

Teilflächenbelastung von hochfestem Beton

T 2654

T 2654

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

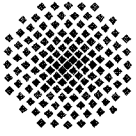
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Pfaffenwaldring 4, 70 550 Stuttgart

Universität Stuttgart
Institut
für Werkstoffe im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. Hans-Wolf Reinhardt
Pfaffenwaldring 4
70 550 Stuttgart
Telefon (0711) 685-3324
Telefax (0711) 685-3349

15. Dezember 1994

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

Teilflächenbelastung von hochfestem Beton

Auftraggeber/
Förderer: Deutsches Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 74-76
10785 Berlin

Forschende
Stelle: Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Pfaffenwaldring 4
70569 Stuttgart

Auftragsdatum: 22.10.1993 (Az.: IV 1-5-739/93)

Datum des Berichts: 15.12.1994

Der Bericht umfaßt 50 Seiten einschließlich Tabellen und Bildern

Inhalt

1. Einführung in die Problematik
2. Überblick zum Stand der Kenntnisse
3. Das Problem der Teilflächenbelastung
4. Umfang der Untersuchungen und Versuchsprogramm
5. Herstellung und Lagerung der Probekörper
 - 5.1 Bestandteile der Betonrezepturen
 - 5.2 Eignungsprüfungen
 - 5.3 Herstellung der Probekörper
 - 5.4 Festigkeiten der Probekörper
6. Versuche zu Teilflächenbelastung
 - 6.1 Prüfeinrichtung und Versuchsaufbau
 - 6.2 Versuchsablauf
7. Versuchsergebnisse
8. Auswertung der Versuchsergebnisse
9. Folgerungen für die Bemessung
 - 9.1 Sicherheitskonzept der DIN 1045
 - 9.2 Vergleich der Versuchsergebnisse unbewehrter Körper mit den zulässigen Spannungen nach DIN 1045 [1]
 - 9.3 Vergleich der Versuchsergebnisse bewehrter Körper mit den zulässigen Spannungen nach DIN 1045 [1]
 - 9.4 Ausblick
10. Literatur

Untersuchungen zur Teilflächenbelastung von hochfestem Beton

Dipl.-Ing. A. Schön, Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt

Abschlußbericht

Teilflächenbelastung von hochfestem Beton

High Strength Concrete Under Local Compression

Béton à haute performance soumis à charge concentrée

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Forschungsvorhaben wurde die Teilflächenbelastung von hochfestem Beton untersucht. Die Betonfestigkeiten reichten von 58 bis 108 N/mm². Dabei lagen die untersuchten Flächenverhältnisse zwischen 2,5 und 22,5. Das wichtigste Ergebnis ist eine Beziehung zwischen Bruchspannung, Betonfestigkeit und Flächenverhältnis.

SUMMARY

The aim of this investigation was to determine the bearing strength of high strength concrete with a small loading area. The compressive cube strength varied from 58 to 108 N/mm². The ratio of areas (cross section / loaded area) reached from 2.5 to 22.5. The main result is the relation between bearing strength, compressive strength and ratio of areas.

RÉSUMÉ

La résistance du béton à haute performance contre une charge concentrée est étudiée. La résistance à la compression varie entre 58 et 108 MPa mesurée au cube. Le rapport entre la section et le surface chargé était 2,5 à 22,5. Le resultat très important est une relation entre la résistance à charge concentrée, la résistance à la compression et le rapport des surfaces.

1. Einführung in die Problematik

Die Untersuchungen zur Teilflächenbelastung von hochfestem Beton standen im Zusammenhang mit der Erarbeitung der Richtlinie 'Hochfester Beton' durch den DAfStb. Diese Richtlinie soll Normencharakter besitzen und die DIN 1045 [1] im Bereich der hochfesten Betone ergänzen. Damit kann in vielen Fällen die bisher beim Einsatz von hochfesten Beton erforderliche "Zustimmung im Einzelfall" entfallen. Unter Abs. 17.3.3 regelt die DIN 1045 [1] den Fall der Teilflächenbelastung. Bei der Erarbeitung der o.g. Richtlinie lagen keine Erkenntnisse darüber vor, ob die in der DIN 1045 genannten Regelungen zur Teilflächenbelastung auch für Betone der Festigkeitsklassen \geq B 65 anzuwenden sind. Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, die Problematik der Teilflächenbelastung bei hochfesten Betonen zu untersuchen.

2. Überblick zum Stand der Kenntnisse

Zum Problem Teilflächenbelastung fand eine Reihe von Untersuchungen statt, die jedoch lediglich das Tragverhalten von normalfestem Beton [2,3,4,5,6] bzw. von Leichtbeton [7] behandeln. Hieraus lassen sich Tendenzen für das Verhalten von höherfesten Betonen ableiten, nicht jedoch quantitative Aussagen.

Bisherige Vorschriften gelten ebenfalls nur für Festigkeitsklassen \leq B55 z.B. DIN 1045 [1] oder EC 2 [8], wobei Überlegungen im Gange sind [9], auch höhere Betonfestigkeitsklassen in den EC 2 aufzunehmen. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit, das Verhalten von hochfestem Beton unter örtlicher Belastung auf experimentellen Wege zu untersuchen. Die Versuche sollen klären, welche der in der Literatur [1,3] angegebenen Formeln zur Beschreibung des Verhaltens von Beton unter hoher örtlicher Pressung am besten mit den Versuchsergebnissen korrelieren. Dabei kann auch überprüft werden, ob die Angaben im MODEL CODE 90 [10] wirklich bis zur Festigkeitsklasse C 80 zutreffend sind.

3. Das Problem der Teilflächenbelastung

Ausgangspunkt der Untersuchungen zur Teilflächenbelastung ist der Fall, daß eine Druckkraft nur über einen Teil der zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche in die Konstruktion eingetragen wird. Dies ist z.B. bei Auflagern gegeben.

Steigert man in einem Versuch die Last bis zum Bruch, und berechnet die maximale Druckspannung, die sich unter der kleinen Druckfläche ergibt, so stellt man fest, daß sie größer ist als die Würfeldruckfestigkeit.

$$\sigma = \frac{F_{Bruch}}{A_{Stempel}} > \beta_w \quad (1)$$

Das läßt sich dadurch erklären, daß der Beton, der die eigentliche Druckfläche umgibt, eine umschnürende Wirkung ausübt. Dies führt zu einer Behinderung der Querdehnung des Betons, der sich unter der Druckfläche befindet. Diese behinderte Querdehnung wiederum hat eine Erhöhung der Druckfestigkeit zur Folge.

Der Faktor der Druckfestigkeitserhöhung, also das Verhältnis Bruchspannung unter der Teilfläche zu Würfeldruckfestigkeit, ist von verschiedenen Parametern abhängig.

Die wichtigste Einflußgröße ist das Verhältnis von Gesamtfläche zu Druckfläche. Je größer das Flächenverhältnis, desto größer die Erhöhung der Druckfestigkeit, weil sich ja auch die Umschnürewirkung des umgebenden Betons mit zunehmenden Flächenverhältnis erhöht.

Ein weiter Einflußfaktor der Druckfestigkeitserhöhung ist die Betonfestigkeit. Bei gleichbleibenden Flächenverhältnis nimmt mit zunehmender Betondruckfestigkeit der Faktor der Druckfestigkeitserhöhung bei mehrachsiger Druckbelastung ab.

Das Größtkorn des Betons hat ebenfalls Einfluß auf die Festigkeitserhöhung, was aber nur ansatzweise untersucht ist [3].

Auch eine Bewehrung führt zu einer weiteren Steigerung der Tragfähigkeit, da sie die Querdehnung behindert.

4. Umfang der Untersuchungen und Versuchsprogramm

Die ausgeführten Untersuchungen gliedern sich in zwei Abschnitte, vgl. Tabelle 1. Im ersten Teil wurde das Tragverhalten von unbewehrten Körpern untersucht. Hierzu gehören die Versuchsreihen 0, 1 und 2. Im zweiten Teil wurden bewehrte Versuchskörper herangezogen. Daraus ergab sich die Versuchsreihe 3.

