

CONCRETE FOR PCRVS: STRENGTH OF CONCRETE UNDER TRIAXIAL LOADING AND CREEP AT ELEVATED TEMPERATURES

D. LINSE, H. ASCHL, S. STÖCKL

Institut für Massivbau der Technischen Universität München, D-8000 München, Germany

SUMMARY

To provide detailed informations for the calculation of prestressed concrete reactor vessels, investigations on the behaviour of concrete under multiaxial loading and on creep at elevated temperatures were made at the Institut für Massivbau of the Technical University of Munich.

Tests on the triaxial stress-strain-relation of concrete in compression and tension were done utilizing the Munich testing equipment (a rigid prestressed concrete frame with brush bearing platens). The specimens are cubes of 10 cm square. All stress states ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) can be managed. During the test all deformations were measured. The concrete being tested has a similar mixture as concrete used in PCRVs.

The strength of concrete under triaxial compression is dependent on the stress ratio. The less the stresses differ from hydrostatic compression the more the strength increases. Triaxial compression increases very much the deformability of concrete. Plastic deformations of $\pm 10\%$ and more (all stresses compression, but not equal, strains compression or tension) are possible without large cracks.

Tension in at least one direction which is connected with compression in the other direction(s) causes a sudden failure (normally only one crack rectangular to the direction of tension) and a reduction of strength. The deformations measured show a nearly constant modulus of elasticity. The tests will be continued. The investigations aim to get complete stress-strain-relations for all possible stress states under short-term loading.

The second test series examines creep of concrete under elevated temperatures with multiaxial loading. The specimens (discs of 20/20/5 cm) were loaded in two directions by brush bearing platens under temperatures of 20°, 50° and 80° Celsius. The deformations of the specimen's three main directions were measured during the testing time.

The creep deformations are considerably dependent on the temperature. Creep at 80°C is about three to four times higher than at 20°C. The Poisson's ratio of creep at elevated temperature seems to be bigger than at normal temperatures at a rate of loading of 35% and 50% of the ultimate strength.

The tests are going on.

1. Einführung

Am Institut für Massivbau der Technischen Universität München werden bereits seit etwa zehn Jahren Untersuchungen an Beton unter mehrachsiger Beanspruchung durchgeführt. Aufbauend auf den Arbeiten von Hilsdorf und Helmut Kupfer /1-4/ wurde eine dreiachsige Belastungsanlage geplant und ausgeführt. Die Kenntnisse des Materialverhaltens von Beton unter zweiachsiger Kurzzeitbelastung wurden kontinuierlich erweitert und das Langzeitverhalten von Beton (zweiachsige Dauerstandfestigkeit und zweiachsige Wechselbeanspruchung) /5/, und das Kurzzeitverhalten betonähnlicher Materialien (Leichtbeton, Gasbeton, Zementstein und Gips) /6/ studiert. Derzeit werden weitere Experimente zur Untersuchung des Kriechens von Beton unter erhöhten Temperaturen bei zweiachsiger Beanspruchung durchgeführt.

Allen Versuchsanlagen gemeinsam ist die Verwendung von Belastungsbürsten zur Reduzierung der Querdehnungsbehinderung.

Der Bau der Belastungsanlagen für mehrachsige Versuche und die früheren Versuche wurden von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsanstalten (AIF) über den Deutschen Betonverein (DBV) finanziert, die derzeit laufenden Versuche aus den Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des Förderungsprogramms "Spannbetonreaktor-druckbehälter" unter der Betreuung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb).

Zusammenfassend werden in diesem Bericht die Versuchsanlagen, zwei in letzter Zeit durchgeführte und zwei derzeit laufende Versuchsprogramme dargestellt und erste Deutungen der Ergebnisse angegeben.⁺)

2. Festigkeit und Verformungsverhalten von Beton unter dreiachsiger Zug- und Druckbeanspruchung

2.1 Allgemeines

Untersuchungen zu dieser Frage wurden bereits an mehreren Stellen /8-11/ durchgeführt. Ein großer Teil dieser Untersuchungen beschränkte sich jedoch auf Festigkeitsmessungen ohne ausreichende Beobachtung der Verformungen, auf Sonderfälle der Belastung (z.B. σ_1/σ_2 beliebig, $\sigma_2 = \sigma_3$) und auf die reine Druckbeanspruchung. Eine umfassende Darstellung der Verformungen in Abhängigkeit von beliebigen dreiachsigen Spannungszuständen sowohl im Druck- als auch im Zugbereich, die z.B. für eine Berechnung eines Reaktorbehälters mit der Methode der Finiten Elemente unbedingt erforderlich ist, ist noch nicht vorhanden.

