in der Vergangenheit mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Belastungskombinationen durchgeführt worden. Die Untersuchungen lassen sich am besten hinsichtlich der verwendeten Probekörperform unterteilen.

Im Rahmen von mehraxialen Untersuchungen an Voll- und Hohlzylindern wurden zweiaxiale Druckversuche unter hydraulischer Druckbeaufschlagung durchgeführt.

Richart, Brandtzaeg und Brown /7/ erzielten an Vollzylindern Festigkeitssteigerungen gegenüber der einaxialen Festigkeit von -9 bis +67%, wobei eine Häufung der Ergebnisse bei 10 bis 50% lag. Akroyd /8/, Fumagalli /9/ und Chinn und Zimmermann /10/ konnten diese Ergebnisse im wesentlichen bestätigen. Bei Druck-Druck-Versuchen an Hohlzylindern wurden recht unterschiedliche Festigkeitssteigerungen beobachtet: Bellamy /11/ konnte Werte bis zu 30% verzeichnen, während Malcov und Pak /12/ Werte von -20 bis +20% erhielten.

Eine Übersicht über zweiaxiale Versuche bei Raumtemperatur an Würfeln und Scheiben im Druck-Druck-Bereich ist auf Tabelle 1 gegeben.

Die erste bekannt gewordene Arbeit auf diesem Gebiet stammt von Föppl /13/, der bereits den festigkeitssteigernden Einfluß erkannte, den starre Lasteintragungsplatten auf den Probekörper ausüben. Verursacht wird diese Festigkeitssteigerung durch Zwängungskräfte, die infolge der Querdehnungsbehinderung des Betons durch Reibung zwischen Lasteintragung und Probekörper aufgebaut werden. Eine von Föppl zwischen Probekörper und Lasteintragungsplatte aufgebrachte Schmierschicht führte jedoch zu einer ungleichmäßigen Lasteintragung und zu einer Festigkeitsminderung.

Die in der Folgezeit von anderen Forschern (z.B. Wästlund

Tabelle 1 Zweiaxiale Druckuntersuchungen an Scheiben und Würfeln bei Raumtemperatur

Name	Probekörper [cm] Material	Lasteinleitung	max.zwei-ax.Festig- keit/ein-axiale Festigkeit	Bemerkungen
Föppl /13/	Würfel 7 x 7 x 7 Mörtel	starre Platten mit verschiedenen Zwi- schenschichten zum Probekörper	0,9 - 1,87	Das Material der Zwischenschich- ten hat großen Einfluß auf die erzielte zwei-axiale Festigkeit
Wästlund /14/	Würfel 15 x 15 x 15 Beton	starre Platten mit Gummiunterlagen zum Probekörper	1,15	Das Versagen der Probekörper geschieht durch Rißöffnung in Richtung der größten Zugdehnung
Glomb /15 /	Würfel 10 x 10 x 10 20 x 20 x 20 2 Betone	starre Platten mit Paraffinschmierung zum Probekörper	1,25 - 1,50	Größte Festigkeitssteigerung bei zwei-ax. Beanspruchung gegen- über ein-ax. Beanspruchung bei $\sigma_1 : \sigma_2 = 1,0$; Die Qualität des Betons hat kei- nen Einfluß auf die Festig- keitssteigerung
Weigler/Becker /16/	Scheibe 10 x 10 x 2,5 Zementstein 3 Betone	starre Platten	1,10 - 1,20	Minimale Änderungen der Festig- keit des Zementsteins bei zwei-ax. Beanspruchung gegenüber ein-ax. Beanspruchung
Sundara Raja Iyengar et al. /17/	Würfel 10 x 10 x 10 15 x 15 x 15 Mörtel Beton	starre Platten	3,10 - 3,60	Es wird ein drei-ax. Spannungs- zustand in den Probekörpern ver- mutet
Vile /18/	Scheibe 25 x 25 x 10 Mörtel Leichtbeton Normalbeton	starre Platten	1,30 - 1,25 - 1,45	"selbstjustierender" Bela- stungsrahmen
Opitz /19/	Scheibe 20 x 20 x 5	starre Platten mit Zwischenschichten aus PTFE und Messing		Festigkeitssteigerungen bei zwei-ax. Beanspruchung gegenüber ein-ax. Beanspruchung: max. ~ 30 % bei $\sigma_1 : \sigma_2 = 0,6$, ~ 20 % bei $\sigma_1 : \sigma_2 = 1,0$; nur geringe Unterschiede im Festigkeitsverhalten der verschiedenen Betone
Neissen /20/	Scheibe 18 x 18 x 13 2 Betone	Belastungsbürste		
Kupfer /23/	Scheibe 20 x 20 x 5 3 Betone	Belastungsbürste		
Liu/Nilson/ Slate /24/ und Buyukozturk/ Nilson/Slate /25/	Scheibe 12,7 x 12,7 x 1,3 Normalbeton Modellbeton	Belastungsbürste		
Linse/Steg- bauer /26/	Scheibe 20 x 20 x 5 Zementstein Leichtbeton Gasbeton	Belastungsbürste		bei zwei-ax. Beanspruchung: sehr geringe Festigkeitssteigerung beim Zementstein geringe Festigkeitssteigerung bei Leichtbeton und Gasbeton gegenüber ein-ax. Beanspruchung
Schickert/ Winkler /27/	Würfel 10 x 10 x 10 Mörtel Beton	schlaffe Druckplatte		Festigkeitssteigerungen bei zwei-ax. Beanspruchung: bei Mörtel: 13 - 17 % bei Beton: 21 - 25 % gegenüber ein-ax. Beanspruchung
Gerstle et al. /28/ und /29/	Würfel, Zylin- der, Scheibe; Mörtel, Beton	starre Platten, schlaffe Platten, Belastungsbürsten, Öl, Druckfissen		

/14/ und Glomb /15/) verwendeten Zwischenschichten aus Materialien mit geringem Reibungswert erbrachten Druckfestigkeitsteigerungen gegenüber der einaxialen Festigkeit von 15 bis 50%.

Weigler und Becker /16/ benutzten für ihre Untersuchungen dünne Scheiben auf Grund der Erkenntnis, daß sich in Scheiben der zweiaxiale Spannungszustand am besten darstellen läßt. Sie stellten bei zweiaxialer Beanspruchung Festigkeitserhöhungen von 33 - 40% gegenüber der einaxialen Druckbeanspruchung fest. Durch zweiaxiale Beanspruchungen vergrößerten sich die Bruchdehnungen gegenüber der einaxialen Beanspruchung in der ersten und der dritten Achse. Die aus den drei Dehnungen berechneten belastungsabhängigen Volumenabnahmen der Probekörper waren bei symmetrisch zweiaxialer Beanspruchung am größten.

Hilsdorf /21/ zeigte, daß die Querdehnungsbehinderung durch die Verwendung von sogenannten Bürsten stark reduziert wird. Bei dieser Lasteintragungskonstruktion ist die starre Platte in viele kleine Elemente aufgeteilt. Damit läßt sich eine nahezu zwängungsfreie Lasteintragung und, in Verbindung mit scheibenförmigen Probekörpern, ein definierter zweiaxialer Spannungszustand realisieren.

Mit der von Kupfer und Zelger /22/ gebauten Versuchseinrichtung für zweiachsige Belastung führte Kupfer /23/ Untersuchungen im zweiaxialen Druck-Druck-, Zug-Druck- und Zug-Zugbereich durch und wies nach, daß die über Stahlbürsten belasteten scheibenförmigen Probekörper die wahre zweiaxiale Festigkeit besitzen. Im Druck-Druck-Bereich bedeutet das, daß die Festigkeit bei zweiaxialer Beanspruchung vom Beanspruchungsverhältnis abhängt und maximal 30% höher als die einaxiale Festigkeit ist. Das Verformungsverhalten stimmt mit dem von Weigler und Becker ermittelten im wesentlichen überein.

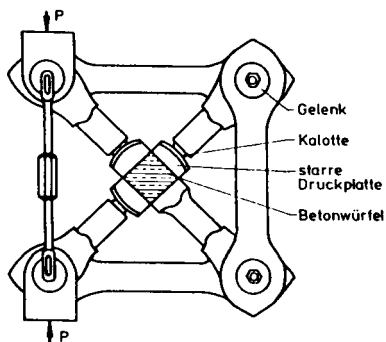
Auch Liu et al. /24/ und Buyukozturk et al. /25/ verwendeten Bürsten und scheibenförmige Probekörper für zweiaxiale Druckversuche. Ihre Versuche an Modellbetonen dienten hauptsächlich dem Studium der Rißausbreitung und des Versagensmecha-

nismus von bis zum Bruch belasteter Probekörper und der Entwicklung von analytischen Spannungs-Dehnungsbeziehungen. Schickert und Winkler /27/ konstruierten ein auf Elastomerkissen gelagertes Stempelsystem zur Krafteinleitung, das sie "schlafte Druckplatte" nannten, und mit dem sie eine nahezu gleichmäßige Spannungsverteilung an der Berührungsfläche zwischen Probekörper und Druckplatte erreichten. Ähnliche Festigkeitsergebnisse wie Schickert und Winkler /27/ ermittelten Gerstle und Ko, die ein hydraulisches Druckkissen zur Eintragung der Druckkräfte verwendeten (siehe /28,29/).

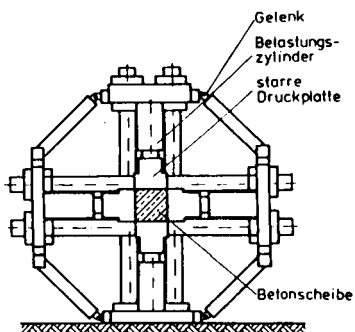
Auf Bild 1 ist die Entwicklung der Belastungseinrichtungen von Föppl /13/ bis Kupfer und Zelger /22/ dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, daß durch erhöhten technischen Aufwand versucht wurde, die tatsächlichen oder "wahren" Eigenschaften von Beton unter den gegebenen Beanspruchungsverhältnissen festzustellen.

Während Föppl /13/ in dem von ihm konstruierten mechanischen Druckkreuz nur symmetrische zweiachiale Druckbeanspruchungen ausführen konnte, waren Weigler und Becker /16/ in der Lage, mit Hilfe eines mechanischen Kraftzerlegungsrahmens unterschiedliche zweiachiale Spannungsverhältnisse zu erzeugen. Der von Vile /18/ gebaute Belastungsrahmen war mit hydraulischen Belastungszyindern versehen. Die Gelenke bewirkten eine "Selbstjustierung" des Rahmens, so daß der Schnittpunkt der Belastungslinien immer in der Probekörpermitte blieb. Auch Kupfer und Zelger /22/ verwendeten ein hydraulisches Belastungssystem mit zwei Belastungsrahmen und jeweils einem Belastungszyylinder und einem festen Widerlager pro Achse. Der Probekörpermittelpunkt wird zwar dadurch bei Belastung verschoben, doch durch die bewegliche Aufhängung des einen Rahmens und der Verwendung von Bürsten als Lasteintragungskonstruktion konnten negative Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse vermieden werden.

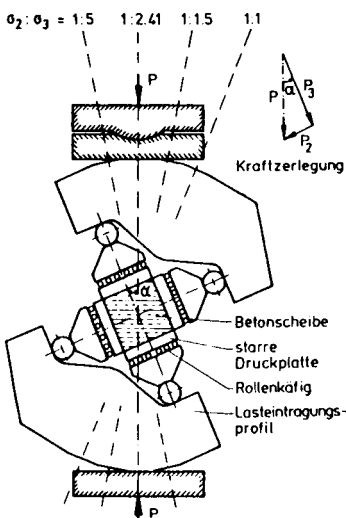
Bild 2 zeigt eine Übersicht über benutzte Lasteintragungssysteme, deren Auswirkungen auf die Festigkeitserhöhung bei zweiachialer Druckbeanspruchung auf Bild 3 dargestellt sind.



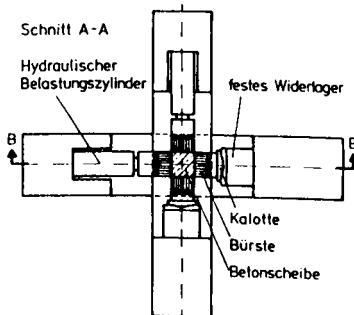
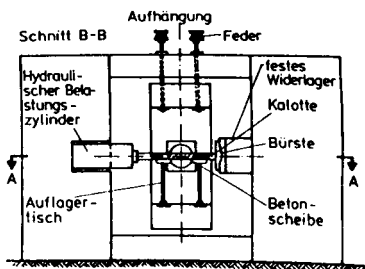
Druckkreuz nach Föppl /13/



Belastungsrahmen nach Vite /18/



Zweiachsige Druckvorrichtung nach Weigler /Becker /16/



Belastungsrahmen nach Kupfer /Zelger /22/

Bild 1 Entwicklung der Belastungseinrichtungen für zweiachsiale Druckbeanspruchungen bei Raumtemperatur

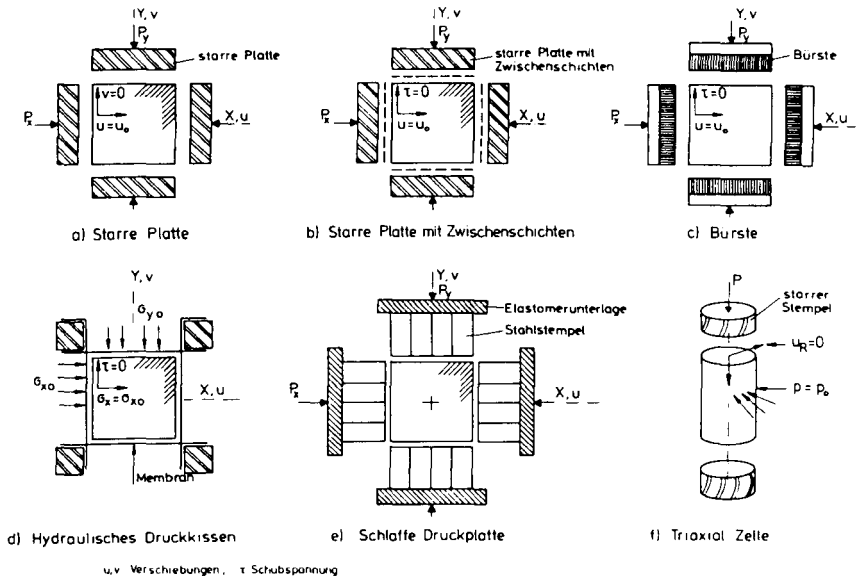
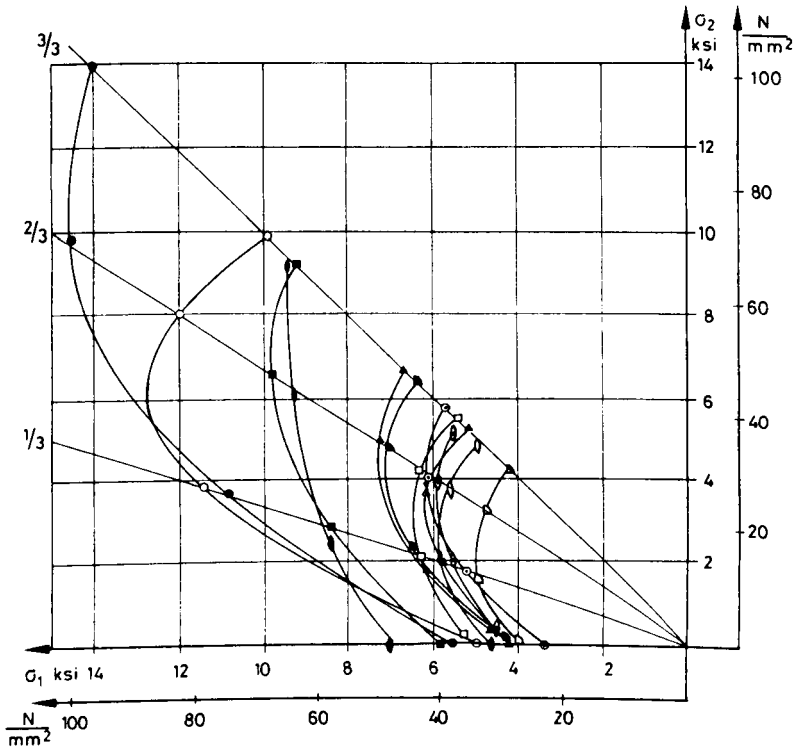


Bild 2 Lasteintragungssysteme bei mehraxialen Untersuchungen (nach /28/)

Diese bei internationalen Vergleichsversuchen /28, 29/ ermittelten Ergebnisse zeigen deutlich auf, welchen Einfluß die Versuchsanordnung auf die Resultate hat. So wurden für den gleichen Beton zweiachsigle Druckfestigkeiten von 24 N/mm^2 (Lasteintragung mit Bürsten) und 52 N/mm^2 (Lasteintragung mit massiven Platten) gemessen. Die bei allen Untersuchungen festgestellten Festigkeitssteigerungen bei zweiachsigler Beanspruchung betragen zwischen 30 % und 90 % gegenüber einaxialer Beanspruchung.

Kriechuntersuchungen unter zweiachsiglem Druck bei Raumtemperatur wurden u.a. von Ross /30/, Meyer /31/ und Gopalakrishnan et al. /32/ durchgeführt. Die Autoren stellten übereinstimmend eine Abnahme der Kriechverformungen gegenüber einaxialer Druckbeanspruchung fest.



Forschungsinstitut	Krafteinleitung
■ Bundesanstalt für Materialprüfung :	starre Platten
□ Bundesanstalt für Materialprüfung :	schlafte Platten
■ Ente Nazionale per Energia Elettrica :	starre Platten
▷ Ente Nazionale per Energia Elettrica :	geschmierte Platten
● University of California :	starre Aluminiumplatten
○ University of California :	geschmierte Aluminiumplatten
◉ University of California :	Bürsten
● New Mexico State University :	starre Platten
○ New Mexico State University :	geschmierte Platten
◉ TU München :	Bürsten
▲ Imperial College of Science and Industry :	starre Platten
▲ University of Colorado :	hydraulische Druckkissen

Bild 3 Zweiaxiale Druckfestigkeitsergebnisse internationaler Vergleichsversuche (nach /28/)

Eine große Anzahl von Ergebnissen liegt von Untersuchungen über das Verhalten von Beton unter einaxialer Beanspruchung und hohen Temperaturen vor.

Der Stand der Kenntnisse des mechanischen und physikalischen Verhaltens bei Temperaturen bis zu 1350°C ist von Schneider in /33/ und /34/ zusammengefaßt worden. Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde dabei vom Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen" erarbeitet (siehe /35/). Eine Übersicht über das Hochtemperaturverhalten von Beton im Zusammenhang mit dem Brandverhalten von Stahlbetonbauteilen wird von Kordina und Meyer-Ottens /36/ gegeben. Ergebnisse spezieller Untersuchungen zur Verwendung von Beton in Bauwerken der Energietechnik mit erhöhten Betriebstemperaturen sind in /37/ zusammengefaßt.

Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von Beton unter einaxialer Beanspruchung, ihre Änderungen bei Temperatureinwirkung und die wesentlichen Einflußfaktoren sind danach:

- Druckfestigkeit: die einaxiale Druckfestigkeit nimmt mit steigender Temperatur stark ab. Wesentlichen Einfluß auf den Festigkeitsverlust haben die Zuschlagsart, die Zementmenge und die Vorbelastung.
- Elastizitätsmodul: der E-Modul wird mit steigender Temperatur stark abgemindert. Von Einfluß sind Zuschlagart und Vorbelastung.
- Spannungs-Dehnungs-Beziehung: hohe Temperaturen haben wesentlichen Einfluß auf den Verlauf der Spannungs-Dehnungslinien. Die Bruchstauchung nimmt mit steigender Temperatur erheblich zu. Wiederum ist die Zuschlagart ein wesentlicher Faktor. Darüberhinaus sind die Versuchsbedingungen mit zu berücksichtigen.
- Kriechen: hohe Temperaturen bewirken einen bedeutenden Anstieg der Kriechgeschwindigkeit. Die Kriecheigenschaften bei instationärer Temperaturbeanspruchung werden entscheidend durch die Höhe der Belastung beeinflusst.
- Zwangsspannungen: die stark zunehmenden Zwängungskräfte bei

instationärer Temperaturbeanspruchung werden hauptsächlich vom Zuschlag/Zement-Verhältnis, von der Zuschlagsart und dem Feuchtegehalt beeinflusst.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Hochtemperaturversuche unter einaxialer Beanspruchung ($\sigma_2 = 0$) als Sonderfall der zweiaxialen Beanspruchung ebenso durchgeführt wie zweiaxiale Untersuchungen bei Raumtemperatur ($T = 20^\circ\text{C}$) als Sonderfall der Hochtemperaturbeanspruchung. Die dabei erzielten Ergebnisse stimmen mit den beschriebenen Eigenschaftsänderungen von Beton bei Temperatureinwirkung bzw. zweiaxialer Beanspruchung überein. Die einzelnen Beziehungen können den entsprechenden Bildern im Ergebnisteil der Arbeit entnommen werden.

3. Entwicklung und Bau einer Versuchsanlage für zweiachiale Betonversuche bei hohen Temperaturen

3.1 Allgemeines

Die mechanischen Untersuchungen des Materialverhaltens von Beton unter zweiachialen Beanspruchungsverhältnissen bei hohen Temperaturen wurden in einer eigens zu diesem Zweck entwickelten Prüfanlage durchgeführt, die das Festigkeits-, Verformungs- und Bruchverhalten von Beton unter genau definierten zweiachialen mechanischen Beanspruchungsverhältnissen im Druck-Druck-Bereich und bei vorgegebenen Temperaturbedingungen zu ermitteln gestattet.

Mit dieser Versuchsanlage und mit dem mit ihr durchführbaren Versuchsprogramm kann das Materialverhalten des Baustoffs Beton unter jenen Verhältnissen untersucht werden, die in flächenartigen Bauteilen bei hohen Temperaturen vorliegen: das sind überwiegend zweiachiale Spannungszustände mit verschiedenen Spannungsverhältnissen unter thermisch und mechanisch stationären und instationären Bedingungen.

Die Konzeption der Versuchsanlage ergab sich dabei aus den grundlegenden Forderungen, einen definierten zweiachialen Spannungszustand im Probekörper bei allen mechanischen und thermischen Beanspruchungsverhältnissen zu erzielen.

Im folgenden wird eine kurze Beschreibung der gesamten Anlage gegeben. Einige spezielle technische Komponenten, die unmittelbar und erheblich Einfluß auf die Untersuchungsergebnisse haben, werden ausführlicher diskutiert. Eine detailliertere Darstellung der Anlage sowie einzelner technischer Ausführungen ist in /38/ und /39/ gegeben.

3.2 Probekörper

Bei Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von Beton unter zweiachialen Spannungsverhältnissen bei Raumtemperatur hat es sich gezeigt, daß in scheibenförmigen Probekörpern der ebene Spannungszustand am besten realisiert werden kann

(siehe z.B. /16/ und /22/). Diese Probekörperform wurde deswegen auch für die vorliegenden Untersuchungen bei hohen Temperaturen ausgewählt.

Die Größe der aus Würfeln ausgesägten und auf den Belastungsseiten geschliffenen Probekörper ergab sich aus betontechnologischen und versuchstechnischen Anforderungen mit $200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$. Damit ist sichergestellt, daß die Probekörper in allen drei Richtungen so groß sind, daß die durch den heterogenen Aufbau des Betons und die zufällige Verteilung des Zuschlags verursachten Ungleichmäßigkeiten keinen nennenswerten Einfluß auf die Meßergebnisse haben.

Trotzdem blieb der Probekörper aber so klein, daß die Abmessungen der Belastungseinrichtungen auch zur Prüfung von Beton hoher Festigkeit in praktikablen Größen gehalten werden konnten. Sowohl die dünne Form der Scheibe und die relativ großen freien Oberflächen sind zum gleichmäßigen Aufheizen der Probekörper ohne wesentlichen Temperaturgradienten vorteilhaft.

3.3 Belastungsrahmen

Der Belastungsrahmen mit den wichtigsten Belastungs- und Meßeinrichtungen ist auf Bild 4 dargestellt. Er besteht aus einer einteiligen, aufrecht stehenden Rahmenkonstruktion. Diese wird durch zwei nebeneinander angeordneten und miteinander verschweißten Rahmenhälften gebildet. Die Konstruktionseinheiten dafür sind Doppel-T-Stahlträger. Durch diese geschlossene Bauweise konnte eine große Steifigkeit erreicht werden, welche die Steifigkeit des Hydrauliksystems weit übertrifft. Diese große Steifigkeit ist vor allem bei weggeregelten Versuchen notwendig. Aufgrund der senkrechten Aufstellung des Rahmens ist eine sehr gute Zugänglichkeit zu dem eigentlichen Prüfraum und ein problemloses Einrichten der Probekörper und der Meßsysteme gegeben. Die Auslegung der Beheizungsvorrichtung konnte allein nach thermischen Gesichtspunkten vorgenommen werden. Durch die symmetrische Ausführung des Rahmens wirken Eigenverformungen immer gleichmäßig. Das

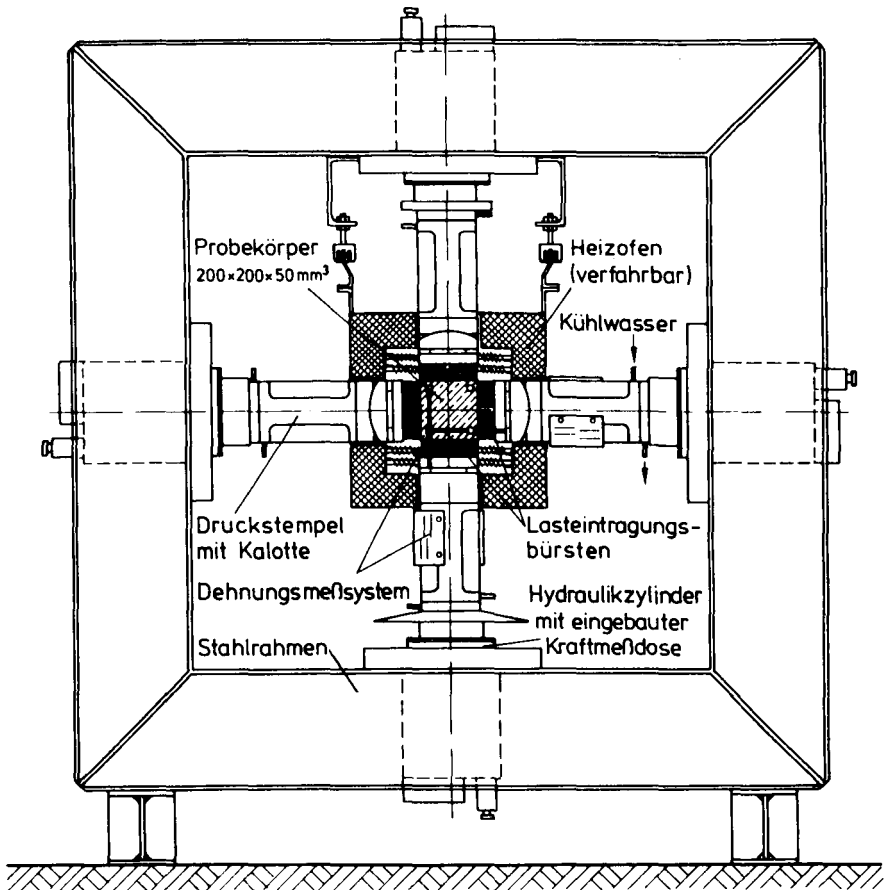


Bild 4 Belastungsrahmen der Versuchsanlage

Problem der Raumstabilität des Probekörpermittelpunktes wird regelungstechnisch gelöst (siehe Kap. 3.5: Belastungsregelung).

Die Belastung der Probekörper erfolgt durch vier kraft- und wegregelbare Hydraulikzylinder mit maximal jeweils 1000 kN Kraft. Die Kräfte werden über wassergekühlte Druckstempel auf die Probekörper übertragen. Davon tragen drei Druckstempel jeweils eine als Kugelkalotte ausgebildete sphärische Lagerung der Lasteintragungskonstruktionen, um bei geringfügigen Abweichungen in Parallelität und Rechtwinkligkeit die Probekörper vollflächig zu belasten.