Tabelle 1: Versuchsprogramm Reihe 0, 1, 2 unbewehrt;
Reihe 3 bewehrt

Reihe	Serie	Betonfestigkeitsklasse	Probekörper	Prüfstempeldurchmesser
0	1	B 55	200'er Würfel	60 mm
1	1	B 55	Zylinder*	60 mm
	2	B 85	Zylinder*	60 mm
	3	B 115	Zylinder*	60 mm
2	1.1	B 85	Zylinder*	120 mm
	1.2	B 85	Zylinder*	40 mm
	2.1	B 115	Zylinder*	120 mm
	2.2	B 115	Zylinder*	40 mm
3	1	B 85	Zylinder*	40 mm
	2	B 85	Zylinder*	60 mm
	3	B 85	Zylinder*	120 mm

* Zylinder, Durchmesser = 190 mm, Höhe = 400 mm

In der Reihe 0 wurden Vorversuche durchgeführt. Damit wurde die Funktionsfähigkeit der gewählten Prüfeinrichtung getestet. Desweiteren ermöglichte die Reihe 0 eine genauere Abschätzung der in den folgenden Versuchen zu erwartenden Kräfte. Dabei wurden Würfel mit 200mm Kantenlänge durch einen Stempel mit 60mm Durchmesser belastet. Hier wurde eine Betonfestigkeitsklasse B 55 angestrebt.

In der Versuchsreihe 1 wurden Betonzylinder (Durchmesser 190mm, Höhe 400mm) mit einem Prüfstempel vom Durchmesser 60mm belastet. Die Betonfestigkeitsklasse sollte hierbei in der ersten Serie B 55, in der zweiten Serie B 85 und in der dritten Serie B 115 betragen. Pro Serie wurden 3, in manchen Fällen 4 Einzelversuche durchgeführt.

In der Versuchsreihe 2 wurden die Probekörper mit Prüfstempeln anderer Durchmesser belastet (40mm und 120mm). Je Stempeldurchmesser sollten zwei Serien mit entsprechend variierten Betonfestigkeitsklassen (B 85 und B 115) gefahren werden. Die Probekörper waren wiederum Zylinder mit Durchmesser 190mm und Höhe 400mm. Zu jeder der vier Serien gehörten drei bis vier Einzelversuche.

In der Reihe 3, dem zweiten Teil der Untersuchungen, wurden bewehrte Versuchskörper getestet. Auch hier handelte es sich um Betonzylinder mit einem Durchmesser von 190mm und einer Höhe von 400mm. Die verwendeten Prüfstempel besaßen Durchmesser von 40mm, 60mm und 120mm. Dabei sollte die Betonfestigkeitsklasse B 85 eingehalten werden. Die Betonzylinder wurden mit einer Wendelbewehrung versehen, die durch Längsbewehrung fixiert wurde. Die Bewehrung beschränkte sich auf die Mindestbewehrung, wie sie nach DIN 1045 [1] für umschnürte Stützen gefordert wird.

5. Herstellung und Lagerung der Probekörper

Der Beton für die einzelnen Versuche wurde in der der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg -Otto-Graf-Institut- (FMPA) mit eigenem Personal hergestellt. Die hier gebotene technische Ausstattung ermöglichte die Herstellung, Lagerung und Prüfung der Probekörper unter einem Dach.

Dabei wurden zuerst Eignungsprüfungen durchgeführt, um Rezepturen zu ermitteln, die die gewünschten Festigkeiten und Verarbeitungseigenschaften aufwiesen. Im Anschluß an die Eignungsprüfungen wurde wöchentlich etwa eine Serie betoniert.

5.1 Bestandteile der Betonrezepturen

Die Auswahl der Ausgangsstoffe orientierte sich an ihrer lokalen Verfügbarkeit.

Betonzuschlag

Als Zuschlag kam Rheinmaterial aus dem Bereich Forchheim/Rheinstetten zum Einsatz. Eine Ausnahme bildete lediglich die Kornfraktion 8/16mm bei dem Beton der angestrebten Festigkeitsklasse B 115. In dem genannten Bereich 8/16mm wurde Basaltsplitt verwendet. Das Größtkorn aller hergestellten Betone wurde auf 16mm festgelegt.

Der Zuschlag besaß in allen Fällen eine stetige Sieblinie. Für den hochfesten Beton wurde der Zuschlag aus bis zu fünf verschiedenen Körnungen zusammengesetzt, um einen gleichmäßig verteilten Kornaufbau zu erreichen. Dabei wurde der Feinstkornanteil des Zuschlags ($<0,25\text{mm}$) für die hochfesten Betone möglichst gering gehalten. Die im Bild 1 dargestellte Sieblinie wird in [11] für hochfeste Betone empfohlen. Sie wurde für die Betonfestigkeitsklassen B 85 und B 115 angestrebt und auch eingehalten.

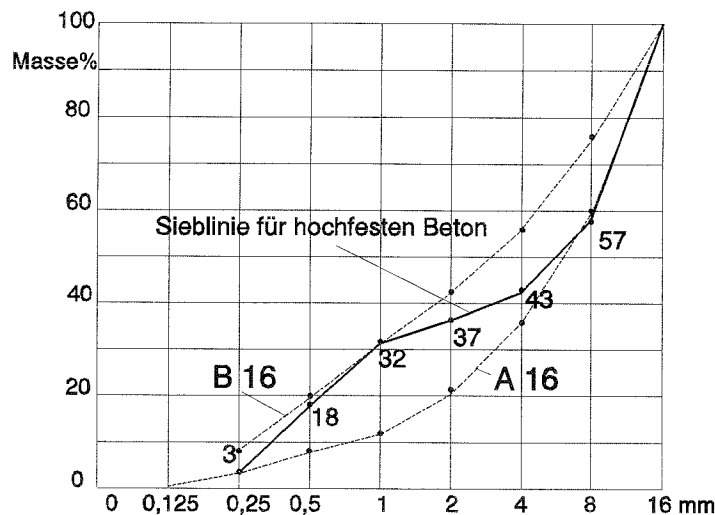


Bild 1: Sieblinie für hochfesten Betone

Für sämtliche Betonierarbeiten kam nur trockener Zuschlag zur Verwendung. Die Zuschläge wurden entweder zwei bis drei Tage in einem Innenraum bei einer gleichmäßigen Temperatur von ca. 20°C getrocknet oder aus einem speziellen Trockensilo entnommen.

Zement

Es wurde Heidelberger Zement PZ 45 F verwendet. Die mit frisch geliefertem Zement durchgeführten Eignungsprüfungen ergaben ausreichende Festigkeiten. Die Lagerung des Zements erfolgte im Zementlagerraum der FMPA.

Zusatzmittel

Es wurden für die Betone der Festigkeitsklassen B 85 und B 115 Zusatzmittel eingesetzt, die auf den Zement abgestimmt waren. Als Fließmittel gelangte ADDIMENT FM 62 zum Einsatz. Damit konnte trotz des geringen Wasser-Zement-Wertes von 0,28 eine gute Verarbeitbarkeit erreicht werden. Weiterhin wurde eine übliche Menge von Verzögerer zugegeben. Es handelte sich hierbei um ADDIMENT VZ 2.

Zusatzstoffe

Der für die Herstellung von hochfestem Beton typische Silika-Staub wurde in Form einer Suspension zugegeben. Der Lieferant war die Elkem GmbH. Vor jedem Betoniergang wurde die Suspension durch zweiminütiges Mischen homogenisiert. Der Feststoffanteil der Suspension betrug 50 Masse%.

5.2 Eignungsprüfungen

Es wurden die in Tabelle 2 wiedergegebenen Rezepturen getestet. Dabei ergab die Rezeptur 1, mit der die Betonfestigkeitsklasse B 55 hergestellt werden sollte, eine zu hohe Festigkeit. Die Serienfestigkeit betrug nach 28 Tagen $\beta_{WS,200} = 81 \text{ N/mm}^2$. Mit der Rezeptur 5 wurde eine geeignetere Rezeptur gefunden. Die Festigkeit betrug hier $\beta_{WS,200} = 64 \text{ N/mm}^2$.

Die Rezeptur 2 entsprach der in [12] vorgeschlagenen Vergleichsrezeptur für hochfesten Beton. Hier wurde im ersten Anlauf eine Festigkeit von $\beta_{WS,200} = 95 \text{ N/mm}^2$ erzielt.

Um einen Beton der Festigkeitsklasse B 115 herzustellen, wurden die Rezepturen 3 und 4 getestet. Dabei stellte sich heraus, daß mit den gewählten Ausgangsstoffen die Betonfestigkeitsklasse B 115 nicht zu erreichen ist. Dabei wurde der Wasserzementwert bereits sehr niedrig gewählt. Die erreichten Festigkeiten betragen hier $\beta_{WS,200} = 118 \text{ N/mm}^2$ bzw. $\beta_{WS,200} = 119 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 2: Bestandteile der Versuchsmischungen

Rezeptur	1	2	3	4	5
Zement in kg/m^3	385	414	450	465	430
Wasserzugabe* in l/m^3	111	90	68	60,5	198
Zuschlag in kg/m^3					
Sand 0/2 mm	652	701	676	662	692
Kiessand 2/8 mm	770	309	299	291	518
Kies 8/16 mm	553	860	-	-	517
Splitt 8/16 mm	-	-	830	920	-
Silikasuspension in kg/m^3	-	72	90	93	-
Fließmittel in l/m^3	8	15	22,5	24	-
Verzögerer in l/m^3	-	1,8	1,8	1,5	-
Gesamtwassergehalt	115	134	125	120	198
w/z-Wert	0,30	0,32	0,28	0,26	0,46

* der Wasseranteil der Zusatzmittel und -stoffe ist hierin nicht enthalten

Während der Eignungsprüfungen wurde die Konsistenz, die Frischbetontemperatur, der Lufporengehalt sowie die Rohdichte gemessen, vgl. Tabelle 3.