2.2 Versuchsanlage

Die in Bild 1 gezeigte Prüfanlage besteht aus einem einteiligen unsymmetrischen Spannbetonrahmen mit der größten Außenabmessung von ca. 3,0 m (s.a. /7/). Die eingebauten Preßzylinder haben max. 200 Mp Druck- und 100 Mp Zugkraft

⁺) Die Versuche sind noch nicht abgeschlossen. Eine weitergehende Darstellung der Ergebnisse erfolgt mündlich auf der Tagung in London, bzw. in einer späteren Veröffentlichung.

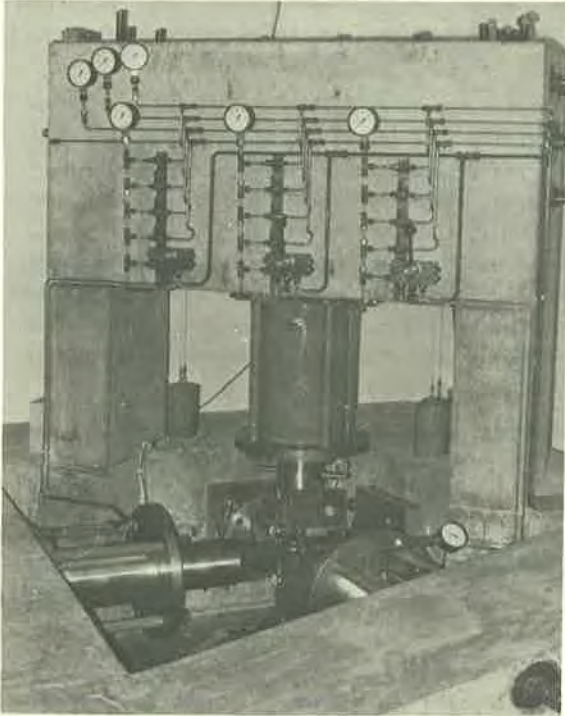
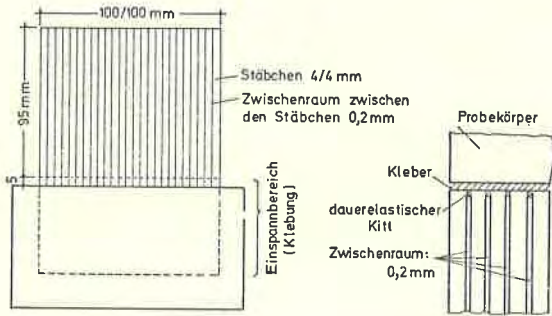
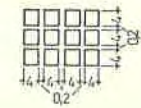


Bild 1: Prüfanlage für dreiachsige Belastungen



Verklebung des Probekörpers mit den Bürsten bei Zugversuchen



Querschnitt der Stäbchen

Bild 2: Belastungsbürste

(in vertikaler Richtung) bzw. max. 100 Mp Druck- und 15 Mp Zugkraft in den beiden liegenden Richtungen. Die Verformungen des Spannbetonrahmens sind so gering, daß die Richtungsänderungen der Pressenachsen auch bei hohen Belastungsgraden vernachlässigbar klein sind.

Die Belastung der Probekörper (Würfel mit 10 cm Kantenlänge) erfolgt über Belastungsbürsten, wie in Bild 2 abgebildet, die starr an den Zylinderkolben bzw. an den Widerlagern befestigt sind. Die Stäbchen haben eine freie Länge von ca. 95 mm, einen Querschnitt von 4/4 mm und stehen im Abstand von 0,2 mm. Sie sind so steif, daß sie im dreiachsigen Versuch Längskräfte bis zu 2000 kp/cm² Druck bei Spitzenauslenkungen bis zu ca. 3 mm übertragen können, ohne das Knickgefahr besteht oder die Streckgrenze überschritten wird. Andererseits sind sie so weich, daß die Rückstellkräfte, die durch die Auslenkung infolge von Querdehnungen des Betons zwangweise entstehen, vernachlässigbar sind. Bei Zugversuchen sind die Stäbchenenden stumpf mit dem Probekörper verklebt.

Die Belastung erfolgt dehnungsgesteuert. Die Verformungsgeschwindigkeit der am stärksten gedrückten Probekörperachse wird dabei konstant beibehalten. Sie ist so gewählt, daß der Probekörper nach ca. 20 Minuten seine Höchstlast erreicht.