3.4 Lasteintragungskonstruktion

3.4.1 Anforderungen

Die Lasteintragungskonstruktion hat insbesondere bei mehraxialen Untersuchungen wesentlichen Einfluß auf die Versuchsergebnisse. Sie muß so ausgebildet sein, daß die Last möglichst zwängungsfrei in den Probekörper eingetragen wird, um einen definierten und gleichmäßigen Spannungszustand zu erhalten. Die Zwängung ergibt sich dabei aus der Querdehnungsbehinderung des Betons infolge Reibung zwischen Probekörper und Lasteintragungskonstruktion. Diese Dehnungsbehinderung bewirkt in großen Teilen des Probekörpers einen dreiaxialen Spannungszustand, wodurch im Versuch eine Festigkeitssteigerung des Betons vorgetäuscht wird.

Eine weitere Störung des speziell zwei axialen Spannungszustandes kann sich aus der Tatsache ergeben, daß, durch die Übertragung von Reibungskräften zwischen Probekörper und Lasteintragungsplatte, ein Teil der äußeren Belastung in die senkrecht dazu stehenden Lasteintragungsplatten abwandert. Auch dies führt zu einer Überschätzung der Festigkeit des Probekörpers.

Umfangreiche Untersuchungen bei Raumtemperatur haben gezeigt, daß Belastungsbürsten nach Hilsdorf /21/ die an eine Lasteintragungskonstruktion gestellten Anforderungen am besten

erfüllen. Die Belastungsplatten werden hierbei in einzelne Stäbe aufgelöst, die durch Biegungen den Querverformungen des Probekörpers folgen können. Die unerwünschte Querdehnungsbegrenzung des Betons hängt nur noch von der Biegesteifigkeit der Einzelstäbchen ab, die je nach Anforderung vorgegeben werden kann.

Der Einsatz von Bürsten bei hohen Temperaturen bereitet keine Schwierigkeiten. Durch die Verwendung spezieller Materialien lassen sich sowohl die Anforderungen an die Hochtemperaturbeständigkeit als auch an die Steifigkeit bei Raumtemperatur und hohen Temperaturen erfüllen.

Bei der Auswahl des Lasteintragungssystems müssen zwei weitere Aspekte berücksichtigt werden: Die Abnahme der Festigkeit und die Zunahme der Verformungsfähigkeit des Betons mit steigender Temperatur. Aus der Abnahme der Betonfestigkeit folgt für die Bürsten, daß auch die Steifigkeit der einzelnen Stäbchen mit steigender Temperatur abnehmen darf. Die mit steigender Temperatur stark zunehmende Verformungsfähigkeit des Betons wird durch die mit steigenden Temperaturen anwachsende Verformungswilligkeit der Bürsten nicht behindert.

Aus Gründen der Hochtemperaturbeständigkeit konnten andere Lasteintragungssysteme, die eine gleichmäßige Spannungsverteilung im Probekörper bewirken sollen, z.B. hydraulische Druckkissen (Gerstle in /28,29/) oder schlaaffe Druckplatten (Schickert und Winkler /27/) nicht verwendet werden. Zur Zeit liegen keine Ergebnisse von Vergleichsversuchen vor, die die Unterschiede in den Auswirkungen von Lasteintragungssystemen, die eine gleichmäßige Verformung bzw. gleichmäßige Spannungsverteilung bewirken, untersuchen. Die Unterschiede dürften jedoch nur gering sein.

3.4.2 Vergleichsuntersuchungen mit unterschiedlichen Lasteintragungen

Bei der Entwicklung eines den speziellen Anforderungen genügenden Lasteintragungssystems wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt, die die Eignung des Systems unter Berücksichtigung der Forderungen nach möglichst zwängungsfreier Lasteinleitung bei Raumtemperatur und bei hohen Temperaturen belegen konnten.

Dazu wurden als erstes Untersuchungen mit starren Lasteintragungsplatten durchgeführt. Die so ermittelten Ergebnisse dienten als Vergleichswerte für die mit anders gestalteten Lasteintragungen gewonnenen Werte.

Aufgrund der Befürchtung, daß einzelne Stäbchenelemente bei der Prüfung von Beton höherer Festigkeit und bei hohen Temperaturen ausknicken könnten, wurde im weiteren mit lamellenartigen Bürsten experimentiert, deren Elemente zunächst recht grob waren. Im Vergleich zu den Versuchen mit starren Lasteintragungsplatten ließ sich jedoch schon eine Verminderung der Querdehnungsbehinderung nachweisen. Eine Bürste mit noch feinerer Unterteilung der Belastungsplatte und entsprechender Länge der einzelnen Stäbchenelemente führte zu noch besseren Ergebnissen. Diese Bürste ist nun auch in der Querrichtung geschlitzt; die Abmessungen der einzelnen Stäbchenelemente (Druckfläche und freie Länge) sind so ausgelegt, daß ihre Knicksicherheit im Druckversuch gerade noch gegeben ist.

Die Abmessungen und der Einsatzbereich der Bürste sind auf Bild 5 angegeben. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um einen hochlegierten Stahl, der für einen Einsatz bis zu Temperaturen von 800°C vorgesehen ist.

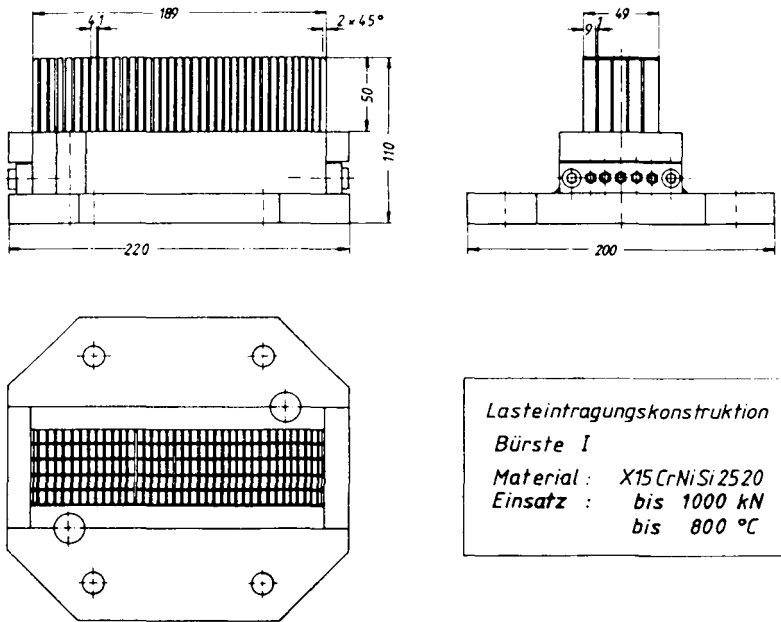


Bild 5 Lasteintragungskonstruktion: Bürste

Die Auswirkungen der drei unterschiedlichen Lasteintragungssysteme auf die zweiachiale Druckfestigkeit sind auf Bild 6 dargestellt. Die mit Bürsten ermittelten Werte sind bei allen Belastungsverhältnissen und den beiden gezeigten Temperaturen geringer als die mit Lamellen und mit starren Platten ermittelten Druckfestigkeiten. Die Verwendung von starren Platten wirkt sich auf die Druckfestigkeit bei hohen Temperaturen weniger stark aus als erwartet.

Der Einfluß der unterschiedlichen Lasteintragungen auf das Rißbild belasteter Probekörper ist eindeutig nachzuweisen. So weisen die Bruchkörper der einaxial mit starren Platten bei Raumtemperatur geprüften Probekörper konisch zum Mittelpunkt zulaufende Bruchflächen auf (Bruchpyramiden) und machen dadurch die Zwängungen im Bereich der Krafteinleitung sichtbar. Die mit den Bürsten bei Raumtemperatur einaxial geprüften Probekörper zeigen Risse, die sich fast gleichmäßig in Kraft-

einleitungsrichtung durch den gesamten Probekörper verteilen (siehe auch Kap. 5.2: Bruchverhalten).

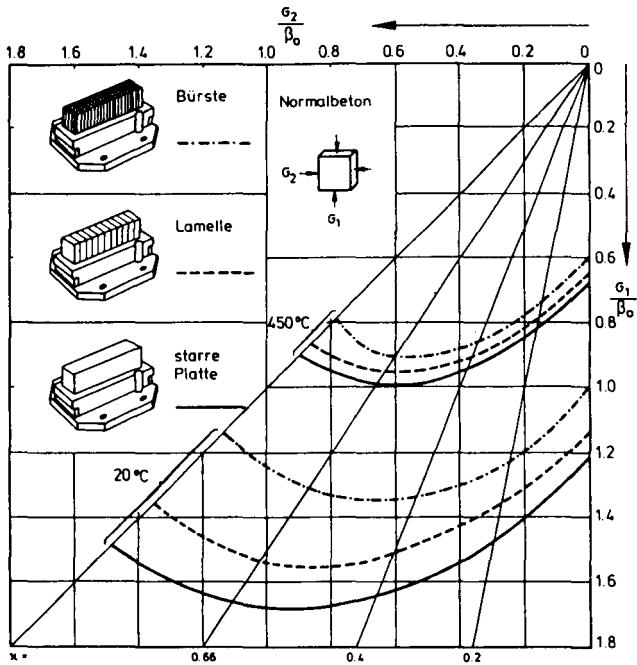


Bild 6 Vergleich der mit unterschiedlichen Lasteintragungen ermittelten zwei axialen Druckfestigkeiten

3.4.3 Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit

Spezielle Untersuchungen zum Einfluß der Lasteintragungskonstruktion auf die Festigkeitseigenschaften galten der Frage, ob die mit den Bürsten ermittelte Druckfestigkeit der scheibenförmigen Probekörper unter vorgegebenen einaxialen Bedingungen der tatsächlichen einaxialen Druckfestigkeit des Betons entspricht.

Zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit in konventionellen Prüfanlagen mit starren Druckplatten wird eine Probekörperschlankheit von 2-3 gefordert. So ist gewährleistet, daß der Bruch im mittleren Bereich des Probekörpers mit eindeutig einaxialem Spannungszustand stattfindet, außerhalb der durch Zwängungen durch die starren Druckplatten gestörten Zonen im Lasteintragungsbereich.

Die Verwendung von Bürsten soll nun einen im ganzen Probekörper ungestörten Spannungszustand ermöglichen. Das bedeutet im einaxialen Fall, daß an Probekörpern unterschiedlicher Gestalt und Schlankheit die gleiche Druckfestigkeit bestimmt wird.

Zum experimentellen Nachweis der Gestaltsunabhängigkeit wurden aus Würfeln einer Betoncharge Prismen ($50 \times 50 \times 200 \text{ mm}^3$) und Scheiben ($200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$) ausgesägt und bis zum Bruch belastet. Dabei wurde an den Prismen sowohl mit starren Druckplatten als auch mit Bürsten eine identische Druckfestigkeit ermittelt, die, aufgrund der großen Schlankheit der Prismen, die tatsächliche einaxiale Druckfestigkeit des Betons darstellt. Die mit Bürsten ermittelte Festigkeit der scheibenförmigen Probekörper entspricht der Prismenfestigkeit und kann deshalb als einaxiale Druckfestigkeit bezeichnet werden.

Um die Unabhängigkeit der mit Bürsten ermittelten Druckfestigkeit von der Probekörperschlankheit nachzuweisen, wurden Scheiben gleicher Dicke (50 mm) und Breite (200 mm), aber un-

terschiedlicher Höhe (150–300 mm), durch Einbringen von Beton in entsprechenden Formen hergestellt, und so Schlankheiten von 3–6 realisiert. Diese Scheiben wurden bei 20°C und 450°C einaxial in Richtung der variierten Höhe auf ihre Druckfestigkeit untersucht.

Als erstes Ergebnis wurde festgestellt, daß die Druckfestigkeit der gegossenen Probekörper (200 x 200 x 50 mm³) mit 23,7 N/mm² erheblich unter der Festigkeit der aus Würfeln ausgesägten Probekörper gleicher Größe (32,8 N/mm²) lag. Die Druckfestigkeiten der Probekörper verschiedener Schlankheiten sind auf Bild 7 dargestellt. Bei 20°C weichen sie nur wenig voneinander ab und liegen insgesamt in einem Streubereich von 7%. Die bei 450°C ermittelten Werte streuen erwartungsgemäß etwas mehr, liegen jedoch auch nur um maximal 10% auseinander.

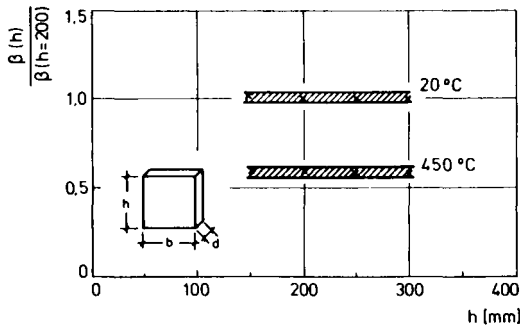


Bild 7 Einaxiale Druckfestigkeit von Probekörpern unterschiedlicher Schlankheit

Durch die Ergebnisse dieser beiden Versuchsreihen konnte nachgewiesen werden, daß durch die Bürsten ein definierter einaxialer Spannungszustand auch im scheibenförmigen Probekörper hergestellt wird. Die so ermittelte Druckfestigkeit ist die einaxiale Druckfestigkeit.

3.5 Belastungsregelung

Die Regeleinrichtungen der Versuchsanlage wurden so ausgelegt, daß

- unterschiedliche Beanspruchungsarten und Belastungspfade realisieren werden können,
- ein gleichmäßiger Belastungsanstieg in beiden Achsen entsprechend dem vorgewählten Belastungspfad gewährleistet ist,
- der Probekörpermittelpunkt während des gesamten Versuchsablaufs raumstabil gehalten wird.

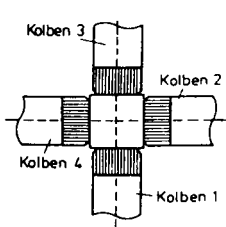
Zur Realisierung dieser speziellen Anforderungen wurde eine servo-hydraulische Kraft-Weg-Regelung entworfen. Die Regeleinrichtungen wurden dabei so ausgelegt, daß jeder der vier Belastungszylinder mit eigenem Hydraulikkreislauf und Servoventil von einer eigenen Regelung angesteuert wird. Die Regelverstärker erhalten ihre Ist-Werte von dem am jeweiligen Zylinder angebauten Wegaufnehmer, bzw. von der im jeweiligen Zylinder eingebauten Kraftmeßdose. Dadurch ist eine separate Regelung eines jeden Zylinders möglich: er kann kraft- oder weggeregt werden, eine vorgewählte Belastungsgeschwindigkeit fahren und einem vorgewählten Belastungspfad folgen.

Der Versuchsablauf unter zwei axialen Belastungsverhältnissen und hohen Temperaturen macht eine achsenweise Kopplung der einzelnen Regelungen notwendig. Die beiden gegenüberliegenden Zylinder laufen dann synchron gegenläufig (closed-loop-Regelung), d.h. in jeder Achse übernimmt eine Regelung die Führung, der zweite Regelkreis arbeitet dann als Seitenregler. Dadurch werden die beim Aufheizen und Belasten des Probekörpers auftretenden Verformungen symmetrisch von den Belastungseinheiten aufgenommen. Der Probekörper bleibt raumstabil, und die Wirkungslinien der Belastungskräfte beider Achsen schneiden sich immer im Probekörpermittelpunkt.

Bild 8 verdeutlicht den Regelungsablauf im Fall einer

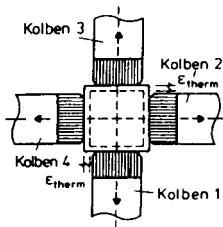
Einbauzustand

Kolben 1 und 2
über Wegregelung
gehalten
Kolben 3 und 4
über Kraftregelung
(Einbaulast) gehalten



Aufheizphase

Kolbenregelung
wie Einbauzustand,
Regelung gleicht thermische
Dehnungen aus, so daß
Probekörpermittelpunkt
raumstabil bleibt



Belastungsphase

Kolben 1 und 3
und Kolben 2 und 4
belasten gleichzeitig
kraft- oder weggeregt
mit vorgewähltem
Belastungsverhältnis

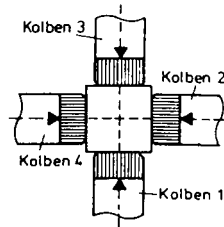


Bild 8 Regelungsablauf beim Aufheizen und Belasten

Aufheizung und anschließenden Belastung. Dazu werden in einer Achse Kraft- und Wegregelung benötigt. So sorgt die Regelung von Kolben 1 beispielsweise für das korrekte Einhalten der Probekörper einbauposition in der senkrechten Achse, während die Regelung von Kolben 3 die Belastungskraft konstant hält. Die beim Aufheizen auftretenden Verformungen von Probekörper und Belastungseinrichtungen wie Bürsten und Stempel werden von der Regelung von Kolben 3 erkannt und durch ein synchrones Zurückfahren von Kolben 1 und 3 aufgenommen.

In der kraftgeregelten Belastungsphase übernimmt die Regelung von Kolben 3 die Führung und belastet den Probekörper durch synchrones Zusammenfahren von Kolben 1 und 3. Der Regelungsablauf in der waagerechten Achse (Kolben 2 und 4) verläuft entsprechend.

Eine Wegüberwachungsvorwahl begrenzt beim Bruch der Probekörper den Hub der Prüfzylinder, um eine Zerstörung der Belastungseinrichtungen zu vermeiden.

3.6 Ofen und Heizungsregelung

Die kontrollierte und gleichmäßige Erwärmung von zweiaxial belasteten Probekörpern stellt ein wesentliches versuchstechnisches Problem dar. Der Probekörper ist auf vier Seiten durch mechanische Belastungseinrichtungen bedeckt und dort nicht direkt beheizbar. Die Ofenwandungen sind durch Öffnungen für Belastungsstempel und Meßsystemdurchführungen durchbrochen, die eine gleichmäßige Temperaturverteilung stören und zu erheblichen Wärmeverlusten führen, die durch direkte Wärmeableitung über die metallischen Belastungsstempel noch vergrößert werden.

Zur Beheizung der Probekörper unter den angegebenen Randbedingungen wurde ein in zwei gleiche Hälften geteilter Kammerofen konstruiert. Die beiden hängend angeordneten Ofenhälften sind verfahrbar und werden zum Probekörper- und Meßsystemeinbau auseinandergefahren und zur Durchführung der Versuche geschlossen. Der Ofenraum umfaßt den Probekörper, die Belastungsbürsten und einen kleinen Teil der Belastungsstempel. Die Wärmeerzeugung geschieht mittels elektrischer Heizelemente. Drei durch Trennelemente thermisch entkoppelte einzeln regelbare Heizzonen sorgen für eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Ofenraum und beheizen die Probekörper indirekt über die beiden freien, flächenmäßig größten Oberflächen.

Durch diese Art der Beheizung wird erreicht, daß die Temperaturverteilung im gesamten Probekörper gleichmäßig ist. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung in den Probekörpern ist für die vorliegenden Untersuchungen notwendig, um den angestrebten zweiaxialen Spannungszustand nicht durch thermisch induzierte, unbekanntene Spannungen zu verfälschen. Darüberhinaus müssen hohe Temperaturgradienten vermieden werden, die zu ungewollten Schädigungen führen können.

Bei einer Überprüfung der Temperaturverteilung in den Probe-

körpern durch in die Fläche und die Dicke einbetonierte Thermoelemente zeigte sich zunächst, daß Temperaturunterschiede in der Dicke der Scheibe vernachlässigbar klein waren. Die Probekörpermitten waren jedoch immer wärmer als die Ränder der Probekörper. Diese ungleiche Temperaturverteilung wird durch die Wärmeableitung über die Belastungseinrichtungen und die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von Betonprobekörpern und Lasteintragungen verursacht.

Nach umfangreichen Erwärmungsversuchen zur Vermeidung von Temperaturgradienten in den Probekörpern wurde eine maximale Aufheizgeschwindigkeit von 2 K/min festgelegt. Zusätzlich wurde die Wärmeableitung über die Belastungsstempel durch Zwischenlagen von druck- und temperaturfesten Materialien zwischen Belastungsbürsten und Belastungsstempeln erheblich reduziert. Die Bürsten werden vollständig mitbeheizt, um auf diese Weise die Temperaturdifferenz zwischen Probekörper und Bürsten klein zu halten.

Bedingt durch den mäßigen Temperaturanstieg gewährleistet eine Haltezeit von 1 h bei der Prüftemperatur eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Probekörper und das Einstellen von physikalischen und chemischen Gleichgewichtszuständen bei Temperaturen über 150°C. Bei Prüftemperaturen bis 150°C muß eine erheblich längere Haltezeit zum Einstellen der Gleichgewichtszustände eingehalten werden. Bedingt durch die im Temperaturbereich um 100°C stattfindende Ausdampfung des physikalisch im Beton gebundenen Wassers sind die festzustellenden mechanischen Kennwerte stark von der Dauer der Temperaturbeanspruchung und der Vorlagerung der Probekörper abhängig (siehe auch Kap. 5.4: Auswirkungen der Dauer der Temperaturbeanspruchung auf die Festigkeitseigenschaften von Beton bei 150°C). Aufheizgeschwindigkeit und Dauer der Haltezeit bis zum Einstellen von Gleichgewichten müssen für den Einzelfall durch Vorversuche festgelegt werden.

Eine 3-Zonen -PID-Programmregelung übernimmt das geregelte

Aufheizen des Ofens bzw. der Probekörper und die Realisierung definierter Temperaturverläufe. Die Ist-Werte werden von den auf den Probekörpern aufgeklebten NiCr-Ni-Thermoelementen geliefert.

3.7 Meßsysteme und Meßwerterfassung

3.7.1 Belastungsmessungen

Zur Messung der in die Probekörper eingebrachten Kräfte stehen vier jeweils im gekühlten Bereich der Belastungsstempel zwischen Zylinder und Probekörper eingebaute Kraftmeßdosen zur Verfügung.

Die Verwendung von zwei Kraftmeßdosen pro Achse bietet die Möglichkeit, den korrekten Einbau der Probekörper zu überprüfen und Fehler im System schnell zu entdecken.

3.7.2 Verformungsmessungen

Die Verformungen der Probekörper in allen drei Achsen werden durch jeweils zwei direkte Verformungsmessungen am Probekörper mit einem speziell entwickelten Hochtemperatur-Verformungsmeßsystem festgestellt (siehe Bild 9). Das Prinzip der Messungen ist aus Bild 10 ersichtlich.

Die Verformungen werden durch Wegübertrager aus Quarzglas aus dem heißen Bereich auf Meßumformer im Bereich der Umgebungstemperatur übertragen. Das Meßsystem zur Ermittlung der Verformungen in den belasteten Achsen ist nach dem Prinzip eines Dilatometers aufgebaut. Thermisch verursachte Dehnungen der Wegübertrager, bestehend aus jeweils einem Rohr und einer darin verlaufenden Stange, kompensieren sich daher zum großen Teil selbst.

Bei den Messungen der Dehnungen in der unbelasteten Achse mit dem nach Art eines Lateralextensometers aufgebauten System müssen die in Vorversuchen ermittelten thermischen Dehnungen der Quarzglaswegübertrager eingerechnet werden.

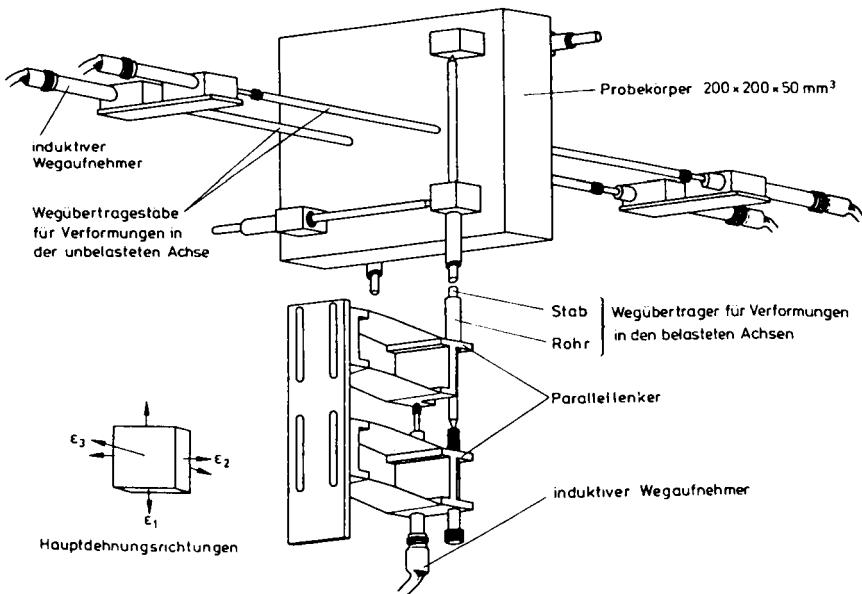


Bild 9 Verformungsmeßsystem

Wegen der speziellen Problematik der Verformungsmessung an zweiachial beanspruchten Probekörpern einerseits und bei hohen Temperaturen andererseits wurden umfangreiche Vergleichsmessungen vorgenommen, um die Zuverlässigkeit des entwickelten Systems zu überprüfen.

Dazu wurden u.a. bei Raumtemperatur und bei Temperaturen bis zu 150°C die Probekörperverformungen in den belasteten Achsen auf den freien Oberflächen der Probekörper an mehreren Stellen mit Dehnungsmessstreifen gemessen. So wurden die ungestörten Verformungsbereiche ermittelt, die für die weiteren Messungen mit dem Hochtemperaturmeßsystem beibehalten wurden. Die einwandfreie Funktion der beiden unterschiedlich konstruierten Meßsysteme für belastete und unbelastete Achsen ließ sich bei Aufheizversuchen unbelasteter Probekörper nachweisen: es wurden identische Werte der thermischen Ausdehnung in

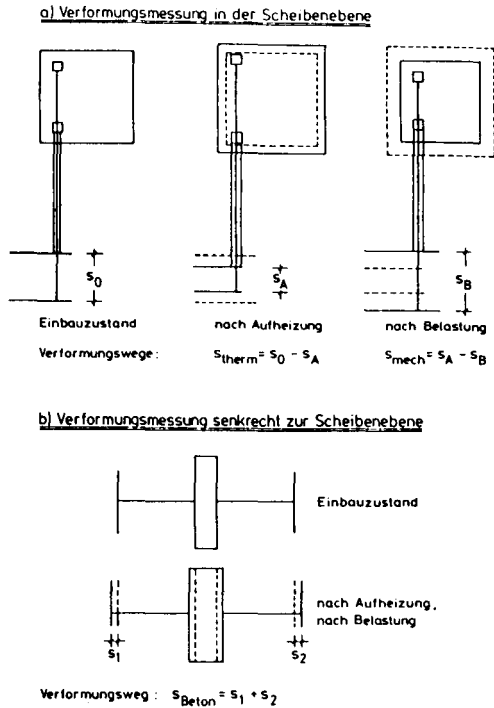


Bild 10 Prinzip der Verformungsmessungen

allen drei Achsen gemessen. Messungen an einem Prüfdilatometer bestätigten die gefundenen Werte.

3.7.3 Temperaturmessungen

Die Temperaturen der Probekörper werden mit insgesamt 4 NiCr-Ni-Thermoelementen gemessen, die auf der Probekörperoberfläche durch hitzebeständige Kleber appliziert werden. Es werden auf einer Seite des Probekörpers die Temperaturen in Höhe der 3 Heizzonen gemessen. Ein auf der Rückseite mittig angebrachtes Thermoelement liefert die Prüftemperatur, da sich diese Temperatur als repräsentativ für den Probekörper erwiesen hat.

3.7.4 Meßwerterfassung

Alle gemessenen Werte - Kraftsignale der vier Kraftmeßdosen, Wegsignale der acht induktiven Wegaufnehmer und Temperatursignale der vier Thermoelemente - werden direkt aufgezeichnet und angezeigt, um das Versuchsgeschehen ständig überwachen zu können. Dazu dienen im wesentlichen Linienschreiber, denen die erforderliche elektronische Meßwertverstärkung und -aufbereitung vorgeschaltet ist.