Die der Festigkeitsbestimmung dienenden Würfel wurden entsprechend DIN 1048 [13] 7 Tage in einem Feuchtlageraum aufbewahrt. Anschließend lagerten die Würfel 21 Tage in einem Trockenlager-

raum bei einer Temperatur von 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit).

Die Druckfestigkeit wurde nach 28 Tagen an Würfeln mit 150mm Kantenlänge bestimmt. Die Ergebnisse wurden entsprechend der Formel (2) auf 200'er Würfel umgerechnet, vgl. Tabelle 3.

$$\beta_{WS,200} = 0,95 * \beta_{WS,150} \quad (2)$$

Tabelle 3: Ergebnisse der Eignungsprüfungen

Rezeptur	1	2	3	4	5
Serienfestigkeit am 150'er Würfel in N/mm ²	85	100	124	125	68
Kleinster Einzelwert am 150'er Würfel in N/mm ²	82	98	123	122	67
Serienfestigkeit des 200'er Würfels in N/mm ² *	81	95	118	119	65
Ausbreitmaß in cm	44	51	52	35	41
Luftgehalt in Vol%	1,6	1,75	1,9	1,8	1,4
Rohdichte in kg/m ³	2410	2360	2540	2570	2340

* nach Gleichung (2) berechnet

5.3 Herstellung der Probekörper

Die Rezepturen 2, 4 und 5 wurden als brauchbar angesehen und als Grundlage für die Herstellung der Probekörper benutzt. Die Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons erfolgte in der FMFA.

Die Probekörper der Versuchsreihe 0 bestanden aus 200'er Würfeln. Zur Herstellung dieser Versuchskörper wurden herkömmliche Würfelformen benutzt. Die Betonzylinder, die als Probekörper für

die folgenden Versuchsreihen benötigt wurden, waren in ihrer Herstellung etwas komplizierter. In einem eigens konstruierten Rahmen, vgl. Bild 2, wurden PVC-Rohre eingespannt, die dann ausbetoniert wurden.

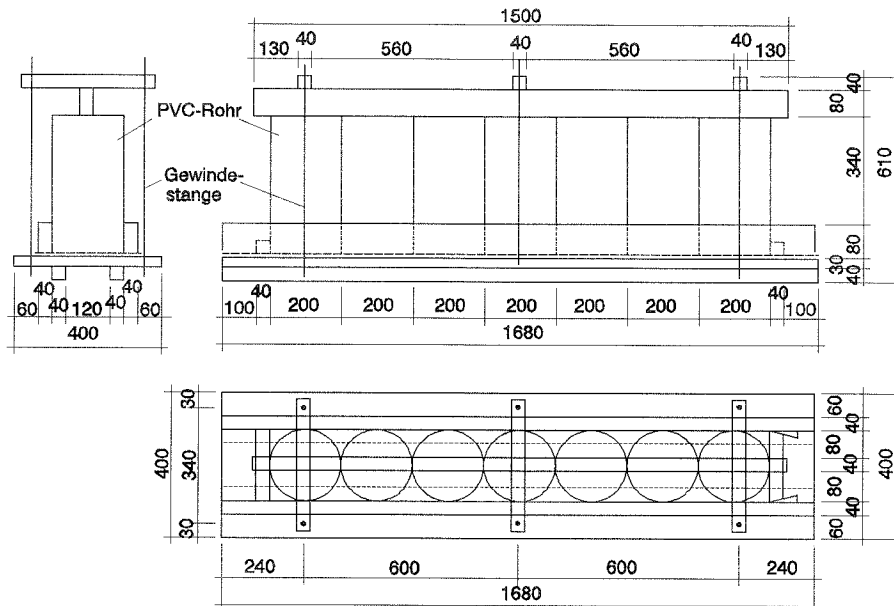


Bild 2: Schalungsrahmen zur Herstellung der Betonzylinder

Je Betoniergang wurden ca. 50 l Frischbeton gemischt. Damit konnten jeweils zwei Betonzylinder sowie zwei Würfel zur Festigkeitsbestimmung hergestellt werden. Pro Betoniertag wurden die Probekörper für jeweils eine Serie einer Versuchsreihe betoniert. Wöchentlich wurde ein Betoniertag angesetzt.

Die Verdichtung erfolgte stets mit einem Innenrüttler. Entmischungerscheinungen waren trotz der intensiven Verdichtung nicht zu beobachten.

Die Versuchskörper wurden ebenfalls entsprechend [13] gelagert. Nach dem Betonieren lagen die Probekörper zwei Tage in einem Feuchtraum bei 100 % relativer Luftfeuchte. Dann wurden die PVC-Rohre durch Aufschneiden entfernt. Auch die Würfel zur Festigkeitsbestimmung wurden nach zwei Tagen entschalt. Weitere 5 Tage lagerten Würfel und Versuchskörper nach dem Entschalen unter Wasser. An die Wasserlagerung schloß sich eine 21tägige Luftla-

gerung bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte an. Während dieser Zeit wurden die Endflächen der Zylinder planparallel geschliffen.

Die Versuche zur Teilflächenbelastung fanden ausnahmslos nach 28 Tagen statt. Die Prüfung der Würfeldruckfestigkeit erfolgte zum selben Datum.

Die Bewehrung für die Versuchskörper der Reihe 3 entsprach der Mindestbewehrung nach DIN 1045 [1]. Dabei wurden gemäß der Forderung, daß die Stahlfläche der Längsbewehrung mindestens 2% der Kernfläche betragen muß, 6 Stähle vom Durchmesser 10mm gewählt. Das entspricht 2,2% der Kernfläche. Der Mindestdurchmesser der Wendelbewehrung beträgt nach [1] 5mm. Für die Versuchskörper der Versuchsreihe 3 wurde der Durchmesser der Wendelbewehrung mit 6mm gewählt. Größere Durchmesser lassen sich nur schwierig - auf den kleinen Wendeldurchmesser von 165mm biegen. Die Ganghöhe von 32mm resultierte aus der Forderung, daß sie kleiner oder gleich einem fünftel des Kerndurchmessers sein müsse, was eine maximale Ganghöhe von 33mm bedeutet hätte. Es wurde ein gerippter Stahl BSt IV verwendet.

5.4 Festigkeiten der Probekörper

Die Festigkeit des hergestellten Betons wurde an 150'er Würfeln geprüft. Die Tabelle 4 gibt die Druckfestigkeiten, umgerechnet auf den 200'er Würfel nach Gleichung (2), wieder.

Vergleicht man die geprüften Festigkeitswerte nach Tabelle 4 mit den angestrebten Festigkeiten nach Tabelle 1, so stellt man eine gute Übereinstimmung fest. Lediglich die Festigkeitsklasse B 115 konnte nicht erreicht werden, so wie es sich bereits in den Eignungsprüfungen andeutete, vgl. Abschnitt 5.2.

Tabelle 4: Festigkeiten der einzelnen Versuchsserien

Versuchsreihe und -serie	Rezeptur	Serienfestigkeit $\beta_{WS,200}$ in [N/mm ²]	Kleinster Einzelwert in [N/mm ²]	Nennfestigkeit β_{WN} in [N/mm ²] nach [1] bzw. [16]
0,1	*	75	75**	65
0,2	5	58	57	45
1,1	5	58	57	45
1,2	2	101	96	85
1,3	4	99	92	85
2,1.1	2	95	93	85
2,1.2	2	94	88	85
2,2.1	4	101	94	85
2,2.2	4	108	105	95
3,1	2	85	80	75
3,2	2	85/95	80/94	75/85
3,3	2	95	94	85

* Würfel aus früheren Versuchen

**Nur an einem Würfel geprüft, da es sich um Vorversuche handelte

6. Versuche zu Teilflächenbelastung

6.1 Prüfeinrichtung und Versuchsaufbau

Im Versuch wurde der Effekt der Teilflächenbelastung dadurch erreicht, daß mit einem Prüfstempel ein Teil der zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche des Probekörpers belastet wurde, vgl. Bild A 1 im Anhang A.