Während des Versuchs bleibt das Verhältnis der Pressenkräfte und somit das Spannungsverhältnis $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$ konstant.

Die Belastungen des Probekörpers durch die hydraulischen Pressen werden indirekt über elektrische Druckaufnehmer in den Pressenzuleitungen ermittelt. Die Zusammenhänge zwischen den erhaltenen Meßdaten und den tatsächlichen Pressenkräften sind durch vorangegangene Eichversuche ermittelt worden. Die Probekörperverformungen werden indirekt durch die Messung der Stäbchenverbiegungen in der Nähe der Würfelkanten gemessen, Eichversuche und eine Nachrechnung ergaben die erforderlichen Umrechnungswerte. In jeder Belastungsrichtung sind 2 Meßgeräte an 2 gegenüberliegenden Kanten angebracht. Außerdem wird je Achse der Pressenvorschub gemessen.

2.3 Versuchsprogramme

2.3.1 Versuch im Druck-Druck-Druck-Bereich

Im Jahre 1972 wurden Tastversuche im dreiachsigen Druckbereich durchgeführt /7/. Die untersuchten Spannungsverhältnisse sind in Bild 3 abgebildet. Der Beton wurde aus kalzitischem, rundkörnigem Kies mit Größtkorn 15 mm hergestellt. Der Zementanteil betrug 190 kg/m³, der Wasserzementfaktor war 0,90. Der Beton hatte eine mittlere Würfelfestigkeit von ca. 300 kp/cm².

2.3.2 Versuche im Druck-Druck-Zug- und Druck-Zug-Zug-Bereich

Ende 1973 wurden Tastversuche mit Zugbeanspruchungen durchgeführt. Die Probekörper wurden aus einem Beton mit rundkörnigen Zuschlägen (Größtkorn etwa 15 mm) bei einem Wasserzementfaktor $W/Z = 0,58$ hergestellt. Die Prismenfestigkeit B_p zum Prüftermin (ca. 120 Tage nach dem Betonieren) betrug etwa

Nr.	$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$	einschichtige Zylinderfestig- keit (28 Tage)	Verformungen bei σ_1		erzielte max. Festigkeit B_C	Bemerkungen
			-50 % σ_{1U} $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	-80 % σ_{1U} $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$		
1	1,0:1,0:0	255	-0,75/-0,75/+0,4	-1,5/-1,5/+1,3	1,1	kein Bruch (Erstbel.)
2	1,0:0,93:0,18	300	[-6,8/-6,8/+5,0]	[-23,0/-23,0/+22,0]	gesch.: -6	kein Bruch
3	1,0:1,0:0,94	260	bei $\sigma_1 = 3B_R$	-5,0/-5,0/-2,4	3,5	kein Bruch
4	1,0:0,49:0,14	310	-1,8/-0,8/+0,25	-3,1/-1,3/+0,4	gesch.: 8	kein Bruch
5	1,0:0,50:0,25	340	[-7,5/-3,4/+0,8]	[-23,0/-15,0/+9,5]	3,3	
6	1,0:0,26:0,09	305	-3,8/-0,8/+1,7	-9,1/-1,0/+7,5	6,0	
7	1,0:0,25:0,12	290	-6,0/0/+1,2	-14,9/+2,2/+6,6	2,6	
8	1,0:0,16:0,08	315	-1,7/+0,55/+1,2	-4,2/+2,1/+3,7	3,8	
9	1,0:0,14:0,07	300	-2,4/-0,3/+0,4	-5,2/+0,4/+2,6	4,4	
10	1,0:0,14:0,14	315	-5,2/+1,0/+1,0	-27,5/+3,8/+3,8	2,8	
11	1,0:0,13:0,13	315	-2,5/+0,1/+0,1	-6,9/+0,45/+0,45	1,8	
12	1,0:0,1:0,05	285	-1,0/+0,13/+0,25	-3,1/+0,25/+0,5		

Bild 3 : Überblick über die Druck - Druck - Druck Versuche

Versuch Nr.	Bemerkung	$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$	B_1 / B_p	
5	Zug	1 : 0 : 0	0,072 (Zug)	
6	Druck - Druck - Zug	-1/-0,50/0,07	0,47	
7		-1/-0,25/0,07	0,48	
9		-1/-0,25/0,03	0,66	
10		-1/-0,25/0,03	0,70	
11		-1/-0,47/0,03	0,62	
12		-1/-0,66/0,12	0,13	
13		-1/-0,88/0,13	0,21	
15		-1/-0,63/0,11	0,11	
17		-1/-0,50/0,40	0,09	
18		Druck-Zug-Zug	-1/0,28/0,27	0,08
19			-1/0,33/0,32	0,08