In Anbetracht der Fülle der anfallenden Daten erwies es sich als notwendig, die Meßwerte automatisch zu erfassen und zu verarbeiten. Dazu wurde ein digitales Meßwerterefassungssystem aufgebaut, das die Meßwerte statistisch verwertbar speichert und mit Hilfe eines speziellen Rechenprogramms aufgearbeitet ausgibt. Gleichzeitig wird durch dieses System der Betriebszustand der Versuchsanlage und der Versuchsablauf ständig überwacht. So können Auswirkungen von etwaigen Fehlbedienungen in hohem Maße verhindert werden. Bei Fehlfunktionen der Anlage besteht die Möglichkeit durch entsprechende Alarmleitungen in den Versuchsablauf korrigierend einzugreifen.

4. Versuchsprogramm

4.1 Ziel

Aus der Sichtung der Literatur geht hervor, daß die Eigenschaften von Beton zum einen unter dem Einfluß hoher Temperaturen bei einaxialer Belastung und zum anderen unter dem Einfluß einer zwei axialen Belastung bei Raumtemperatur untersucht wurden.

Das durchgeführte Versuchsprogramm knüpfte an Untersuchungen unter diesen Beanspruchungen an. Es hatte zum Ziel, den grundlegenden Einfluß von hohen Temperaturen und zwei axialen Beanspruchungen auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Betons zu erforschen.

Im einzelnen wurden dazu in Abhängigkeit von zwei axialer Belastung und Temperatur untersucht:

- die Druckfestigkeit bei konstanten Temperaturen;
- die Spannungs-Dehnungsbeziehungen bei konstanten Temperaturen;
- die Gesamtverformungen bei Aufheizung;
- die Zwängungskräfte bei Aufheizung.

Die Druckfestigkeit und die Spannungs-Dehnungsbeziehungen sind die wesentlichen Eigenschaften des Betons. Ihre Änderungen unter dem Einfluß hoher Temperaturen und zwei axialer Belastung sind deshalb von besonderem Interesse.

Bei den Versuchen zur Ermittlung der Gesamtverformungen wurden während der Aufheizzeit die Probekörper einer praxisgerechten Belastung unterworfen. Aus den Gesamtverformungen, die aus der thermischen Dehnung und dem last- und temperaturabhängigen Kriechen bestehen, konnte eine "kritische Betontemperatur", d.h. eine beanspruchungsbezogene Bruchtemperatur abgelesen werden.

Bei den Relaxationsversuchen wurden die Zwängungskräfte gemessen, die sich in dehnungsbehinderten Betonprobekörpern bei Aufheizung einstellen.

4.2 Parameter der Untersuchungen

4.2.1 Beton

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die technologischen Daten der Versuchsbetone.

Tabelle 2 Betontechnologische Daten der untersuchten Betone

Beton		Normalbeton	Mörtel	Leichtbeton
Zement PZ 35 F	[kg/ m ³]	360	562	350
Sand 0/2	[kg/ m ³]	652	1689	440
Kies 2/8	[kg/ m ³]	550	-	-
Kies 8/16	[kg/ m ³]	768	-	-
Liapor 0/2	[kg/ m ³]	-	-	170
Liapor 2/8	[kg/ m ³]	-	-	160
Liapor 8/16	[kg/ m ³]	-	-	350
Gesamtwasser	[kg/ m ³]	220	270	210
W/Z-Wert	[-]	0,61	0,48	0,60
Festbetonrohddichte (28 Tage)	[kg/dm ³]	2,39	2,14	1,73
Würfelfestigkeit (15 cm , 28 Tage)	[N/mm ²]	54,0	37,0	36,0
Alter bei Versuchsdatum	[d]	> 90	> 90	> 90

Für die überwiegende Anzahl der Versuche wurde ein Normalbeton mit hauptsächlich quarzhaltigen Zuschlägen verwendet. Auf die Untersuchung unterschiedlich fester Normalbetone wurde verzichtet, da sich ihr Verhalten unter zweiaxialer Beanspruchung kaum unterscheidet. Mörtel und Leichtbeton wurden nur auf ihr Festigkeitsverhalten untersucht. Durch die Auswahl dieser drei Betone wurden der Zementgehalt, die Kornfraktion und die Festigkeit bzw. der Elastizitätsmodul der Zuschlagkörner variiert, um die Auswirkungen dieser wichtigen Betongrößen auf das Verhalten kennenzulernen.

4.2.2 Mechanische Beanspruchungen

Die Versuche zum Festigkeitsverhalten und den Spannungs-Dehnungsbeziehungen wurden unter den zweiaxialen Spannungsverhältnissen $\kappa = \sigma_2 : \sigma_1 = 0,0, 0,2, 0,4, 0,66$ und $1,0$ durchgeführt und so der Bereich zweiaxialer Beanspruchungsverhältnisse gleichmäßig belegt.

Die Versuche zum Gesamtverformungs- und Relaxationsverhalten wurden unter den Spannungsverhältnissen $\kappa = 0,0$ und $1,0$ durchgeführt, um den prinzipiellen Einfluß von einaxialer und zweiaxialer Druckbeanspruchung auf das Hochtemperaturverhalten zu erkennen.

Der Belastungspfad bei den Versuchen zum Festigkeitsverhalten und zu den Spannungs- Dehnungsbeziehungen war dergestalt, daß die Belastungskräfte in beiden Achsen entsprechend dem gewählten Verhältnis bis zum Bruch der Probekörper gesteigert wurden. Dehnungsgesteuerte Versuche konnten wegen regelungstechnischer Schwierigkeiten nicht durchgeführt werden. Bei den Versuchen zum Gesamtverformungsverhalten wurden die aufgebrachten Belastungskräfte und ihr Verhältnis zueinander konstant gehalten, während bei den Relaxationsversuchen die Verformungen konstant gehalten wurden.

4.2.3 Thermische Beanspruchungen

Die Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten und zu den Spannungs-Dehnungsbeziehungen wurden bei konstanten Temperaturen von $20, 150, 300, 450, 600$ und 750°C durchgeführt. Bei den Versuchen zum Gesamtverformungs- und Relaxationsverhalten wurde die Temperatur mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 K/min bis zum Bruch der Probekörper erhöht.

4.3 Temperatur-Last-Programme und Durchführung der Versuche

Aus der Kombination von mechanischer und thermischer Beanspruchung ergaben sich die auf den Bildern 11, 12 und 13 dargestellten Temperatur-Last-Programme.

Der Versuchsablauf zur Ermittlung der Druckfestigkeit und der Spannungs-Dehnungsbeziehungen unter zweiaxialer Beanspruchung und hohen Temperaturen ist auf Bild 11 dargestellt.

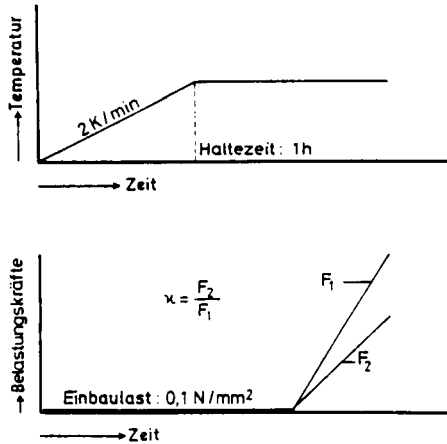


Bild 11 Temperatur-Last-Programm zur Ermittlung der Druckfestigkeit und der Spannungs-Dehnungsbeziehungen

Dazu wurde der Probekörper unter einer Einbaulast von 1 kN (entsprechend $0,1 \text{ N/mm}^2$) mit 2 K/min auf die Prüftemperatur aufgeheizt. Nach einer Haltezeit von 1h wurden die Belastungskräfte in beiden Achsen gleichzeitig mit dem gewählten Verhältnis bis zum Bruch des Probekörpers mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 kN/min (entsprechend $0,08 \text{ N/mm}^2\text{s}$) gesteigert. Der Bruch erfolgte bei den verwendeten Betonen nach etwa 10-20 min. Während des Belastungsvorganges wurden die Belastungskräfte in den beiden Achsen und die Verformungen der Probekörper in den belasteten und der unbelasteten Achse gemessen. Die in jeder Achse maximal gemessene Kraft wurde als Bruchlast bezeichnet und in eine Bruchspannung umgerechnet.

Nach dem auf Bild 12 dargestellten Ablauf erfolgte die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Gesamtverformungen des Betons bei Aufheizung.

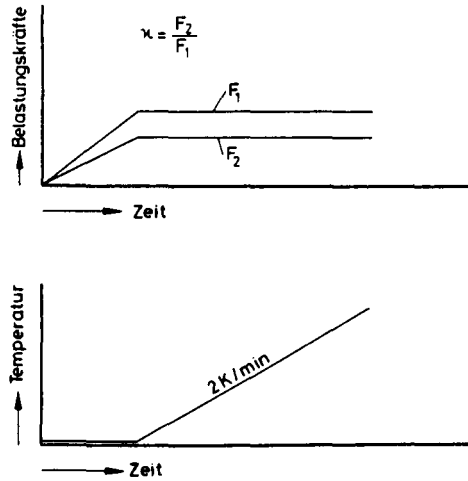


Bild 12 Temperatur-Last-Programm zur Ermittlung der Gesamtverformungen bei Aufheizung

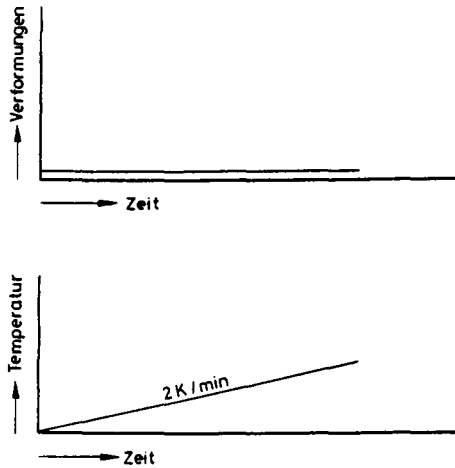


Bild 13 Temperatur-Last-Programm zur Ermittlung der Zwängungskräfte bei Aufheizung

Dazu wurden die Probekörper mit dem vorgegebenen Belastungsgrad α (in Prozent der einaxialen Raumtemperaturdruckfestigkeit) und dem gewählten Belastungsverhältnis κ belastet. Der Belastungsgrad und das Belastungsverhältnis wurden während der folgenden Aufheizung mit 2 K/min konstant gehalten. Die Probekörper wurden bis zum Versagen aufgeheizt, die Dehnungen wurden in den drei Hauptachsen gemessen.

Die Versuchsdurchführung bei den Relaxationsuntersuchungen zur Ermittlung der Zwangskräfte ist auf Bild 13 dargestellt. Die Probekörper wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 K/min aufgeheizt. Im Fall der vollständigen Dehnungsbehinderung unter ein- und zweiaxialer Beanspruchung wurden die Dehnungen in Richtung der Belastungen unterdrückt, die sich aufbauenden Kräfte wurden gemessen. Die Dehnungen in den unbelasteten Richtungen wurden ebenfalls gemessen.

5. Untersuchungsergebnisse zum Festigkeitsverhalten

5.1 Allgemeines

Die Festigkeitsuntersuchungen wurden an einem Normalbeton, einem Mörtel und einem Leichtbeton durchgeführt. Die Probekörper wurden nach der Herstellung mindestens sechs Monate bei 20°C / 65% r.F. gelagert. Sie wurden dann unversiegelt und unvorbelastet bis zum Bruch kraftgeregelt belastet.

5.2 Bruchverhalten

Das Bruchverhalten zweiachial druckbeanspruchter Betonprobekörper wurde zum einen auf Grund der Heftigkeit der Energiefreisetzung während des Bruchvorganges und zum anderen mittels des äußeren Erscheinungsbildes der geprüften Probekörper beurteilt. Dazu wurden Anzahl und Verteilung der Risse sowie Form und Größe der Bruchstücke herangezogen.

Der Bruch erfolgte sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 300°C explosionsartig und mit einem lauten dumpfen Knall. Erfahrungsgemäß deutet diese Versagensweise auf ein relativ sprödes Verhalten und ein hohes Energiespeichervermögen hin (weitgehend elastische Verformungen bis unmittelbar vor dem Probekörperversagen). Bei 150°C war die Heftigkeit des Bruchvorganges geringer und bei Temperaturen über 300°C nahm sie weiter stark ab. Das Verhalten des Betons wird bei hohen Temperaturen insgesamt weicher und es können sich nicht mehr so hohe elastische Spannungen aufbauen.

In diesem Zusammenhang muß die in der Prüfanlage gespeicherte Energie berücksichtigt werden (elastische Verformungen des Belastungsrahmens und der Hydraulikflüssigkeit), die bei hohen Prüfkräften bei entsprechend hoher Festigkeit des Betons im kraftgeregelten Versuch ebenfalls zur explosionsartigen Zerstörung des Probekörpers beiträgt.

Trotz des explosionsartigen Charakters des Versagens blieb

die scheibenförmige Gestalt der geprüften Probekörper in den meisten Fällen erhalten. Es genügten dann allerdings geringe mechanische Beanspruchungen, um die Bruchkörper entlang der Rißflächen in einzelne Bruchstücke zu zerlegen.

Die Bruchstücke hatten im Fall der einaxialen Beanspruchung im wesentlichen stabförmiges Aussehen. Dies ergab sich auf Grund der fast parallel zur Belastungsrichtung ausgebildeten Risse. Die überwiegende Anzahl der Rißflächen stand dabei senkrecht zu den freien Oberflächen der Probekörper. Nur wenige Rißflächen waren parallel dazu orientiert, siehe Bild 14.

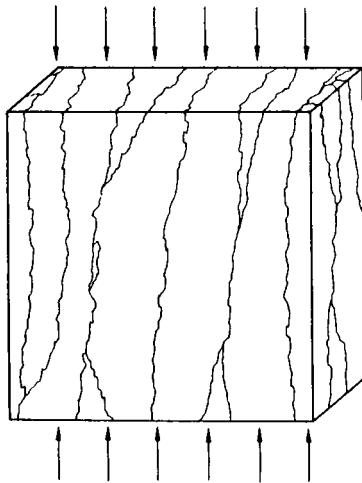


Bild 14 Rißverteilung nach einaxialer Bruchbeanspruchung

Nach zweiaxialer Beanspruchung zeigte das Bruchbild der Probekörper vorwiegend parallel zur den freien Oberflächen verlaufende Rißflächen, Bild 15. Daraus resultierend hatten die Bruchstücke eine plattenförmige Form. Nach symmetrisch zweiaxialer Beanspruchung lösten sich nahezu runde Bruchstücke aus dem mittleren Bereich der Probekörper. Teile der

Ecken blieben meist erhalten, was auf verbliebene Zwängungen in diesen Bereichen hinweist.

Die Charakteristik dieser Bruchbilder blieb grundsätzlich auch bei hohen Temperaturen erhalten. Allerdings war die Anzahl der Risse erheblich größer als bei Raumtemperatur, da auch thermisch erzeugte Risse auftraten, die den Verbund zwischen Zuschlagkörnern und Zementsteinmatrix schon vorweg erheblich lockerten. Es gingen auch kaum noch Risse durch die Zuschlagkörner hindurch, wie dies bei Raumtemperatur und 300°C beobachtet wurde.

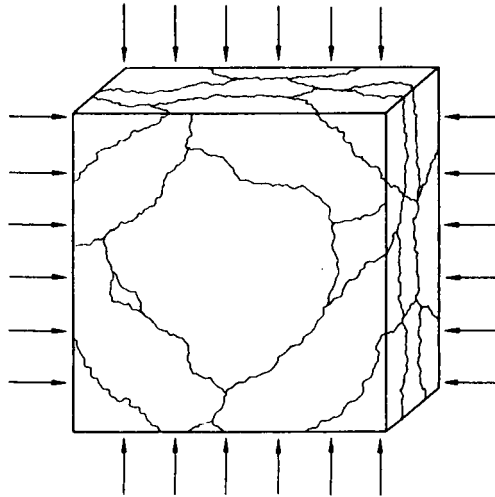


Bild 15 Rißverteilung nach symmetrisch zweiaxialer Bruchbeanspruchung

5.3 Zweiaxiale Hochtemperaturdruckfestigkeit

Die Werte der zweiaxialen Druckfestigkeit bei vorgegebener Temperatur und vorgegebenem Spannungsverhältnis wurden aus den Ergebnissen von jeweils mindestens drei Einzelversuchen gemittelt. Sie werden in der Ebene der beiden aufgebrachten Hauptspannungen dargestellt und auf die einaxiale Probekörperdruckfestigkeit bei Raumtemperatur, β_0 , bezogen. (Zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit siehe Kap.3.4.3.). Die Druckfestigkeiten werden immer als positive Werte angegeben, da über Zugfestigkeiten nicht berichtet wird und keine Verwechslungsgefahr besteht. Wegen der Symmetrieeigenschaften der beiden aufgebrachten Druckspannungen genügt es, eine Hälfte des Druck-Druck-Quadranten darzustellen. Für jeweils eine Temperatur wurden die bei einem bestimmten Spannungsverhältnis ermittelten Festigkeiten durch eine Bruchgrenzkurve verbunden.

Die vorliegenden Druckfestigkeiten wurden in Versuchen mit Belastungssteigerungen unter einem konstanten Spannungsverhältnis κ erhalten. Bei der Durchführung einer beschränkten Anzahl von Versuchen mit anderen, sequentiellen Belastungspfaden zeigte es sich, daß auch für diese Arten der Laststeigerung die gleichen Festigkeiten erzielt wurden.

An Hand der an den drei Betonen gewonnenen Festigkeitsergebnisse, die auf den Bildern 16-18 dargestellt sind, lassen sich folgende allgemeine Feststellungen treffen:

1. Die Druckfestigkeit von Beton unter zweiaxialer Beanspruchung ist bei allen Spannungsverhältnissen höher als die einaxiale Druckfestigkeit bei gleicher Temperatur. Der Festigkeitszuwachs gegenüber der einaxialen Festigkeit ist schon bei nur geringer Beanspruchung in der zweiten Achse recht deutlich. Dieser stützende Einfluß der Beanspruchung in der zweiten Achse erreicht bei einem bestimmten Beanspruchungsverhältnis, das mit der Temperatur ansteigt, seine größte Wirksamkeit.

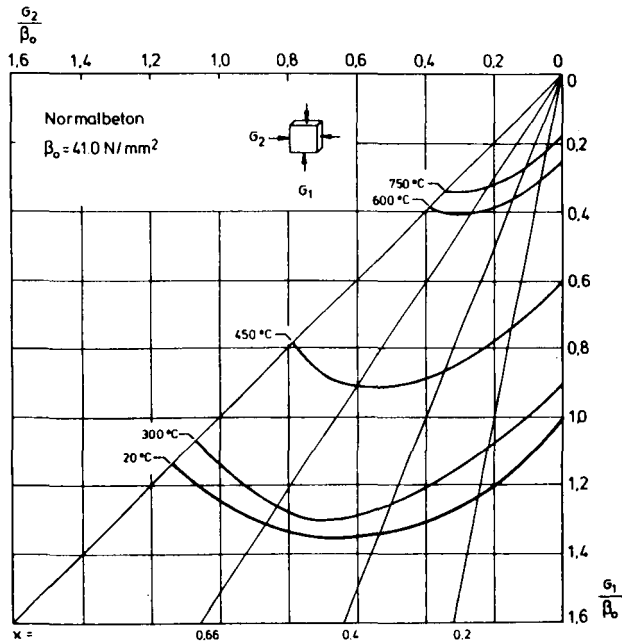


Bild 16 Zweiachiale Hochtemperaturdruckfestigkeit von Normalbeton

2. Die Festigkeitserhöhung bei zweiachialer Beanspruchung ist bei höheren Temperaturen größer als bei Raumtemperatur. Die Bilder 19-21 verdeutlichen diesen Zusammenhang. Sie zeigen die bei den jeweiligen Prüftemperaturen ermittelten Festigkeitswerte, bezogen auf die jeweilige einaxiale Hochtemperaturfestigkeit. Besonders große Werte erreicht die Festigkeitserhöhung bei Temperaturen über 450°C. Das Maximum der Festigkeit bei zweiachialer Beanspruchung wird mit steigender Prüftemperatur zu großen Spannungsverhältnissen verschoben. Das bedeutet aber, daß der in der Literatur /23/ angesprochene spaltende Einfluß der seitlichen Druckspannung bei hohen Temperaturen seine Wirkung verringert.

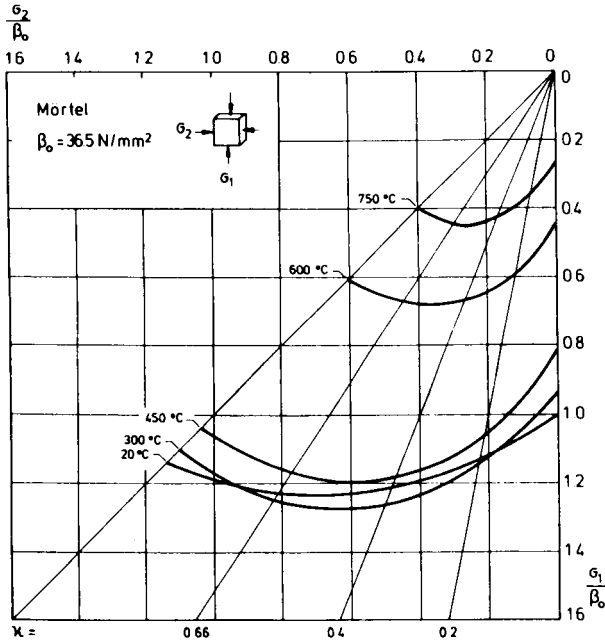


Bild 17 Zweiaxiale Hochtemperaturdruckfestigkeit von Mörtel

Die Festigkeitserhöhung bei zweiaxialer Beanspruchung gegenüber einaxialer Beanspruchung ist bei Normalbeton am größten und beim Leichtbeton am geringsten. Die Ursachen dafür sind im Aufbau und Anteil des Zuschlagkorngerüstes zu sehen. Beim Normalbeton bilden die großen Zuschlagkörner durch ihre hohe Elastizität ein steifes Korngerüst, über das die von außen angreifenden Druckkräfte vorwiegend abgetragen werden. Der Elastizitätsmodul der Leichtzuschläge dagegen ist so klein, daß hier überwiegend die Zementsteinmatrix die Druckkräfte aufnimmt.

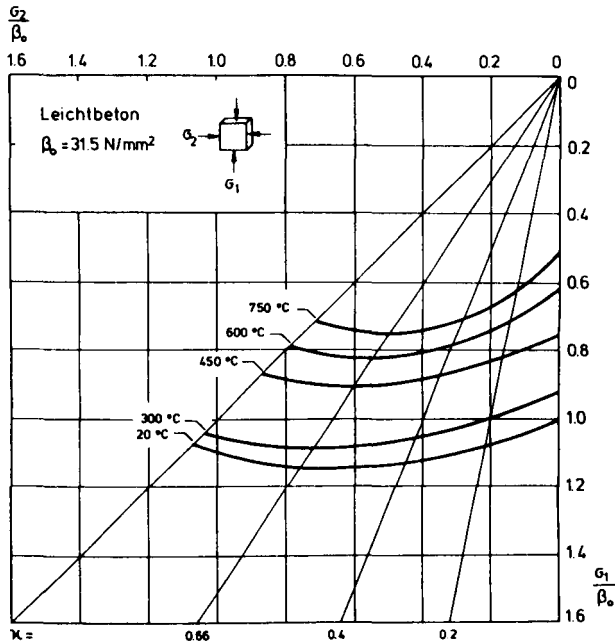


Bild 18 Zwei-axiale Hochtemperaturdruckfestigkeit von Leichtbeton

Eine Beanspruchung mechanischer oder thermischer Art führt durch das unterschiedliche Verhalten von Zuschlägen und Zementsteinmatrix im Normalbeton zu großen Rissen, vor allem um die großen Zuschlagkörner herum (siehe z.B. /44/ und /53/). Im Mörtel entstehen kleinere, gleichmäßiger verteilte Risse und im Leichtbeton wird hauptsächlich die Zementsteinmatrix zerstört.

Unter zwei-axialer Druckbeanspruchung wird nun die Ausbreitung von Rissen in einer Ebene behindert, was zu einer Festigkeitserhöhung führt. Besonders wirksam zur Festigkeitserhöhung wird die Druckbeanspruchung in zwei Richtungen dann, wenn die Ausbreitung großer Risse, wie im Normalbeton, behindert werden kann. Beim Leichtbeton ist deshalb nur eine geringe Festigkeitserhöhung festzustellen.

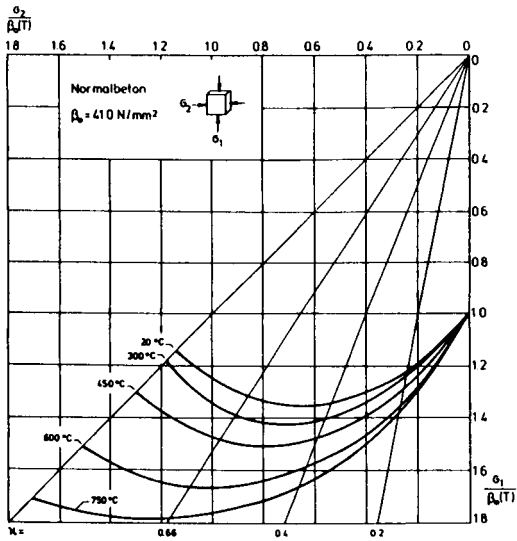


Bild 19 Temperaturabhängige Festigkeitserhöhung von Normalbeton bei zweiachialer Druckbeanspruchung

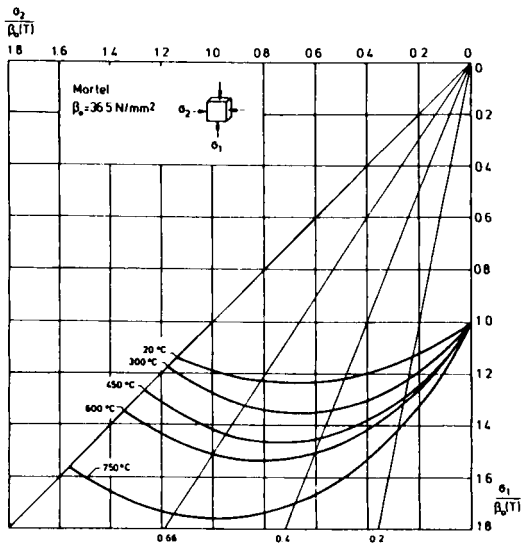


Bild 20 Temperaturabhängige Festigkeitserhöhung von Mörtel bei zweiachialer Druckbeanspruchung

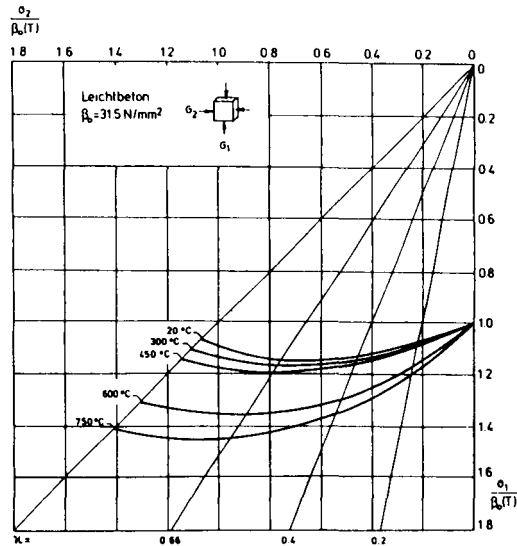


Bild 21 Temperaturabhängige Festigkeitserhöhung von Leichtbeton bei zweiaxialer Druckbeanspruchung

Die Rolle des Zementgehaltes läßt sich beim Vergleich Normalbeton - Mörtel ersehen. Der höhere Zementgehalt im Mörtel führt zu einer geringeren Festigkeitserhöhung als beim Normalbeton. Der die Räume zwischen den Zuschlagkörnern ausfüllende Zementstein ist verformungswilliger als der quarziti-sche Zuschlag und führt unter Beanspruchung zu einem Ver-halten, wie es isotrop aufgebaute Materialien wie z.B. Zementstein zeigen. Bei diesen wird in der Tat unter zwei-axialem Druck keine Festigkeitserhöhung beobachtet /16,26/. Dies entspricht auch den Beobachtungen, daß Materialien, die sich insgesamt spröde verhalten, nur eine geringe Festig-keitserhöhung unter zweiaxialer Druckbeanspruchung zeigen. Technisch amorphe Materialien mit vorwiegend duktilem Ver-halten erfahren dagegen unter zweiaxialem Druck größere Festigkeitserhöhungen.