Dazu war die Anfertigung spezieller Prüfstempel erforderlich. Es wurde überschläglich ermittelt, daß die maximal auftretenden Pressungen unter der Lastfläche den Wert 450 N/mm² nicht wesentlich überschreiten würden. Nach Rücksprache mit der Stahlabteilung der FMPA wurde ein Qualitätstahl St 60 nach DIN 17200 [14] gewählt. Um die Druckplatten der Prüfmaschine nicht zu hohen Spannungen auszusetzen, lief der Stempel zur Auflagerfläche hin konisch zu. Am Auflagerende hatten alle Stempel einen Durchmes-

ser von 150mm. Die Prüfflächen der drei Stempel hatten Durchmesser von 40, 60 und 120mm.

Die Stempel wurden aus massiven Stahlzylindern gedreht. Pro Stempel ergab sich ein Gewicht von ca. 18 kg.

An jedem Stempel wurden zwei Halterungen für die induktiven Wegaufnehmer angebracht. Die Gegenstücke der induktiven Wegaufnehmer, kleine Winkel, auf denen sich die Aufnehmer während der Messung abstützten, wurden in Höhe der belasteten Oberfläche der Probekörper angebracht. Dazu wurden die Winkel an den Außenseiten der Betonzyylinder angeklebt, vgl. Bild 3.

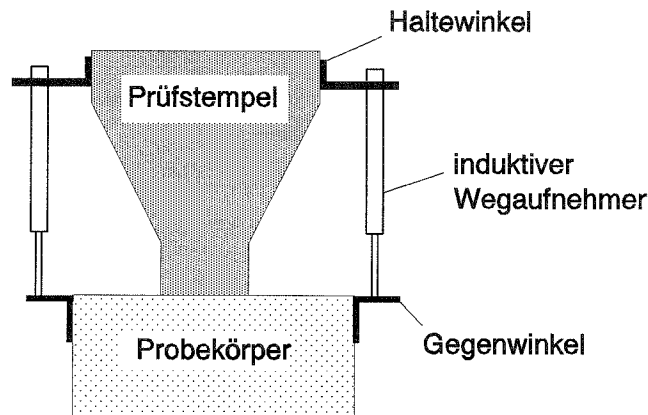


Bild 3: Schematische Anordnung der Meßeinrichtung

Während des Versuches wurde der Stempel durch einen Hydraulikkolben auf den Probekörper gepreßt, vgl. Bild A 2 im Anhang A. Dabei drückte sich der Stempel in die Betonoberfläche ein. In einigen Versuchen wurde die Betonierunterseite belastet, in anderen Versuchen die Betonieroberseite. Dabei konnte keine Tendenz der Ergebnisse festgestellt werden.

Mit der in Bild 3 dargestellten Meßanordnung wurde nun die relative Eindrückung des Stempels gegenüber der Betonoberfläche gemessen. Der Meßwert enthält außer der Stempелеindrückung das Maß der Zusammendrückung des Stempels, was bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden muß, vgl. Bilder B 1 bis B 3 im Anhang B. Es wurde davon ausgegangen, daß sich der äußere, unbelastete Rand des Probekörpers nicht verdreht oder senkt.

Die Probekörper wurden durch den Prüfstempel zentrisch belastet. Die Belastung erfolgte durch eine servohydraulische Prüfmaschine, dessen maximaler Lastbereich 3000 kN betrug, siehe Bild A 3 im Anhang A. Die maximal in den Versuchen aufgetretenen Kräfte lagen bei ca. 2000 kN. Bild 4 stellt die Gesamtanordnung dar.

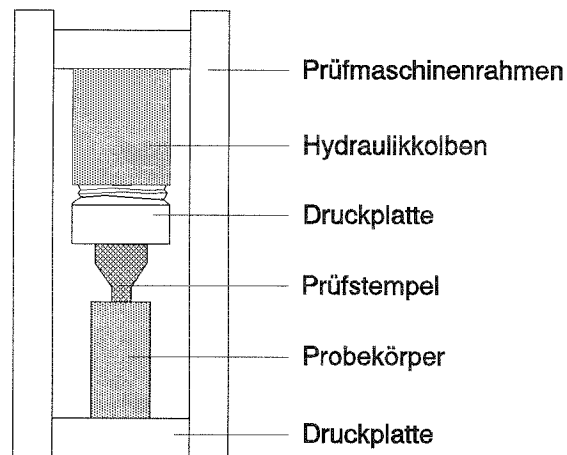


Bild 4: Versuchsanordnung

Die Belastungsgeschwindigkeit wurde über den zurückgelegten Kolbenweg geregelt. Aus den Vorversuchen der Reihe 0 wurde eine konstante Kolbengeschwindigkeit von 0,02mm/s als optimal ermittelt.

6.2 Versuchsablauf

Die vorbereiteten Probekörper wurden zentrisch in die Prüfmaschine eingebaut, der Prüfstempel zentrisch aufgesetzt. Die Wegaufnehmer wurden mit einem x-y-Schreiber verbunden. Der x-y-Schreiber zeichnete darüberhinaus die aktuelle Prüflast auf. So konnten Last-Verformungs-Kurven aufgenommen werden. Nach Aufbringen einer Vorlast, in der Regel 10% der zu erwartenden Maximallast, erfolgte die Positionierung des x-y-Schreibers. Danach erfolgte eine Laststeigerung bis zum Bruch des Probekörpers. In jeder Versuchsreihe wurde aber auch mindestens ein Versuchskörper stufenweise zum Bruch gefahren. Aus den Aufzeichnungen dieser Versuche konnten Aussagen über die plastischen Verformungen

des hochfesten Betons gewonnen werden. Es stellte sich heraus, dass die stufenweise Belastung keine Auswirkungen auf die maximale Bruchlast hatte, da sich die Ergebnisse mit den Resultaten der anderen Einzelversuche deckten.

Das Versagen der unbewehrten Probekörper verlief, unabhängig von den verwendeten Stempeldurchmessern, prinzipiell gleich.

Bei dem Beton der Festigkeitsklasse B 55 ließ sich bei der Last-Eindrückungs-Kurve ein nichtlineares Verhalten erkennen, wie es typisch für Betone normaler und niedriger Festigkeitsklassen ist. Kurz vor Erreichen der Maximallast traten in Belastungsrichtung Risse auf. Bei weiterer Laststeigerung wuchsen die Risse, und es kam zu einem weichen Versagen des Probekörpers.

Bei den Betonen der höheren Festigkeitsklassen verliefen die Last-Eindrückungs-Kurven bis ganz kurz vor den Bruch linear. Erst dann war ein leichtes Abkippen zu sehen. Risse traten erst im Moment des Bruches am Körper auf. Die Trägheit der Prüfmaschine erlaubte es bei dem schlagartigen Versagen der unbewehrten Probekörper nicht, den abfallenden Ast der Last-Verformungskurve aufzuzeichnen. Einige typische Kurven sind im Bild 5 dargestellt.

Zylinder \varnothing 190 mm, Prüfstempel \varnothing 60mm => Flächenverhältnis $A_0/A_1 = 10$

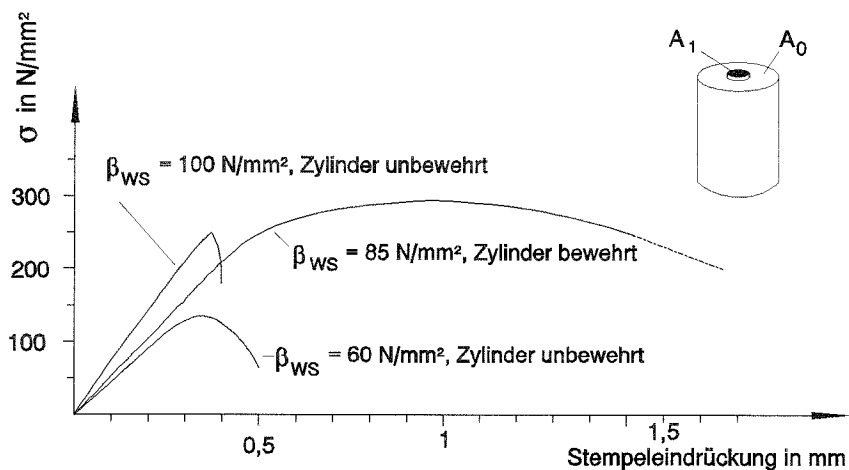


Bild 5: Typische Last-Verschiebungskurven

Der Weg s beinhaltet im Bild 5 sowohl die Eindrückung als auch die Zusammendrückung des Stempels. Die Zusammendrückung der verschiedenen Stempel unter Last ist aus den Bildern B 1 bis B 3 im Anhang B zu ersehen.

