

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Erhöhung der Zugfestigkeit und Verminderung der Rissbildung des Betons

Autor: Bornemann, E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-2681>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

II b 1

Erhöhung der Zugfestigkeit und Verminderung der Rißbildung des Betons.

La résistance à la traction et la fissuration du béton.

Tensile Strength and Formation of Cracks in Concrete.

E. Bornemann,
Regierungsbaumeister a. D., Berlin.

Einleitung.

Risse im Beton zu vermeiden und unvermeidliche Risse in unschädlichen Grenzen zu halten, ist von jeher ein Ziel der Baustoff-Forschung und baulichen Entwicklung des Beton- und Eisenbetonbaues gewesen, dessen Bedeutung mit dem Bestreben, höhere Beanspruchungen zuzulassen, noch gewachsen ist. Dabei ist stets die enge Abhängigkeit der Rißbildung von der Zugfestigkeit des Betons und die Notwendigkeit, diese zu steigern, betont worden. Der nachfolgende Bericht soll einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse auf diesem Gebiete liefern.

I. Zugfestigkeit des Betons.

a) Messen der Zugfestigkeit des Betons.

Die Zugfestigkeit des Betons kann entweder unmittelbar durch Zugversuche oder mittelbar durch Biegeversuche gemessen werden. Der Zugversuch wird verhältnismäßig selten angewandt, weil er nur mit kostspieligen Prüfmaschinen und schwieriger herzustellenden Probekörpern ausgeführt werden kann und außerdem eine größere Sorgfalt bei der Prüfung erfordert als der Biegeversuch. Dazu kommt, daß der Biegeversuch der meistens vorliegenden Beanspruchung des Betons mehr entspricht als der Zugversuch.

Bei beiden Prüfarten ist das Ergebnis von der Querschnittsgröße der Probekörper abhängig, derart, daß der größere Körper in der Regel kleinere Festigkeiten ergibt (1 S. 84). Der Grund hierfür ist in erster Linie in Eigenspannungen zu suchen, die z. B. beim Austrocknen der Körper entstehen (1 S. 87) (vgl. I c 8). Beim Biegeversuch ist außerdem die Lastanordnung zu beachten. Zwei Einzellasten in einem gewissen Abstand ergeben im Durchschnitt eine kleinere Biegebruchspannung als eine Einzellast, weil sich bei zwei Lasten die höchste Beanspruchung auf den ganzen Abschnitt zwischen den Lasten erstreckt und deshalb eher die schwächsten Stellen im Beton erfaßt (1 S. 93). Die aus Zug- und Biegeversuchen an demselben Beton mit den üblichen Annahmen (gleichförmig verteilte Spannung beim Zugversuch, geradlinig verteilte

Spannung beim Biegeversuch) errechneten Bruchspannungen stimmen nicht überein, vielmehr ist die Biegebruchspannung größer als die Zugfestigkeit. Dies röhrt vorwiegend daher, daß zwischen den Lastangriffstellen die höchste Spannung beim Zugversuch gleichzeitig in allen Punkten eines Querschnitts, beim Biegeversuch dagegen zunächst nur in der äußersten Randzone auftritt (1 S. 93). Dazu kommt, daß in der Zugzone des Betons schon unter geringen Beanspruchungen keine Proportionalität zwischen Spannungen und Dehnungen besteht, so daß die Spannungsverteilung den Voraussetzungen bei der Spannungsberechnung nicht entspricht (4 S. 39) (39 S. 73).

b) *Verhältnis zwischen Zug-, Biege- und Druckfestigkeit.*

Ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen Zug-, Biege- und Druckfestigkeit des Betons, der einen sicheren Rückschluß von der einen auf die andere Festigkeit erlaubte, ist bisher nicht gefunden worden. Soweit Mitteilungen über Verhältniswerte vorliegen, streuen diese stark.

Graf (1 S. 92) fand zwischen der Druckfestigkeit, ermittelt an Würfeln mit 30 cm Kantenlänge und der Zugfestigkeit an Körpern mit 400 cm^2 Querschnitt $K_d : K_z = 8$ bis 17; *Guttmann* (3) an Würfeln und Zugkörpern mit 100 cm^2 Querschnitt $K_d : K_z = 14$ bis 28. In beiden Fällen ist die Streuung der Verhältniswerte also etwa gleich groß, während ihre absolute Größe offenbar von den Abmessungen der Probekörper beeinflußt ist.

Für das Verhältnis der Druckfestigkeit zur Biegefestigkeit gibt *Graf* (2 S. 83) auf Grund einer großen Zahl von Versuchen $K_d : K_b = 4$ bis 12 an.

Die Streuung des Verhältnisses zwischen Biege- und Zugfestigkeit fällt entsprechend groß aus. *Graf* (2 S. 91) fand bei 400 cm^2 Zugquerschnitt $K_b : K_z = 1,6$ bis 2,9 und als Höchstwert bei Schleuderbeton 3,5, während *Guttmann* (3) bei 100 cm^2 Zugquerschnitt und Biegebeanspruchung durch 1 Einzellast $K_b : K_z = 2,3$ bis 4,2 und *Dutron* (5) bei demselben Zugquerschnitt, jedoch Biegebelastung mit 2 Einzellasten, $K_b : K_z = 1,3$ bis 2,0 beobachtete. Aus dem Unterschied der beiden letzten Zahlengruppen geht der Einfluß der Belastungsanordnung gemäß den Darlegungen unter I a hervor.

Bei den Streuungen ist allerdings zu beachten, daß Mischungen verglichen wurden, die sich zugleich in mehreren Einflußgrößen unterschieden. Würde man die Zahl der Veränderlichen beschränken, so würde man wahrscheinlich eher eine gesetzmäßige Beziehung finden. *Hummel* gibt nach seinen Beobachtungen zwischen der Biegefestigkeit und Druckfestigkeit die Gleichung $K_b = K_d^x$ an (6 S. 15). Aus anderen Versuchen kann man mit gleicher Wahrscheinlichkeit schließen, daß zwischen der Zug- und Druckfestigkeit eine entsprechende Beziehung $K_z = K_d^y$ besteht. Diese beiden Gleichungen besagen, daß die Zug- und Biegefestigkeiten mit wachsender Druckfestigkeit zunehmen, jedoch nicht im gleichen Verhältnis wie die Druckfestigkeiten, sondern umso langsamer, je größer die Druckfestigkeiten werden. Wie nach den oben angegebenen Streuungen der Verhältniswerte $\frac{K_d}{K_b}$ und $\frac{K_d}{K_z}$ zu erwarten, sind x und y keine für alle Fälle gültigen Festwerte. x schwankt vielmehr wahrscheinlich zwischen 0,55 und 0,70 und y zwischen 0,45 und 0,60 (vgl. Zusammenstellung 1). Trotzdem ermöglichen die Exponenten x und y eine zuverlässige Beurteilung der Wirkung

Zusammenstellung 1.

Einfluß der Zusammensetzung des Betons auf die Zug- und Biegefesteitigkeit.

Gruppe	Versuche von	Zuschlagsstoffe	Sieblinie des Sandanteils nach Bild 1	Körnung 0/0,2 mm Sand	Sandanteil am gesamten Zuschlag	Zement in 1 m ³ Beton	Wasserzementverhältnis W	Biegefestigkeit (zug) K _b (K ₂)	Druckfestigkeit K _d	x (y) für K _b = K _d K ₂ = K _d	Steife	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Bach u. Graf (13) S.42	Natursand u. Kies	unter B	2	50	~290	0,82	(12)	138	(0,513)	sehr weich	
				"	55	~320	0,81	(17)	201	(0,534)		
				"	57	~430	0,50	(23)	264	(0,560)		
2	Graf (11) S.40	Natursand u. Kies	unter C	A	—	43	284	0,63	47	278	0,659	weich
				B	22	60	257	0,77	36	183	0,687	Ausbreitmaß ~ 51 cm
				C	40	71	259	0,98	18	133	0,620	
				"	44	80	250	1,17	13	81	0,586	
			über C	A	—	43	308	0,52	50	301	0,686	
				B	17	59	297	0,65	44	242	0,689	
				C	37	71	294	0,81	29	770	0,656	
				"	44	79	296	0,96	16	719	0,581	
			über A	A	—	40	353	0,51	48	362	0,657	
				B	12	58	349	0,58	46	256	0,690	
				C	34	70	351	0,67	37	251	0,654	
				"	44	79	367	0,88	24	166	0,621	
3	Hertel (15)	Natursand u. Kies	unter B	9	38	306	0,70	29	240	0,616	weich	
				"	7	46	302	0,70	37	250	0,653	
				Über C	15	95	300	1,00	14	90	0,584	
			Natursand u. Splitt (Basaltspelzdrüngungen)	C	11	37	310	0,72	31	795	0,686	
				B	13	41	307	0,72	30	238	0,619	
				Über A	8	50	303	0,72	36	244	0,651	
			Brechsand u. Splitt (Basalt)	unter B	8	43	301	0,68	(16)	303	(0,486)	weich
				"	8	54	300	0,68	(21)	305	(0,533)	
4	Gültman (3)	Natursand u. Kies	unter B	8	43	278	0,80	(18)	354	(0,484)	weich	
				"	8	54	275	0,80	(21)	353	(0,520)	
			Brechsand u. Splitt (Basalt)	unter B	8	43	301	0,68	(16)	303	(0,486)	
				"	8	54	300	0,68	(21)	305	(0,533)	
			Bach u. Graf (13) S.28	unter B	2	55	~320	0,61	(17)	201	(0,534)	sehr weich
				B	6	56	~350	0,77	(21)	197	(0,573)	
				unter B	13	55	~320	0,80	(17)	157	(0,558)	
				B	17	56	~350	1,05	(16)	124	(0,572)	
5	Graf (17) S.546	Natursand	Natursand u. Kies	über C	5	40	301	0,69	40	265	0,661	wenig weich
				"	6	40	300	0,71	38	193	0,691	Ausbreitmaß
				Über A	5	40	299	0,71	41	227	0,685	
			Natursand u. Kies (Basalt)	"	5	40	297	0,76	32	207	0,650	flüssig
				"	6	40	308	0,93	24	109	0,678	Ausbreitmaß
				"	5	40	285	0,87	25	155	0,638	
			Natursand u. Splitt (Basalt)	"	5	40	297	0,76	32	207	0,650	
				"	6	40	308	0,93	24	109	0,678	
				"	5	40	285	0,87	25	155	0,638	
				"	5	40	295	0,87	25	155	0,638	
6	Graf (17) S.546	Natursand	Natursand u. Kies	über C	5	40	301	0,69	40	265	0,661	wenig weich
				"	6	40	300	0,71	38	193	0,691	Ausbreitmaß
				Über A	5	40	299	0,71	41	227	0,685	
			Natursand u. Splitt (Basalt)	"	5	40	297	0,76	32	207	0,650	
				"	6	40	308	0,93	24	109	0,678	
				"	5	40	285	0,87	25	155	0,638	
			Natursand u. Splitt (Basalt)	"	5	40	297	0,76	32	207	0,650	
				"	6	40	308	0,93	24	109	0,678	
				"	5	40	285	0,87	25	155	0,638	
				"	5	40	295	0,87	25	155	0,638	
7	Dutrun (5)	Natursand	Natursand u. Kies			346	0,50	(20)	384	(0,507)	weich	
						350	0,55	(21)	335	(0,526)		
						355	0,60	(25)	350	(0,553)		
			Natursand u. Splitt (Hochfenschlacke)			365	0,67	(24)	273	(0,569)		
						360	0,74	(22)	247	(0,561)		
						360	0,74	(22)	247	(0,561)		
			Brechsand u. Splitt (Porphy)			346	0,50	(20)	384	(0,507)		
						350	0,55	(21)	335	(0,526)		
						355	0,60	(25)	350	(0,553)		
						365	0,67	(24)	273	(0,569)		
8	Walz (18)	Natursand	Natursand u. Kies	A	2	42	254	0,54	57,5	330	0,698	(1) erdfeucht
						250	0,64	51,0	280	0,698	(2) gesättigt	
				A	2	42	345	0,46	63,5	445	0,681	(1) erdfeucht
			Natursand u. Splitt (Porphy)			343	0,50	59,5	395	0,684	(2) gesättigt	
						350	0,55	61,0	450	0,684	(3) gesättigt	
						355	0,60	62,5	460	0,684	(4) gesättigt	