Die kombinierte Wirkung von Zementgehalt, Größtkorn und Elastizitätsmodul des Zuschlags zeigt sich in der Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Temperatur. Der Leichtbeton verliert bis zu etwa 400°C nur wenig von seiner Festigkeit, da kaum Risse auftreten. Erst die thermischen Auswirkungen auf den chemischen Aufbau des Zementsteins führen zu einem schnellen Festigkeitsabfall bei höheren Temperaturen. Der Festigkeitsverlust bei höheren Temperaturen ist beim Mörtel geringer als beim Normalbeton, da die thermisch verursachten Risse kleiner sind. Die Auswirkungen der Temperaturbeanspruchung auf den Zementstein machen sich dagegen nicht so stark bemerkbar.

5.4 Druckfestigkeit bei 150°C

Bei der Ermittlung der ein- und zwei axialen Druckfestigkeit bei einer konstanten Prüftemperatur von 150°C zeigte es sich, daß die erreichte Festigkeit in besonderem Maß von der Dauer der Temperaturbeanspruchung abhängig ist. Die zu erzielende Festigkeit stieg mit zunehmender Haltezeit an (Bild 22) und erreichte nach 25 Stunden Werte, die 27 % über jenen der Festigkeit nach einer Stunde Haltezeit lagen. Eine Verlängerung der Haltezeit über die 25 Stunden hinaus führte zu keiner weiteren Festigkeitserhöhung.

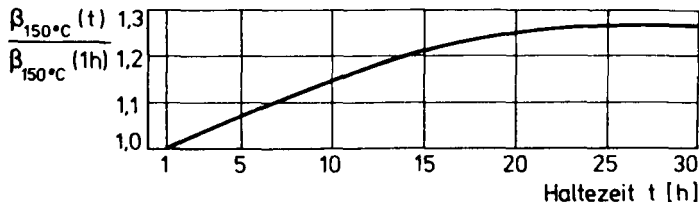


Bild 22 Einfluß der Haltezeit auf die Druckfestigkeit von Normalbeton bei 150°C

Die Ursachen für das besondere Verhalten von Beton im Temperaturbereich 70–200°C sind in der Ausdampfung des physikalisch gebundenen Wassers zu sehen.

Aus Ergebnissen von Untersuchungen mit Hilfe der Differential - Thermo - Analyse (DTA) und der Thermogravimetrie ist bekannt, daß, abhängig von Aufheizgeschwindigkeit, Probenform und -größe, der Vorgang der Ausdampfung des physikalisch gebundenen Wassers bei etwa 200°C abgeschlossen ist. Durch den hohen Verdichtungsgrad des Betons wird der durch die Temperatur erzwungene Transport von Wasserdampf stark behindert. Wenn aber die Phasenumwandlung des Wassers schneller vor sich geht als die Abwanderung des Dampfes, baut sich ein Dampfdruck im Beton auf, der von der Porosität abhängig ist, und im Beton entsteht ein großes Druckgefälle.

Der hohe innere Porendruck und die äußere mechanische Beanspruchung führen zum frühzeitigen Versagen des Probe-

körpers. Erst nach entsprechend langen Temperaturbeanspruchungszeiten, realisiert durch Standzeiten von über 25 Stunden in diesem Temperaturbereich oder durch geringe Aufheizgeschwindigkeiten von etwa 10 K/h, sind die Entwässerungsvorgänge des physikalisch gebundenen Wassers abgeschlossen. Das Erreichen der Gewichtskonstanz bei Probekörperwägungen in diesem Temperaturbereich zeigt diese Tatsache (Gewichtsverlust bei 150°C = 3% vom Ausgangsgewicht). Die nach Abschluß der Entwässerungsvorgänge festzustellenden Eigenschaften von Beton können dann exakt der Prüftemperatur zugeordnet werden.

Zur Absicherung der eben genannten Schlußfolgerungen wurden deshalb Versuche mit Standzeiten zwischen 1 h und 25 h im Temperaturbereich von 70°C bis 200°C durchgeführt. Daraus ergeben sich Temperaturbeanspruchungszeiten (bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 2 K/min) von etwa 2 h bis 26 h. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in die Bilder 23-25 eingetragen, die den Verlauf der einaxialen Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur darstellen.

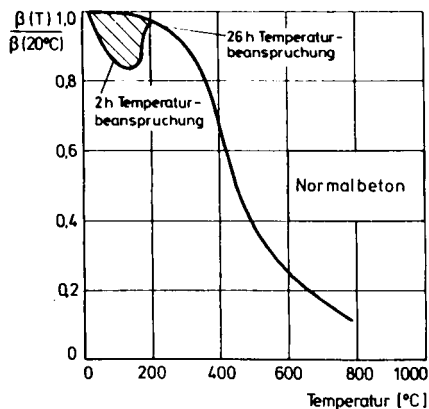


Bild 23 Einaxiale Druckfestigkeit von Normalbeton in Abhängigkeit von Prüftemperatur und Temperaturbeanspruchungszeit

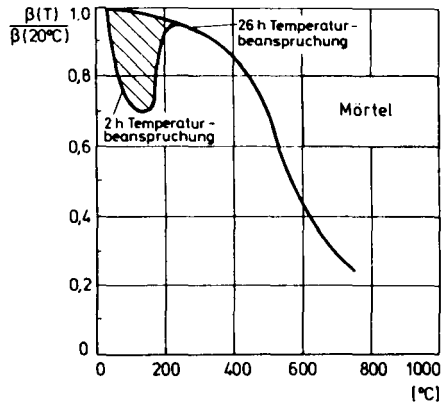


Bild 24 Einaxiale Druckfestigkeit von Mörtel in Abhängigkeit von Prüftemperatur und Temperaturbeanspruchungszeit

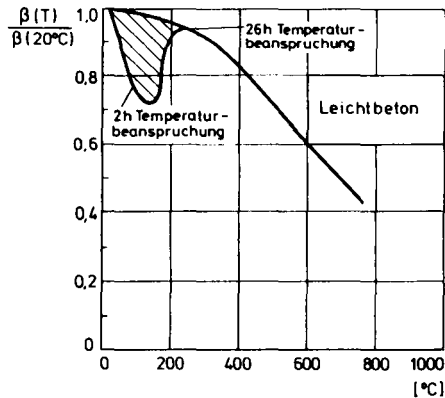


Bild 25 Einaxiale Druckfestigkeit von Leichtbeton in Abhängigkeit von Prüftemperatur und Temperaturbeanspruchungszeit

Die gestrichelten Flächen geben den von der Temperaturbeanspruchungszeit abhängigen Festigkeitsbereich an, der allerdings nur für die hier untersuchten luftgelagerten Betone gilt. Andere Festigkeitsergebnisse sind von Untersuchungen mit Probekörpern zu erwarten, die eine andere Geometrie haben (z.B. Würfel) oder die aufgrund einer anderen Lagerung (z.B. Wasserlagerung) einen anderen Feuchtegehalt haben.

Die Temperaturabhängigkeit der Druckfestigkeit erhält also im Temperaturbereich von 30 - 250°C durch den unterschiedlichen Versuchsablauf einen ebenfalls unterschiedlichen Verlauf. Das bei manchen Versuchen beobachtete Festigkeitsloch bei 150°C ist demnach nur eine Folge zu kurzer Temperaturbeanspruchung.

Die Auswirkungen unterschiedlich langer Haltezeiten (bei gleichen Aufheizgeschwindigkeiten von 2 K/min) auf das zwei-axiale Druckfestigkeitsverhalten bei 150°C sind auf den Bildern 26-28 gezeigt. Die zweiaxialen Druckfestigkeiten sind hier auf die einaxialen 150°C-Festigkeits nach der jeweiligen Standzeit bezogen.

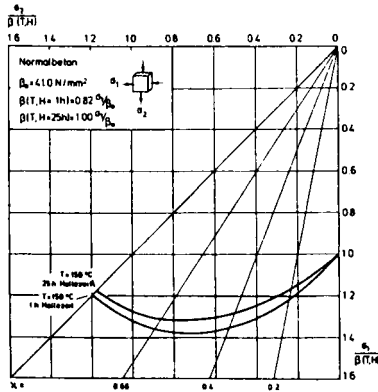


Bild 26 Einfluß der Haltezeit auf die zwei-axiale Druckfestigkeit von Normalbeton bei 150°C

Wie schon oben gezeigt, ist die einaxiale 150°C-Festigkeit des Normalbetons nach 25 h Haltezeit etwa 27% höher als nach 1 h Haltezeit. Die jeweils nach den zwei unterschiedlich langen Standzeiten ermittelten zwei-axialen Bruchgrenzkurven zeigen für die drei Betone einen recht unterschiedlichen Verlauf. Für den Normalbeton differieren die relativen Festigkeitserhöhungen nach beiden Standzeiten nur wenig. Beim Mörtel und dem Leichtbeton dagegen gibt es recht deutliche Unterschiede: die Festigkeitserhöhungen sind nach 1 h Halte-

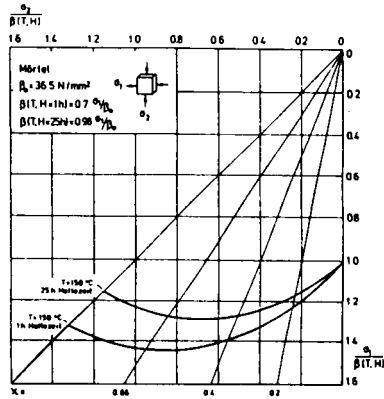


Bild 27 Einfluß der Haltezeit auf die zweiachsale Druckfestigkeit von Mörtel bei 150°C in Abhängigkeit

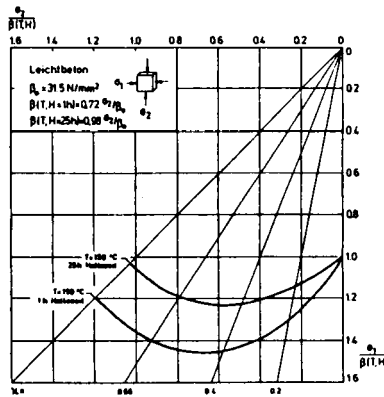


Bild 28 Einfluß der Haltezeit auf die zweiachsale Druckfestigkeit von Leichtbeton bei 150°C

zeit erheblich größer als nach 25 h Haltezeit. Zu erklären ist der unterschiedliche Verlauf der beiden Kurven damit, daß der zweiachsale äußere Druck einen stützenden Gegendruck gegen den inneren, strukturzerstörenden Druck bewirkt. Beim Normalbeton ist die Differenz zwischen den beiden Kurven nicht so groß, da der innere Druck nicht so groß wird. Der Dampf wird leicht durch die großen Risse abgeleitet.

5.5 Bruchgrenzkurven

5.5.1 Bedeutung der Bruchgrenzkurven

Die bei jeweils einer Temperatur und einem bestimmten Spannungsverhältnis ermittelten Bruchspannungen $\sigma_{1,u}$ und $\sigma_{2,u}$ lassen sich in der Ebene der Hauptspannungen durch eine Bruchgrenzkurve $\sigma_{2,u}(T) = f(\sigma_{1,u}, T)$ verbinden. Die Fläche, die durch die Bruchgrenzkurve und die Hauptspannungsachsen begrenzt wird, ist der Bereich, in dem der Probekörper im Kurzzeitversuch unter allen zweiaxialen Druckspannungsverhältnissen nicht versagt; die Bruchgrenzkurve selbst stellt den Grenzzustand dar. Die Bereiche außerhalb der Bruchgrenzkurve sind für einen Betonprobekörper unter den angegebenen Beanspruchungen nicht existent.

Die Antwort auf die Frage, wann ein zwei axial auf Druck beanspruchter Beton bei einer Laststeigerung auf einem bestimmten Belastungspfad versagt, wann also die Bruchgrenzkurve erreicht wird, interessiert sowohl für praktische Experimente als auch für rechnerische Verfahren. Konkret bedeutet das, daß bei einer bestimmten Temperatur für eine vorgegebene Spannung σ_1 gerade die maximale Spannung σ_2 gesucht wird, bei der noch kein Versagen eintritt:

$$\sigma_1(T) \leq \sigma_{1,u}(T) \quad \text{bzw.} \quad \frac{\sigma_1(T)}{\beta_0} \leq \frac{\sigma_{1,u}(T)}{\beta_0} \quad (1)$$

5.5.2 Analytische Formulierung der Bruchgrenzkurven

Zur analytischen Formulierung der Bruchgrenzkurven, die beispielhaft für die Kurven des Normalbetons in der auf Bild 16 dargestellten Form durchgeführt wird, wird die folgende Gleichung benutzt:

$$\frac{\sigma_{1,u}}{\beta_0} = a(T) \left(\frac{\sigma_{2,u}}{\beta_0}\right)^2 + b(T) \frac{\sigma_{2,u}}{\beta_0} + c(T) \quad (2)$$

mit den Randbedingungen:

$$0 \leq \frac{\sigma_2(T)}{\beta_0} \leq \frac{\sigma_{2,\max}(T)}{\beta_0} \quad (3)$$

Die durch diese Gleichung beschriebenen und mittels einer linearen Interpolation (quadratisches Polynom) ermittelten Kurvenverläufe sind auf Bild 29 dargestellt.

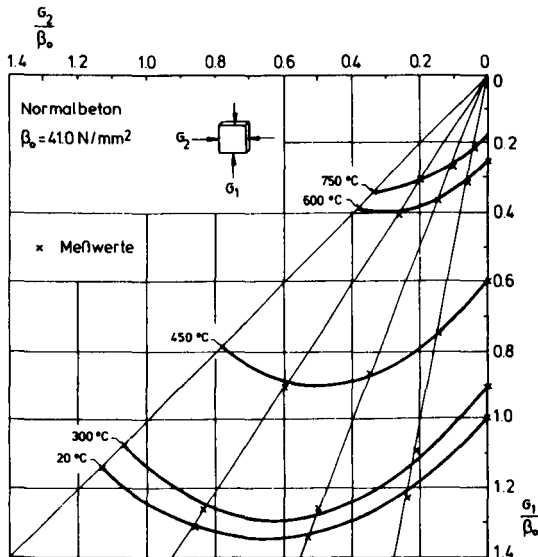


Bild 29 Darstellung der Funktion der Bruchgrenzkurven des Normalbetons

Die Koeffizienten a, b und c der Funktionen der Bruchgrenzkurven sind auf Tabelle 3 angegeben und graphisch auf Bild 30 dargestellt. Nach Einsetzen der entsprechenden Koeffizienten in Gleichung 2 ist es also möglich, für Temperaturen bis zu 750°C anzugeben, bei welchen maximalen Spannungen der Normalbeton versagt.

Tabelle 3 Koeffizienten der Bruchgrenzkurvenfunktion

T [°C]	a	b	c
20	- 0,820	1,058	1,000
300	- 1,050	1,283	0,900
450	- 1,254	1,209	0,600
600	- 1,801	1,026	0,250
750	- 1,383	0,941	0,180

Bereiche außerhalb der durch die Bruchgrenzkurven, die Hauptspannungsachse σ_1 und die Symmetrielinie begrenzten Fläche werden dadurch angezeigt, daß der berechnete Wert $\sigma_{2,u}/\beta_0$ größer als der eingegebene Wert $\sigma_{1,u}/\beta_0$ ist.

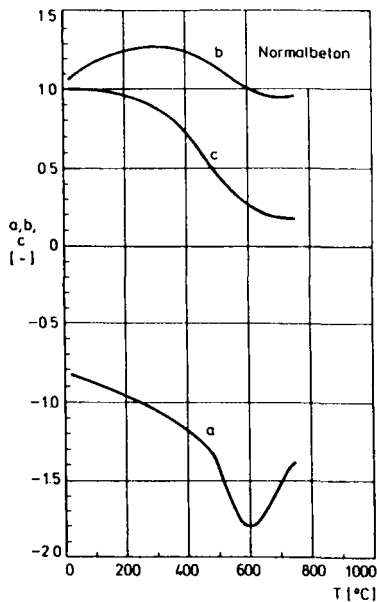


Bild 30 Verlauf der Koeffizienten der Bruchgrenzkurvenfunktion des Normalbetons

6. Ergebnisse der Untersuchungen zum Verformungs- und Relaxationsverhalten

6.1 Allgemeines

Die Verwendung der Belastungsbürsten erlaubt die Eintragung einer in Richtung der Hauptachsen der Scheibenebene wirkenden Belastung ohne gleichzeitige Behinderung der Verformungen der Querrichtungen. Dadurch wird in der Scheibenebene ein ebenes und gleichmäßiges Spannungsfeld erzeugt, das einen zu den Hauptspannungen gleichgerichteten Verformungszustand verursacht.

Die Anordnung von jeweils zwei Meßstrecken auf beiden freien Probekörperoberflächen (siehe Bild 9) erlaubt die Überwachung der Gleichmäßigkeit der Verformungsverteilung während der gesamten Aufheiz- und Belastungsphase. Durch die Länge der Meßstrecken, je 14 cm zur Bestimmung von σ_1 und σ_2 und 5 cm zur Bestimmung von σ_3 , werden mittlere Betonverformungen gemessen, die örtliche, durch den inhomogenen Stoffaufbau bedingte Störungen nicht wirksam werden lassen.

6.2 Spannungs-Dehnungsbeziehungen bei stationären Temperaturen

6.2.1 Dehnungen in den Hauptachsen

Die nach dem auf Bild 11 gezeigten Verfahren ermittelten lastabhängigen Dehnungen σ_1 , σ_2 und σ_3 bei konstanten Temperaturen sind für drei Spannungsverhältnisse auf den Bildern 31-33 dargestellt. Die Dehnungen hängen in ihrer Größe von Belastungsgrad, von Spannungsverhältnis und Temperatur ab.

Die Dehnungen in allen drei Achsrichtungen nehmen mit steigender Last zu und zeigen bei hohen Belastungsgraden eine

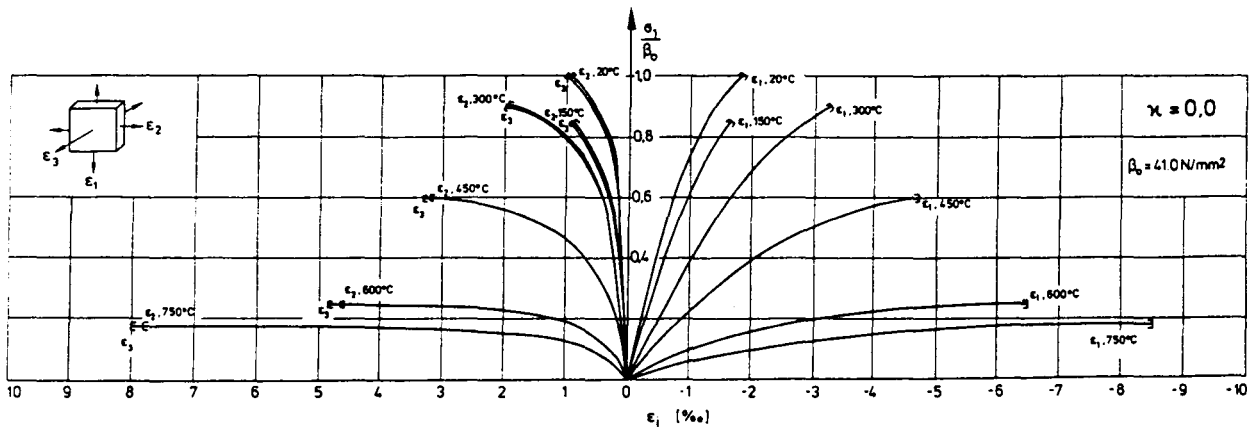


Bild 31 Spannungs-Dehnungsbeziehungen eines Normalbetons; $\chi = 0,0$

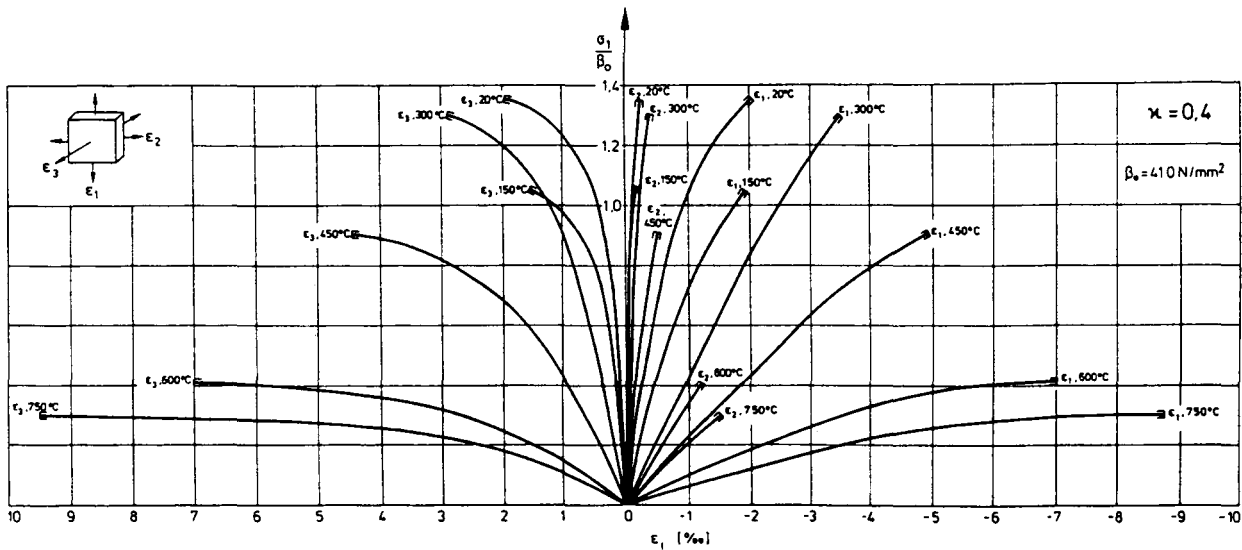


Bild 32 Spannungs-Dehnungsbeziehungen eines Normalbetons; $\kappa = 0,4$

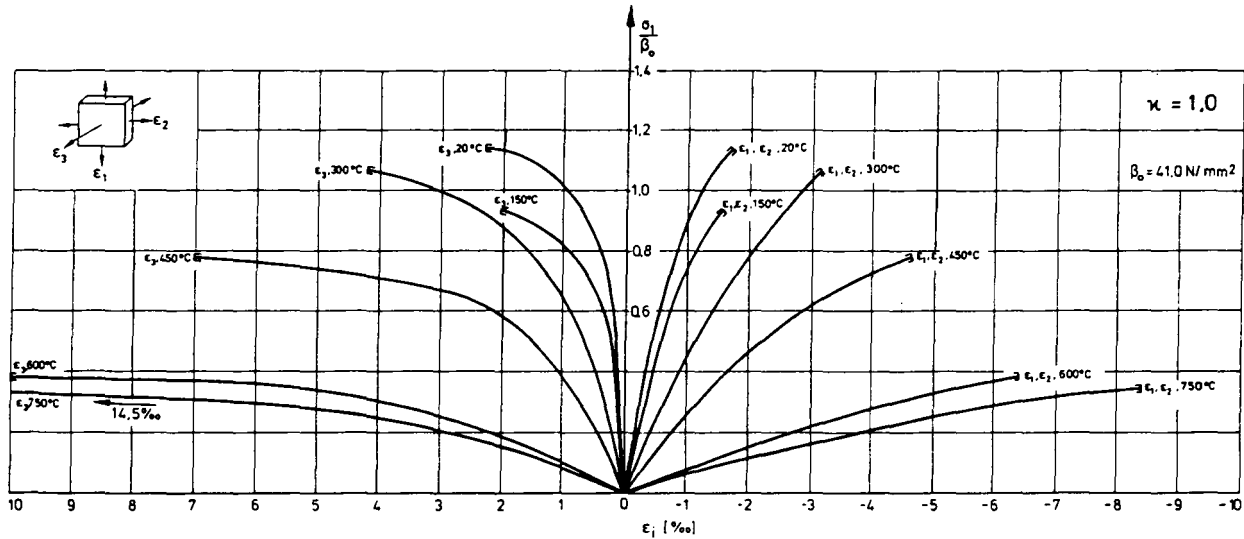


Bild 33 Spannungs-Dehnungsbeziehungen eines Normalbetons; $\kappa = 1,0$

nichtlineare Abhängigkeit zur größten Hauptspannung, was auf einen hohen Anteil plastischer Verformungen hinweist.

Der Verlauf der $\sigma_1 - \epsilon_1$ - Kurven zeigt für gleiche Temperaturen nur eine geringe Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis. In dieser am stärksten belasteten Achse ergeben sich maximale Dehnungen für ein Spannungsverhältnis $\sigma_2 : \sigma_1 = 0,5$. Der Einfluß des Spannungsverhältnisses auf den $\sigma_1 - \epsilon_2$ - Verlauf ist dagegen groß: ϵ_2 verändert sich bei steigenden Beanspruchungsverhältnissen von positiven Werten (Querdehnung bei einaxialer Beanspruchung) zu maximalen negativen Dehnungen (Stauchungen) im symmetrisch zweiaxialen Fall.

Die Dehnungen in der unbelasteten Achse, ϵ_3 , erreichen unter dem Einfluß von hohen Temperaturen und großem Spannungsverhältnis extrem große Werte, die neben elastischen und plastischen Verformungen aus der Querdehnung einen Verformungsanteil aufweisen, der durch die Rißaufweitungen senkrecht zu den Belastungsrichtungen entsteht. Die maximalen Verformungen in der lastfreien Achse ergeben sich deswegen auch bei dem Belastungsverhältnis $\sigma_2 : \sigma_1 = 1,0$.

Bei höheren Temperaturen verlaufen die Spannungs-Dehnungskurven flacher, d.h., niedrige Beanspruchungen führen bereits zu großen Verformungen. Das bei Raumtemperatur bekannte spröde Bruchverhalten des Betons verändert sich und führt zu einem weichen Versagen. Die Verformungsgeschwindigkeiten werden bei Temperaturen über 450°C sehr groß, so daß die Angabe eines exakten Versagenspunktes schwierig wird.

Der Verlauf der Spannungs-Dehnungskurven zeigt für zunehmende Temperaturen (Ausnahme 150°C , siehe Kapitel 5.4) den Abfall der Festigkeit bei allen Spannungsverhältnissen an (siehe auch die Bilder 16 und 23). Die kleiner werdenden Steigungen der Spannungs-Dehnungskurven im Ursprung bedeuten die Abnahme des Elastizitätsmoduls unter dem Einfluß höherer Temperatu-

ren. Die Bruchdehnungen in allen drei Achsen werden mit steigenden Temperaturen zu größeren Werten hin verschoben, eine besonders große Zunahme der Verformungen wird ab 450°C beobachtet. Die Bilder 34-36, auf denen die Bruchdehnungen des Normalbetons in Abhängigkeit von Temperatur und Spannungsverhältnis zusammengefaßt sind, verdeutlichen diese Zusammenhänge noch einmal.