Die Bilder B 4 bis B 12 im Anhang B zeigen Last-Eindrückungskurven der verschiedenen Versuchsreihen und -serien. In diesen Bildern ist die Verformung der Prüfstempel berücksichtigt, so daß s in dem Fall die wirkliche Stempeleindrückung angibt.

Zum Versuchsablauf ist noch anzumerken, daß die Körper stets durch Spalten versagten. Dabei wurden sie meist in zwei, drei oder vier Teile zerlegt, vgl. Bilder A 4 bis A 7 im Anhang A. Direkt unter der Stempeldruckfläche bildete sich ein Kegel aus, dessen Höhe etwa das 1,2fache des Stempeldurchmessers betrug, vgl. Bilder A 8 bis A 11 im Anhang A. Der Bruch erfolgte, außer bei dem Beton der Festigkeitsklasse B 55, glatt, durch das Zuschlagkorn hindurch. Der Beton zeigte stets ein homogenes Gefüge, siehe Bilder A 10 und A 12 in Anhang A.

Bei den bewehrten Zylindern war ein anderes Bruchverhalten festzustellen, vgl. Anhang A, Bilder A 13 bis A 15. Die Lastverschiebungskurven verliefen wiederum bis nahe an die Höchstlast linear. Dann war ein Abknicken zu verzeichnen, das in der Regel mit einer Rißbildung einherging. Kurz darauf war die Höchstlast erreicht. Bei weiterer Stempeleindrückung fiel die Last nur sehr langsam ab. Exemplarisch wurde ein Versuch bis zu einer Stempeleindrückung von 15mm gefahren, ohne daß ein erneutes Ansteigen der Last zu beobachten war. Der Stempel wurde bei stetigem Lastabfall lediglich sehr tief eingepreßt, siehe im Anhang A die Bilder A 16 und A 17.

Entlang des eingestanzten Kegels war der Beton pulverfein zerrieben. An den Probekörpern bildete sich jeweils eine Vielzahl radialer und longitudinaler Risse, vgl. Bilder A 18 bis A 20 im Anhang A. Beim Prüfstempeldurchmesser 40mm waren keine Betonabplatzungen zu verzeichnen. Bei dem Prüfstempeldurchmesser 60mm kam es bei sehr tiefen Stempeleindrückungen zu ersten Abplatzungen der Betondeckung an der Mantelfläche. Erst beim Prüfstempeldurchmesser 120mm waren schon frühzeitig nach Überschreiten der Höchstlast Abplatzungen der Betondeckung zu beobachten, wie im Bild A 21, Anhang A, zu sehen.

In den Bildern B 13 bis B 15 sind im Anhang B Last-Eindrückungs-Kurven der bewehrten Versuchskörper dargestellt. Die Verformung der Laststempel ist dabei berücksichtigt, s.o.

7. Versuchsergebnisse

Die einzelnen Versuchsergebnisse sind in den Tabellen 5 und 6 dargestellt. Aus den Tabellen 7 und 8 sind die Mittelwerte der Versuche zu ersehen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Einzelversuche an unbewehrten Körpern

Versuchsreihe und -serie	Stempel	$\beta_{WS,200}$ [N/mm ²]	F_{max} [kN]	σ_{max} [N/mm ²]	σ_{max}/β_{WS}	Mittelwert
0,1 Würfel	60 mm	75	535	189	2,52	2,49
0,1 "	60 mm	75	509	180	2,40	
0,1 "	60 mm	75	540	191	2,55	
0,2 "	60 mm	58	512	181	3,12	3,01
0,2 "	60 mm	58	476	168	2,90	
1,1 Zylinder	60 mm	58	372	132	2,27	2,28
1,1 "	60 mm	58	385	136	2,35	
1,1 "	60 mm	58	362	128	2,21	
1,2 "	60 mm	101	690	244	2,42	2,40
1,2 "	60 mm	101	646	228	2,26	
1,2 "	60 mm	101	691	244	2,42	
1,2 "	60 mm	101	715	253	2,50	
1,3 "	60 mm	99	684	242	2,44	2,47
1,3 "	60 mm	99	721	255	2,58	
1,3 "	60 mm	99	653	231	2,33	
1,3 "	60 mm	99	706	250	2,52	
2,1.1 "	120 mm	95	1225	108	1,14	1,21
2,1.1 "	120 mm	95	1355	120	1,26	
2,1.1 "	120 mm	95	1240	110	1,16	
2,1.1 "	120 mm	95	1381	122	1,28	
2,1.2 "	40 mm	94	514	409	4,35	4,30
2,1.2 "	40 mm	94	517	411	4,37	
2,1.2 "	40 mm	94	493	392	4,17	
2,2.1 "	120 mm	101	1269	112	1,11	1,15
2,2.1 "	120 mm	101	1301	115	1,14	
2,2.1 "	120 mm	101	1313	116	1,15	
2,2.1 "	120 mm	101	1380	122	1,21	
2,2.2 "	40 mm	108	532	423	3,92	4,01
2,2.2 "	40 mm	108	528	420	3,89	
2,2.2 "	40 mm	108	574	457	4,23	

Tabelle 6: Ergebnisse der Einzelversuche an bewehrten Körpern

Versuchsreihe und -serie	Stempel	$\beta_{WS,200}$ [N/mm ²]	F_{max} [kN]	σ_{max} [N/mm ²]	σ_{max}/β_{WS}	Mittelwert
3,1 Zylinder	40 mm	85	590	470	5,53	5,04
3,1 "	40 mm	85	515	410	4,82	
3,1 "	40 mm	85	569	453	5,33	
3,1 "	40 mm	85	479	381	4,48	
3,2 "	60 mm	85	820	290	3,41	3,74
3,2 "	60 mm	85	980	347	4,08	
3,2 "	60 mm	95	984	348	3,66	3,65
3,2 "	60 mm	95	978	346	3,64	
3,3 "	120 mm	95	1990	176	1,85	1,84
3,3 "	120 mm	95	1946	172	1,81	
3,3 "	120 mm	95	1952	173	1,82	
3,3 "	120 mm	95	2004	177	1,86	

Tabelle 7: Mittelwerte der Versuchsserien an unbewehrten Körpern

Ver-suchs-reihe	Stempel-durch-messer	Flächen-verhältnis	$\beta_{WS,200}$ [N/mm ²]	F_{max} [kN]	$\bar{\sigma}_{max}$ [N/mm ²]	$\bar{\sigma}_{max}/\beta_{WS}$
0,1	60 mm	11	75	528	187	2,49
0,2	60 mm	11	58	494	174	3,01
1,1	60 mm	10	58	373	132	2,28
1,2	60 mm	10	101	686	242	2,40
1,3	60 mm	10	99	691	244	2,47
2,1.1	120 mm	2,5	95	1300	115	1,21
2,1.2	40 mm	22,5	94	508	404	4,30
2,2.1	120 mm	2,5	101	1315	116	1,15
2,2.2	40 mm	22,5	108	545	433	4,01

Tabelle 8: Mittelwerte der Versuchsserien an bewehrten Körpern

Ver-suchs-reihe	Stempel-durch-messer	Flächen-verhältnis	$\beta_{WS,200}$ [N/mm ²]	F_{max} [kN]	$\bar{\sigma}_{max}$ [N/mm ²]	$\bar{\sigma}_{max}/\beta_{WS}$
3,1	40 mm	22,5	85	538	428	5,03
3,2	60 mm	10	90	940	333	3,70
3,3	120 mm	2,5	95	1973	174	1,84

8. Auswertung der Versuchsergebnisse

Es ist festzustellen, daß bei den ausgeführten Versuchen eine Bruchspannung (Bruchlast/Stempelfläche) auftritt, die in ihrer Größe erwartungsgemäß über der Würfeldruckfestigkeit liegt. Das heißt, die bezogene Bruchspannung (Bruchspannung/Würfelfestigkeit) ist größer 1. Diese bezogene Bruchspannung ist vor allem abhängig vom Flächenverhältnis, vgl. Tabellen 7 und 8. Bei dem Stempeldurchmesser 40mm, das einem Flächenverhältnis von 22,5 entsprach, ergab sich eine bezogene Bruchspannung von rund 4. Das heißt, bei einem Beton der Festigkeitsklasse B 85 trat der Bruch erst bei einer Spannung von ca. 400 N/mm² ein. Kleinere Flächenverhältnisse führen zu kleineren bezogenen Bruchspannungen. Bei dem Flächenverhältnis 10 (Stempeldurchmesser 60mm) ergab sich eine bezogene Bruchspannung von ca. 2,4. Bei dem Flächenverhältnis 2,5 (Stempeldurchmesser 120mm) betrug der Wert der bezogenen Bruchspannung nur noch 1,1.