bestimmter Maßnahmen auf das Verhältnis der Biege- oder Zugfestigkeit zur Druckfestigkeit als die einfachen Verhältniswerte zwischen diesen Festigkeiten, weil die Exponenten die von der Höhe der Druckfestigkeit abhängige Schwankung der Verhältniswerte offenbar befriedigend erfassen.

c) *Einflüsse auf die Zugfestigkeit des Betons.*

Wenn die Aufgabe gestellt ist, die Zugfestigkeit des Betons zu erhöhen, so müssen alle Größen und Vorgänge untersucht werden, die die Eigenschaften des Betons beeinflussen können, das sind der Zement, die Gesteinsart, Kornform und Körnung der Zuschläge, die Mischung aus Zement, Zuschlägen und Wasser, die Verarbeitung, die äußeren Bedingungen während der Erhärtung und später, wie Temperatur und Feuchtigkeit, das Alter und die Belastung.

1. *Zement.*

Da die Festigkeit des Betons erst durch die Bindekraft des Zements herbeigeführt wird, so bestimmen die Eigenschaften des Zements auch in erster Linie die Zugfestigkeit des Betons. Dieser Überlegung widerspricht scheinbar die Tatsache, daß die Rangordnung der Zemente nach der bis vor kurzem allgemein üblichen Normenzugprüfung eine andere ist als nach dem Zugversuch an Beton, der mit diesen Zementen hergestellt wurde, d. h. daß der nach den Normen zugfestere Zement keineswegs immer den zugfesteren Beton liefert, z. B. (3). Man hat hieraus und aus ähnlichen Beobachtungen beim Druckversuch geschlossen, daß die herkömmliche Normenprüfung mit einkörnigem Sand und niedrigem Wasserzement-Verhältnis keinen hinreichenden Bewertungsmaßstab für die Bindekraft der Zemente im Beton bildet, und neue Prüfverfahren mit gemischtkörnigen Sanden und höherem Wasserzement-Verhältnis entwickelt (7) bis (10). Von der Forschungsgesellschaft für das deutsche Straßenwesen veranlaßte Versuche haben eine gute Übereinstimmung zwischen den Verhältnissen der nach den neuen Prüfverfahren ermittelten Biegefestigkeiten verschiedener Zemente und der Biegefestigkeiten von Beton, der mit diesen Zementen hergestellt war, ergeben. Damit ist bewiesen, daß die Biegefestigkeit des Betons durch die Wahl eines nach den neuen Prüfverfahren überlegenen Zements erhöht werden kann. Ferner ist nun auch die Möglichkeit gegeben, die Ursachen zu erforschen, die die Überlegenheit der einzelnen Zemente bedingen. Nach den gegenwärtigen Erkenntnissen über die Wirkungsweise der Zemente ist allerdings kaum zu erwarten, daß die Leistung der Zemente für die Zugfestigkeit des Betons über das z. Zt. Erreichte wesentlich gesteigert werden kann.

Das Verhältnis zwischen der Biege- und Druckfestigkeit der Zemente schwankt auch nach dem neuen Prüfverfahren in weiten Grenzen und ist im Durchschnitt umso ungünstiger für die Biegefestigkeit, je größer die Druckfestigkeit ist (10). Das Verhältnis zwischen diesen beiden Festigkeiten beim Beton wird demnach auch durch die Eigenart des Zementes bedingt.

Inwieweit die Schmierfähigkeit, die Bedeutung für den Wasseranspruch zur Erzielung einer bestimmten Verarbeitbarkeit des Betons hat, die Schwindneigung und die Erhärtungsgeschwindigkeit der Zemente die Zugfestigkeit des Betons beeinflussen, wird später in anderem Zusammenhang erörtert (vgl. Ziff. 3 und 8).

2. Zementmenge im Beton.

Mit der Zementmenge im Beton nimmt, bei gleichbleibenden Zuschlägen und gleichbleibender Steife des Betons, die Zug- bzw. Biegef Festigkeit zu (11 S. 48) (12). In der Zusammenstellung 1 kann man dies bei der Gruppe 1 verfolgen, ferner bei Gruppe 2, wenn man die zu derselben Sieblinie gehörigen Werte vergleicht. Aus der Änderung der Exponenten y in Gruppe 1 kann man folgern, daß das Verhältnis $\frac{K_z}{K_d}$ mit wachsendem Zementgehalt günstiger wird. Wahrscheinlich nähert es sich dem für die Zementmarke kennzeichnenden Wert. In Gruppe 2 ist dagegen x z. T. konstant. Dies ist anscheinend auf den höheren und nach der Zementmenge abgestuften Gehalt in der Körnung 0/0,2 mm zurückzuführen, wodurch der Zement auch bei den magereren Mischungen nicht als Porenfüller in Anspruch genommen wird. Mit wachsender Zementmenge nehmen allerdings auch die Austrocknungsspannungen (vgl. Ziff. 8) zu, weil die Querschnitte langsamer durchtrocknen (25 S. 34), so daß trotz höheren Zementgehalts die Festigkeiten vorübergehend sinken können (12).

3. Wassermenge im Beton.

Die Wassermenge im frischen Beton hat auf die Zug- und Biegef Festigkeit einen gleichgearteten Einfluß wie auf die Druckfestigkeit. Mit steigendem Wasserzementverhältnis $w = \frac{\text{Wassergewicht}}{\text{Zementgewicht}}$ fällt die Zug- und Biegef Festigkeit in Abhängigkeit von w ; nach *Graf* näherungsweise im Verhältnis $\frac{1}{w^2}$ (2 S. 86).

Infolge der unter 2 b genannten Beziehungen zwischen den Festigkeiten ist allerdings der Festigkeitsverlust mit steigendem w bei der Zug- und Biegef Festigkeit verhältnismäßig kleiner als bei der Druckfestigkeit. Um den Wasserbedarf zur Erzielung einer bestimmten Verarbeitbarkeit des Betons herabzusetzen, kann neben der Wahl einer geeigneten Zementmarke (vgl. Ziff. 1) und einer zweckmäßigen Körnung (vgl. Ziff. 4) die Verwendung von Benetzungsmitteln vorteilhaft sein (14).

4. Körnung der Zuschläge.

Da die Körnung der Zuschläge in erster Linie den Wasseranspruch des Betons bedingt und dessen Einfluß auf die Zug- oder Biegef Festigkeit einerseits und die Druckfestigkeit andererseits gleichgeartet ist, muß man erwarten, daß die Körnungsregeln, die im Hinblick auf die Druckfestigkeit entwickelt worden sind, auch geeignet sind, hohe Zug- oder Biegef Festigkeiten zu liefern. In Fig. 1 sind die z. Zt. in Deutschland für Eisenbetonmischungen maßgebenden Grenzsieblinien wiedergegeben. Vergleicht man hiermit die Gruppe 2 der Zusammenstellung 1, so findet man, daß die im als „besonders gut“ gekennzeichneten Bereich liegenden Sieblinien in der Tat die günstigsten Biegef Festigkeiten lieferten. Betrachtet man die Gruppen 2 bis 4 und beachtet dabei die Exponenten x bzw. y , so erkennt man, daß es zweckmäßig ist, wenn für weich verarbeiteten Beton der Sandanteil am gesamten Zuschlag auch bei natürlich gekörnten Stoffen zwischen 50 und 60 % beträgt. In Gruppe 3 fällt auf, daß Sand, der nach Fig. 1 ungünstig gekörnt ist, die Biegef Festigkeit weniger un-

günstig beeinflußt hat als die Druckfestigkeit, solange er nicht im Übermaß vorhanden war. Es ist möglich, daß dieses Ergebnis durch das langsamere Austrocknen des feinkörnigen Mörtels beeinflußt ist. *Pfletschinger* (16) fand, daß für die Biegezugfestigkeit eine gute Abstufung der Grobkörnung (> 7 mm) wichtig ist, während es hierauf für die Druckfestigkeit weniger ankommt.