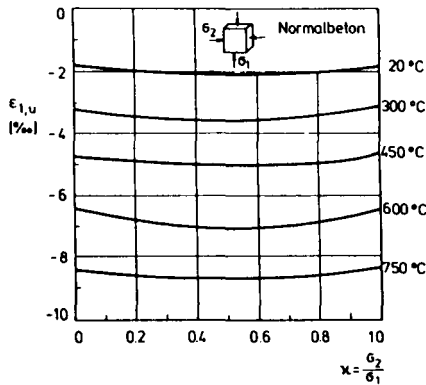


Bild 34 Abhängigkeit der Bruchdehnung $\epsilon_{1,u}$ von Temperatur und Spannungsverhältnis

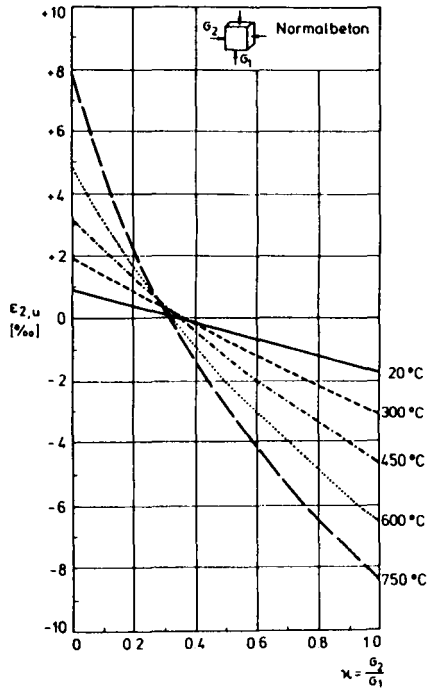


Bild 35 Abhängigkeit der Bruchdehnung $\epsilon_{2,u}$ von Temperatur und Spannungsverhältnis

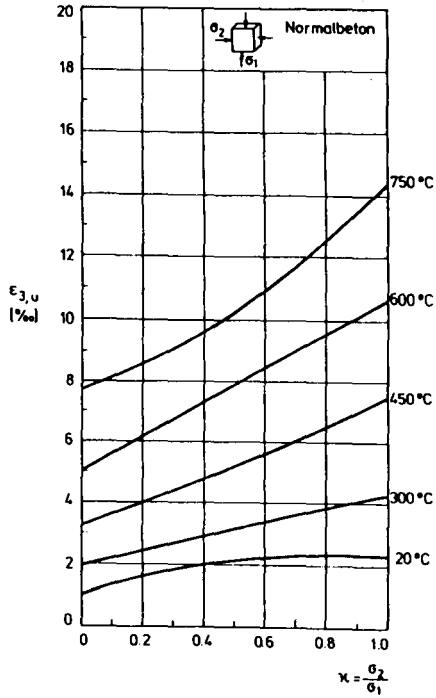


Bild 36 Abhängigkeit der Bruchdehnung $\epsilon_{3,u}$ von Temperatur und Spannungsverhältnis

Zur analytischen Formulierung der auf den Bildern 31-33 dargestellten Verformungen wurde ein Ansatz der Form

$$\frac{\sigma_1}{B_0} = a(\kappa, T) \epsilon_1^3 + b(\kappa, T) \epsilon_1^2 + c(\kappa, T) \epsilon_1 + d(\kappa, T), \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

mit den Randbedingungen

$$\frac{\sigma_2}{B_0} \leq \frac{\sigma_1}{B_0} \leq \frac{\sigma_{\max}}{B_0} \quad (5)$$

gewählt.

Die Koeffizienten a, b und c der Gleichung 4 für verschiedene Belastungsverhältnisse und Temperaturen sind auf Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Koeffizienten der Spannungs-Dehnungs-Kurvenfunktion

			20 °C	300 °C	450 °C	600 °C	750 °C
$\kappa = 0,0$	ϵ_1	a	- 0,08858	+ 0,04689	- 0,001599	- 0,001030	- 0,0002719
		b	- 0,4948	- 0,02877	- 0,03523	- 0,01805	- 0,007039
		c	- 1,1578	- 0,4195	- 0,2575	- 0,1112	- 0,06057
	ϵ_2	a	4,3875	0,4928	0,06236	0,008370	0,002373
		b	- 7,9845	- 1,7997	- 0,3960	- 0,08130	- 0,03178
		c	4,6924	2,1074	0,8194	0,2498	0,1323
$\kappa = 0,4$	ϵ_1	a	- 0,1581	+ 0,004333	+ 0,0009294	+ 0,0004350	+ 0,0002217
		b	- 0,8609	- 0,008852	- 0,006308	- 0,002869	- 0,001842
		c	- 1,7587	- 0,4551	- 0,2385	- 0,1007	- 0,06621
	ϵ_2	a	-246,9766	- 2,8837	- 2,5841	- 0,09491	- 4,3002
		b	-118,8510	- 9,6364	- 4,0475	- 0,2000	-10,7606
		c	- 19,9497	- 6,6424	- 3,1993	- 0,4450	- 6,6654
	ϵ_3	a	1,4322	0,06412	0,009861	0,0009725	0,0007275
		b	- 4,6496	- 0,4870	- 0,1198	- 0,02018	- 0,01583
		c	4,3134	1,3209	0,5423	0,1522	0,1164
$\kappa = 1,0$	ϵ_1	a	- 0,1271	- 0,007105	- 0,001197	- 0,0001855	- 0,0002636
		b	- 0,6790	- 0,08125	- 0,03202	- 0,002322	- 0,0005935
		c	- 1,4529	- 0,5248	- 0,2909	- 0,08164	- 0,05403
	ϵ_3	a	0,8935	0,03357	0,006387	0,0003645	0,0003455
		b	3,2790	- 0,2996	- 0,09287	- 0,01126	- 0,009598
		c	3,3366	0,9223	0,4499	0,1138	0,09386

6.2.2 Volumenverformungen

Die Volumenänderungskurven geben wichtige Hinweise auf Vorgänge struktureller Art, die das Verhalten von Beton bei Druckbeanspruchung beeinflussen.

Die Volumenänderungen wurden nach folgender Formel berechnet:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{(a_1 + \Delta a_1) \cdot (a_2 + \Delta a_2) \cdot (a_3 + \Delta a_3)}{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad (\approx \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3, \text{ siehe /40/})$$

Um den Einfluß der mechanischen Beanspruchung darzustellen, wurde die Änderung der Volumina auf das Volumen nach Aufheizung bezogen. (Die Volumenänderungen bei thermischer Beanspruchung sind auf den Bildern 48 und 49 dargestellt.) Der Verlauf der Kurven (Bilder 37-39) zeigt, daß sich nach Aufbringen der mechanischen Beanspruchung das Volumen der Probekörper verkleinert.

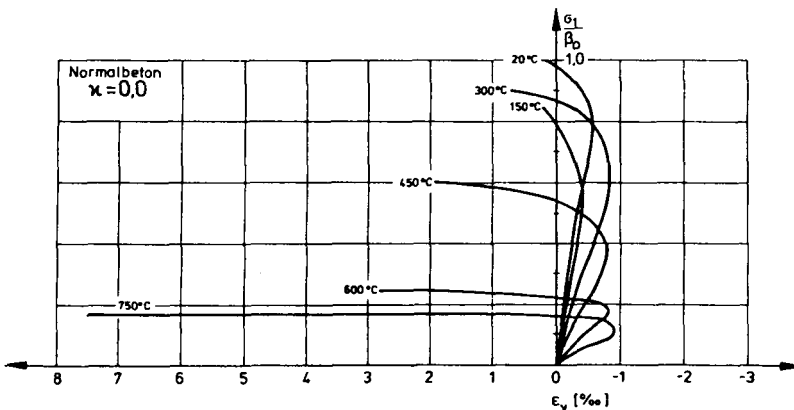


Bild 37 Lastabhängige Volumendehnungen bei konstanten Temperaturen; $\kappa = 0,0$

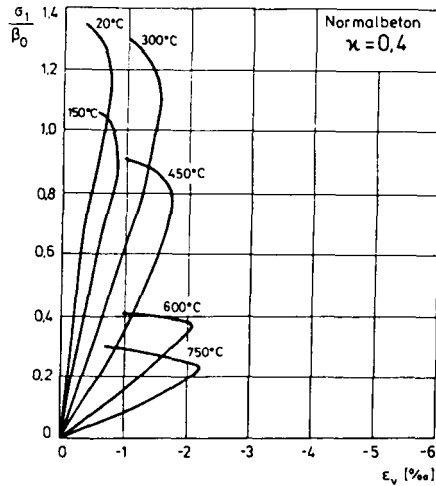


Bild 38 Lastabhängige Volumendehnungen bei konstanten Temperaturen; $\kappa = 0,4$

Bei kleinen Belastungsgraden besteht ein fast linearer Zusammenhang zwischen aufgebrachtter Spannung und Volumenänderung. Das Volumen nimmt mit steigendem Belastungsgrad rasch ab und erreicht in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Spannungsverhältnis ein Minimum.

Diese anfängliche Volumenabnahme resultiert aus einer Verdichtung des Materials durch das Schließen von Mikrorissen, die bei der Erhärtung des Zementsteins entstanden. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang dadurch, daß die Volumenverringerungen bei zweiaxialer Beanspruchung größer sind als bei einaxialer Beanspruchung. Neben dem Effekt des Rissenschließens kommt bei der zweiaxialen Beanspruchung der Effekt der weitgehenden Verhinderung von lastinduzierten Rissen hinzu.

Durch weitere Erhöhung der Beanspruchung ergeben sich durch

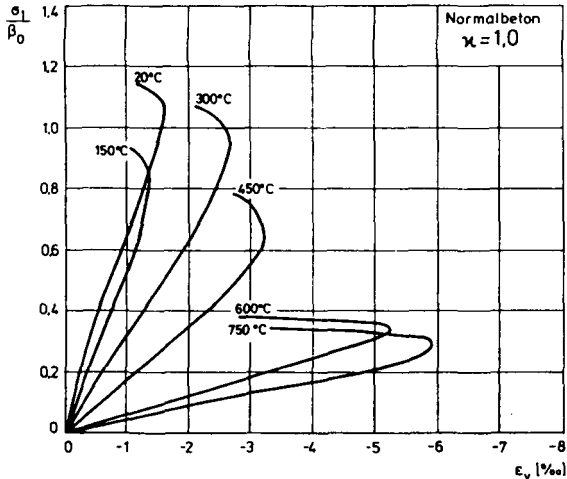


Bild 39 Lastabhängige Volumendehnungen bei konstanten Temperaturen; $\kappa = 1,0$

die Neubildung von Mikrorissen Schädigungen des Gefüges, die zu einer Volumenzunahme führen. Der Einfluß der Beanspruchung in zwei Achsen wird auch hier deutlich: das Volumen bleibt bei zweiaxialer Beanspruchung geringer als bei einaxialer Beanspruchung, da sich im einaxialen Fall größere Risse in zwei Querrichtungen bilden können, während im zweiaxialen Fall nur eine Richtung zur Bildung von Rissen frei ist.

Der eben geschilderte Mechanismus der Gefügeverdichtung und Gefügauflockerung bei mechanischer Beanspruchung wird anhand der Volumenkurven bei höheren Temperaturen noch deutlicher. Durch die vorherige Aufheizung des Probekörpers auf die Prüftemperatur haben sich in temperaturabhängiger Anzahl Risse zwischen Zuschlag und Zementsteinmatrix gebildet, die ihre Ursache im unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhalten der beiden Komponenten haben. Bei der darauf folgenden

mechanischen Beanspruchung werden die thermisch erzeugten Risse in Richtung der Belastung geschlossen, gleichzeitig werden jedoch auch schon bei nur geringen Belastungsgraden neue, mechanisch erzeugte Risse gebildet, da das Gefüge schon geschädigt ist. Anfangs überwiegt der erste Effekt, so daß eine Volumenabnahme zu beobachten ist.

Besonders bei hohen Temperaturen macht sich die Beanspruchung in der zweiten Achse auf die Volumenänderungen bemerkbar. Die thermisch erzeugten Risse werden in der Ebene der aufgebrachtten Spannungen geschlossen, ohne daß sich neue Risse senkrecht dazu bilden können. Dieser Effekt tritt bei symmetrischer zweiaxialer Beanspruchung am deutlichsten hervor, d.h. hier ist eine besonders starke Volumenabnahme zu beobachten. Im einaxialen Fall dagegen kommt es wegen der unbehinderten Rißausbreitung in zwei Richtungen bei hohen Temperaturen immer zu einer Volumenzunahme gegenüber dem Ausgangsvolumen.

Insgesamt ergeben sich für die Volumenänderungen bei Aufheizung und Belastung wegen der großen Werte der thermischen Dehnung immer Volumenvergrößerungen. So nimmt beispielsweise das Volumen eines auf 600°C aufgeheizten Probekörpers um rund 18% zu. Eine symmetrisch zweiaxiale Beanspruchung führt zwar dann zu einer maximalen, auf dieses Volumen bezogene Volumenabnahme um 5,2%, doch bleibt eine Volumenerhöhung um 12,7%, bezogen auf das Ausgangsvolumen, bestehen.

6.2.3 Querdehnzahlen

Im Bereich der Gültigkeit elastischer Beziehungen ist die bei einer Beanspruchung feststellbare Querdehnung der gleichzeitig auftretenden Längsverformung proportional. Der absolute Betrag des Quotienten dieser beiden Größen wird als Querdehnzahl definiert.

In Anlehnung an diese Definition werden für den ein- und

zwei axialen Beanspruchungsfall der absolute Betrag des Quotienten von Dehnung in unbelasteter Achse (ϵ_3) und Dehnung in der am stärksten belasteten Achse (ϵ_1) betrachtet und als Querdehnzahl bezeichnet.

Der Verlauf der Querdehnzahl bei zunehmender einaxialer Beanspruchung ist für verschiedene Temperaturen auf Bild 40 aufgetragen.

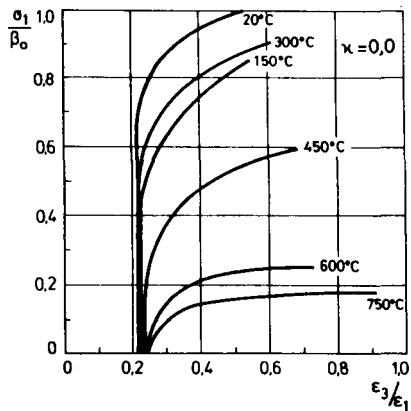


Bild 40 Querdehnraten in Abhängigkeit vom Belastungsgrad

Die bei 20°C ermittelte Querdehnraten ist bis zu etwa 70 % der Bruchfestigkeit konstant. Oberhalb von 70 % vergrößert sich die Querdehnraten mit zunehmender Beanspruchung: die Plastifizierung des Materials durch mechanisch erzeugte Risse schreitet schnell fort. Der Verlauf der Querdehnraten bei hohen Temperaturen zeigt, daß der Bereich konstanter Werte kleiner, der absolute Betrag jedoch sehr groß wird. Der Beton ist in seinem Verhalten plastischer geworden. Die Dehnungen in den unbelasteten Achsen wachsen bei zunehmender Beanspruchung überproportional gegenüber der Stauchung in der belasteten Achse an. Verhältniswerte von größer 0,5 zeigen, daß der Gültigkeitsbereich elastischer Beziehungen verlassen wurde.

Der temperaturabhängige Verlauf der bei $0,3 \beta_0$ gemessenen Querdehnzahlen unter einaxialer Beanspruchung ist auf Bild 41 dargestellt: Mit zunehmender Temperatur vergrößert sich die Querdehnzahl leicht. Bei höheren Temperaturen wird also die Dehnung in der unbelasteten Achse erleichtert.

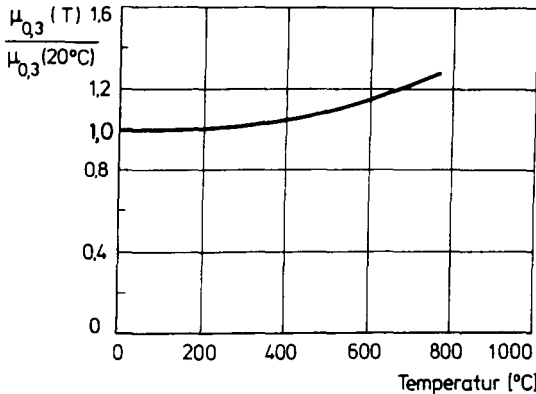


Bild 41 Querdehnzahlen in Abhängigkeit von der Temperatur

Noch erheblich deutlicher wird dieses Verhalten bei zweiach-
sialer Beanspruchung. Gegenüber der einaxialen Beanspruchung
wird die Dehnung in der unbelasteten Achse durch die zusätz-
liche Beanspruchung in der zweiten Achse verstärkt. Der Pro-
portionalbereich wird sehr schnell verlassen, und die Quer-
dehnzahl erreicht sehr große Werte.

6.2.4 Arbeitsvermögen

Unter Arbeitsvermögen wird hier die im Druckversuch dem Beton
pro Masseneinheit zugeführte Energie verstanden. Zur Be-
stimmung des Arbeitsvermögen wird aus den Belastungs -
Verformungs - Kurven durch Integration die am Beton geleiste-
te Verformungsarbeit bis zum Versagen ermittelt:

$$A = \int_{s=0}^{s=s_u} F \cdot ds$$

Bei zweiaxialer Beanspruchung werden die Verformungsarbeiten der einzelnen Belastungskräfte zu einem zweiaxialen Arbeitsvermögen summiert.

Bild 42 zeigt die Abhängigkeit des Arbeitsvermögens von der Temperatur und dem Belastungsverhältnis. Das Arbeitsvermögen nimmt mit steigender Temperatur bis knapp über 100°C ab, erreicht bei etwa 400°C ein Maximum und geht danach wieder auf seinen Ausgangswert zurück.

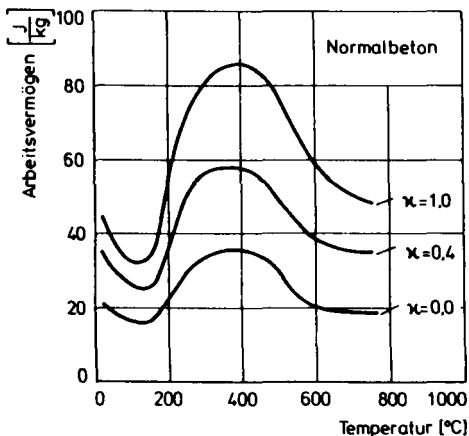


Bild 42 Arbeitsvermögen von Normalbeton

Das Minimum bei knapp über 100°C steht in Zusammenhang mit dem in Kap. 5.4 diskutierten Festigkeitsloch in diesem Temperaturbereich. Das geringe Arbeitsvermögen muß auch als Ursache für das frühe Versagen der Probekörper ($T_{krit} = 125^\circ\text{C}$) bei den instationären Hochtemperaturkriechversuchen gesehen werden, wenn die Probekörper mit etwa 80 % der Kurzzeitbruchlast bei Raumtemperatur belastet waren (siehe 6.3). Nur wenig kleinere Belastungshöhen führten dagegen zum Versagen

der Probekörper bei Temperaturen um 800°C.

Die erhebliche Zunahme des Arbeitsvermögens bis zu 400°C hat wichtige Auswirkungen in praktischer Hinsicht: Die hierdurch ausgedrückte hohe Verformungsfähigkeit und hohe Belastbarkeit des Betons bewirkt, daß Beton bei Druckbeanspruchung und unter hohen Temperaturen duktil versagt.

6.3 Verformungen unter instationärer Temperaturbeanspruchung

6.3.1 Gesamtverformungen

Zur Ermittlung des Verformungsverhaltens unter instationärer Temperaturbeanspruchung dienen Versuche, bei denen die Verformungen von Probekörpern gemessen werden, die bei Aufheizung konstant ein- oder zweiachsig belastet werden. Bei diesen instationären Hochtemperaturkriechversuchen werden während der Aufheizzeit die Gesamtverformungen unter unterschiedlichen Belastungshöhen und einem vorgegebenen Temperaturanstieg gemessen. Aus dem Verlauf der Gesamtverformungen, die aus elastischer und thermischer Dehnung und dem last- und temperaturabhängigen Kriechen bestehen, kann eine "kritische Betontemperatur", d.h. eine beanspruchungsbezogene Bruchtemperatur abgelesen werden.

Die thermische Dehnung des Betons wird anhand von Versuchen an unbelasteten Probekörpern ermittelt. Dabei ist davon auszugehen, daß der Schwindanteil in der thermischen Ausdehnung enthalten ist, da der Beton unversiegelt aufgeheizt wird.

Die praktische Versuchsdurchführung erfolgt nach dem auf Bild 12 dargestellten Ablauf: Die Probekörper werden entsprechend dem gewählten Belastungsgrad (in Prozent der einaxialen Raumtemperaturdruckfestigkeit) und dem gewählten Belastungskräfteverhältnis $F_2:F_1$ bei Raumtemperatur belastet. Der Belastungsgrad und das Belastungsverhältnis werden während der folgenden Aufheizung mit 2 K/min konstant gehalten. Die Probekörper werden bis zum Versagen aufgeheizt, die Dehnungen werden in den drei Hauptachsen gemessen.

Die nach Beginn der Aufheizung gemessenen Verformungen im einaxialen Fall sind für verschiedene Belastungsgrade auf Bild 43 dargestellt.

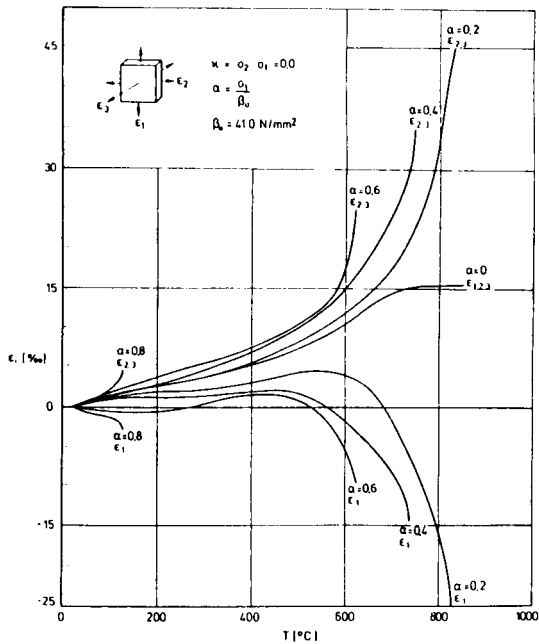


Bild 43: Dehnungen bei Aufheizung unter einaxialer Beanspruchung

Als Bezugskurve für die weiteren Betrachtungen soll die Kurve des Belastungsgrades 0, also der thermischen Dehnung, genommen werden, deren Verlauf folgendermaßen erklärt werden kann:

Durch Entwässerungs- und Dehydratationsvorgänge sowie durch Inkompatibilitätseffekte entstehen im thermisch beanspruchten Betongefüge Risse. Das Auftreten der Risse und die thermische Dehnung der Zuschläge ergeben die thermische Dehnung von Beton. Der erste Anstieg bis etwa 150°C wird dabei durch die Ausdehnung von Zementstein und Zuschlägen, der zweite steile Anstieg ab 450°C durch eine verstärkte Ausdehnung der

Zuschläge verursacht. Von Einfluß ist dabei sicherlich auch die Portlandzersetzung ab 450°C.

Eine aufgebrachte Belastung bis zu 70 % der einaxialen Raumtemperaturfestigkeit behindert die freie thermische Ausdehnung in Richtung der Belastung derart, daß nur noch geringe Dehnungen erreicht werden. Der Kurvenverlauf der Verformungen in den belasteten Achsen zeigt mit steigender Temperatur aufeinanderfolgend ein relatives Maximum, ein relatives Minimum und ein Maximum. Bei weiter steigenden Temperaturen werden bis zum Versagen des Probekörpers recht große Stauchungen erreicht.

Belastungsgrade über $0,7 \beta_0$ führen schon bei niedrigen Temperaturen von etwa 120°C bis 130°C zum Versagen des Probekörpers. Durch die aufgebrachte Belastung werden die Querdehnungen vergrößert, ihre rapides Zunehmen kündigt das Versagen des Probekörpers an.

Eine symmetrisch zweiachiale Beanspruchung führt zu einer enormen Zunahme der Querdehnung in der dritten freien Achse (Bild 44).

Auch hier sind wieder die große Verformungsgeschwindigkeit und die großen absoluten Werte der Verformungen Ursache für das Versagen des Probekörpers. Die Stauchungen in den belasteten Achsen sind in etwa so groß wie im einaxialen Fall.

Neben den gegenüber einaxialer Beanspruchung erheblich größeren Dehnungen in der freien Achse werden bei zweiachialer Beanspruchung höhere Versagenstemperaturen als im einaxialen Fall erreicht.

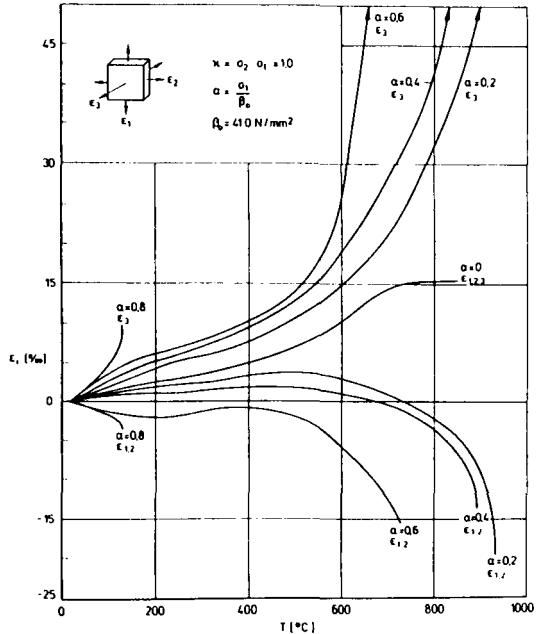


Bild 44: Dehnungen bei Aufheizung unter symmetrisch zweiachialer Beanspruchung

6.3.2 Kritische Temperaturen

Auf Bild 45 sind die sog. kritischen Betontemperaturen in Abhängigkeit vom Belastungsgrad dargestellt.

Es lassen sich drei Bereiche unterscheiden. Im einaxialen Fall führt eine Beanspruchung von 0 bis 70 % der Druckfestigkeit zu Versagenstemperaturen, die etwa bei 500°C liegen. Zwischen 70 % und 80 % befindet sich ein im Hinblick auf die Versagenstemperatur sehr kritischer Bereich. Schon geringe Veränderungen im Belastungsgrad können zu Verschiebungen bei der kritischen Temperatur um mehrere 100 K führen.

Belastungsgrade über 80 % bedeuten das Versagen des Probekörpers schon bei Temperaturen unter 130°C. Allerdings muß hier-

bei beachtet werden, daß es sich um den Bereich der Dauerstandfestigkeit handelt, ein Bereich, in dem zusätzlich zur Temperatur die Dauer der Beanspruchung eine wesentliche Rolle spielt.

Zweiachsale Beanspruchungen führen innerhalb der genannten Belastungsbereiche zu einer Verschiebung zu höheren Temperaturen hin, also auch zu höheren kritischen Temperaturen.

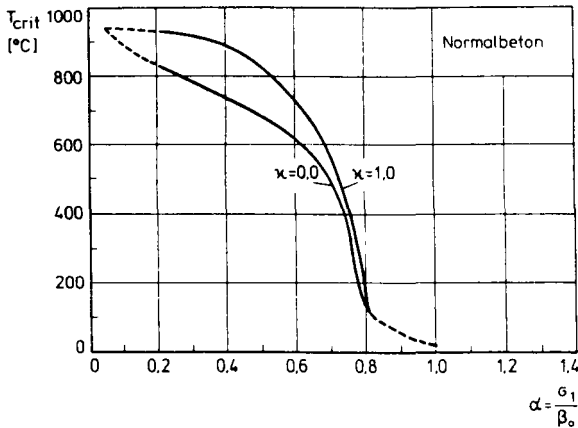


Bild 45: Kritische Temperaturen von Normalbeton

6.3.3 Mechanisch verursachte Verformungsanteile

Die auf den Bildern 43 und 44 dargestellten Gesamtverformungen nach Beginn der Aufheizung werden in einen mechanischen und thermischen Anteil getrennt, um den Einfluß der verschiedenen Beanspruchungsarten deutlich zu machen:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{mech} + \epsilon_{therm} ; \quad \epsilon_{mech} = \epsilon_{kr} + \epsilon_{el}$$

Für den thermischen Verformungsanteil werden die Werte der unbelasteten Aufheizung des Probekörpers genommen.