Diese bezogene Bruchspannung ist weiterhin abhängig von der Betonfestigkeit. Die von Untersuchungen an Normalbeton bekannte Tendenz, daß bei konstantem Flächenverhältnis und zunehmender Betonfestigkeit die bezogene Bruchspannung abnimmt, kann aus den hier vorgenommenen Versuchen auch für hochfesten Beton vermutet werden. Eine eindeutige Aussage läßt sich jedoch aufgrund der vergleichsweise geringen Versuchsanzahl nicht machen.

Eine Bewehrung steigert, je nach Anordnung, die bezogene Bruchspannung bis zum 1,6fachen im Vergleich zum unbewehrten Versuchskörper. Eine Bewehrung verändert wesentlich den Bruchvorgang. Während unbewehrte Körper (ab einer Festigkeit von ca. $\beta_{WS,200} = 85 \text{ N/mm}^2$) in den Versuchen schlagartig durch Spalten versagen, kam es bei bewehrten Versuchskörpern nach Überschreiten der Höchstlast zu einem ganz allmählichen Lastabfall. Dies ist in den Last-Eindrückungs-Kurven in Bild 5 deutlich zu erkennen.

9. Folgerungen für die Bemessung

Am Beginn der Untersuchungen stand die Frage, ob die Aussagen der DIN 1045 [1] bezüglich der Teilflächenbelastung auf hochfeste Betone übertragbar sind. Dazu ist es notwendig, auf das Sicherheitskonzept der DIN 1045 [1] einzugehen.

9.1 Sicherheitskonzept der DIN 1045

Das Sicherheitskonzept der DIN 1045 [1] beruht auf dem Prinzip, daß "die Schnittgrößen, die vom Querschnitt aufgenommen werden können, mindestens gleich sind den mit den Sicherheitsbeiwerten vervielfachten Schnittgrößen unter Gebrauchslast".

Das heißt, die Beanspruchung (S_d) muß kleiner, höchstens gleich der Beanspruchbarkeit (R_d) sein:

$$S_d \leq R_d \quad (3)$$

Nach [15] läßt sich der oben genannte Abschnitt 17.1.1 der DIN 1045 [1] in folgender Formel ausdrücken:

$$S_d[\gamma(\Sigma G_k + \Sigma Q_k)] \leq R_d(\beta_R; \beta_S) \quad (4)$$

Dabei sind G_k und Q_k die charakteristischen Werte der ständigen bzw. veränderlichen Lasten, β_R der Rechenwert der Betondruckfestigkeit, β_S die Streckgrenze des Betonstahles und γ ein globaler Sicherheitsbeiwert.

Der globale Sicherheitsbeiwert soll all die Unsicherheiten abdecken, die mit den Einwirkungen, den Baustoffkennwerten und mit dem Bemessungsmodell verbunden sind.

Im Rechenwert der Betondruckfestigkeit β_R sind nach [16] die Abminderung der Würfelfestigkeit auf die Prismenfestigkeit, der Dauerstandeffekt und der Unterschied zwischen Baustellen- und Laborbedingungen enthalten. Die Rechenfestigkeit kann für hochfesten Beton nach folgender Formel [11] bestimmt werden:

$$\beta_R = 0.69 * \left(1 - \frac{\beta_{WN}}{600}\right) * \beta_{WN} \quad (5)$$

Der Wert S_d stellt gewissermaßen die maximale Beanspruchung dar und R_d die minimale Beanspruchbarkeit. Das Verhältnis dieser

beiden Größen vermittelt der globale Sicherheitsbeiwert γ :

$$\gamma = \frac{R_d}{S_d} \quad (6)$$

Der Abschnitt 17.2.2 der DIN 1045 [1] legt jetzt bei einem Versagen der Konstruktion ohne Vorankündigung den Sicherheitsbeiwert mit 2,1 fest. Ist ein Versagen der Konstruktion mit Vorankündigung zu erwarten, darf der Sicherheitsbeiwert 1,75 betragen.

9.2 Vergleich der Versuchsergebnisse unbewehrter Körper mit den zulässigen Spannungen nach DIN 1045 [1]

Die DIN 1045 gibt für die Berechnung der zulässigen Spannung unter Teilflächenbelastung folgende Formel an:

$$\sigma_{zul} = \frac{\beta_R}{2,1} * \sqrt{\frac{A_0}{A_1}} \leq 1,4 \beta_R \quad (7)$$

Entfernt man aus der Formel (7) den Sicherheitsbeiwert 2,1 und setzt statt der Rechenfestigkeit β_R die Betonfestigkeit der Versuchskörper ein, dann gelangt man zu Formel (8), mit der die Bruchspannung unter Teilflächenbelastung ermittelt werden kann.

$$\sigma_{Bruch} = \beta_P * \sqrt{\frac{A_0}{A_1}} \quad (8)$$

Für die Betonfestigkeit ist die Prismenfestigkeit β_P einzusetzen, da die Betondruckfestigkeiten am Würfel gemessen wurden, aber im Versuchskörper ähnliche Geometrieverhältnisse und damit Festig-

keitsverhältnisse wie beim Prisma vorliegen. Entsprechend [11] wurde die Prismenfestigkeit nach Formel (9) berechnet.

$$\beta_P = 0,91 * \beta_{WS,200} \quad (9)$$

In der Tabelle 9 sind die mit Hilfe der Formeln (8) und (9) ermittelten Werte für die rechnerische Bruchlast angegeben. Diesen Werten wurden die gemittelten Versuchsergebnisse gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, daß die Formel (8) etwas zu optimistische Resultate liefert. Mit Hilfe der Gleichung (10), die den Verhältniswert α ermittelt, kann die Größe dieser Abweichung festgestellt werden.

$$\alpha = \frac{\sigma_{Bruch}}{0,91 * \beta_{WS,200} \sqrt{\frac{A_0}{A_1}}} \quad (10)$$

Der Verhältniswert α ist ebenfalls aus der Tabelle 9 zu ersehen.

Tabelle 9: Vergleich der Versuchsergebnisse unbewehrter Betonkörper mit Rechenwerten nach Formel (8)

Versuchsreihe und Serie	Stempel-durchmesser	$\beta_{WS,200}$ in N/mm ²	Bruchspannung nach Formel (8) in N/mm ²	Bruchspannung aus Versuch in N/mm ²	Verhältniswert α nach Formel (10)
0,1	60 mm	75	226	187	0,826
0,2	60 mm	58	175	174	0,994
1,1	60 mm	58	167	132	0,791
1,2	60 mm	101	291	242	0,833
1,3	60 mm	99	285	244	0,856
2,1.1	120 mm	95	137	115	0,841
2,1.2	40 mm	94	406	404	0,996
2,2.1	120 mm	101	145	116	0,798
2,2.2	40 mm	108	466	433	0,929

Der Verhältniswert α zeigt an, daß die im Versuch ermittelten Bruchlasten zum Teil nur 79% der rechnerischen Bruchlast erreichen. Bestimmt man für α den Mittelwert über alle Versuche mit unbewehrten Betonkörpern, dann erhält man $\alpha_M = 0,874$. Daraus muß die Schlußfolgerung gezogen werden, daß der hochfeste Beton ein ungünstigeres Verhalten bei Teilflächenbelastung aufweist als normalfester Beton. Dieses Ergebnis führt zu der Folgerung, daß die Formel (8) im Falle hochfesten Betons um den Faktor 0,79 erweitert werden muß, um Resultate zu erhalten, die auf der sicheren Seite liegen. Daraus ergibt sich die Gleichung (11).

$$\sigma_{Bruch} = 0,79 \beta_P^* \sqrt{\frac{A_0}{A_1}} \quad (11)$$

Ermittelt man jetzt den Verhältniswert α^* nach Gleichung (12), so stellt man fest, daß dieser mindestens den Wert 1 erreicht. Das heißt, die rechnerischen Bruchlasten überschätzen die im Versuch ermittelten Bruchlasten nicht und liegen somit auf der sicheren Seite, vgl. Tabelle 10.

$$\alpha^* = \frac{\sigma_{Bruch}}{0,79 * 0,91 * \beta_{WS,200} \sqrt{\frac{A_0}{A_1}}} \quad (12)$$

Tabelle 10: Vergleich der Versuchsergebnisse unbewehrter Betonkörper mit Rechenwerten nach Formel (11)

Versuchsreihe und Serie	Stempel-durchmesser	$\beta_{WS,200}$ in N/mm ²	Bruchspannung nach Formel (11) in N/mm ²	Bruchspannung aus Versuch in N/mm ²	Verhältniswert α^* nach Formel (12)
0,1	60 mm	75	179	187	1,046
0,2	60 mm	58	138	174	1,258
1,1	60 mm	58	132	132	1,001
1,2	60 mm	101	230	242	1,054
1,3	60 mm	99	225	244	1,084
2,1.1	120 mm	95	108	115	1,065
2,1.2	40 mm	94	320	404	1,260
2,2.1	120 mm	101	115	116	1,010
2,2.2	40 mm	108	368	433	1,176

Im Bild 6 ist die Gleichung (11) den Versuchswerten unbewehrter Betonkörper gegenüber gestellt. Es läßt sich gut erkennen, daß diese Gleichung Resultate liefert, die auf der sicheren Seite liegen. Die Meßwerte liegen jeweils oberhalb der zugehörigen Geraden, die nach Gleichung (11) die rechnerischen Bruchspannungen für die Betonfestigkeitsklassen B 45, B 65, B 85 und B 95 angeben.