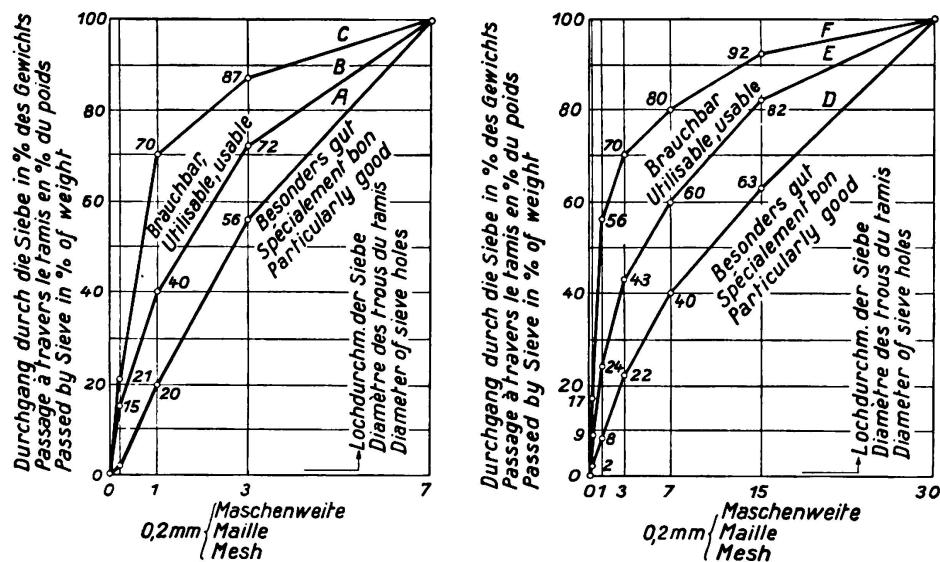


Fig. 1.

Grenzsieblinien des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton.

Sieblinien für Sand allein.

Sieblinien für die gesamten Zuschläge.

5. Kornform und Oberflächenbeschaffenheit der Zuschläge.

Kornform und Oberflächenbeschaffenheit der Zuschläge bestimmen bei gegebenem Zementgehalt und gegebener Körnung den Wasserbedarf des frischen Betons, wenn eine bestimmte Verarbeitbarkeit erzielt werden soll. Um den Wasserbedarf gering zu halten, ist eine möglichst runde oder gedrungene Kornform (Länge : Breite : Dicke zwischen 1:1:1 und 1:0,6:0,2 gemäß den Richtlinien für Fahrbahndecken der Reichsautobahnen) und eine nicht zu rauhe Oberfläche erwünscht. Dies gilt besonders für weichen und flüssigen Beton. Daneben ist die Haftung des Zements am Gestein und die Verklammerung zwischen dem Mörtel und den Grobzuschlägen von der Oberflächenbeschaffenheit der Zuschläge abhängig. Hierauf kommt es offenbar bei der Zug- und Biegefestigkeit mehr an als bei der Druckfestigkeit, weil sich bei der Zug- und Biegebeanspruchung die Zuschlagkörner nicht gegenseitig abstützen vermögen. Zuschlagstoffe mit rauher und unregelmäßiger Oberfläche können deshalb auf die Zug- und Biegefestigkeit günstig einwirken, vorausgesetzt, daß der ungünstige Einfluß erhöhten Wasserbedarfs nicht überwiegt. Dementsprechend kann man aus den Gruppen 5 bis 7 der Zusammenstellung 1 ersehen, daß durch die Verwendung gebrochener an Stelle natürlich gekörneter Zuschläge das Verhältnis der Zug- bzw. Biegezugfestigkeit zur Druckfestigkeit verbessert wird (Zunahme der Exponenten x bzw. y), daß dagegen durch diese Maßnahme die Absolutwerte der Zug- und Biegefestigkeiten keineswegs immer günstig beeinflußt

werden. So tritt z. B. in Gruppe 6 beim flüssigen Beton durch die gebrochenen Zuschläge sogar eine merkliche Verschlechterung der Festigkeiten ein. Aus den Gruppen 4, 5 und 7 geht hervor, daß bezüglich der Zug- bzw. Biegefestigkeit Brechsand und Natursand gleichwertig sind, daß jedoch die Druckfestigkeit durch Brechsand stark beeinträchtigt wird. Es liegt also kein Anlaß vor, Brechsand mit Rücksicht auf die Zug- oder Biegefestigkeit gegenüber Natursand zu bevorzugen.

6. Gesteinsart der Zuschlagstoffe.

Die Zugfestigkeit der als Betonzuschlagstoffe verwendeten Gesteine ist im allgemeinen größer als die bisher gewöhnlich erreichte Betonzugfestigkeit. Wenn man jedoch berücksichtigt, daß die zur Zeit erreichbare Betonzugfestigkeit in höherem Alter nach den beobachteten Biegefestigkeiten (2 S. 90) zu rd. 55 kg/cm^2 eingeschätzt werden kann und daß es andererseits als Betonzuschlag geeignete Gesteine mit kleinerer Zugfestigkeit gibt, so ersieht man, daß die Zugfestigkeit des Gesteins beachtet werden muß, wenn besonders hohe Leistungen erzielt werden sollen (12). Die Biegefestigkeit des Gesteins hat für die Betonfestigkeit kaum Bedeutung, da beim Zug- und Biegeversuch nur besonders länglich geformte Stücke durch Biegung zerstört werden dürften.

Von der Gesteinsart, bei gebrochenen Zuschlägen allerdings auch von der Art der Aufbereitung, ist die Oberflächenbeschaffenheit der Zuschläge abhängig, deren Bedeutung bereits erörtert wurde. Noch nicht verfolgt ist, inwieweit das Wasseraufsaugevermögen der Gesteine zu beachten ist, sei es wegen Verbesserung des Wasserzementverhältnisses (vorausgesetzt, daß die Zuschläge nicht vorher angenäßt waren) (16), wegen Verringerung der Austrocknungsgeschwindigkeit oder vielleicht auch wegen der Haftung des Zements am Gestein.

Vorteilhaft sind Zuschläge aus Gesteinen oder künstlichen Stoffen, die, wie z. B. Hochofenschlacke oder Zementklinker, mit dem Zement chemisch zu reagieren vermögen und dadurch eine festere Bindung des Zements herbeiführen.

Einige Beispiele für den Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit verschiedener Gesteine auf die Zug- und Biegefestigkeit des Betons bringen *Dutron* (Gruppe 7 der Zusammenstellung 1) und *Guttmann* (3).

Schließlich ist die Gesteinsart noch wegen ihres Einflusses auf die Eigenspannungen zu beachten (vgl. Ziff. 8).

7. Verarbeitung des Betons.

Je besser der Beton beim Verarbeiten verdichtet wird, desto größer wird offenbar auch seine Zug- und Biegefestigkeit. So beobachtete *Graf* bei maschinen-gestampften Betonwaren wiederholt Biegefestigkeiten bis 80 kg/cm^2 , in Einzelfällen bis 120 kg/cm^2 (2 S. 90). Größere Unterschiede in der Verdichtungsleistung sind allerdings nur bei erdfeuchten Mischungen möglich. Bei diesen hat besonders das Rütteln günstigen Einfluß, der außer auf der besseren Verdichtung auch darauf beruht, daß ein kleineres Wasserzement-Verhältnis ausreichend ist. Die Gruppe 8 der Zusammenstellung 1 zeigt, welche Vorteile das Rütteln gegenüber dem Stampfen bietet, wobei zu beachten ist, daß eine ungewöhnlich große Stampfarbeit aufgewandt wurde. Die größeren Festigkeiten

bei demselben Zementgehalt entsprechen dem Rütteln, die kleineren dem Stampfen. Das Verhältnis der Biege- zur Druckfestigkeit blieb bei beiden Verdichtungsarten gleich. Hohe Zugfestigkeit erlangt Mörtel, der im Spritzverfahren aufgebracht wird.

8. Feuchtigkeit und Temperatur.

Die Zug- und Biegef Festigkeit des Betons ist von Feuchtigkeits- und Temperatur einwirkungen stark abhängig. Sobald nämlich die Feuchtigkeit oder die Temperatur über den Querschnitt eines Betonkörpers ungleichmäßig verteilt ist, entstehen auch beim Fehlen jeglicher äußeren Kräfte Spannungen im Beton. Diese Eigenspannungen bilden eine Vorbelastung des Betons und bewirken, daß die aus den Bruchlasten errechnete Festigkeit kleiner ausfällt als die wahre Festigkeit.

Das die Eigenspannungen hervorruhende Feuchtigkeitsgefälle entsteht zum Beispiel, wenn feuchter Beton austrocknet oder trockener Beton durchfeuchtet wird, dadurch, daß die Änderung der Feuchtigkeit des Betons und damit das Schwinden oder Quellen im Körper nur allmählich von außen nach innen fortschreitet. Ist nun zum Beispiel die Randzone stärker ausgetrocknet als der Kern des Querschnitts, so wird die Randzone an der ihrem Feuchtigkeitsgehalt entsprechenden Schwindung behindert, wodurch in der Randzone Zugspannungen entstehen, denen Druckspannungen im Kern das Gleichgewicht halten (13 S. 106). Bei Durchfeuchtung des Betons ist das Spannungsbild umgekehrt.

Über die durch das Feuchtigkeitsgefälle beim Austrocknen bedingten Vorgänge gibt Fig. 2 nach Versuchen von *Graf* (19 Fig. 4) einige Aufschluß. Hier wurden Körper mit verschiedener Querschnittsgröße unter denselben Lagerbedingungen beobachtet. Nimmt man an, daß bei den kleineren Körpern praktisch kein Feuchtigkeitsgefälle im Querschnitt vorhanden ist, so geben die ausgezogenen Linien an, wie weit sich der Beton an der Oberfläche der großen Körper verkürzt haben würde, wenn er nicht durch Eigenspannungen gedehnt und durch Feuchtigkeit aus dem Innern des Querschnitts daran gehindert worden wäre, ebenso rasch auszutrocknen wie der Beton der kleinen Körper. Weiter ersieht man aus der geringeren Achsverkürzung der großen Körper (gestrichelte Linie), wieviel langsamer diese gegenüber den kleineren austrocknen, wobei noch zu berücksichtigen ist, daß Eigendruckspannungen die Achsverkürzung über das allein durch Schwinden bedingte Maß vergrößern. Und schließlich zeigt ein Vergleich zwischen der Oberflächen- und Achsverkürzung der großen Körper (strichpunktierter und gestrichelter Linie), wie sehr die nach dem Feuchtigkeitsgefälle zu erwartenden Unterschiede der Verkürzungen durch Eigenspannungen ausgeglichen werden.