Auf den Bildern 46 und 47 sind die mechanisch verursachten Verformungsanteile (ohne Verformungsanteil der Belastung bei

Raumtemperatur) für den Fall der einaxialen und der zweiaxialen Beanspruchung dargestellt.

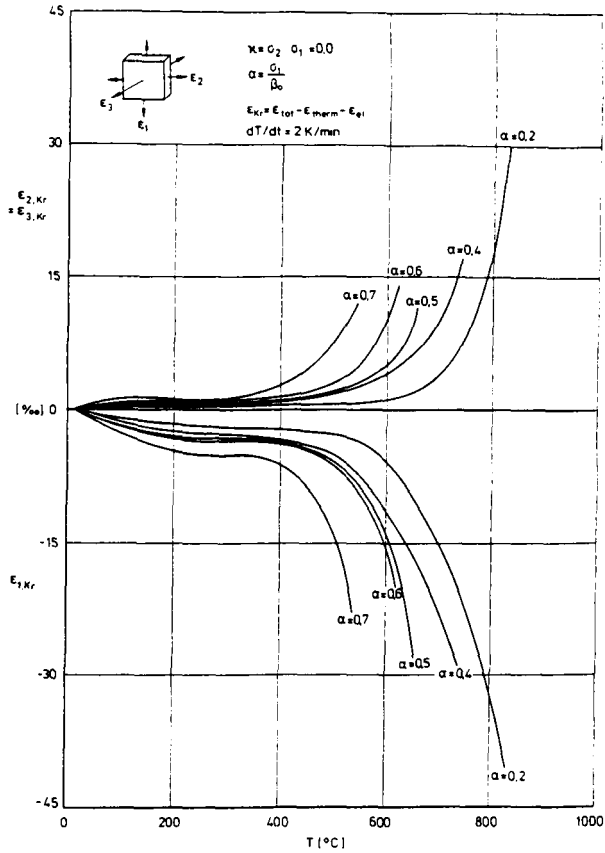


Bild 46: Instationäre Kriechverformungen unter einaxialer Beanspruchung

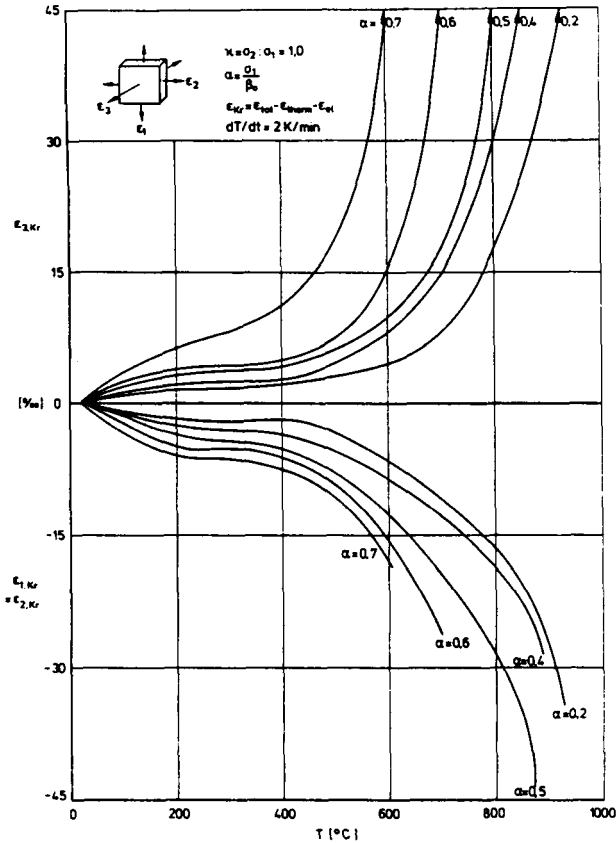


Bild 47: Instationäre Kriechverformungen unter symmetrisch zweiachialer Beanspruchung

Eine mechanisch einaxiale Belastung hat auf die Kriechdehnungen in den freien Achsen bis zu einer Temperatur von etwa 0,65 der Versagenstemperatur nur geringe Auswirkungen. Bei weiter steigender Temperatur dominiert der mechanische Einfluß über den thermischen und bewirkt mit hoher Verformungsgeschwindigkeit das Versagen des Probekörpers.

In der belasteten Achse verursacht die Druckbeanspruchung von Beginn der Aufheizung an Stauchungen, die bei Annäherung an die Versagenstemperatur sehr groß werden.

Die insgesamt in einem großen Temperaturbereich recht dicht beieinander liegenden Kurven der Dehnungen in den freien Achsen bzw. in der belasteten Achse zeigen, daß der Belastungsgrad für die mechanisch verursachten Verformungen in weiten Bereichen keinen großen Einfluß hat.

Eine aufgebrauchte zweiachiale Beanspruchung wirkt sich in besonders großem Maß auf das Dehnungsverhalten in der freien Achse aus. Die mechanisch verursachten Querdehnungen sind von Beginn der Aufheizung an groß. Sie erreichen bei steigenden Temperaturen nach einer kurzen Phase konstanter Werte sehr große Dehnungsgeschwindigkeiten, die zusammen mit absolut großen Querverformungswerten zum Versagen des Probekörpers führen.

6.3.4 Volumenverformungen

Die relativen Volumenänderungen von Probekörpern beim Aufheizen unter verschiedenen Belastungsgraden sind auf Bild 48 für den einaxialen Fall und auf Bild 49 für den symmetrisch zweiachialen Fall dargestellt. Bei einaxialer Belastung ergibt sich die interessante Tatsache, daß die Volumenänderungen in großen Bereichen unabhängig vom Belastungsgrad sind. Offenbar wird das Volumen der durch die Belastung geschlossenen thermischen Risse normal zur Belastungsrichtung durch das Volumen von Rissen ersetzt, die sich, verstärkt durch die Belastung, parallel zur Belastungsrichtung bilden.

Bei symmetrisch zweiachialer Beanspruchung wird, abhängig vom Belastungsgrad, das Volumen während der Aufheizung gegenüber dem Volumen bei unbelasteter Aufheizung verkleinert. In der Nähe der Versagenstemperatur nimmt das Volumen der belasteten Probekörper rasch zu und übertrifft das der unbelasteten Probekörper weit.

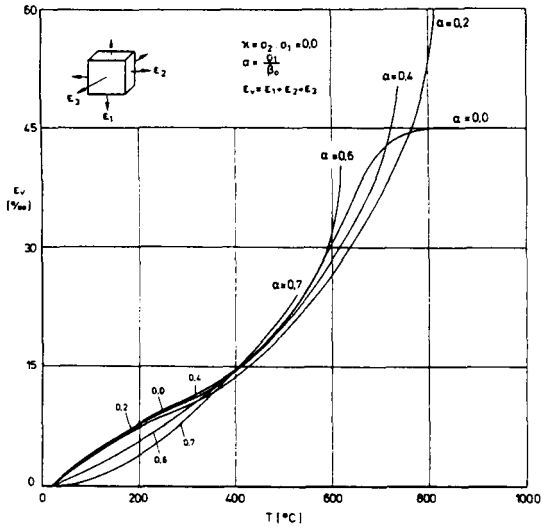


Bild 48: Instationäre Volumenänderungen unter einaxialer Beanspruchung

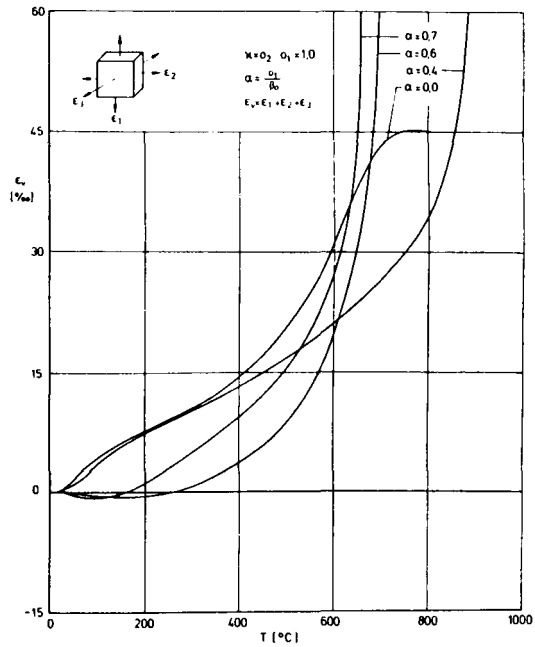


Bild 49: Instationäre Volumenänderungen unter symmetrisch
zweiachialer Beanspruchung

6.4 Zwängungskräfte in Betonprobekörpern bei vollständiger Dehnungsbehinderung

Die zeitliche Entwicklung der Zwängungskräfte von luftgelagerten (20°C / 65 % r.F.) und vorgetrockneten Probekörpern (105°C) bei vollständiger Dehnungsbehinderung ist auf Bild 50 für Versuche ohne Vorlast dargestellt. Auf Bild 51 ist der Verlauf der Zwängungskräfte von vorbelasteten Probekörpern gezeigt. Die Versuche wurden unter einaxialer und symmetrisch zweiaxialer Beanspruchung durchgeführt.

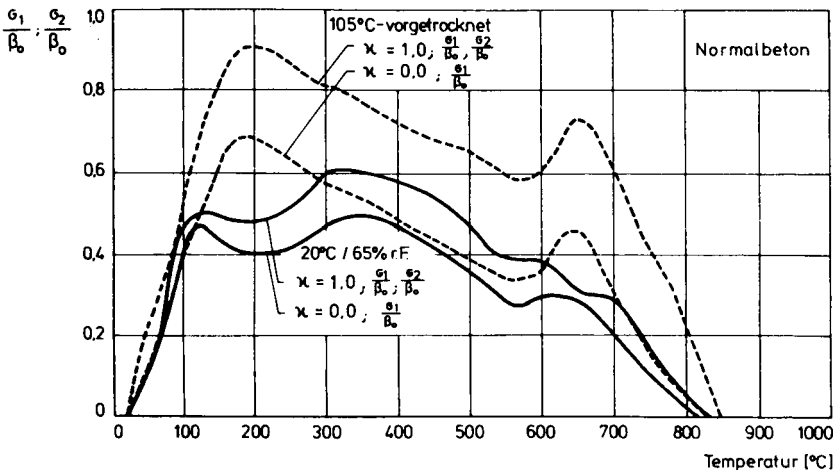


Bild 50: Zwängungskräfte bei vollständiger Dehnungsbehinderung, Vorlast 0,0 β_0

Die Kurven für $\kappa = 0,0$ zeigen den Verlauf der bezogenen Spannung σ_1 . Die Kurven, die mit $\kappa = 1,0$ bezeichnet sind, gelten wegen der Symmetrie der aufgetragenen Spannungen, sowohl für σ_1 als auch für σ_2 . Sie verlaufen insgesamt diskontinuierlich. Bis zu 120°C steigen die Zwängungskräfte für den luftgelagerten Beton (20°C/65 % r. F.) stark an. Danach folgt zwischen 100°C und 200°C eine Phase des Schwindens, in der die Zwängungskräfte abnehmen. Nach Durchlaufen eines

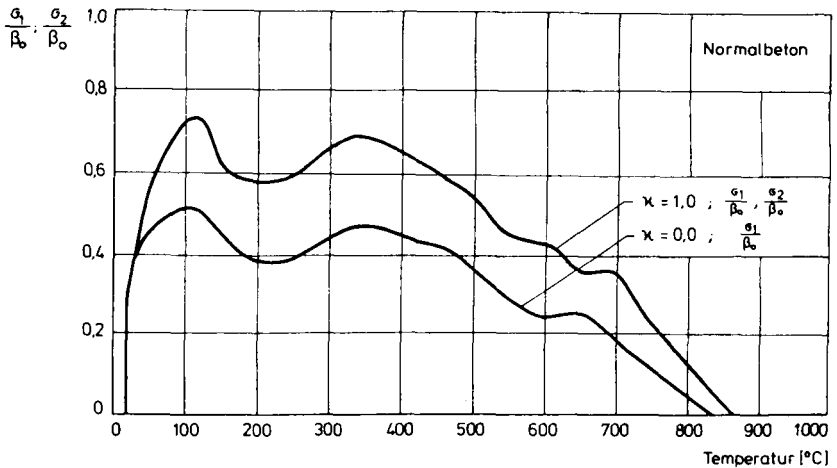


Bild 51 Zwängungskräfte bei vollständiger Dehnungsbehinderung, Vorlast $0,3 \beta_0$

Minimums bei knapp über 200°C steigen die Zwängungskräfte mit steigender Temperatur wieder an und erreichen bei 310°C bis 350°C Maximalwerte, die bei 50 bis 60 % der Kurzzeitbruchlast bei Raumtemperatur liegen. Anschließend nehmen die Zwängungskräfte ständig ab und erreichen bei etwas über 800°C den Wert 0.

Probekörper, die bei 105°C vorgetrocknet wurden, verhalten sich dagegen anders. Bei 200°C tritt ein deutliches Zwängungsmaximum auf. Die Zwängungskräfte erreichen Werte zwischen 70 bis 90 % der einaxialen Bruchfestigkeit bei 20°C. Die hohen Zwängungskräfte nehmen jedoch rasch ab. Nach Durchlaufen eines Minimums bei etwa 560°C tritt ein scharfes Maximum bei 650°C ein, das dann schnell bis 870°C abgebaut wird.

Von großem Einfluß auf die Entwicklung der Zwängungskräfte bei steigenden Temperaturen sind zum einen die Werte für die thermische Dehnung und die Kriechverformungen des Betons, die

mit den im Beton ablaufenden Entwässerungs- und Dehydrationsvorgängen eng zusammenhängen. Die Entwicklung der Zwängungskräfte in vorgetrockneten und luftgelagerten Probekörpern im Temperaturbereich von 20°C bis 200°C zeigt dies deutlich. Die höhere Feuchtigkeit in luftgelagerten Probekörpern begünstigt die Kriechverformungen, so daß sich, verglichen mit vorgetrockneten Probekörpern, bei über 100°C bedeutend geringere Zwängungskräfte ergeben. Das ausgeprägte Minimum in den Zwängungskräften der luftgelagerten Probekörper bei 200°C rührt offenbar von Trocknungs- und Schwindvorgängen her. Diese Vorgänge waren in vorgetrockneten Probekörpern bereits abgelaufen. Nach Überschreiten des zweiten Maximums bei 650°C nehmen die Zwängungskräfte infolge der thermischen Zersetzung des Betons rasch ab.

Der Spannungszustand beeinflusst die qualitative Entwicklung der Zwängungskräfte nur wenig. Der zweiachsale Spannungszustand verursacht allerdings höhere Zwängungskräfte als der einachsale Spannungszustand. Die Behinderung der Querdehnung einer Richtung verursacht also eine Erhöhung der Zwängungskraft in der dazu senkrechten Richtung.

Die Auswirkungen ein- oder zweiachsaler Druckbeanspruchung während des Zwängungsversuches (ohne Vorlast) auf die Dehnungen in den freien Achsen bzw. die Dehnung in der freien Achse des luftgelagerten Betons sind auf Bild 52 dargestellt. Der Kurvenverlauf entspricht qualitativ in etwa dem der thermischen Dehnung (siehe Bild 43 und 44). Die Zwängungskraft, bzw. Zwängungskräfte haben nur auf die Größe der Dehnungen einen Einfluß. Im einachsialen Fall, ϵ_1 bleibt Null, erreichen ϵ_2 und ϵ_3 Maximalwerte von 18%. Die Dehnung ϵ_3 in der freien Achse beim vierseitig gezwängten Probekörper hat bis zu 350°C den gleichen Verlauf wie bei zweiseitiger Zwängung. Bei höheren Temperaturen wird sie dann schnell größer und erreicht Werte von 26% bei knapp über 800°C, wenn die Zwängungskräfte gegen Null gehen. Für die beiden dargestellten Beanspruchungsfälle zeigen die Volumendehnungen

bei einaxialer Druckbeanspruchung erwartungsgemäß deutlich größere Werte als bei zweiaxialem Druck.

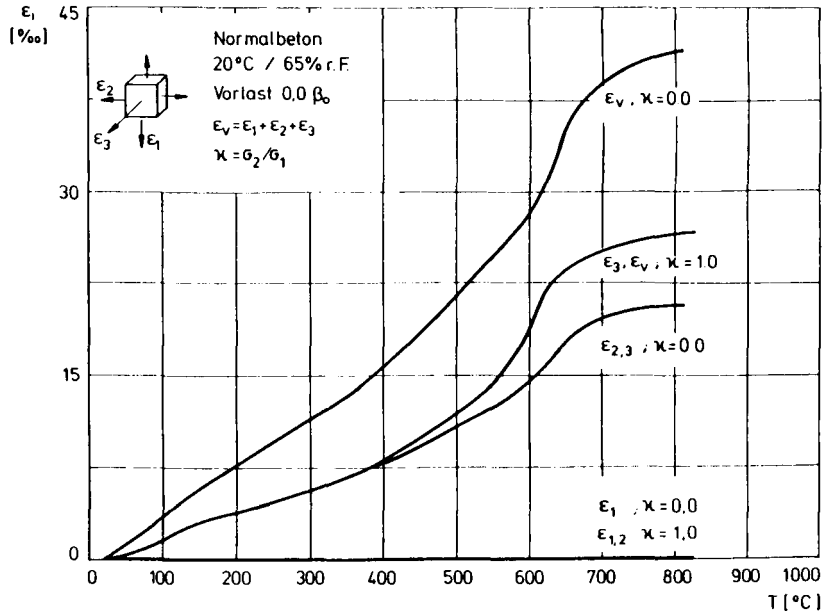


Bild 52: Gesamtverformungen und Volumenverformungen im Zwängungsversuch

7 Ein rißmechanisches Modell zur Diskussion des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Normalbeton

7.1 Allgemeines

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Betons wird entscheidend durch die Bildung und Ausbreitung von Rissen bestimmt. Im folgenden werden deshalb die Festigkeitsänderungen und das Verformungsverhalten unter thermischer und mechanisch einaxialer oder zweiaxialer Beanspruchung auf die bei unterschiedlichen Beanspruchungshöhen festgestellten Rißverteilungen zurückgeführt.

Da die Risse durch das unterschiedliche Verhalten der Betonkomponenten entstehen, werden vorweg deren Änderungen bei Beanspruchung kurz dargestellt. Der Normalbeton wird dabei als ein heterogenes System angesehen, das aus einer Matrix aus Portlandzementstein und zementfeinen Zuschlägen, darin eingelagerten quarzitischen Grobzuschlägen und einem Poren- bzw. Rißsystem besteht.

7.2 Verhalten der einzelnen Betonbestandteile

7.2.1 Zementstein

Der Zementstein zeigt unter mechanischer Beanspruchung eine hohe Verformbarkeit. Unter einaxialer Druckbeanspruchung werden Verformungen bis zu -8% beobachtet. Im Bereich des zweiaxialen Druckes wird bei Raumtemperatur keine bzw. nur eine geringe Festigkeitserhöhung gegenüber der einaxialen Druckfestigkeit festgestellt /16,26/.

Unter einer steigenden Temperaturbeanspruchung gibt der Zementstein sukzessive das bei der Hydratation gebundene Wasser ab. Verbunden ist damit die physikalische und chemische Zersetzung der den Zementstein aufbauenden Phasen, die größtenteils zu einer Veränderung seiner Struktur führt. Dabei laufen in Abhängigkeit von der Temperatur folgende

Reaktionen ab /39,47,48/:

Zwischen 20 und ungefähr 150°C wird das in Grobporen adsorptiv (physikalisch) gebundene Wasser ausgetrieben, ein Vorgang, der die Struktur nur geringfügig ändert.

Gleichzeitig beginnt die Entwässerung von Hydratphasen, also die Austreibung chemisch gebundenen Wassers. Zwischen 150 und 450°C verändert sich die Struktur des Zementsteins kaum. Erst die Portlanditersetzung (450–550°C) und die Zersetzung der CSH-Phasen (ab 600°C) führen zu gravierenden Änderungen der Zementsteinstruktur, erkennbar an einer deutlichen Zunahme des Porenvolumens und der Porenradien.

Makroskopisch äußern sich diese Vorgänge durch eine thermische Dehnung des Zementsteins auf etwa +2% bei 150°C (hervorgerufen vor allem durch die Festkörperdehnung) und eine folgende Kontraktion bis zum Erreichen von -17% bei 800°C.

Es soll allerdings an dieser Stelle bemerkt werden, daß sich die Herstellung von Probekörpern aus reinem Zementstein und die Durchführung von Versuchen mit derartigen Probekörpern als problematisch erweist. Bei der Herstellung werden deshalb der Mischung Magerungsmittel in Form von feinem Sand beigegeben. Dieses Vorgehen entspricht der oft bei Beton angewendeten Betrachtungsweise, den zementfeinen Zuschlag dem Zementstein zuzuordnen, da beide Anteile nur willkürlich voneinander zu trennen sind.

7.2.2 Zuschlag

Die Festigkeit der betrachteten quarzitisches Zuschläge liegt in der Regel nicht unter 100 N/mm². Der Elastizitätsmodul ist entsprechend groß. Das Verformungsverhalten unter mechanischer Beanspruchung ist im wesentlichen linear.

Das thermische Verhalten im betrachteten Temperaturbereich

besteht physikalisch in einer monotonen positiven Dehnung, bei 573°C unterbrochen durch die Quarzinversion. Diese stellt eine sprunghafte reversible Kristallumwandlung mit einer Volumenzunahme von etwa 2% dar. Chemische Umwandlungen finden nicht statt.

Durch den volumenmäßig hohen Anteil des Zuschlages im Beton (65-80 Vol% bei Raumtemperatur) bestimmt dessen Verhalten maßgeblich das Verformungsverhalten des Betons. Unter thermischer Beanspruchung führt dies insgesamt zu einer positiven thermischen Ausdehnung.

7.2.3 Poren- und Rißsysteme

Die Gesamtporosität eines heterogenen Systems, wie es der Beton darstellt, besteht aus der Porosität der einzelnen Komponenten und der Porosität, die durch den Verbund der Komponenten gegeben ist.

Der Zementstein enthält zwei, sich teilweise durchdringende Porensysteme /39,46/:

- Gelporen mit einer Größe von weniger als 0,004 µm;
- und
- Kapillarporen mit Größen zwischen 0,004 und 0,12 µm;

Der Einfluß der temperaturbedingten Veränderungen im Gelporenbereich auf das Verhalten von Beton darf bis 450°C wahrscheinlich vernachlässigt werden. Erst im Zusammenhang mit der Zersetzung des Portlandzements ab 450°C gibt es Veränderungen in diesem Porenbereich.

Die Kapillarporen, verursacht durch überschüssiges Anmachwasser und ganz oder teilweise damit gefüllt, geben dieses sogenannte physikalisch gebundene und dadurch leicht verdampfbare Wasser bis 200°C ab. Das bei vielen Versuchen

beobachtete Festigkeitsloch bei 150°C (siehe Kap. 5.4) hat vermutlich seine Ursache in dieser Entwässerung der Kapillarporen und dem damit verbundenen Anstieg des Porenwasserdruckes.

Die Porosität des hier betrachteten quarzitisches Zuschlags ist in der Regel so klein, daß sie vernachlässigt werden kann.

Der Verbund zwischen Zementstein und Zuschlägen führt zu der Porosität der Verbundzonen (siehe z.B. /49/). Sie sind zum einen aus hochporösen Hydratationsprodukten von der Zementhärtung her aufgebaut und zum anderen mit Schrumpfrissen durchsetzt, die auf Austrocknungs-, Abkühlungs- und Sedimentationsvorgänge im jungen Beton zurückzuführen sind /49,50,51/. Neben diesen Mikrorissen in der Verbundzone (Haftrisse) sind in der Regel Risse von Zuschlag zu Zuschlag (Matrixrisse) vorhanden.

Die Verbundzonenporosität und die Risse haben den größten Einfluß auf das Verhalten von Beton. Denn nur so ist es zu verstehen, daß Beton insgesamt eine niedrigere Festigkeit haben kann als seine Einzelkomponenten Zementstein und Zuschlag.

Beim Aufheizen von Beton vergrößert sich nun die Porosität des Verbundbereiches (Radien größer als 0,12 µm) kräftig /39,52/. Sowohl Porenvolumen als auch Porenradien werden mit steigender Temperatur größer. Als Ursachen werden im wesentlichen das unterschiedliche thermische Ausdehnungsverhalten von Zementstein und Zuschlag gesehen.

Dieses unterschiedliche Ausdehnungsverhalten führt zu thermisch induzierten Spannungen, die sich durch Mikrorißbildung in den Kontaktzonen abbauen (Vergrößerung des Porenvolumens). Gleichzeitig weiten sich bestehende Risse deutlich auf (der Porenradius wird größer), so daß einige auch makroskopisch erkennbar werden. Diese erheblichen Zunahmen an Porenvolumen und Porenradien sind verantwortlich für den starken Druck-

festigkeitsabfall ab 300°C, die Zunahme der Verformbarkeit bei mechanischer Hochtemperaturbeanspruchung und dem damit verbundenen steilen Abfall des Elastizitätsmoduls.

Bild 53 zeigt die differentielle Verteilung der Porenradien für thermisch beanspruchten Mörtel und Normalbeton. Die Flächen unter den Verteilungskurven (schraffiert für Beton und weiß für Mörtel, dabei teilweise durch die des Betons verdeckt) stellen das integrale Porenvolumen dar. Jede der Flächen ist durch eine Kurve, die, ausgehend vom Hauptmaximum, die Nulllinie des differentiellen Porenvolumens zwischen 0,1 und 0,2 µm schneidet, in zwei Teilflächen geteilt. Diese stellen zwei, einander durchdringende Porensysteme dar, wobei der Bereich kleinerer Porenradien das Porensystem der Zementsteinmatrix repräsentiert (siehe auch /39,52/).

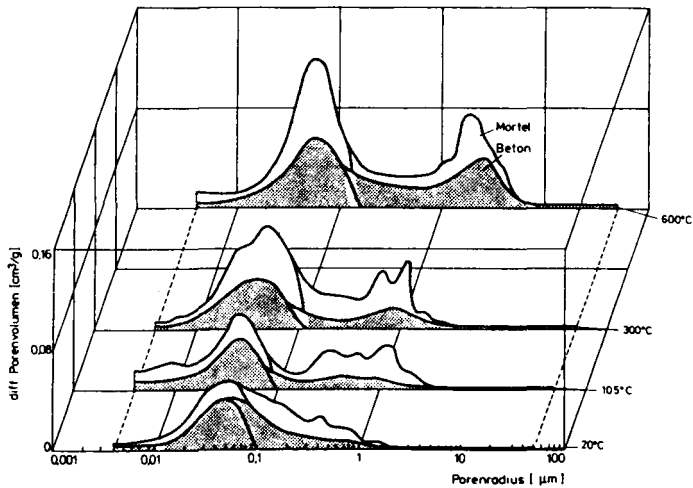


Bild 53: Porenradienverteilungen von thermisch beanspruchtem Mörtel und Beton

Die Porenvolumina und die Porenradienverteilungen wurden mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelt. Bei diesem Untersuchungsverfahren wird Quecksilber unter Druck in Öffnungen und Risse einer Betonprobe gepreßt. Aus dem Zusammenhang von intrudiertem Quecksilber und aufgebrachtem Druck läßt sich eine differentielle Porenradienverteilungskurve berechnen, die die Häufigkeitsverteilung von Poren mit einem bestimmten Radius angibt.

Bild 53 zeigt, daß die Unterschiede in den Porenradienverteilungen von Mörtel und Beton, die nach Aufheizen auf die Prüftemperatur und Abkühlen gewonnen wurden, quantitativer Art sind. Sie sind durch die unterschiedlichen Mengenverhältnisse von Zementstein und Zuschlag in Mörtel und Beton bedingt. So sind die Maxima im Zementsteinbereich bei Beton durch den geringeren Zementgehalt des Betons kleiner. Auch die Verbundzonenporosität bei Radien um 1 μm ist beim Beton niedriger, weil durch die größeren Zuschläge und die somit kleinere Gesamtoberfläche der Zuschläge weniger Verbundzonenbereich vorhanden ist. Durch die in beiden Materialien gleichartigen Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen bestehen qualitativ keine Unterschiede. Die zwei verschiedenen, einander durchdringenden Porensysteme von Zementsteinmatrix und Verbundzone sind jeweils deutlich erkennbar.