Bild 4: Überblick über die Druck-Druck-Zug- und Druck-Zug-Zug-Versuche

σ_3 / σ_1		σ_1 : Druck														
		σ_2 / σ_1														
		1,0	0,80	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0	-0,01	-0,025	-0,05	-0,1	-0,2	-0,5	-1,0
$\sigma_3 = \text{Druck}$	1	x														
	0,80	x	x													
	0,50	x	x	x												
	0,30	x	x	x	x											
	0,20	x	x	x	x	x										
	0,10	x	x	x	x	x	x									
	0,05	x	x	x	x	x		x								
$\sigma_3 = \text{Zug}$	0	x		x		x			x							
	-0,010	x	x	x		x			x	x						
	-0,025	x	x	x		x			x	x	x					
	-0,050	x	x	x		x			x	x	x	x				
	-0,100	x	x	x		x			x	x	x	x	x			
	-0,200	x	x	x		x			x	x	x	x	x	x		
	-0,500	x	x	x		x			x	x	x	x	x	x	x	
-1,000	x	x	x		x			x	x				x	x	x	
		$\sigma_2 = \text{Druck}$							$\sigma_2 = \text{Zug}$							

σ_1 : Zug				σ_3 / σ_1
σ_2 / σ_1			0	
1	0,5	0,10	0	
x				1
x	x			0,50
x	x	x		0,1
x	x		x	0

Bereich DDD: 62 Versuche
 DDZ: 70 Versuche
 DZZ: 50 Versuche
 ZZZ: 18 Versuche
 200 Versuche

2 Probekörper je Spannungs-
 verhältnis

Bild 5: Programm für Versuche in allen Spannungsbereichen

410 kp/cm². Die Probekörper waren 7 Tage im Feuchtraum, die Zeit bis Versuchsbeginn bei 65 % relativer Luftfeuchte und 20°C gelagert. Die Spannungsverhältnisse sind in Bild 4 aufgeführt.

2.3.3 Versuche in allen Spannungsbereichen

Derzeit wird ein umfassendes Versuchsprogramm mit Beanspruchungen in allen Spannungsbereichen durchgeführt. Die dabei untersuchten Spannungsverhältnisse der einzelnen Versuche sind in Bild 5 aufgeführt, dabei überwiegen Zugbeanspruchungen.

2.4 Vorliegende Versuchsergebnisse und deren Deutung

Eine Erklärung zu den vorliegenden Ergebnissen der unter 2.3 beschriebenen Versuche bietet das Bruchverhalten von zweiachsigen mit D r u c k beanspruchten Probekörpern: Es entstehen Risse parallel oder nur wenig geneigt zur Belastungsebene, deren Aufweitung bei Druck in der dritten Richtung vermindert, bei Zug hingegen unterstützt wird.

Bei den Versuchen mit D r u c k in 3 Richtungen lag z.B. bei einem Querdruck von nur ca. 20 % der Belastung in der Hauptrichtung die größte erreichbare Festigkeit bei fast 300 % der Prismenfestigkeit. Es ergaben sich dabei Verformungen bis zu 10 % und mehr. Die in Bild 6 angegebenen Werte der Festigkeit und Verformung können wegen der kleinen Anzahl von Versuchen nur qualitativ gewertet werden.