Die Eigenspannungen werden umso größer, je größer das Feuchtigkeitsgefälle im Querschnitt wird und je mehr der Zement und die Zuschläge zum Schwinden oder Quellen neigen. Das Feuchtigkeitsgefälle hängt ab von dem Verhältnis zwischen Oberfläche und Querschnitt der Körper, von der Beschaffenheit der Poren im Beton, die die Geschwindigkeit des Durchtrocknens von außen nach innen bestimmen (20 Teil I) (21) und von der Austrocknungsgeschwindigkeit der Randzone, die umso größer ist, je größer der

Unterschied zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt des Betons und seiner Umgebung ist (22 S. 136). Um die Austrocknung zu verlangsamen, können abdichtende Anstriche des Betons vorteilhaft sein (3) (23) (39 S. 139). Die Eigenspannungen werden dagegen umso kleiner, je kleiner das Elastizitätsmaß und je größer das Kriechen des Betons ist (24). Weiter ist die Erhärtungsgeschwindigkeit zu be-

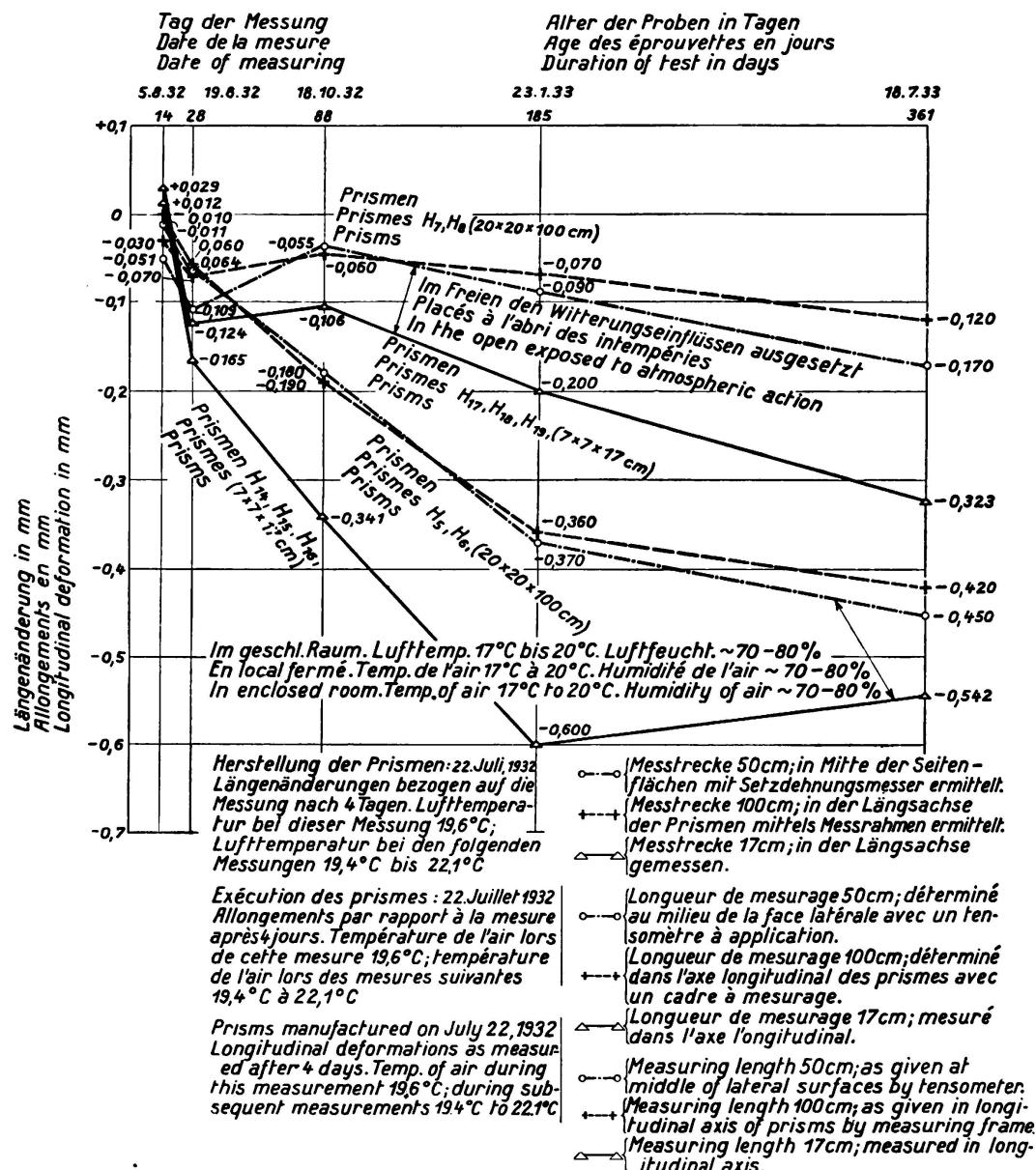


Fig. 2.

Schwinden und Quellen verschieden großer Körper.

achten. Je schneller der Beton erhärtet, umso früher tritt die Größe der Eigenspannungen gegenüber der Größe der wahren Festigkeit zurück; dagegen werden die Eigenspannungen im schnellerhärtenden Beton größer, weil das Elastizitätsmaß schneller wächst und das Kriechen früher nachläßt als bei langsam erhärtendem Beton. Diese zahlreichen zum Teil entgegengesetzten Ein-

flüsse führen dazu, daß sich Unterschiede der Lagerungsarten auf die Zug- und Biegefestigkeit von verschiedenen aufgebautem Beton verschieden stark auswirken (1 S. 90 und 94) (12 Tafel 12).

Während bei Änderung der Feuchtigkeit stets Abnahme der Zugfestigkeit erwartet werden muß, fand *Graf* bei Durchfeuchtung nach mehr oder minder langem Austrocknen Zunahme der Biegefestigkeit (26 Zusammenstellung 9). Der Grund hierfür kann darin gefunden werden, daß auf den Zugversuch die Eigenspannungen im gesamten Querschnitt einwirken, daß also bei Durchfeuchtung der Randzone Zugspannungen im Kern die Zugfestigkeit vermindern, während beim Biegeversuch nur die Eigenspannungen der Randzone ausschlaggebend sind. Diese sind aber bei Durchfeuchtung zunächst Druckspannungen und erhöhen dadurch die Biegefestigkeit. Bemerkenswert ist, daß bei diesen Versuchen die senkrecht zur Druckrichtung wirkenden Zugspannungen im Kern die Druckfestigkeit herabsetzten.

Neben den beschriebenen Eigenspannungen kann auch längeres Unterwasserlagern die Zug- und Biegefestigkeit des Betons vermindern (1 S. 90) (26 Zusammenstellung 3).

Erwärmung und Abkühlung rufen gleichgeartete Eigenspannungen wie Durchfeuchtung und Austrocknung hervor, deren Größe sinngemäß vom Temperaturgefälle im Querschnitt abhängt (23).

Faßt man diese Betrachtungen zusammen, so ergibt sich, daß vor allem schroffer Wechsel der Lagerbedingungen die Zug- und Biegefestigkeit beeinträchtigt. Durch anfänglich langes Feuchthalten und möglichst langsames Austrocknen der Oberfläche des Betons kann sie dagegen günstig beeinflußt werden (4 S. 49).

9. Alter.

Die Zug- und Biegefestigkeit wächst mit dem Alter entsprechend der Erhärzungsgeschwindigkeit des Zements. Diese Tatsache wird allerdings von den unter Ziff. 8 erörterten Lagerungseinflüssen überdeckt, so daß je nach den Umständen während längerer Zeit Stillstand (27 S. 51) oder sogar Rückgang (12 Tafel 12) (26 Zusammenstellung 3) der Zug- oder Biegefestigkeit beobachtet werden kann, auch wenn die Druckfestigkeit gleichzeitig weiter zunimmt. Dabei ist zu beachten, daß der Beton im allgemeinen sehr langsam durchtrocknet (1 S. 89), dagegen viel schneller Wasser aufnimmt (28 Fig. 24) (22 S. 140).

Wenn nach einer Änderung der Lagerbedingungen die Zug- und Biegefestigkeit mit fortschreitendem Feuchtigkeitsausgleich infolge des entsprechenden Rückgangs der Eigenspannungen wieder zunimmt, ist der Zuwachs innerhalb eines bestimmten Zeitraumes oft größer als die gleichzeitige Steigerung der Druckfestigkeit. Die Exponenten x und y sind deshalb am Ende dieses Zeitraumes größer als am Anfang (vgl. Zusammenstellung 2) und nähern sich den Werten, die bei eigenspannungsfreier Erhärzung entstehen. (Vgl. die beiden letzten Zeilen der Zusammenstellung.) Die Zusammenstellung zeigt weiter, daß der wasserreichere Beton mit anderer Geschwindigkeit erhärtet als der wasserärmere Beton, daß also die Eigenspannungen je nach dem Wasserzementverhältnis verschieden schnell zu- und abnehmen.

Zusammenstellung 2.

Einfluß der Lagerung und des Alters auf die Zugfestigkeit des Betons.¹

Lagerung	Alter	$W_1 = 0,53$			$W_2 = 0,61$		
		K_{z_1} kg/cm ²	K_{d_1} kg/cm ²	y_1	K_{z_2} kg/cm ²	K_{d_2} kg/cm ²	y_2
1	2	3	4	5	6	7	8
7 Tage feucht dann trocken	28 Tage	12,4	225	0,466	12,0	191	0,474
	45 Tage	13,7	253	0,472	11,8	209	0,463
	6 Monate	19,5	337	0,511	15,3	297	0,480
	1 Jahr	23,7	371	0,536	23,1	329	0,543
dauernd feucht	45 Tage	19,0	224	0,545	17,0	201	0,534

10. Wechselbelastung.

Durch oftmals wiederholte Belastung und Entlastung wird die Zug- und Biegefestigkeit vermindert. Als Ursprungsfestigkeit ermittelt beträgt die Dauerbiegefestsigkeit rund die Hälfte der in üblicher Weise bestimmten Biegefestsigkeit (29 S. 117). In diesem Zusammenhang ist zu bedenken, daß auch häufiger Temperaturwechsel als Wechselbelastung wirkt.

d) Mittel zur Erhöhung der Zugfestigkeit des Betons.