Die Bilder 54 und 55 zeigen Porenradienverteilungen von Mörtel nach mechanischer und thermischer Beanspruchung. Auf Bild 54 sind die Auswirkungen von mechanischen Beanspruchungen auf die Porenradienverteilungen bei einer Maximaltemperatur von 300°C dargestellt. Besonders auffallend ist der Unterschied in den Verbundzonenporenradienverteilungen und -volumina. Eine mechanische Beanspruchung, aufgebracht nach Erreichen der Höchsttemperatur, führt zu Volumenverminderungen gegenüber dem unbelasteten Probekörper, vermutlich durch Schließen der thermisch erzeugten Risse, und einer Verschiebung der Reißweiten zu kleineren Radien hin. Die vor der Aufheizung aufgebrachte und während der Beheizung aufrecht erhaltene mechanische Beanspruchung bewirkt zwar ein

Schließen von Rissen kleinerer Radien, führt aber zur Öffnung großer Risse und damit zu einer Zunahme des Rißvolumens.

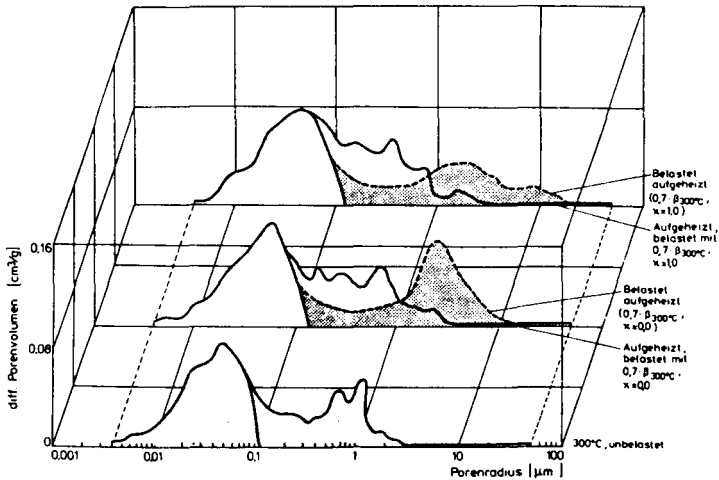


Bild 54: Porenradienverteilungen von Mörtel nach mechanischer und thermischer Beanspruchung bis zu 300°C.

Diese unterschiedlichen Auswirkungen des Zeitpunktes der Aufbringung der mechanischen Beanspruchung sind bei 600°C Höchsttemperatur nicht zu beobachten (siehe Bild 55). Das Mörtelgefüge ist thermisch bereits derart geschädigt, daß die mechanische Beanspruchung nur noch wenig Einfluß auf Rißverteilung und -volumen hat. Beide Beanspruchungsarten führen zu einer leichten Verschiebung der Rißweiten zu größeren Werten hin. Risse noch größerer Weite werden mit diesem Meßverfahren nicht erfaßt. Die Belastung nach Aufheizen hat eine geringe Volumenabnahme zur Folge, die im zwei axialen Fall etwas größer als im ein axialen Fall ist. Die Belastung vor dem Aufheizen hat im ein axialen Fall die vergleichsweise größte Verschiebung der Rißweiten zu größeren Werten hin zur Folge und

damit eine Zunahme des Rißvolumens, die zweiaxiale Beanspruchung verringert jedoch das Rißvolumen durch Verkleinerung der Rißweiten.

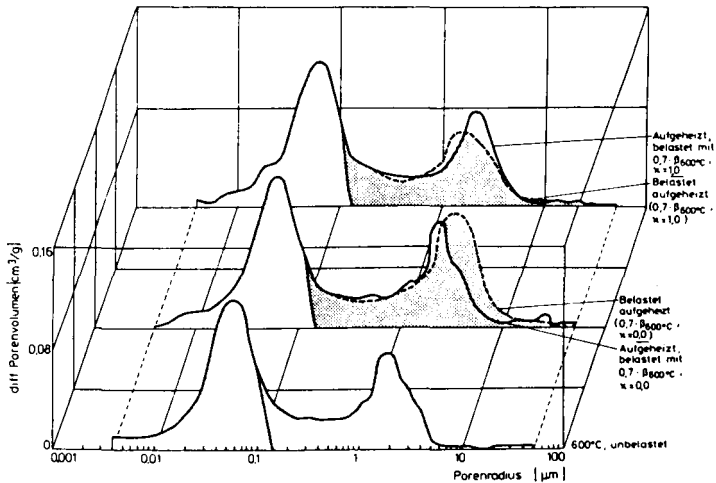


Bild 55: Porenradienverteilungen von Mörtel nach mechanischer und thermischer Beanspruchung bis zu 600°C

Die Änderungen in den Porenvolumina des Mörtels sind in Abhängigkeit von der Beanspruchung in Tabelle 5 dargestellt. Das Gesamtporenvolumen wurde dabei in die Anteile Porenvolumen des Zementsteins (Z) und Porenvolumen der Verbundzone (V) aufgeteilt. Die thermische Beanspruchung führt zu einer Zunahme des Zementsteinporenvolumens, die durch mechanische Beanspruchung während des Aufheizens nur geringfügig vermindert wird. Das Porenvolumen der Verbundzone nimmt bei Aufheizung ebenfalls zu, über 300°C sogar beschleunigt. Bis zu einer Höchsttemperatur von 300°C vergrößert eine mechanische Beanspruchung beim Aufheizen das Verbundzonenporenvolumen, und zwar bei einaxialer Beanspruchung mehr als bei zweiaxialer.

Tabelle 5 Porenvolumen des Zementsteins (Z) und der Verbundzone (V) von Mörtelproben nach thermischer und mechanischer Beanspruchung

mechanische Beanspruchung	Porenvolumen [cm ³ /kg]											
	Temperatur T [°C]											
	20 ¹⁾		105 ¹⁾		300 ¹⁾		600 ¹⁾		20 + 300 ²⁾		20 + 600 ²⁾	
	Z	V	Z	V	Z	V	Z	V	Z	V	Z	V
unbelastet	43,0	35,6	44,4	41,4	61,0	41,5	71,8	76,6	61,0	41,5	71,8	76,6
0,7 $\beta_{T;0,0}$	39,0	39,0	44,1	48,8	58,6	40,9	70,3	76,5	59,3	59,8	70,8	89,5
0,7 $\beta_{T;1,0}$	39,3	39,9	44,2	46,5	65,0	40,8	71,9	73,3	58,1	50,2	66,3	60,9

1) unbelastet auf T aufgeheizt, dann auf 0,7 β_T belastet.
 2) mit 0,7 β_T belastet aufgeheizt.

Auch bei Aufheizung unter mechanisch einaxialer Beanspruchung bis zu 600°C vergrößert sich das Porenvolumen in den Verbundzonen, zweiachiale Beanspruchung verhindert dagegen eine Zunahme des Porenvolumens.

Damit ist nachgewiesen, daß bei thermischer Beanspruchung durch das unterschiedliche thermische Ausdehnungsverhalten von Zementstein und Zuschlag vor allem Risse in der Verbundzone entstehen.

Eine einaxiale mechanische Beanspruchung von 70% während der Aufheizung bewirkt eine Zunahme und Aufweitung dieser Risse. Die zweiachiale, symmetrische Beanspruchung vermindert bei einer Aufheizung bis zu 300°C diese zusätzliche Rißvolumenzunahme, bei einer Aufheizung bis zu 600°C werden thermisch erzeugte Risse sogar geschlossen.

Über eventuell entstandene Risse größerer Weiten können diese Untersuchungen allerdings keinen Aufschluß geben.

7.3 Rißbilder in beanspruchten Normalbetonprobekörpern

Bereits im unbelasteten Zustand entstehen im Beton durch die Unverträglichkeit zwischen Zuschlag und Zementstein Risse /46/, vor allem Verbundrisse um die Zuschlagkörner herum, aber auch einige Mörtelrisse zwischen den Zuschlagkörnern. Diese Risse werden wegen ihrer geringen geometrischen Abmessungen als Mikrorisse bezeichnet.

Aus diesen Mikrorissen entwickeln sich bei zunehmender mechanischer oder thermischer Beanspruchung Rißsysteme. Diese Rißentwicklung kann durch Schallemissionsanalysen nachgewiesen werden, siehe z.B. /39/.

Die mit Hilfe eines Lichtmikroskopes geringer Vergrößerung (etwa 6-20 fach) festgestellten Rißverteilungen sind auf den Bildern 56-58 dargestellt. Sie sind die erste Erscheinungsform der entsprechenden Bruchbilder auf den Bildern 14 und 15.

Betrachtet werden sollen drei unterschiedliche Beanspruchungen:

a) Thermische Beanspruchung über 150°C (Bild 56): Die Risse sind vornehmlich um die Zuschlagkörner herum ausgeprägt.

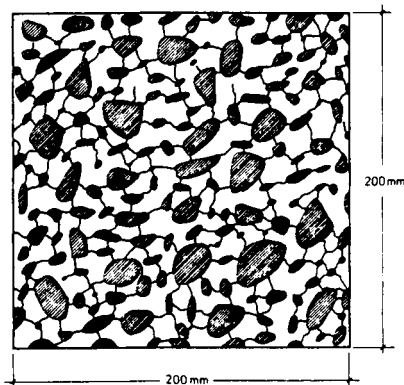


Bild 56: Rißverteilung in einem thermisch über 150°C beanspruchten Normalbetonprobekörper

Enge Mörtelrisse verlaufen im gesamten Probekörpervolumen auf den kürzesten Verbindungsstrecken zwischen den Zuschlag - körnern, eine übergeordnete Orientierung ist nicht zu erkennen.

b) Mechanische einaxiale Druckbeanspruchung (bis etwa 70 % Bruchlast, Bild 57): Die Risse verlaufen hauptsächlich in Richtung der aufgebrachten Belastung, die Normalen der Reißflächen stehen senkrecht zur Belastung. Bis zu etwa 300°C gehen Risse auch durch Zuschlagkörner hindurch. Bei höheren Temperaturen sind fast nur noch Risse durch den Zementstein zu finden.

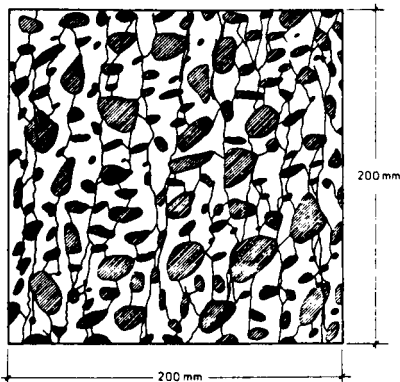


Bild 57: Rißverteilung in einem mechanisch einaxial beanspruchten Normalbetonprobekörper (etwa 70% Bruchlast)

c) Mechanische zweiaxiale Druckbeanspruchung (bis etwa 70 % Bruchlast, Bild 58): Risse werden auf den schmalen belasteten Seiten und den Eckbereichen der scheibenförmigen Probekörper beobachtet. Die Normalen der Reißflächen stehen senkrecht zur Belastungsebene. Große Teile der unbelasteten Oberflächen sind rissfrei. Einige Zuschlagkörner sind bis zu Temperaturen von 300°C gerissen.

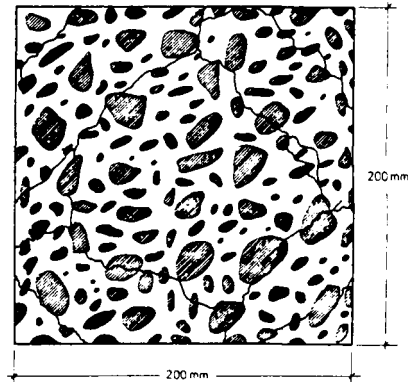


Bild 58: Rißverteilung in einem mechanisch symmetrisch
zwei axial beanspruchten Normalbetonprobekörper
(etwa 70% Bruchlast)

7.4 Spannungsverteilungen in beanspruchtem Normalbeton

Das auf einer Betonkörperoberfläche zu erkennende Rißmuster ist das zweidimensionale Bild von räumlich im Volumen verteilten Rißflächen. Die Orientierungen dieser Rißflächen werden durch Spannungsverläufe im Betongefüge verursacht. Aufbauend auf Erkenntnissen von Spannungsverläufen, die an Betonmodellen mit überwiegend spannungsoptischen Methoden gewonnen wurden (siehe z.B. Lusche /41/), werden im folgenden die inneren Spannungsverteilungen in Normalbetonprobekörpern qualitativ dargestellt.

Für die betrachteten Beanspruchungsfälle ergeben sich folgende Zusammenhänge:

- a) Bei thermischer Beanspruchung (Bild 59):
- bis 150°C: Zuschläge und Zementstein dehnen sich aus, im Betoninneren herrschen durchweg Druckspannungen.
 - über 150°C: Zwischen den einzelnen Zuschlagkörnern, die sich bei steigender Temperatur weiter ausdehnen, herrschen Druckspannungen. Der Zementstein schwindet, so daß in dem von

ihm ausgefüllten Bereich zum Teil Zugspannungen vorliegen.

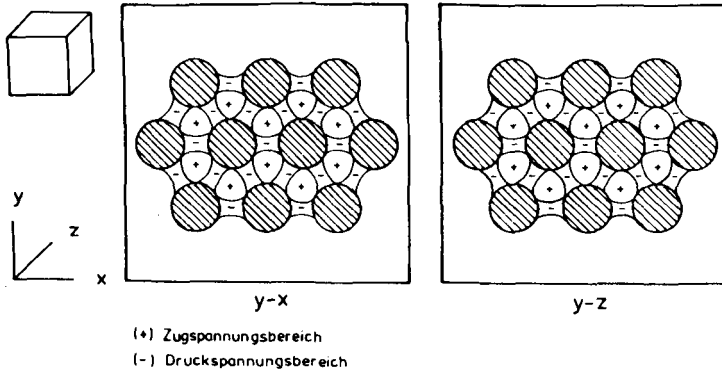
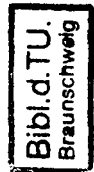


Bild 59: Spannungsverteilung in einem thermisch über 150°C beanspruchten Normalbeton



b) Bei mechanisch einaxialer Druckbeanspruchung (bis etwa 70% Bruchlast; Bild 60):

- Die Hauptspannungen verlaufen im druckbeanspruchten Normalbeton vorwiegend durch die großen und kleinen Zuschlagkörner, die eine höhere Festigkeit und einen höheren Elastizitätsmodul als der Zementstein haben. Die größten Druckspannungen treten in den zur Belastungsrichtung parallelen bzw. fast parallelen Verbindungslinien zwischen den Zuschlagkörnern auf. In den senkrecht zur Belastungsrichtung gerichteten Verbindungslinien zwischen den Zuschlagkörnern herrschen Zugspannungen.

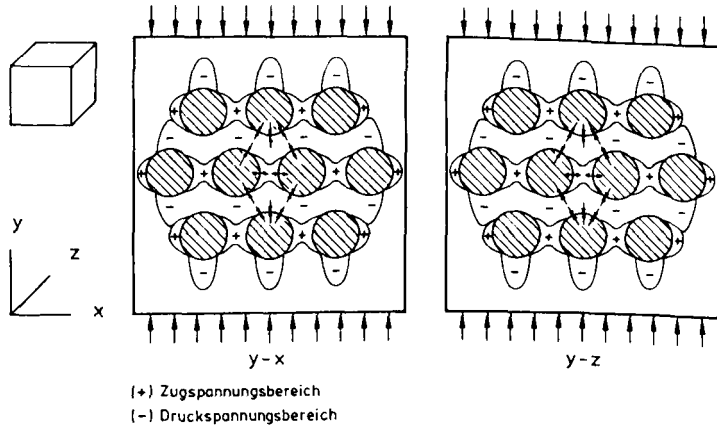


Bild 60: Spannungsverteilung in einem mechanisch einaxial beanspruchten Normalbeton (bis etwa 70% Bruchlast)

c) Bei mechanisch zweiaxialer Druckbeanspruchung (bis etwa 70% Bruchlast):

Die Spannungsverteilung hängt vom Verhältnis der äußeren Beanspruchungskräfte ab. Aus den Ergebnissen der lastabhängigen Verformungsmessungen bei konstanten Temperaturen geht hervor, daß -in Abhängigkeit von der Temperatur- etwa bei einem Spannungsverhältnis $\kappa = \sigma_2 : \sigma_1 = 0,3-0,4$ die Dehnung in der weniger belasteten Achse den Wert 0 hat. Das bedeutet, daß für Spannungsverhältnisse κ kleiner 0,3 die auf Bild 59 dargestellte Spannungsverteilung mit Zugspannungen in der Achse der geringeren Beanspruchung herrscht. Bei $\kappa = 0,3-0,4$ werden in dieser Achse die inneren Zugspannungen gerade durch die äußere Spannung aufgehoben. Bei κ größer gleich 0,4 (Bild 61) bestehen in der Ebene der aufgetragenen Spannungen nur noch Druckspannungen, die vornehmlich zwischen den Zuschlagkörnern wirken. In der Ebene senkrecht zur Spannungsebene bleibt die qualitative Spannungsverteilung wie auf Bild 60 rechts erhalten, die Zugspannungen werden allerdings vergrößert.

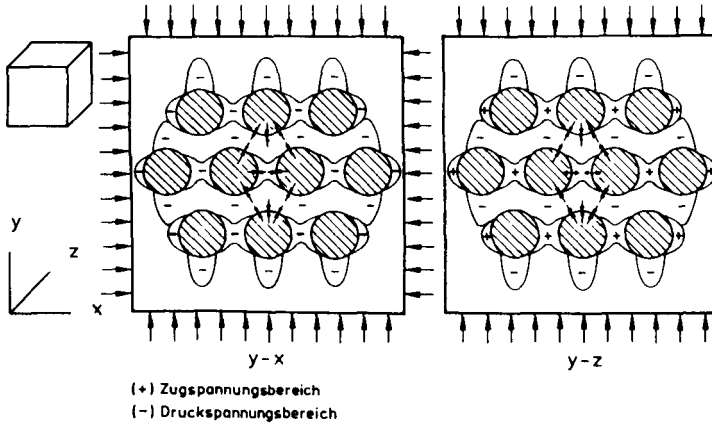


Bild 61: Spannungsverteilung in einem mechanisch symmetrisch zwei axial beanspruchten Normalbeton (bis etwa 70% Bruchlast)

7.5 Kräfteverläufe und Verformungsverhalten

Mit der Kenntnis der Rißverteilungsbilder und Spannungszustände im Probekörper unter verschiedenen Beanspruchungen kann nun für einen Normalbeton ein entsprechendes Bild des Kräfteverlaufs erstellt werden.

Die innere Kräfteverteilung in einem Betongefüge ist die Ursache für die makroskopisch an einem Probekörper zu beobachtenden richtungsabhängigen Verformungen. Die Reaktion eines Gefüges auf eine Druckkraft ist eine Stauchung in Richtung der äußeren Kraft. Wenn Verformungen senkrecht zur äußeren Kraft auftreten, sind dies (positive) Dehnungen, die Zugkräfte im Gefüge nach sich ziehen.

Für den Fall der einaxialen Beanspruchung ergibt sich der auf Bild 62 dargestellte innere Kräfteverlauf. Die Bilder sind in den Ebenen $y - x$ und $y - z$ aus Symmetriegründen identisch, da gleiches Querdehnungsverhalten vorausgesetzt wird. Zu unterscheiden sind drei Kräfte:

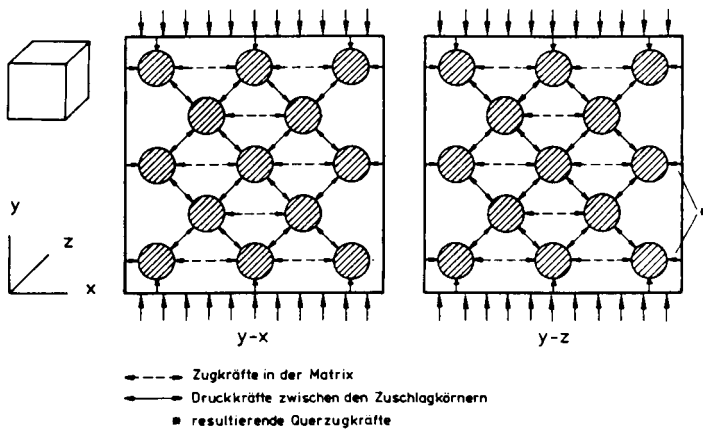


Bild 62: Kräfteverlauf in einem einaxial druckbeanspruchten Normalbeton

-Druckkräfte zwischen den Zuschlagkörnern. Diese gegenseitige Druckbeanspruchung, die überwiegend parallel zur äußeren Last gerichtet ist, bewirkt eine Verschiebung der Zuschlagkörner in Richtung der Last und damit eine makroskopische Stauchung. Durch seitliche Verschiebungen kommt es zu Querverformungen.

-Zugkräfte in der Matrix. Sie sind senkrecht zur äußeren Last orientiert und werden durch die Verschiebungen der Zuschlagkörner bewirkt. Sie ermöglichen erst die weitere Ausbreitung der Verbundrisse. Deren Auftreten und Wachsen führt zu erhöhten Querverformungen.

-Querzugkräfte in den Randbereichen, die das Versagen einleiten.

Eine zusätzliche Beanspruchung in Richtung der zweiten Hauptachse in der $y - x$ Ebene wirkt zuerst auf die Querzugkräfte in den Randbereichen (siehe Bild 63).

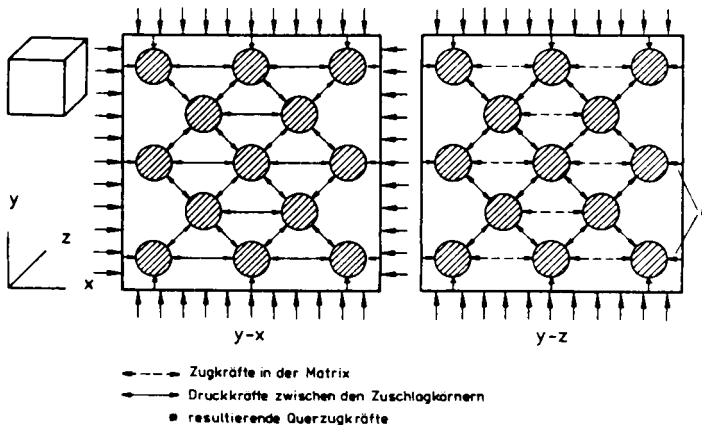


Bild 63: Kräfteverlauf in einem zweiachsig beanspruchten Normalbeton

Je nach Größe der zweiten Beanspruchung werden die Querkzugkräfte verringert oder aufgehoben oder sogar in ihrer Richtung umgedreht. Die Zugkräfte in der Matrix werden dabei entlastet. Die Zugkräfte in der $y - z$ Ebene werden durch die zweite Belastung verstärkt und vergrößern dort die Querdehnung. Im idealen, symmetrisch zwei axialen Druckbeanspruchungsfall herrschen in der Ebene der aufgetragenen Spannungen nur Druckkräfte.

7.6 Rißmechanismen und ihre Auswirkungen auf das Festigkeitsverhalten

Nachdem auf Grund von experimentellen Beobachtungen Rißverteilungen festgestellt wurden und daraus Spannungs- und Kräfteverläufe abgeleitet wurden, sollen nun anhand dieser Verteilungsbilder die Auswirkungen unterschiedlicher Beanspruchungen auf das Festigkeitsverhalten besonders unter kurzzeitiger Druckbeanspruchung bei konstanten Temperaturen dargelegt werden. Der Einfluß der Temperatur muß dabei für verschiedene Bereiche betrachtet werden, die sich aus dem Auftreten von physikalischen und chemischen Reaktionen im Beton ergeben.

Ausgangspunkt der Überlegungen ist das Verhalten bei 20°C . Der darauf folgende Temperaturbereich bis etwa 200°C wurde im Zusammenhang mit der Diskussion des Festigkeitsverhaltens bei 150°C bereits in Kap. 5.4 behandelt. Abgesehen davon ist das Verhalten bis 300°C dem bei 20°C ähnlich. In den Temperaturbereich $300^{\circ}\text{C}-600^{\circ}\text{C}$ fallen die größten Eigenschaftsänderungen des Betons. Für den Temperaturbereich über 600°C muß das Verhalten des Betons aufgrund des stark geänderten Gefüges mit anderen Gesetzmäßigkeiten als vorher erklärt werden. In jedem Temperaturbereich wird die mechanische Beanspruchung, ausgehend von einaxialer Beanspruchung ($\kappa = 0,0$) bis zur symmetrisch zwei axialen Beanspruchung ($\kappa = 1,0$) für wachsendes Spannungsverhältnis betrachtet. Vorweg müssen allerdings einige vereinfachende Annahmen gemacht werden. Das Verhalten der in einem belasteten Betongefüge immer existierenden Risse hängt davon ab, ob sich Mikrorisse in

einem Bereich von Druckkraft oder Zugkraft befinden und wie die Lage der Risse zu der Kraftrichtung ist. In Anlehnung an Griffith /42/, der bei seinen Energiebetrachtungen zur Ausbreitung von Rissen in ebenen Scheiben von einem schmalen RiB ausging, soll für die folgenden Überlegungen zur Rolle der Risse in einem Volumen ein RiB als Ellipsoid angesehen werden, bei dem eine Halbachse sehr viel größer als die beiden anderen ist. Als Richtung des Risses soll immer die Richtung der großen Achse verstanden werden. Griffith, nach dessen Vorstellung der Bruch eines spröden Materials von Mikrorissen ausgeht, wenn die bei der Verlängerung eines Risses freigesetzte elastische Verformungsenergie größer ist als die zur Bildung neuer Oberflächen erforderliche Energie, machte auch Angaben über die Auswirkungen der Orientierung zwischen RiB und Drucklast. So treten die größten Kerbzugspannungen an den Enden eines unter 30° zur äußeren Drucklast geneigten Risses auf. Von dort nimmt der Bruch seinen Ausgang. Dieser schräggeneigte RiB breitet sich dann parallel zur Druckrichtung aus, wie es auch experimentell beobachtet wird. Auf Tabelle 6 sind Risse und Kräfte und die Resultate zwischen extrem unterschiedlicher Orientierungen zueinander angegeben, wobei "senkrecht" und "parallel" in einem großzügigen Sinn verstanden werden. Da die exakte Bestimmung der in der Griffith'schen Theorie verwendeten Energien bei Beton auf große Schwierigkeiten stößt, ist in Tabelle 6 lediglich eine pauschalierende Abschätzung der Energien gemacht.

Tabelle 6: RiBverhalten unter inneren Kräften

Kraft	RiBorientierung zur Kraft	Ergebnis	Energieaufwand zur Änderung der RiBerscheinung
Druckkraft	parallel	RiBweiterung	groß
Druckkraft	senkrecht	RiBschließung	klein
Zugkraft	parallel	RiBschließung	klein
Zugkraft	senkrecht	RiBweiterung	groß

Anhand von Tabelle 6 und den Bildern 62 und 63 soll nun der Einfluß der äußeren Belastung auf das die Festigkeit bestimmende Verhalten der Risse betrachtet werden.

Unter zunehmender einaxialer Druckbeanspruchung werden die senkrecht zu den inneren Druckkräften und parallel zu den inneren Zugkräften orientierten Risse mit geringem Energieaufwand geschlossen. Diese Vorgänge finden deshalb bevorzugt statt.

Die parallel zu den inneren Druckkräften und senkrecht zu den inneren Zugkräften orientierten Risse werden erweitert. Die weitere Ausbreitung verläuft hauptsächlich parallel zur äußeren Last. Dabei vereinigen sich immer wieder gleichgerichtete Risse zu Rißsystemen. Dies wiederum führt zu einem noch niedrigeren Energieaufwand zur Rißausbreitung, wie Diaz und Hilsdorf /43/ und Wittmann und Zaitsev /44/ zeigen konnten. Nach Überschreiten einer kritischen Rißlänge bei höheren Belastungsgraden kommt es dann zu einem beschleunigten und nicht mehr aufzuhaltenden Rißwachstum (instabiles Rißwachstum), das zum Versagen des Probekörpers führt. Die makroskopisch zu beobachtende Stauchung findet nur in einer Richtung statt, die positiven Querverformungen und die sie verursachenden Quersugkräfte und Zugkräfte sind in zwei Richtungen orientiert.