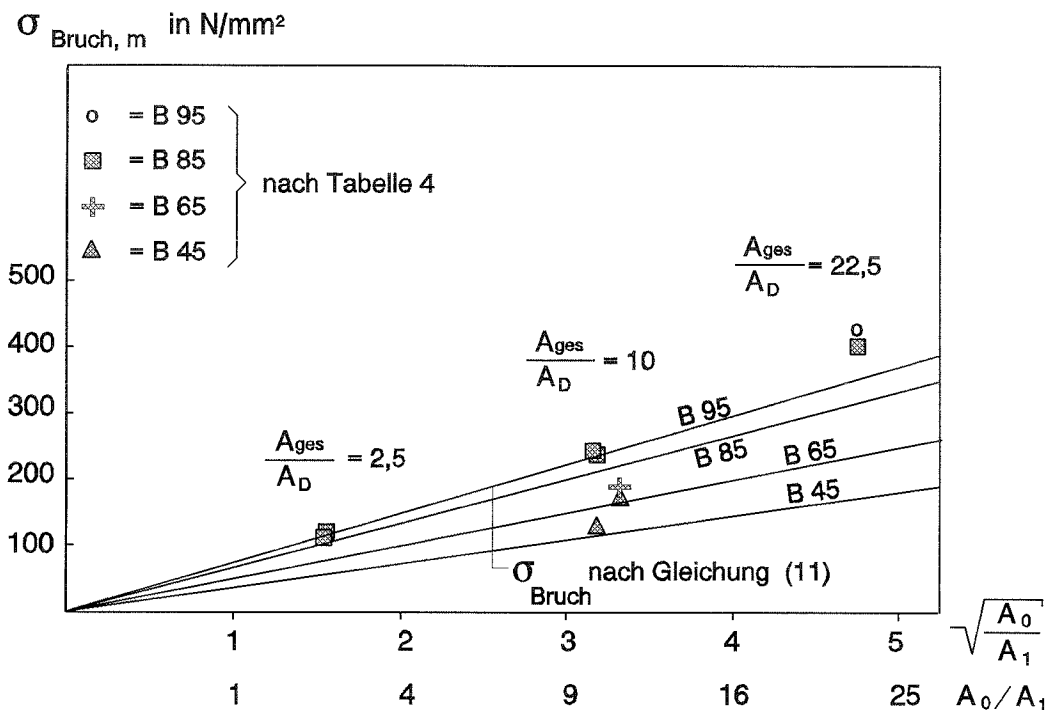


Bild 6: Vergleich der Mittelwerte der Versuchsergebnisse unbewehrter Körper mit den rechnerischen Bruchspannungen nach Gleichung (11)

Für die Ermittlung der zulässigen Spannungen ergibt sich somit folgendes:

Anstelle Gleichung (7), mit der die DIN 1045 [1] die zulässigen Spannungen bei Teilflächenbelastung ermittelt, wurde Gleichung (8) verwendet. Diese Gleichung (8) liefert Werte, die das Bruchverhalten von hochfestem Beton zu günstig einschätzen, vgl. Tabelle 9. Durch Einfügen des Faktors 0,79 wurde dies kompensiert, vgl. Formel (11), (12), Tabelle 10.

Wie in Abschnitt 9.1 ausgeführt, verlangt die DIN 1045 [1] im Falle von unbewehrten Konstruktionen (Versagen ohne Vorankündigung) einen Sicherheitsbeiwert von $\gamma=2,1$. Diese Überlegungen führen zu folgendem Vorschlag zur Bestimmung der zulässigen Spannungen für unbewehrte Konstruktionen aus hochfestem Beton bei Teilflächenbelastung:

$$\sigma_{zul} = 0,79 * \frac{1}{2,1} \beta_{R*} \sqrt{\frac{A_0}{A_1}} \quad (13)$$

Eine Erhöhung der zulässigen Spannungen nur bis zu einem Flächenverhältnis von 9 zu gestatten (wie in der DIN 1045 [1]), scheint nach Auswertung der Versuche nicht plausibel, da der Sicherheitsbeiwert $\gamma=2,1$ mit der Gleichung (11) bis zum Flächenverhältnis 22,5 eingehalten wird. Bei unbewehrten Konstruktionen steigt der Sicherheitsbeiwert eher mit zunehmenden Flächenverhältnis an, vgl. Bild 6. Dies ist zumindest bis zum Flächenverhältnis 22,5 nachgewiesen.

9.3 Vergleich der Versuchsergebnisse bewehrter Körper mit den zulässigen Spannungen nach DIN 1045 [1]

Bisher wurden nur unbewehrte Körper betrachtet. Die bewehrten Zylinder lieferten günstigere Werte, mit denen die Rechenannahme der Gleichung (8) zutrifft. Dies ist aus dem Vergleich der Rechenergebnisse mit den Resultaten der Versuchsergebnisse in der Tabelle 11 zu ersehen. Der Verhältniswert α , der nach Gleichung (10) berechnet wurde, ist stets größer 1, was bedeutet, daß die rechnerischen Bruchspannungen stets auf der sicheren Seite liegen.

Tabelle 11: Vergleich der Versuchsergebnisse bewehrter Betonkörper mit Rechenwerten nach Formel (8)

Versuchsreihe und Serie	Stempel-durchmesser	$\beta_{ws,200}$ in N/mm^2	Bruchspannung nach Formel (8) in N/mm^2	Bruchspannung aus Versuch in N/mm^2	Verhältniswert α nach Formel (10)
3,1	40 mm	85	367	428	1,166
3,2	60 mm	90	259	333	1,286
3,3	120 mm	95	137	174	1,270

Errechnet man den Mittelwert für α über alle Versuche an bewehrten Betonkörpern, dann erhält man $\alpha_M = 1,241$.

Der in Tabelle 11 dargestellte Sachverhalt spiegelt sich ebenfalls in Abbildung 7 wieder.

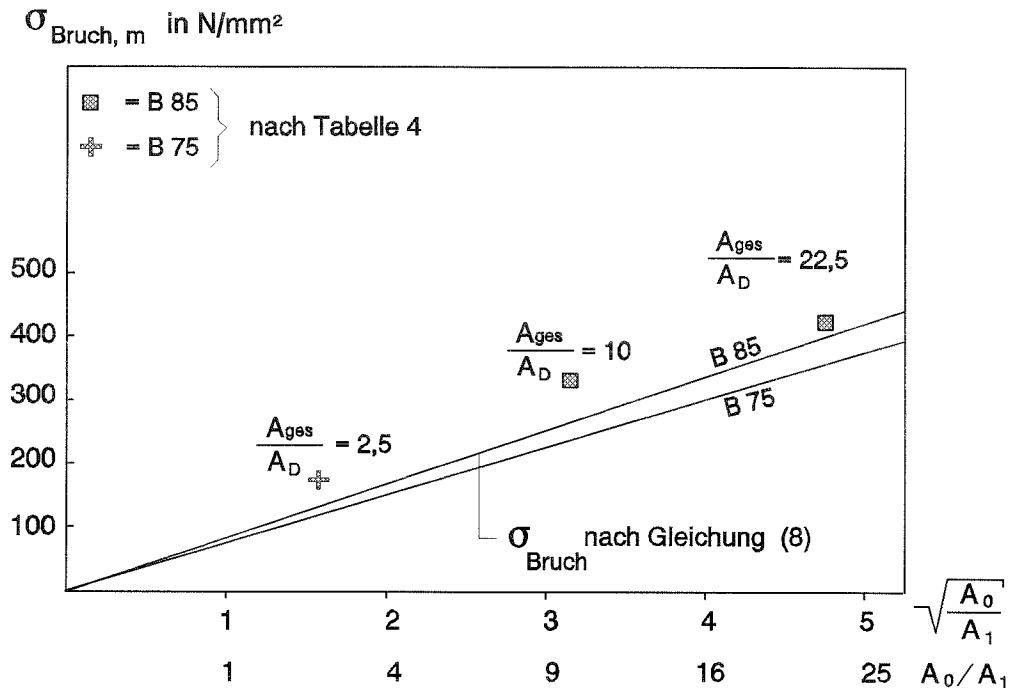


Bild 7: Vergleich der Mittelwerte der Versuchsergebnisse bewehrter Körper mit den rechnerischen Bruchspannungen nach Gleichung (8)

Bei der Berechnung der zulässigen Spannung für bewehrte Konstruktionen aus hochfestem Beton unter Teilflächenbelastung bedeutet dies, daß die Gleichung (7) nach DIN 1045 [1] ihre Gültigkeit behält, wenn es um den Nachweis der Tragfähigkeit (Bruchsicherheit) geht. Soll der Nachweis eines einwandfreien Verhaltens unter Gebrauchslast erbracht werden (Beschränkung der Rißbreiten etc.), ist die Gleichung (13) zu verwenden. Dies muß zumindest so lange gelten, wie noch keine ausreichenden Untersuchungen über Rißbildung an bewehrten Körpern vorliegen.