Faßt man die vorstehenden Erörterungen zusammen, so kann man folgende Mittel und Maßnahmen zur Erhöhung der Zugfestigkeit des Betons empfehlen:

1. Vor allem ist eine geeignete Zementmarke auszuwählen. Der Zement soll nach dem Prüfverfahren mit weichem gemischtkörnigem Mörtel möglichst große Biegefestsigkeit liefern und möglichst wenig schwinden; er soll den Beton auch bei geringem Wasserzusatz leicht verarbeitbar machen. Langsam erhärtende Zemente sind zu bevorzugen, falls sie genügend fest werden und gute Nachbehandlung des Betons gesichert ist.
2. Es sind Zuschlagstoffe zu verwenden, deren Zugfestigkeit größer ist als die erstrebte Betonzugfestigkeit. Zu bevorzugen sind Stoffe, die wenig schwinden, stark kriechen und ein kleines Elastizitätsmaß haben. Rauhe Oberfläche der Körner ist vorteilhaft, vorausgesetzt, daß dadurch der Wasseranspruch nicht zu sehr erhöht wird. Hierauf ist bei der Verwendung von Brechsand und Splitt zu achten. Beim Aufbereiten des Gesteins ist dafür zu sorgen, daß keine Stücke mit Spaltrissen geliefert werden.
3. Für die Körnung der Zuschläge gelten im allgemeinen dieselben Grundsätze, die für die Erzeugung möglichst druckfesten Betons seit langem ent-

¹ Nach Graf (1) S. 86; Beton wie Zusammenstellung 1; Gruppe 1, Reihe 2.

wickelt worden sind. Es erscheint allerdings zweckmäßig, den Sandgehalt (Körnung < 7 mm) auch bei natürlich gekörnten Stoffen nicht kleiner als 50 % des Gesamtzuschlagsgewichts zu wählen. Auch bei den groben Körnungen ist auf eine gute Abstufung der Korngrößen zu achten.

4. Erhöhung der Zementmenge im Beton ist vorteilhaft, jedoch lässt die günstige Wirkung nach, wenn die üblichen Grenzen überschritten werden.
5. Die Wassermenge im Beton, bzw. das Wasserzement-Verhältnis ist möglichst zu beschränken. Die Verwendung von Benetzungsmitteln kann deshalb zweckmäßig sein.
6. Der Beton ist möglichst gut zu verdichten. Bei genügend steifem Beton bietet deshalb das Rütteln Vorteile.
7. Der Beton ist anfänglich möglichst lange feucht zu halten und soll möglichst langsam austrocknen. Zu vermeiden ist, besonders solange der Beton noch jung ist, wiederholter und besonders schroffer Wechsel der auf den Beton einwirkenden Feuchtigkeit und Temperatur.

- - - H. Dehnbarkeit des Betons.

a) Dehnbarkeit des Betons unter kurzfristiger Belastung.

Versuche über die Dehnung des Betons bei Zug- und Biegebeanspruchung haben folgendes ergeben:

An größeren Probekörpern werden unter derselben Beanspruchung etwas größere Dehnungen gemessen als an kleineren Körpern (30) (31). Biegeversuche liefern größere Bruchdehnungen als Zugversuche (25 S. 39), zur Begründung vgl. I a.

Die Dehnzahl $\alpha = \frac{1}{E}$, errechnet aus den gesamten oder federnden Dehnungen, stimmt bei kleinen Beanspruchungen für Zug und Druck überein. Bei größeren, jedoch gleichen Spannungen wird α für Zugbeanspruchung ein wenig größer als für Druckbeanspruchung (30 S. 50). Die Dehnzahl α nimmt mit wachsender Beanspruchung des Betons zu.

Bei Beton, der aus denselben Stoffen (Zementmarke, Gesteinsart der Zuschläge) besteht, wird die Dehnzahl α für dieselbe Spannungsstufe umso kleiner, je größer die Festigkeit des Betons ist (30 S. 50) (24) (31). Durch Änderung der Zementmarke oder der Gesteinsart und damit der Verformbarkeit der Zuschläge kann man bei gleicher Festigkeit verschiedenen dehnbaren Beton erhalten. Aus Untersuchungen von *Hummel* (24) sind in Zusammenstellung 3 Verhältniswerte angegeben, die zeigen, welche Möglichkeiten zur Beeinflussung der Dehnbarkeit des Betons auf diesem Wege bestehen. Bemerkenswert ist, daß die größere Dehnbarkeit des Betons umso ausgeprägter hervortritt, je mehr sich die Beanspruchung der Bruchspannung nähert.

Offenbar wird die Dehnbarkeit des Betons durch Eigenspannungen je nach den Lagerbedingungen beeinflußt. Jedoch sind die vorliegenden Versuche (24) (30) (32) nicht genügend vergleichbar, um daraus allgemeine Schlüsse ziehen zu können.

Inwieweit die Dehnzahl α für Zug- und Biegebeanspruchung des Betons durch häufig wiederholte Be- und Entlastung unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze beeinflußt wird, konnte nicht ermittelt werden.

Zusammenstellung 3.

Verhältniswerte der Dehnzahlen $\alpha = \frac{1}{E}$ nach Hummel.²⁴

Beton unterschieden durch:	K_d kg/cm ²	K_b kg/cm ²	15	25	$\sigma_{bz} = 35$ kg/cm ²	40	45	K_b
Gesteinsart der Zuschläge	555	48	1	1	1	1	1	1
	510	49	1,06	1,02	1,04	1,07	1,22	1,35
	479	48	1,35	1,82	1,33	1,34	1,42	1,53
Zement	532	48	1	1	1	1	1	1
	544	48	1,0	0,98	1,0	1,02	1,05	1,25
	500	47	1,0	1,08	1,24	1,55	—	1,95

b) Dehnbarkeit des Betons unter langdauernder ruhender Zugbeanspruchung (Kriechvermögen).

Das Kriechen des Betons unter Zugbeanspruchung ist bisher wenig verfolgt worden. Aus einem Bericht von *Glanville* (33) ist lediglich ein Versuch bekannt, bei dem das Kriechmaß von Beton, der im Alter von 1 Monat belastet wurde, unter Zugbeanspruchung gleich groß war, wie unter Druckbeanspruchung. Es betrug bei dem mitgeteilten Versuch unter einer Spannung von 10 kg/cm² nach 6 Monaten 0,1 mm/m. Da das Kriechmaß verhältnisgleich mit der Spannung wächst, so wird es unter Beanspruchungen nahe der Zugfestigkeit größer werden, als die Bruchdehnung beim kurzfristigen Versuch, die etwa 0,0045 mm/m je kg/cm² Zugfestigkeit beträgt (4 S. 51). Falls es erlaubt sein sollte, die Beobachtung über das Verhältnis des Kriechens bei Zug- und Druckbeanspruchung zu verallgemeinern, so ergibt sich aus den Untersuchungen über das Kriechen des Betons unter Druck [nach einem Bericht über Versuche von *Davis, Glanville u. a.* (34)], daß die Dehnbarkeit des Betons unter langdauernder Belastung sehr viel größer werden kann als die im kurzfristigen Versuch gefundene Dehnbarkeit, und daß sie auch in viel stärkerem Maße durch den Aufbau und die Behandlung des Betons beeinflußt werden kann.

c) Bedeutung der Dehnbarkeit des Betons für die Rißbildung.

Zu unterscheiden ist zwischen der Bruchdehnung und der Dehnzahl α .

Die Größe der Bruchdehnung hat in allen den Fällen keine Bedeutung, wo die Tragfähigkeit des Bauwerks erschöpft ist, sobald Risse im Beton entstehen. Hier kommt es lediglich darauf an, daß die Zugfestigkeit des Betons genügend groß ist, um die Beanspruchungen mit Sicherheit aufnehmen zu können. In allen anderen Fällen wird die Rißgefahr umso kleiner, je größer die Bruchdehnung des Betons ist. Dabei ist es keineswegs immer gleichgültig, ob der größeren Bruchdehnung eine größere oder kleinere Zugfestigkeit entspricht. Betrachtet man z. B. eine Betonstraßenplatte, die während des Austrocknens durch Reibungskräfte gedehnt wird, so erkennt man folgendes: Die Größe der Reibungskräfte ist begrenzt. Sobald diese Grenze erreicht ist, gleitet die Platte auf dem Untergrund und die Dehnung der Platte nimmt nicht weiter zu. Je größere Kräfte

also erforderlich sind, um die Platte bis zum Bruch zu dehnen, d. h. je größer die Zugfestigkeit der Platte ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß die Platte gleitet und Risse vermieden werden.

Die Größe der Dehnzahl α wirkt sich auf die Rißbildung mittelbar aus. Je größer α ist, d. h. je dehnbarer der Beton ist, desto kleiner bleiben die Spannungen, die entstehen, wenn die durch Änderung der Feuchtigkeit oder Temperatur bedingte Verformung des Betons behindert wird (vgl. auch I 8). Je kleiner aber diese Spannungen sind, umso geringer ist die Gefahr, daß sie allein oder zusammen mit den durch Lasten hervorgerufenen Spannungen die Zugfestigkeit überschreiten.

In demselben Sinne wie die Dehnzahl α wirkt das Kriechvermögen des Betons. Durch das Kriechen werden vor allem die Schwindspannungen, die sich sehr langsam entwickeln und lange wirken, vermindert (23) (24) (34).

Zusammenfassend ergibt sich, daß zur Verminderung der Rißbildung möglichst große Dehnbarkeit des Betons bei gleichzeitig möglichst großer Zugfestigkeit erwünscht ist. Diese Feststellung bedarf allerdings einer Einschränkung. Da einer größeren Dehnbarkeit des Betons unter Zug- und Biegebeanspruchung im allgemeinen auch eine größere Stauchbarkeit unter Druckbeanspruchung entspricht, können in durch Biegung beanspruchten Bauteilen mit wachsender Verformbarkeit des Betons insbesondere durch Kriechen so große Formänderungen entstehen, daß eine weitgehende Änderung der in üblicher Weise errechneten Spannungsverteilung eintritt und die Riß- und Standsicherheit vermindert wird (34) (35).