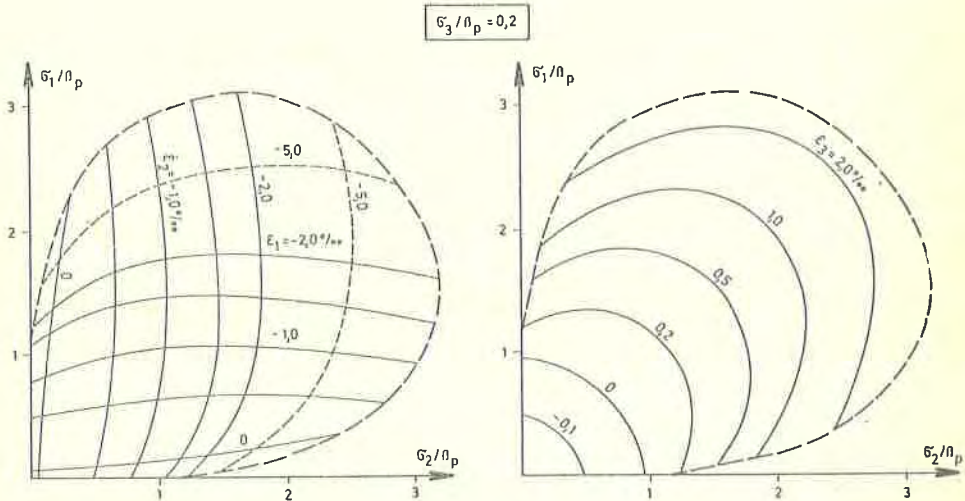


Bild 6: Parameterdarstellung der Dehnungen ϵ_1 und ϵ_2 , bzw. ϵ_3 im $\sigma_1/\sigma_p - \sigma_2/\sigma_p$ - Diagramm

Die Versuche mit Zug in einer oder zwei Richtungen sind in Bild 4 zusammengestellt. Es zeigt sich:

- a) die aufnehmbare Druckkraft sinkt bei einer gleichzeitig wirkenden Zugkraft stark ab. Bei einer Zugspannung von ca. 7 % der größten Druckspannung sinkt die Druckfestigkeit auf ca. 50 % der einachsigen Festigkeit. Bei einer Zugbeanspruchung von ca. 12 % der größten Druckspannung erhält man nur eine Druckfestigkeit von ca. 20 % der einachsigen Festigkeit.
- b) die Zugfestigkeit des Betons sinkt bei gleichzeitig wirkenden Querdrukbeanspruchungen entsprechend stark ab.

In /2/ werden bei zweiachsigen Druck-Zug-Versuchen Trenn- und Druckbrüche unterschieden. Ein Trennbruch ergab sich im Regelfall bei einer Zugbeanspruchung, die größer war als ca. 1/12 der Druckspannung. Die Bruchfläche des Trennbruches lag senkrecht zur jeweiligen Zugrichtung. Bei kleineren Zugbeanspruchungen ergab sich das z.B. beim einachsigen Druckversuch übliche Bruchbild, nämlich mehrere Risse, die bis zu 30° zur Druckrichtung geneigt waren.

Es ist anzunehmen, daß ein Probekörper, der auf Zug versagt hat (Trennriß), parallel zur Trennrißebene nur eine vernachlässigbare Schädigung erlitten hat; bei Betondruckbruch ist die Restfestigkeit in allen Richtungen stark reduziert.

Bei den hier durchgeführten Versuchen ergaben sich nur Trennbrüche. Die Ursache kann darin gesehen werden, daß die untersuchten Spannungsverhältnisse den Wert $\sigma_3/\sigma_1 = 1/12$ nur in einigen Fällen und ggf. auch nur wenig unterschreiten. Andererseits ist anzunehmen, daß beim Druck-Druck-Zug-Versuch durch das Zusammenreffen der Rißrichtungen der Druck-Druck-Beanspruchung und der Zugbeanspruchung die reinen Zugbrüche schon bei kleineren Zugkräften als beim zweiachsigen Versuch, also auch bei Spannungsverhältnissen $\sigma_3/\sigma_1 = 1/15$ auftreten können.

Die Probekörperverformungen in den drei Hauptrichtungen verhalten sich nahezu linear-elastisch bis zum Bruch. Elastizitätsmodul und Querdehnungszahl entsprechen den üblichen Werten.

3. Kriechen von Beton unter erhöhten Temperaturen bei zweiachsiger Beanspruchung

3.1 Allgemeines

Das Kriechen von Beton unter erhöhten Temperaturen und mehrachsiger Beanspruchung wurde bereits an mehreren Stellen (z.B. /12/ - /15/) untersucht; dies beschränkte sich jedoch meist auf Sonderfälle der Belastung und nur eine Temperatur. Deshalb sollte in vorliegendem Programm zunächst die Möglichkeit geschaffen werden, Kriechversuche mit ein- und zweiachsiger Beanspruchung durchzuführen und dabei ausführliche Messungen der Längs- und Querverformungen vorzunehmen. Als weitere Versuchsparameter werden die Höhe der Temperatur und der Kriechspannung variiert. Eine Ausweitung der Untersuchungen auf dreiachsige Kriechbeanspruchung mit erhöhten Temperaturen kann später erfolgen.