Unter zunehmender symmetrisch zweiaxialer Druckbeanspruchung bilden sich in der Ebene der aufgebrachten Spannungen nur noch Druckkräfte zwischen den Zuschlagkörnern aus. Alle in dieser Ebene orientierten Risse werden geschlossen. Die zu einem Riß parallele Druckkraft vermag diesen Riß nicht zu erweitern, da der Energieaufwand dafür zu groß ist.

In der Ebene senkrecht zu der belasteten Ebene bleiben die Verhältnisse qualitativ wie im einaxialen Fall. Die Zugkräfte und resultierenden Quersugkräfte werden allerdings verstärkt.

Dieser Verstärkungseffekt, der sich in einer Zunahme der Querdehnung äußert, setzt deutlich erst bei einem Spannungsverhältnis von $\kappa = 0,4 - 0,5$ ein. Bild 64 zeigt dies für das

bezogene Verhältnis von $\epsilon_3 : \epsilon_1$ in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis.

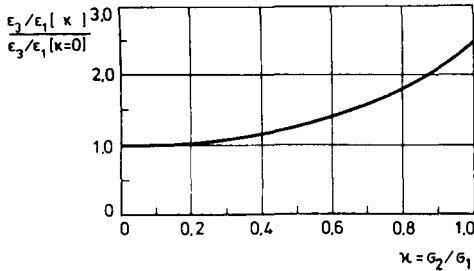


Bild 64 Querdehnzahlen von Normalbeton in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis

In den Bereich $\kappa = 0,4-0,5$ fallen auch die höchsten zwei-axialen Druckfestigkeiten. Die Beanspruchung in der zweiten Achse hat bis zu $\kappa = 0,4 - 0,5$ durch ihre stützende Wirkung einen positiven Einfluß auf die Druckfestigkeit, über $\kappa = 0,4 - 0,5$ überwiegt ein negativer Einfluß, der zu großen Dehnungen in der freien dritten Achse führt. Der negative Einfluß der Querdehnungserhöhung wird von einer Keilwirkung einzelner Zuschlagkörner verstärkt. Es werden durch die Druckbeanspruchungen große Zuschlagkörner als Keile zwischen andere Zuschläge geschoben. Die dabei auftretenden großen Zugspannungen zerstören die Bindungen zwischen den Zuschlägen und drücken diese in Richtung der freien unbelasteten Achse auseinander.

Der unbehinderten Querdehnung und Rißöffnung in Richtung der unbelasteten Achsen wird das Versagen eines einaxial auf Druck beanspruchten Probekörpers zugeschrieben.

Wenn, wie im zwei axialen Versuch, die Querdehnung in zwei Richtungen verhindert wird, tritt der Bruch erst bei höheren Spannungen ein, die Festigkeit ist höher.

Um zu demonstrieren, daß auch bei zwei axialer Beanspruchung das Versagen durch Querdehnung und Rißöffnung in die noch freie Achse verursacht wird, wurden Versuche bei Raumtemperatur durchgeführt, bei denen auch die Querdehnung in die

dritte Achse verhindert wurde. Die Probekörper waren also einem dreiaxialen Druckspannungszustand ausgesetzt. Tatsächlich gelang es nicht, die Probekörper mit den zur Verfügung stehenden Belastungskräften zu zerstören. Auch nach dem Ausbauen zeigten sie keine makroskopisch erkennbaren Schädigungen.

Die Hochtemperaturdruckfestigkeit von Normalbeton zeigt zwischen 300°C und 600°C einen starken Abfall. Verursacht wird diese Festigkeitseinbuße durch die Veränderungen der Mikrostruktur des Zementsteins und die Zunahme der Rißvolumina in den Verbundzonen Zuschlag-Zementstein. Gefüge und Struktur des Betons sind thermisch geschädigt. Die Reaktionen auf äußere Beanspruchungen sind denen bei 20°C und 300°C allerdings ähnlich. Der Verlauf der zweiaxialen Bruchgrenzkurven zeigt dies. Die dort gemachten Ausführungen über Rißverteilungen, Spannungs- und Kraftverläufe gelten weiterhin. Es muß allerdings berücksichtigt werden, daß durch die bei der Aufheizung entstandenen weiten Risse das Verformungsverhalten des Betons erheblich plastischer wird. Die bindende und verkittende Wirkung des Zementstein läßt bei höheren Temperaturen sukzessive nach. Querkzugdehnungen im Beton werden durch die zweite Druckbeanspruchung wesentlich mehr aufgenommen als bei niedrigeren Temperaturen, bei denen der Zementstein diese Funktion hauptsächlich wahrnimmt.

Die bei Temperaturen über 600°C ermittelten Bruchgrenzkurven (siehe Bild 16 und 19) unterscheiden sich von denen bei niedrigeren Temperaturen. Sie zeigen nicht den relativen zweiaxialen Festigkeitsabfall bei höheren Spannungsverhältnissen $\sigma_2 : \sigma_1$ von etwa 0,5. Es wird tatsächlich mit höherem Spannungsverhältnis eine weitere Festigkeitssteigerung beobachtet.

Schon bei Temperaturen über 450°C sind die Zementsteinphasen im wesentlichen zerstört, und ihre bindende Wirkung ist aufgehoben. Der Beton kann als Haufwerk aus Zuschlag- und Zementsteinbruchstücken angesehen (siehe Weiß /45/), in dem

nicht mehr chemische Bindungskräfte, sondern die Haftreibung zwischen den Haufwerkselementen die Festigkeit bestimmen. Für ein Haufwerk aber gelten nicht die in der Elastizitätstheorie geltenden Annahmen. Dies hat im vorliegenden Fall spezielle Auswirkungen auf die Ausbildung der Querszugkräfte und Querdehnungen.

In der Festigkeitsdiskussion bis 300°C wurde so argumentiert, daß ab $\kappa = 0,5$ die Festigkeit abnimmt, weil die Querdehnung in der freien Achse zu groß wird und dadurch das Versagen einleitet wird. Diese Argumentation kann in diesem Temperaturbereich nicht übernommen werden. Es werden zwar in der Querrichtung große Verformungen gemessen, doch resultieren diese aus der Summation der Rißbreiten parallel zu dieser Richtung. Der haufwerkartige Verband in der Belastungsebene bleibt jedoch weitgehend erhalten.

Der Verlauf der Bruchgrenzkurven entspricht den von Weiß in /45/ auf haufwerkstheoretischer Annahme gemachten Prognosen. Diese besagen, daß, wenn die Rißweiten in der Ebene der auf-gebrachten Spannungen durch den zwei axialen Spannungszustand verringert werden, bei höheren Temperaturen vergleichsweise größere Festigkeitssteigerungen als bei Raumtemperatur möglich sind.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Baustoff Beton wird im Bauteil häufig mechanisch mehraxial beansprucht. Er ist in vielen Gebäuden der Energietechnik und besonders im Brandfall hohen Temperaturen ausgesetzt. Materialkennwerte, die diesen Zuständen Rechnung tragen, liegen bisher nicht vor.

Druckfestigkeiten und Verformungen unter zweiaxialer Beanspruchung bei hohen Temperaturen wurden daher aus Ergebnissen einaxialer Hochtemperaturuntersuchungen und zweiaxialer Raumtemperaturuntersuchungen extrapoliert. Zugrundegelegt wurde dabei, daß bei hohen Temperaturen unter einaxialer Beanspruchung die Druckfestigkeit abnimmt und die Verformungen größer werden, und daß bei Raumtemperatur unter zweiaxialer Beanspruchung sowohl die Druckfestigkeiten als auch die Bruchverformungen größer werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Prüfverfahren zu entwickeln und damit das zweiaxiale Hochtemperaturverhalten von Beton experimentell zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen Festigkeiten und Verformungen von Beton unter verschiedenen zweiaxialen Beanspruchungsverhältnissen unter stationärer und instationärer Temperaturbeanspruchung ermittelt wurden.

Eine eigens dafür entworfene Versuchsanlage ermöglicht es, Betonprobekörper den vorgegebenen thermischen und mechanischen Beanspruchungen zu unterwerfen. Zur exakten Erfüllung dieser Anforderungen mußten für die Versuchsanlage einige ganz spezielle Problemlösungen gefunden werden.

Das besonders wichtige Problem der Lasteinleitung zur Erzielung eines definierten und ungestörten zweiaxialen Spannungszustandes im Probekörper wurde durch die Verwendung von Belastungsbürsten als Lasteintragungssystem gelöst.

Dadurch wird eine Behinderung der Querdehnung weitgehendst vermieden. Die Wirksamkeit der Bürsten wurde dadurch nachgewiesen, daß die mit Bürsten unter einaxialen Bedingungen ermittelte Festigkeit auch die tatsächliche einaxiale Festigkeit ist.

Die Belastungsregelung erlaubt es, verschiedene Belastungspfade zu realisieren. Der Probekörpermittelpunkt wird während thermischer und mechanischer Beanspruchung raumstabil gehalten, so daß die Wirkungslinien der Belastungskräfte immer senkrecht zueinander stehen.

Das bei hohen Temperaturen besonders schwierige Problem der Verformungsmessung wurde durch die Entwicklung eines Hochtemperaturdilatometersystems gelöst, das die Verformungen in allen drei Achsen zu messen gestattet.

Die Versuche bei Raumtemperatur konnten die von anderen mehraxialen Untersuchungen her bekannten Ergebnisse bestätigen. Ebenso zeigten die Ergebnisse der einaxialen Hochtemperaturuntersuchungen Übereinstimmung mit denen bekannter Untersuchungen.

Für die zweiaxiale Druckfestigkeit bei konstant hohen Temperaturen wurde das Maximum der Festigkeitserhöhung gegenüber der einaxialen Druckfestigkeit bei größeren Spannungsverhältnissen als $\kappa = 0,5$ festgestellt. Zurückgeführt wird dies auf den im Vergleich zu niedrigeren Temperaturen unterschiedlichen Lastabtrag im Mehrkomponentensystem Beton. Die Druckfestigkeit im Temperaturbereich 70-200°C ergab sich als Funktion der Prüftemperatur und der Temperaturbeanspruchungszeit.

Die im Belastungsversuch bei konstanten Temperaturen gemessenen Verformungen nehmen bei höheren Temperaturen in allen drei Achsen stark zu, trotz des Festigkeitsverlustes gegenüber der Festigkeit bei Raumtemperatur. Zugleich ändern sich

die Verhältnisse der einzelnen Dehnungen zueinander.

Mit den Meßergebnissen instationärer Hochtemperaturkriechversuche, die Gesamtverformungen im Prozentbereich für alle drei Achsen ergaben, ließen sich kritische Betontemperaturen und Kriechverformungen ermitteln.

Die kritische Betontemperatur, definiert als die Temperatur, bei der ein Betonprobekörper bei Aufheizung versagt, steigt mit sinkendem Belastungsgrad des Probekörpers und mit steigendem Spannungsverhältnis der zwei axialen Beanspruchung an.

Die Kriechverformungen, als belastungs- und temperaturabhängige Verformungen berechnet, zeigen in Fall einaxialer Druckbeanspruchung für einen Temperaturbereich von 20°C bis zu etwa 450°C einen fast identischen Verlauf für die Belastungsgrade 0,4–0,6 β_0 . Das bedeutet, daß der thermische Einfluß auf das Gesamtverformungsverhalten in den genannten Bereichen größer ist als der durch die unterschiedlichen Belastungen verursachte Einfluß.

Die Zwangskräfte, die Probekörper bei instationärer Temperaturbeanspruchung und vollständiger Dehnungsbehinderung entwickeln, sind bei zwei axialer Beanspruchung größer als bei einaxialer Beanspruchung, haben aber für beide Beanspruchungsverhältnisse in etwa qualitativ den gleichen zeitlichen Verlauf.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen wird das zwei axiale Hochtemperaturdruckfestigkeitsverhalten mit Hilfe einer rißmechanischen Betrachtungsweise zumindest phänomenologisch geklärt.

Die Erhöhung der Festigkeit bei zwei axialer Druckbeanspruchung gegenüber einaxialer Beanspruchung wird auf das Schließen und Verhindern von Rissen in den Belastungsrichtungen zurückgeführt.

Die Untersuchungen und ihre Ergebnisse haben vor allem folgende Bedeutung:

- für die Praxis bedeuten sie, daß die Bemessung der Bauteile auf der sicheren Seite liegt, da bei der Bemessung im Regelfall von der einaxialen Beanspruchung ausgegangen wird: Dies gilt insbesondere bei Temperaturbeanspruchung der Bauteile, wie sie im Falle eines Brandes auftritt;
- für den sich mit der rechnerischen Beschreibung und Analyse von Bauteilen mit zwei axialen Spannungszuständen beschäftigenden Wissenschaftler werden Materialdaten und -eigenschaften zur Verfügung gestellt, die es ihm ermöglichen, anwendungsorientierte Materialgleichungen aufzustellen und zu einer möglichst praxisnahen Modellierung für seine Rechenprogramme zu gelangen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen die grundsätzlichen Änderungen des Verhaltens von Beton unter zwei axialer Beanspruchung gegenüber dem Verhalten bei einaxialer Beanspruchung auf.

Im Rahmen dieser Arbeit war es allerdings nur möglich, diese Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit einer beschränkten Anzahl versuchstechnischer und betontechnologischer Parameter zu untersuchen.

Die wichtigsten Einflußgrößen, deren Auswirkungen auf das zwei axiale Hochtemperaturverhalten noch untersucht werden sollten, sind deshalb nachfolgend aufgeführt.

Bei der Zusammensetzung des Betons sollte im Hinblick auf das Festigkeitsverhalten insbesondere der Aufbau des Korngerüstes variiert werden. Möglichkeiten dazu wären stark voneinander abweichende Sieblinien und unterschiedliche Zuschlagsformen (rund-plattig-gebrochen). Wichtig sind auch Untersuchungen mit Zuschlägen, die sich in ihrem thermischen Dehnungsverhalten unterscheiden, da dieses das Auftreten der

thermisch induzierten Risse wesentlich beeinflußt.

Als besonders kritisch hat sich das Betonverhalten bei Temperaturen bis zu etwa 200°C herausgestellt. Zur Klärung der in diesem Temperaturbereich auftretenden Phänomene wären Versuche erforderlich, bei denen die Vorlagerung und die Austrocknungsmöglichkeiten während des Versuches variiert werden. Zu denken wäre an eine Wasserlagerung und eine Vortrocknung bei 105°C. Anschließend sollten die Probekörper dann versiegelt und unversiegelt untersucht werden.

In diesem Temperaturbereich und bei den genannten Behandlungen des Betons sind sicherlich auch Langzeituntersuchungen von Interesse.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen durchgeführte Versuche zur Restfestigkeit zeigten keine grundsätzlich anderen Erkenntnisse bezüglich des zweiaxialen Verhaltens als die bei hohen Temperaturen gewonnenen Erkenntnisse. Versuchstechnische Parameter allerdings, wie z.B. Vorbelastung, Belastung während Aufheizung und Abkühlung, Zeitdauer nach dem Abkühlen bis zur Bestimmung der Resteigenschaften, haben sich als wichtige Einflußgrößen herausgestellt und sollten deshalb untersucht werden.

Der Belastungsgrad während Aufheizung und Abkühlung spielt auch eine große Rolle bei den instationären Versuchen, die nicht nur bis zum Versagen der Probekörper durchgeführt werden sollten. Die Probekörper sollten nur bis zu bestimmten maximalen Temperaturen aufgeheizt und dann abgekühlt werden.

Für Untersuchungen speziell des Querdehnungsverhaltens wäre eine spezielle Bewehrung angebracht. Diese Bewehrung könnte dabei so ausgelegt sein, daß auch die Einbringung von Zugbeanspruchungen in die Probekörpern möglich ist und damit das Hochtemperaturverhalten von Beton im Zug-Druck-Bereich untersucht werden kann.

8 Literatur

1. Majchrowicz, J.: Strength of Plain Concrete under Short - Term Biaxial Stress at Temperatures up to 600°C. International Conference on Concrete under Multiaxial Conditions, Toulouse, Mai 1984
2. Matsushita, T.; Nakajima, S.: On the 200 tons Triaxial Testing Machine Capable of Automatic Load Control, under High and Low Temperature. RILEM International Symposium, The Evolution of Mechanical Equipment for Testing Building Materials, Stuttgart 1972
3. RILEM Bulletin, Materials and Structures. Vol. 16. No 91 Jan-Feb 1983
4. Arthanari, S.; Yu, C.W.: Creep of Concrete under Uniaxial and Biaxial Stress at Elevated Temperatures. Magazine of Concrete Research, Vol.19, No.60, Sept.1967
5. McDonald, J.E.: Creep of Concrete under Various Temperature, Moisture and Loading Conditions. Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, ACI SP-55, Detroit 1978
6. Aschl, H.; Linse, D.; Stöckl, S.: Kriechen von Beton bei mehrachsiger Beanspruchung und bei erhöhten Temperaturen DAfStB: Spannbeton- Reaktordruckbehälter, Vortragsband Nr.3, Berlin 197536.
7. Richart, F.E.; Brandtzaeg, A.; Brown, R.L.: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses. University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin No. 185, 1928
8. Akroyd, T.N.W.: Concrete under Triaxial Stresses. Magazine of Concrete Research V.13, no.39, 1961
9. Fumagalli, E.: The Strength Characteristics of Concrete under Conditions of Multi-axial Compression. Models and Structures, Experimental Institute, Bergamo, report No.30, 1965
10. Chinn, J.; Zimmermann, R.M.: Behaviour of Plain Concrete under Various High Triaxial Compression Loading Conditions. University of Colorado, 1965

11. Bellamy, C.J.: Strength of Concrete under Combined Stresses. Journal of A.C.I., Oct. 1961
12. Malcov, K.A.; Pak, A.: Betonfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung. Internationales Kolloquium Festigkeitsprobleme des Betons, Dresden 1968. Sonderdruck der wissenschaftlichen Zeitschrift der TU Dresden.
13. Föppl, A.: Die Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Art des Spannungszustandes. Mitteilungen aus dem Mech. techn. Laboratorium der Königl. Techn. Hochschule. Heft 27, München 1900
14. Wästlund, G.: Nya Rön Angående Betongens Grundläggande Halfasthetsegenskaper. Betong 1937, Heft 3
15. Glomb, J.: Die Ausnutzbarkeit zweiachsiger Druckfestigkeit des Betons in Flächentragwerken. Paper of the F.I.P. 3. Congress 1958
16. Weigler, H.; Becker, G.: Untersuchungen über das Bruch- und Verformungsverhalten von Beton bei zweiachsiger Beanspruchung. Heft 157 des DAfStB, Berlin 1963
17. Sundara Raja Iyengar, K.T.; Chandrashekhara, K.; Krishnaswamy, K.T.: Strength of Concrete under Biaxial Compressions. Journal of ACI, Vol.62, no.2. Feb. 1965
18. Vile, G.W.D.: Behaviour of Concrete under Simple and Combined Stresses. Imperial College of Science and Technology, London, Sept. 1965
19. Opitz, H.: Festigkeit und Verformungseigenschaften des Betons bei zweiachsiger Beanspruchung. Internationales Kolloquium Festigkeitsprobleme des Betons, Dresden 1968. Sonderdruck der wissenschaftlichen Zeitschrift der TU Dresden.
20. Nelissen, L.J.M.: Biaxial Testing of Normal Concrete. Heron, Vol.18, 1972, No.1
21. Hilsdorf, H.: Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit des Betons. Heft 173 des DAfStB, Berlin 1965
22. Kupfer, H.; Zelger, C.: Bau und Erprobung einer Versuchseinrichtung für zweiachsige Belastung. Heft 229 des DAfStB, Berlin 1973

23. Kupfer, H.: Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. Heft 229 des DAfStB, Berlin 1973
24. Liu, T.C.Y.; Nilson, A.H.; Slate, F.O.: Stress-strain Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression. ACI Journal, May 1972
25. Buyukozturk, O.; Nilson, A.H.; Slate, F.O.: Stress-strain Response and Fracture of a Concrete Model in Biaxial Loading. ACI Journal, August 1971
26. Linse, D.; Stegbauer, A.: Festigkeit und Verformungsverhalten von Leichtbeton, Gasbeton, Zementstein und Gips unter zweiachsigen Kurzzeitbeanspruchungen. Heft 254 des DAfStB, Berlin 1976
27. Schickert, G.; Winkler, H.: Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung. Heft 277 des DAfStB, Berlin 1977
28. Gerstle, K.H.; Linse, D.L.; Bertachi, P.; Kotsovos, M.D.; Ko, H-Y.; Newman, J.B.; Rossi, P.; Schickert, G.; Taylor, M.A.; Traina, L.A.; Zimmermann, R.M.; Bellotti, R.: Strength of Concrete under Multiaxial Stress States. Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, ACI SP-55, Detroit 1978
29. Gerstle, K.H.; Aschl, H.; Bellotti, R.; Bertacci, P.; Kotsovos, M.D.; Ko, H-Y.; Linse, D.; Newman, I.B.; Rossi, P.; Schickert, G.; Taylor, M.A.; Traina, L.A.; Winkler, H.; Zimmermann, R.M.: Behaviour of Concrete under Multiaxial Stress States. Proceedings of ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division, EM6, December 1980
30. Ross, A.D.: Experiments on the Creep of Concrete under Two-dimensional Stressing. Magazine of Concrete Research, No.16, June 1954
31. Meyer, H.G.: Beitrag zur Frage des Querkriechens von Beton unter ein- und zweiachsiger Druckbeanspruchung. Mitteilungen aus dem Institut für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der T.H. Hannover, Heft 5, 1967

32. Gopalakrishnan,K.S.; Neville,A.M.; Ghali,A.: Creep Poissons Ratio of Concrete under Multiaxial Compressions. University of Calgary, Journal of ACI, Dec. 1969
33. Schneider,U.: Behaviour of Concrete at High Temperatures. Report: RILEM Committee 44-PHT. February 1983
34. Schneider,U.: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen. DAFStB Heft 337, Berlin 1982
35. Kordina,K et al.: Arbeitsberichte des Sonderforschungsbereiches Brandverhalten von Bauteilen, TU Braunschweig, 1975-1977,1978-1980,1981-1983
36. Kordina,K.; Meyer-Ottens,C.: Beton-Brandschutz-Handbuch. Beton-Verlag, Düsseldorf 1981
37. Kesler,C.E. (Hrsg): Concrete for Nuclear Reactors. A.C.I. Special Publication SP-34. Detroit 1972.
38. Schneider,U.; Ehm,C.; Diederichs,U.: Prüfanlage für Beton unter biaxialer Beanspruchung und hohen Temperaturen. Mitteilungsblatt für die amtliche Materialprüfung in Niedersachsen, 22/23, S.39-45, 1982/83
39. Schneider,U.; Diederichs,U.; Ehm,C.; Hinrichsmeyer,K.: Hochtemperaturverhalten von Festbeton. Arbeitsbericht 1981-1983 des SFB 148, TU Braunschweig 1983
40. Chmelka,F.; Melan,E.: Einführung in die Festigkeitslehre. Springer-Verlag, Wien 1960
41. Lusche, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 39/1972
42. Griffith,A.A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Phil. Transactions of the Royal Society of London, Series A. V.221, pp. 163-198, 1920
43. Diaz,S.J.; Hilsdorf,H.K.: Fracture Mechanism of Concrete under Static, Sustained and Repeated Compressive Loads. Civil Engineering Studies. Structural Research Series No. 382, University of Illinois, Urbana, Ill. August 1971

44. Wittmann, F.; Zaitsev, J.: Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und Dauerlast. Heft 232 des DAFStB, Berlin 1974
45. Weiß, R.: Ein haufwerkstheoretisches Modell der Restfestigkeit geschädigter Betone. Dissertation, Technische Universität Braunschweig 1981
46. Rostasy, F.S.: Baustoffe. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz 1983
47. Hinrichsmeyer, K.: Dissertation, TU Braunschweig (in Vorbereitung)
48. Diederichs, U.; Hinrichsmeyer, K.; Schneider, U.: Experimentelle Untersuchung von Transportvorgängen und Porenstrukturen in Beton im Bereich der Verdampfung des Porenwassers (Phasenübergang). Bericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, 1984
49. Rehm, G.; Diem, P.; Zimbelmann, R.: Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton. Heft 283 des DAFStB, Berlin 1977
50. Beton-Kalender 1982, Teil 1. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, München
51. Verein Deutscher Zementwerke: Zement Taschenbuch 1979/80 Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin
52. Schneider, U.; Diederichs, U.; Hinrichsmeyer, K.: Nachweis von Strukturveränderungen beim Erhitzen von Zementstein und Mörtel durch Quecksilberporosimetrie. TIZ-Fachberichte, Vol. 107, No.2, 1983
53. Slate, F.O.: X-Ray Technique for Studying Cracks in Concrete, with Emphasis on Methods Developed and Used at Cornell University. In: F.H. Wittmann (Hrsg.): Fracture Mechanics of Concrete. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 1983

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 kreiszyklindrischen 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 Claus Meyer-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 dampfgehärtetem 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 Spannbeton-

- konstruktionen (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
- 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 hohen Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten (Diss.) (1976)
von Olaf Hjorth
- 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 Viggo Weber
- Heft 54: Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Bau- stahl und Beton - Geklebte Bewehrung -. (Diss.) (1982).
von Ernst-Holger Ranisch -vergriffen-
- 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
- Heft 57: Untersuchungen über den Verbund zwischen Stahl und Beton bei hohen Temperaturen (Diss.). (1983)
von Ulrich Diederichs
- Heft 58: Wärmebilanzrechnungen in Verbindung mit Versuchen in Brandräumen (Teil II). (1983)
von Ulrich Schneider
- Heft 59: Wärmebilanzrechnungen in Brandräumen unter Berücksichtigung der Mehrzonenmodellbildung (Teil III). (1983)
von Reinhold Dobbernack und Ulrich Schneider
- Heft 60: Verbesserungen und Erweiterungen von Ultraschall- prüfverfahren zur zerstörungsfreien Fehlstellen- und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen (Diss.). (1983)
von Wolfgang Hillger
- Heft 61: Zur Wirklichkeitsnähe der Lastannahmen in Silo- vorschriften für Zellen aus Stahlbeton und Spann- beton. (Diss.)(1984).
von Franz Blume
- Heft 62: Das Durchstanzen von Platten aus Stahlbeton - Tragverhalten, Berechnung, Bemessung - (Diss.). (1984)
von Diedrich Nölting
- Heft 63: Tragverhalten von Stahlbetonplatten im bauprakti- schen Einbauzustand bei Brandbeanspruchung (Diss.). (1985)
von Jürgen Wesche
- Heft 64: Untersuchungen zur Technologie des Gleitscha- lungsbau (Diss.). (1985)
von Siegfried Droese

- Heft 65: Forschungsarbeiten 1978 -1983. (1984)
- Heft 66: Einfluß der Verbundart auf die Grenztragfähigkeit von Spannbetonbalken. (Diss.)(1985).
von Josef Hegger
- Heft 67: Zum Tragverhalten von Verankerungen für hochfeste Stäbe aus Glasfaserverbundwerkstoff als Bewehrung im Spannbetonbau (Diss.). (1985)
von Bernhard Kepp
- Heft 68: Zum Einfluß hoher Temperaturen auf das Verbundverhalten von einbetonierten Bewehrungsstäben (Diss.). (1985)
von Helmut Sager
- Heft 69: Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Eisen (Diss). (1986)
von Rüdiger Haß
- Heft 70: 17. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. März 1986. Kurzfassungen der Beiträge. (1986).
- Heft 71: Versuche zur Festigkeit und Verformung von Beton unter zweiaxialer Beanspruchung und hohen Temperaturen. (Diss.) (1986).
von Christian Ehm