III. Rißbildung im Eisenbeton.

a) Allgemeines.

Den im Eisenbetonbau zugelassenen Eisenspannungen $\sigma_e \geq 1200 \text{ kg/cm}^2$ entsprechen Eisendehnungen $\epsilon_e \geq 0,6 \text{ mm/m}$, während die z. Zt. erreichbare Bruchdehnung des Betons beim Zugversuch höchstens etwa $0,2 \text{ mm/m}$ (36 S. 3) und beim Biegeversuch höchstens etwa $0,3 \text{ mm/m}$ (24) beträgt. Deshalb sind in Eisenbetonbauteilen Risse im allgemeinen schon unter den Gebrauchslasten vorhanden. Die Erfahrung hat gezeigt, daß diese Risse den dauernden Bestand der Bauwerke nicht gefährden, solange sie eng genug bleiben, um das Eisen vor zerstörenden Einflüssen zu schützen (11, Bericht von Krüger) (37) (38). Maßnahmen zur Verminderung der Rißbildung müssen deshalb dahin gehen,

1. das Entstehen von Rissen möglichst einzuschränken, d. h. dafür zu sorgen, daß Dehnungen, die der Beton nicht mehr zu ertragen vermag, auf einen möglichst kleinen Teil des Baukörpers beschränkt bleiben, und
2. das Klaffen unvermeidlicher Risse zu verhindern.

b) Anfangsspannungen im Eisenbeton.

Bekanntlich entstehen in bewehrten frei beweglich gelagerten Bauteilen beim Schwinden und Quellen des Betons durch den Gleitwiderstand der Eiseneinlagen Eigenspannungen im Beton und zwar beim Schwinden Zugspannungen, beim Quellen Druckspannungen, denen im Eisen Druck- bzw. Zugspannungen entsprechen. Diese Spannungen in Beton und Eisen werden zusammen als Anfangsspannungen bezeichnet, weil sie schon im noch unbelastetem Bauwerk vorhanden sind.

Die Größe dieser Anfangsspannungen ist aus folgenden Gründen durch Versuche schwer zu erfassen (39 S. 127) (40) (33): Die Verkürzungen des Betons beim Schwinden werden durch den Gleitwiderstand der Eisen auf diese übertragen. Der Gleitwiderstand entsteht durch die Reibung des Eisens im Beton und durch Umschließungskräfte infolge der Raumverminderung des Betons (36 S. 32). Der Gleitwiderstand entwickelt sich erst allmählich mit zunehmender Erhärtung des Betons. Es ist deshalb wahrscheinlich, daß in der ersten Zeit des Erhärtens Bewegungen zwischen Beton und Eisen möglich sind, ohne daß Spannungen entstehen. Später wird die Schwindverkürzung des Betons vom Ende des Versuchskörpers aus durch den Gleitwiderstand auf die Eisen übertragen, wodurch die gegenseitigen Bewegungen allmählich abnehmen, bis sie im mittleren Teil des Körpers verschwinden. Entsprechend nehmen die Anfangsspannungen von 0 am Ende bis zum Größtwert in der mittleren Beharrungszone zu. Das Gesetz dieser Zunahme und damit auch die Länge der Beharrungszone, die bei kurzen Körpern überhaupt nicht zustande kommt, sind unbekannt. Sobald im Beton Spannungen entstehen, beginnt der Beton zu kriechen. Es ist deshalb unmöglich, aus dem Unterschied der Verkürzung des bewehrten Betons gegenüber der des unbehindert schwindenden Betons auf die Anfangsspannungen im Beton zu schließen. Die durch die Eisen hervorgerufene Verlängerung des Betons gegenüber der Verkürzung bei unbehindertem Schwinden ist vielmehr infolge des Kriechens wesentlich größer als die federnde Dehnung infolge der Anfangsspannung (25 S. 36). Die Größe der Anfangsspannung kann deshalb nur durch Stauchungsmessungen an Eisen in der Beharrungszone gemessen werden. Einen solchen Versuch hat *Glanville* durchgeführt (36 S. 53). Das Ergebnis kann jedoch wegen der Abmessung des Versuchskörpers nicht verallgemeinert werden. Die Anfangsspannungen sind im Betonquerschnitt nicht gleichmäßig verteilt. In der engsten Umgebung des Eisens wird das Kriechen durch den Gleitwiderstand stark gefördert. Dieser Einfluß des Eisens nimmt mit wachsendem Abstand vom Eisen zuerst rasch, dann langsamer ab. An Versuchskörpern entstand hierdurch eine deutlich ausgeprägte Wölbung der Endflächen (25 S. 37).

Für die Beharrungszone gilt jedenfalls, daß die Verkürzung des Betons neben den Eisen, die entstanden ist aus der Verkürzung des Betons, bei unbehindertem Schwinden δ vermindert um die federnde Dehnung $\frac{\sigma_b}{E_b}$ und das Kriechmaß α des Betons, gleich sein muß der Verkürzung des Eisens $\frac{\sigma_e}{E_e}$. Hierbei ist das Kriechmaß eine Funktion des zeitlichen Verlaufs des Schwindens und der Größe der Spannung σ_b . Außerdem muß im Querschnitt Gleichgewicht herrschen. Aus den beiden Gleichungen:

$$\delta - \alpha - \frac{\sigma_b}{E_b} = \frac{\sigma_e}{E_e} \quad \text{und} \quad \sigma_b F_b = \sigma_e F_e$$

folgt mit $\mu = \frac{F_e}{F_b}$

$$\sigma_b = \frac{(\delta - \alpha)}{\left(\frac{E_e}{E_b} + \frac{1}{\mu}\right)} \cdot E_e.$$

Die Anfangsspannung im Beton wird also umso größer, je mehr der Beton

schwindet und je größer das Elastizitätsmaß des Betons und das Bewehrungsverhältnis sind, dagegen umso kleiner, je mehr der Beton kriecht. Dabei kommt es hauptsächlich auf das Kriechen während der ersten Zeit des Erhärtens an, das bei genügend langsamer Erhärtung auch dann groß sein kann, wenn das Kriechmaß in höherem Alter klein bleibt, wie es mit Rücksicht auf die Dauerdeformierung unter den Lasten erwünscht ist.

Durch Anfangszugspannungen im Beton wird die Rißgefahr erhöht. Zur Verminderung der Rißbildung infolge von Anfangsspannungen ist deshalb wenig schwindender, stark dehnbarer und langsam erhärtender Beton zu verwenden und für langsames stetiges Austrocknen zu sorgen (vgl. I 8). Es sind also dieselben Maßnahmen anzuwenden, die bereits für den unbewehrten Beton empfohlen wurden. Außerdem ist das Bewehrungsverhältnis möglichst klein zu halten. Aus diesem Grunde sind auch geschweißte Stöße der Eisen zweckmäßiger als solche durch Überdeckung oder Spannschlösser.

Aus den Beobachtungen über das Abklingen der Beeinflussung des Betons in der Umgebung der Eisen kann man nun folgern, daß bei gleichbleibendem Beton- und Eisenquerschnitt, die durch das Eisen hervorgerufenen Formänderungen des Betons einen umso größeren Teil der Querschnittsfläche erfassen, je gleichmäßiger der Eisenquerschnitt im Beton verteilt ist, d. h. je zahlreicher die Eiseneinlagen bei entsprechend verminderter Querschnitt des Einzelstabes sind. Das Dehnungsgefälle im Betonquerschnitt wird also mit besserer Verteilung des Eisenquerschnitts kleiner und dadurch dürften auch die Anfangsspannungen abnehmen.

Auf Anfangsspannungen ist wahrscheinlich auch die Tatsache zurückzuführen, daß in hohen Balkenstegen mit stark bewehrter Zugzone, insbesondere bei I-förmigem Balkenquerschnitt, die Risse zuerst im Steg oberhalb der Bewehrung entstehen. Während des Austrocknens ist wie oben erörtert, der Beton in der Umgebung der Eisen gedeht worden, die Verkürzung der bewehrten Zone also wesentlich kleiner geblieben als beim freien Schwinden. Oberhalb der bewehrten Zone muß nun wegen des Zusammenhangs der Beton im Steg ebenso sehr gedeht werden, was auch nur durch Kriechen möglich ist. Hier fehlt jedoch der das Kriechen begünstigende Einfluß des Gleitwiderstandes der Bewehrung, so daß das Kriechmaß mit wachsendem Abstand von der bewehrten Zone kleiner wird und ein größerer Teil der erzwungenen Dehnung des Betons Spannungen hervorruft. Die Anfangsspannungen werden also im Steg oberhalb der bewehrten Zone größer als in dieser. Bei I-förmigen Querschnitten ist diese Erscheinung besonders ausgeprägt, weil zwischen der breiten Zugzone und dem dünnen Steg leicht ein größeres Feuchtigkeits- und damit Schwindgefälle entsteht. Zum Schutz gegen solche Risse im Steg ist eine gut verteilte Bewehrung nahe der Oberfläche zu empfehlen, wie sie schon öfter angewandt worden ist (z. B. 41), wenn auch manchmal nur aus der Erwägung, daß auch oberhalb der bewehrten Zone noch hohe Belastungszugspannungen im Beton vorhanden sind (42).

c) Vorgänge bei der Rißbildung im Eisenbeton.

Die Vorgänge in der Umgebung eines Risses hat *Emperger* (36) in letzter Zeit ausführlich erörtert. Es ergab sich dabei eine grundsätzliche Übereinstimmung mit den Vorgängen, die bei Versuchen zur Ermittlung der Anfangs-

spannungen beobachtet oder aus den Beobachtungen gefolgert werden können (vgl. III b). An Stelle des Kriechens unter langdauernder Lasteinwirkung tritt bei der Rißbildung die plastische Dehnung, die der Beton unter dem Einfluß des Gleitwiderstandes in der engsten Umgebung der Eisen erfährt, und die größer ist als seine gewöhnliche Dehnbarkeit (36 S. 18). Sie nimmt mit wachsender Entfernung von den Eisen rasch ab (25 S. 40).

Von der Rißstelle aus muß die Zugkraft des Eisens durch den Gleitwiderstand wieder in den Beton übertragen werden. Es wird sich zunächst unmittelbar neben dem Riß ein Bereich befinden, wo sich der Beton vom Eisen gelöst hat, weil er den Dehnungen und der Querzusammenziehung des Eisens nicht mehr zu folgen vermochte (Bereich der Loslösung), sodann folgt ein Bereich, wo der Beton in fortschreitend wachsender Schichtdicke plastisch gedehnt ist und der Gleitwiderstand wirkt, der schnell seinen Höchstwert erreicht (plastischer Bereich). Hier übernimmt der Beton einen Teil der Zugkraft aus den Eisen, bis schließlich die Eisendehnungen die federnde Dehnbarkeit des Betons nicht mehr überschreiten (elastischer Bereich) (36 Fig. 20) (25 S. 53). Mit wachsender Beanspruchung des Eisens und abnehmendem Rißabstand verschwinden nacheinander die beiden letzten Bereiche, so daß schließlich das Eisen auf der ganzen Länge zwischen zwei Rissen gleitet.

Aus den Vorgängen in der Nähe eines Risses kann man schließen, daß die Mitwirkung des Betons in der Zugzone umso länger gewährleistet ist, je größer der Gleitwiderstand der Bewehrung und die plastische Verformbarkeit des Betons sind. Soweit es auf den Beton ankommt, wächst der Gleitwiderstand mit der Betonfestigkeit, wenn auch in geringerem Maße als diese (25 S. 56), dagegen nimmt die plastische Verformbarkeit mit abnehmender Betonfestigkeit zu (36 S. 73) (30 S. 50). Durch die Art der Bewehrungseisen kann der Gleitwiderstand leichter beeinflußt werden, z. B. durch Verwendung von Eisen mit möglichst rauher Oberfläche oder von Sondereisen, wie Knoten- oder Dralleisen, deren Form eine besonders gute Verbindung mit dem Beton bewirkt (25 S. 58) (36 S. 73). Die Mitwirkung des Betons kann weiter dadurch erhöht werden, daß von den Eiseneinlagen ein größerer Querschnittsteil des Betons beeinflußt wird, z. B. durch bessere Aufteilung der Querschnittsfläche der Eisen (25 S. 41) oder durch räumliche Bewehrung (Querbewehrung, Maschennetze, Streckmetall). Zu beachten ist dabei, daß Querbewegungen (z. B. Bügel), zwischen der Hauptbewehrung und der Betonoberfläche die Rißbildung begünstigen.

Eine bessere Mitwirkung des Betons in der Zugzone bewirkt folgendes: Die mittlere Spannung der Eisen unter einer bestimmten Belastung wird kleiner und infolgedessen auch die Dehnung der Zugzone (25 S. 51). Ferner wird der Abstand der Risse kleiner, weil die Entspannung des Betons vom ersten Riß aus nur eine kleine Strecke weit reicht (25 S. 48). Je zahlreicher jedoch die Risse sind, desto weniger klaffen sie (25 S. 50). Dies erklärt sich daraus, daß die Verlängerung des Eisens auf einer bestimmten Strecke, innerhalb deren Risse vorhanden sind, hauptsächlich von der Dehnung des Eisens in den Rißquerschnitten abhängt, weil dort die größte Beanspruchung des Stahles herrscht. Je zahlreicher nun die Risse sind, desto kleiner ist der Bruchteil der Gesamtdehnung des Eisens, der auf den einzelnen Riß entfällt.

Mit wachsender Beanspruchung der Eisen klaffen die Risse stärker, falls nicht.

solange der Gleitwiderstand zwischen den vorhandenen Rissen noch nicht überwunden ist, neue Risse hinzutreten. Ist der Gleitwiderstand erschöpft, so hört die Abhängigkeit der Rißweite von der Rißzahl auf (25 S. 51). Es können einzelne Risse sich vielmehr besonders weit öffnen, während andere wieder kleiner werden können. So zeigte sich bei Versuchen mit oftmals wiederholter Belastung und Entlastung (36 S. 114) (43), daß bei Rundseisenbewehrung, wo der Gleitwiderstand durch die Dauerbelastung überwunden war, die größte Rißbreite trotz gleichbleibender Rißzahl mit den Lastwiederholungen stark zunahm, während sie bei Isteigstahl, der im Beton nicht gleiten konnte, dauernd gleich blieb. Bei solchen Dauerbelastungen nimmt die Rißzahl anfänglich zu, erreicht jedoch bald einen Beharrungszustand. Neue Risse können auch unter dauernder ruhender Belastung infolge des Kriechens entstehen, weil die Nulllinie sich nach der Zugseite verschiebt und dadurch die Beanspruchung der Zugzone wächst (33) (34).

Erheblichen Einfluß auf das Klaffen der Risse hat der Umstand, daß die Eisen die bis zur Rißbildung vom Beton übertragene Kraft zusätzlich aufnehmen müssen (36 S. 44) (44). Sie werden dadurch an der Rißstelle, wo sie sich allein unbehindert dehnen können, zusätzlich gedehnt. Die Risse klaffen deshalb anfänglich umso mehr, je kleiner das Verhältnis des Bewehrungsquerschnitts zum gerissenen Betonquerschnitt ist und je größer vorher die Zugkraft im Beton war, also im allgemeinen je größer die Breite der Betonzugzone (44) und die Zugfestigkeit des Betons sind. Beim Entstehen des Risses federt der Beton infolge der Entspannung zurück. Die Bewegung bleibt dabei in der Nähe der Eiseneinlagen infolge des Gleitwiderstandes kleiner als in größerem Abstand davon, wo auch die federnde Dehnung größer war. Der Riß klafft also an der Körperoberfläche etwas mehr als in der Nähe der Eisen (36 S. 48), wie er auch an der Oberfläche beginnt und gegen die Bewehrung fortschreitet (39 S. 117).

Besonders wichtig ist es, daß die Risse unter der ständigen Last fein bleiben, daß sich also die Risse nach Entlastung von der Verkehrslast wieder möglichst weit schließen (45). Die bleibende Rißweite dürfte vor allem von den bleibenden Dehnungen des Betons oberhalb der bewehrten Zone abhängen. Auch treten im Riß bleibende Verlängerungen der Eisen auf, weil diese durch den Gleitwiderstand am vollen Zurückfedern gehindert werden (36 S. 73).

Darüber, welche Rißweite für den Beton dauernd unschädlich bleibt, besteht noch kein Einvernehmen. Untersuchungen an Schleuderbeton, also an besonders dichtem Beton (37), ergaben als dauernd zulässig eine Rißweite bis zu 0,3 mm und als vorübergehend zulässig bis zu 0,5 mm.

Gehler (44) folgert aus den Rißweiten, die an Plattenbalken bei einer Eisenspannung von 1200 kg/cm² gemessen wurden, daß als Rißbreite $1/8$ mm zulässig sei. *Graf* (43) kommt zu einem ähnlichen Ergebnis. Solche Festsetzungen sollen dazu dienen, die Zulässigkeit erhöhter Eisenspannungen in Abhängigkeit von der Betongüte und der Art und Anordnung der Bewehrung nach Versuchen zu beurteilen. Es ist jedoch fraglich, ob es mit den derzeitigen Erkenntnissen möglich ist, die Rißbreite mit Sicherheit auf ein bestimmtes Maß zu begrenzen (vgl. 44 Übersicht III).

Aus den Erörterungen über das Klaffen der Risse kann man folgern, daß die sogenannte Rißsicherheit, berechnet als das Verhältnis der Belastung, bei der

der Riß entsteht, zur zulässigen Belastung oder als Verhältnis der in üblicher Weise unter Vernachlässigung der Mitwirkung des Betons errechneten Eisenspannung zur zulässigen Eisenspannung (44) im allgemeinen erst dann einen brauchbaren Wertmaßstab bildet, wenn sie größer als 1 ist. Solange sie kleiner als 1 bleibt, ist ihre Erhöhung nur dann vorteilhaft, wenn die infolge der größeren Rißsicherheit erst später entstandenen Risse unter den ständigen Lasten weniger klaffen als Risse, die frühzeitig entstanden sind.

Die Rißsicherheit, wie sie oben festgelegt wurde, wird größer, je größer die Biegefesteitk und Dehnbarkeit des Betons und je zweckmäßiger die Bewehrung nach Art und Anordnung ist, je größer der Unterschied zwischen der rechnungsmäßigen und der infolge der Mitwirkung des Betons tatsächlich vorhandenen Eisenspannung ist und schließlich je kleiner das Bewehrungsverhältnis $\mu = \frac{F_e}{b h}$ ist (25 S. 24) (45). Sie ist deshalb größer bei kreuzweise bewehrten, allseitig aufliegenden, als bei nach einer Richtung gespannten Platten, ferner bei Platten als bei Plattenbalken und bei diesen wieder, je breiter die Betonzugzone ist (44).

d) Maßnahmen zur Verminderung der Rißbildung im Beton.

Aus den Abschnitten IIIb und c kann man zusammenfassend entnehmen, daß zur Verminderung der Rißbildung im Eisenbeton wenig schwindender, stark dehnbarer und soweit angängig langsam erhärtender Beton zu verwenden und für langsames stetiges Austrocknen des Betons zu sorgen ist. Solange eine Möglichkeit besteht, Risse unter den Gebrauchslasten überhaupt zu verhindern, kommt es auf möglichst große Zugfestigkeit des Betons an. Sind jedoch Risse unvermeidlich, wie z. B. in Plattenbalken unter den üblichen Verhältnissen, so wird die Dehnbarkeit des Betons wichtiger als die Zugfestigkeit.

Besondere Sorgfalt ist darauf zu verwenden, daß das Zusammenwirken zwischen Beton und Eisen in der Zugzone bis zu möglichst großen Eisendehnungen gewahrt bleibt. Deshalb ist der Eisenquerschnitt möglichst weitgehend aufzuteilen. Es sind Eisen mit rauher Oberfläche zu bevorzugen und solche, die wie Knoten- oder Dralleisen durch ihre Form einen großen Gleitwiderstand besitzen. (Selbstverständlich müssen diese Eisen, die sonst vom Bewehrungsstahl geforderten Stoffeigenschaften besitzen, auch darf ihre Form nicht dazu führen, daß der Beton leicht abgesprengt wird.) Auch mit der gezogenen Bewehrung an geeigneter Stelle starr verbundene Querbewehrungen bieten Vorteile.

Neben diesen Maßnahmen, die im allgemeinen anwendbar sind, sei noch darauf verwiesen, daß es in besonderen Fällen möglich ist, durch Vorspannung der Bewehrung in den Beton so große Druckvorspannungen einzuleiten, daß unter den Gebrauchslasten überhaupt keine Zugspannungen im Beton entstehen. Diese Möglichkeit ist schon seit langem erörtert worden (25 S. 44), jedoch ist es erst Freyssinet (vgl. das voranstehende Referat in diesem Bericht) gelungen, sie auszunutzen, nachdem er die Bedeutung des Kriechens für die Größe der erforderlichen Vorspannung erkannt und neue Wege zur Verminderung der Raumänderungen des Betons gefunden hatte (20). Die von ihm dabei entwickelten Auffassungen über die Beeinflußbarkeit der Eigenschaften des Betons werden voraussichtlich auch die Klärung der im vorliegenden Bericht behandelten Fragen weiter fördern.

Zusammenfassung.

Das Referat beruht auf einer Auswertung der reichhaltigen Literatur zu dem gestellten Thema. Danach ergibt sich folgendes:

Die Zugfestigkeit des Betons hängt vorwiegend von der Zugfestigkeit der Zemente ab, wie sie sich nach den neueren Prüfverfahren mit gemischtkörnigen plastischen Mörteln als Biegefertigkeit ergibt. Für die Zusammensetzung des Betons sind im allgemeinen dieselben Maßnahmen zweckmäßig, die einen möglichst druckfesten Beton liefern. Gebrochene Zuschlagstoffe verbessern das Verhältnis der Zug- zur Druckfestigkeit, ergeben jedoch trotzdem bei weichem und flüssigem Beton wegen des größeren Wasseranspruchs im allgemeinen keine größere Zugfestigkeit als natürlich gekörnte Stoffe. Durch die Gesteins-eigenschaften der Zuschläge kann die Zugfestigkeit stärker beeinflußt werden als die Druckfestigkeit. Es kommt besonders darauf an, daß der Beton langsam austrocknet.

Zur Bewertung der einzelnen Einflüsse hat es sich als zweckmäßig erwiesen, das Verhältnis der Zug- zur Druckfestigkeit mit Hilfe von Exponenten der Druckfestigkeit zu verfolgen, die die Tatsache berücksichtigen, daß dieses Verhältnis von der Höhe der Druckfestigkeit abhängig ist.

Da für die Rißbildung die Dehnbarkeit des Betons wichtig ist, ist auch diese verfolgt worden. Sie nimmt im allgemeinen mit wachsender Festigkeit ab, kann jedoch durch den Zement und die Gesteinsart der Zuschläge beeinflußt werden. Günstig auf die Zugfestigkeit wirkt das Kriechen, weil es die nachteiligen Schwindspannungen vermindert.

Für die Verminderung der Rißbildung ist die Zugfestigkeit des Betons nur dann ausschlaggebend, wenn die Möglichkeit besteht, Risse unter den Gebrauchs-lasten überhaupt zu verhindern. Nur in diesem Falle hat auch hohe Riß-sicherheit, verstanden als Verhältnis der Rißlast zur zulässigen Last, praktische Bedeutung. Wo Risse unvermeidlich sind, ist die Dehnbarkeit des Betons wichtiger als die Zugfestigkeit und geringes Klaffen der Risse wichtiger, als daß sie erst unter hohen Lasten entstehen.

Im übrigen kommt es darauf an, die Bewehrung möglichst aufzuteilen und solche Bewehrungsarten zu verwenden, die hohen Gleitwiderstand im Beton ergeben. Im Zusammenhang mit der Erörterung der Rißbildung wurde nachgewiesen, daß die Wechselwirkung zwischen Beton und Eisen beim Entstehen der Anfangsspannungen grundsätzlich übereinstimmt mit den Vorgängen in der Nähe eines Risses, und daß die Anfangsspannungen infolge des Kriechens des Betons wahrscheinlich kleiner sind, als bisher vermutet wurde.

Verzeichnis der benutzten Literatur.

- (1) *Graf*: Die Druckfestigkeit von Zementmörtel, Beton, Eisenbeton und Mauerwerk. Stuttgart 1921.
- (2) *Graf*: Der Aufbau des Mörtels und des Betons. Berlin 1930.
- (3) *Guttmann*: Zur Frage der Zugfestigkeit unbewehrten Betons. Zement 1935, Heft 35.
- (4) *Graf*: Deutscher Beton-Verein, Eisenbetonbau, Entwurf und Berechnung. Stuttgart 1926.
- (5) *Dutron*: Les matières inertes et les propriétés mécaniques des bétons. Kongreßbericht Lüttich 1930.
- (6) *Hummel*: Das Beton ABC. Berlin 1935.
- (7) *Haegermann*: Die Prüfung von Zement mit weich angemachtem Mörtel. Zement 1935, Heft 35, 39 und 44.

- (8) *Graf*: Über Zement für Betonstraßen. *Zement* 1935, Heft 23 und 24.
- (9) *Graf*: Über die Herstellung und Prüfung von Prismen aus weich angemachtem Mörtel zur Ermittlung der Festigkeitseigenschaften von Straßenbauzementen. *Zement* 1936, Heft 7.
- (10) *Graf*: Betonstraßenbau und Materialprüfung. *Straße* 1936, Heft 2.
- (11) *Graf*: Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, Heft 71, Berlin 1933.
- (12) *Olsen*: Untersuchungen über die Zugfestigkeit von Zementmörtel und Beton. *Beton und Eisen* 1929, Heft 11 und 12.
- (13) *Bach* und *Graf*: Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Heft 72 bis 74. Berlin 1909.
- (14) *Roß*: Einfluß des Zusatzes von „Plastiment“ auf die bautechnischen Eigenschaften des Betons. Bericht Nr. 79 der Eidgen. Materialprüfungsanstalt Zürich 1934.
- (15) *Hertel*: Einfluß der Verwendung von Edelzuschlag auf die Güte und die Kosten von Beton. Berlin 1930.
- (16) *Pfletschinger*: Der Einfluß der Grobzuschläge auf die Güte von Beton. *Zement* 1929, Heft 31 bis 34.
- (17) *Graf*: Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, Heft 63. Berlin 1930.
- (18) *Walz*: Beitrag zur Anwendung von Rüttelverfahren beim Verarbeiten des Betons. Versuche über Oberflächenrüttlung. *Beton und Eisen* 1935, Heft 5 bis 7.
- (19) *Graf*: Über den Einfluß der Größe der Betonkörper auf das Schwinden in trockenen Räumen und im Freien. *Beton und Eisen* 1934, Heft 7.
- (20) *Freyssinet*: Une révolution dans les techniques du béton. Paris 1936.
- (21) *Würzer*: Adhäsion, Kapillarkraft und Erhärtung. *Zement* 1934, Heft 39.
- (22) *Haegermann*: Raumänderungen des Betons durch Feuchtigkeitswechsel. Bericht über die Tagung des Vereins Deutscher Portlandzement-Fabrikanten im August 1935.
- (23) *Graf*: Über einige Aufgaben der Eisenbetonforschung aus neuerer und älterer Zeit. *Beton und Eisen* 1934, Heft 11.
- (24) *Hummel*: Beeinflussung der Beton-Elastizität. *Zement* 1935, Heft 42 und 43.
- (25) *Graf*: Handbuch für Eisenbetonbau, Bd. I, 4. Aufl., Berlin 1930.
- (26) *Graf*: Druckfestigkeit, Biegefesteitigkeit, Schwinden und Quellen usw. von Zementmörtel und Beton. *Zement* 1928, Heft 40 bis 42 und 45 bis 47.
- (27) *Gehler*: Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, Heft 66, Berlin 1930.
- (28) *Graf*: Über die Elastizität der Baustoffe. *Bautechnik* 1926, Heft 36 bis 38.
- (29) *Graf*: Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente, Berlin 1929.
- (30) *Graf*: Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Heft 227, Berlin 1920.
- (31) *Möhlmann*: Untersuchungen über die Dehnungsfähigkeit von hochwertigem Beton an Zug- und Druckkörpern. Berlin 1927.
- (32) *Graf*: Über das Schwinden und Quellen sowie über die Dehnungsfähigkeit von Beton mit verschiedenen Zuschlagstoffen. *Beton und Eisen* 1933, Heft 7/8.
- (33) *Granville*: Creep of concrete under load. *The Structural Engineer*, Februar 1933.
- (34) *Hummel*: Vom Kriechen oder Fließen des erhärteten Betons und seiner praktischen Bedeutung. *Zement* 1935, Heft 50 und 51.
- (35) *Freudenthal*: Änderung des Spannungszustandes weitgespannter, flacher Eisenbetonbogen durch die plastische Dauerverformung des Betons. *Beton und Eisen* 1935, Heft 11.
- (36) *Emberger*: Heft 16 der Mitteilungen über Versuche, ausgeführt vom Österreichischen Eisenbetonausschuß. Wien 1935.
- (37) *Honigmann*: Witterungseinflüsse und ihre Raffung im Kurzversuch an Schleuderbetonmaststücken. *Beton und Eisen* 1935, Heft 19 und 20.
- (38) *Rengers*: Einfluß der Rißbreite auf den Angriff durch Rost. *Beton und Eisen* 1935, Heft 10.
- (39) *Mörsch*: Der Eisenbetonbau, 6. Aufl., Bd. 1, Stuttgart 1923.
- (40) *Kayser*: Anfangsspannungen im Eisenbetonbau. *Beton und Eisen* 1936, Heft 1.
- (41) *Schächterle*: Talübergang bei Denkendorf. *Beton und Eisen* 1936, Heft 1.
- (42) *Berger*: Der Umbau der Sophienbrücke in Bamberg. *Bauingenieur* 1932, Heft 23/4.
- (43) *Graf*: Über die Bedingungen für die Größe der zulässigen Anstrengungen von Eisen-einlagen in Eisenbetonplatten und in Eisenbetonbalken. *Beton und Eisen* 1935, Heft 9.
- (44) *Gehler*: Referat IIc des vorliegenden Kongressberichtes.
- (45) *Abeles*: Über die Verwendung hochwertiger Baustoffe im Eisenbetonbau. *Beton und Eisen* 1935, Heft 8 und 9.

Leere Seite
Blank page
Page vide