In der Abbildung 8 ist die Gleichung (13) für die Betonfestigkeitsklassen B 65 bis B 115 und bis zu einem Flächenverhältnis von 22,5 aufgetragen.

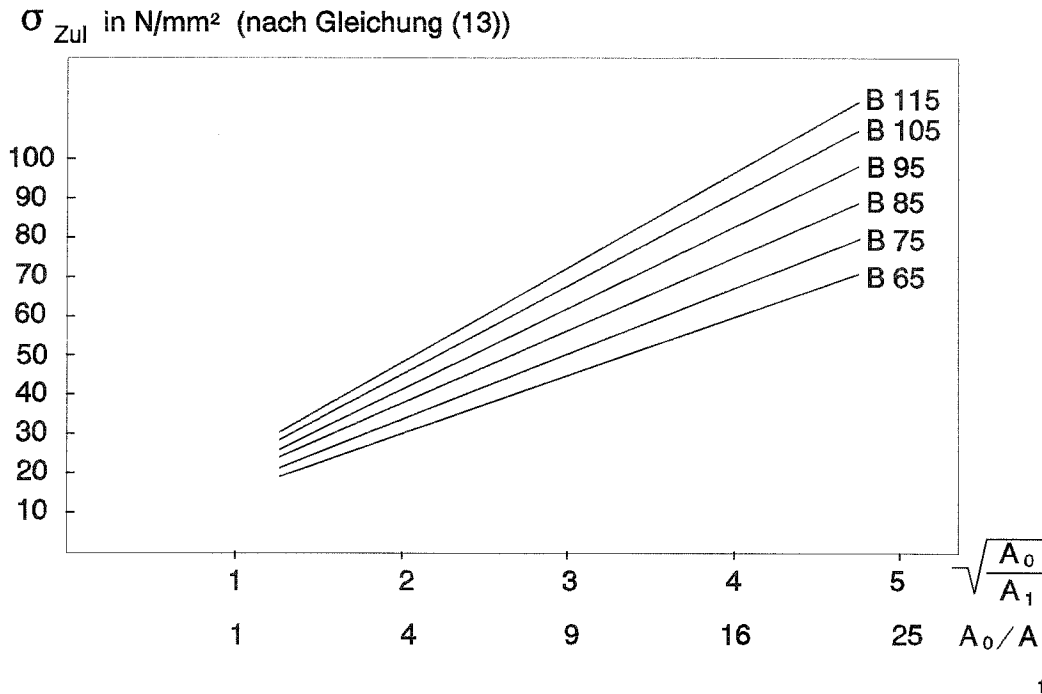


Bild 8: Zulässige Spannungen für hochfesten Beton unter Teilflächenbelastung nach Gleichung (13)

In den hier vorgenommenen Untersuchungen wurde die Rißbildung an bewehrten Körper nur mit dem bloßen Auge beobachtet. Erste Risse waren ab ca. 95% der Höchstlast zu sehen. Dieser Wert ist jedoch, aufgrund der geringen Anzahl der Versuche und dem wechselndem Verhältnis Durchmesser Wendel zu Durchmesser Stempel, nicht eindeutig zu belegen.

Ähnlich wie bei den unbewehrten Versuchskörpern konnte nachgewiesen werden, daß die Gleichungen (7) bzw. (13) bis zu einem Flächenverhältnis 22,5 gelten. Die Beschränkung des Flächenverhältnisses auf 9, wie es die DIN 1045 [1] fordert, könnte deshalb gelockert werden.

9.4 Ausblick

Während der Untersuchungen ergaben sich Fragen, die mit dem durchgeführten Versuchsprogramm nicht geklärt werden konnten.

So ist der Einfluß von aussermittigen Lasteintragungen noch ungeklärt. In den ausgeführten Versuchen wurde die Last stets zentrisch eingetragen.

Ebenfalls ungeklärt ist der Einfluß der Betonzugfestigkeit, die in diesem Versuchsprogramm nicht Gegenstand der Untersuchungen war. Dabei ist zu erwarten, daß Betone mit gleicher Druckfestigkeit aber unterschiedlicher Zugfestigkeit auch unterschiedliche Ergebnisse liefern.

Weiterhin wurden die Versuche nur mit einer Probengröße durchgeführt. Deshalb gelten die Ergebnisse streng genommen nur für diese. Für allgemein gültige Aussagen sollten Versuche zumindest mit größeren Abmessungen durchgeführt und ausgewertet werden.

Sinnvoll wäre es außerdem, die Anordnung der Bewehrung zu variieren, um zu einer optimalen Bewehrungsführung unter der Lastfläche zu gelangen. In diesem Zusammenhang könnte auch die Rißbildung genauer untersucht werden.

Schlußendlich sollten die Versuche noch durch eine Versuchsreihe mit Betonen sehr hoher Festigkeit (B 115 und B 105) ergänzt werden.

Soll der Sicherheitsbeiwert verringert, d.h. die zulässigen Spannungen angehoben werden, dann kann das in der Art des EC 2 [8] geschehen, wo Teilsicherheitsbeiwerte eingeführt werden, die die unterschiedlichen Einflußparameter differenziert erfassen. Außerdem müßte die Rißbildung in bewehrtem Beton eingehender untersucht werden.

10. Literatur

- [1] DIN 1045, Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung; Ausgabe 06/88
- [2] Spieth, H.P.: Das Verhalten von Beton unter hoher örtlicher Pressung; Beton und Stahlbetonbau 56 (1961), H. 11, S. 257-263
- [3] Lieberum, K.-H., Reinhardt, H.-W., Weigler, H.: Das Tragverhalten von Beton bei extremer Teilflächenbelastung; Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989), H.1, S. 1-5
- [4] Lieberum, K.-H.: Das Tragverhalten von Beton bei extremer Teilflächenbelastung; Diss. TH Darmstadt 1987
- [5] Wurm, P., Daschner, F.: Versuche über Teilflächenbelastung von Normalbeton; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 286; Berlin 1977
- [6] Wurm, P., Daschner, F.: Teilflächenbelastung von Normalbeton; Versuche an bewehrten Scheiben; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 344, Berlin 1983
- [7] Heilmann, H. G.: Versuche zur Teilflächenbelastung von Leichtbeton für tragende Konstruktionen; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 344, Berlin 1983
- [8] EC 2 - Design of Concrete Structures, Betonkalender 1991, T.2, S.90 ff.
- [9] Meyer, H.G.: Stand der Europäischen Normung auf dem Gebiet der Betontechnik; Beton- und Stahlbetonbau 85 (1990), H. 12, S. 316-321
- [10] CEB-FIP MODEL CODE 1990, CEB BULLETIN D'INFORMATION N°203
- [11] Held, M.: Ein Beitrag zur Herstellung und Bemessung von Druckgliedern aus hochfestem Normalbeton (B 60 - B 125), Dissertation, Darmstadt 1992
- [12] Schrage, I., Sticha, J., Mohr, B.: Ein Ausgangsrezept für hochfesten Beton, Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), H. 6 S. 158-159
- [13] DIN 1048, Teil 5 Prüfverfahren für Beton - Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper; Ausgabe 06/91
- [14] DIN 17200 Vergütungsstähle; Ausgabe 03/87
- [15] Litzner, H.-U.: Grundlagen der Bemessung nach EC 2 - Vergleich mit DIN 1045 und DIN 4227, Betonkalender 1993, Teil I, S. 509-687
- [16] Ergebnisprotokoll der 3. Sitzung des Unterausschusses hochfester Beton - Bemessungsgruppe, Oktober 1993

Anhang A - Fotos



Bild A 1: Prinzip der Teilflächenbelastung

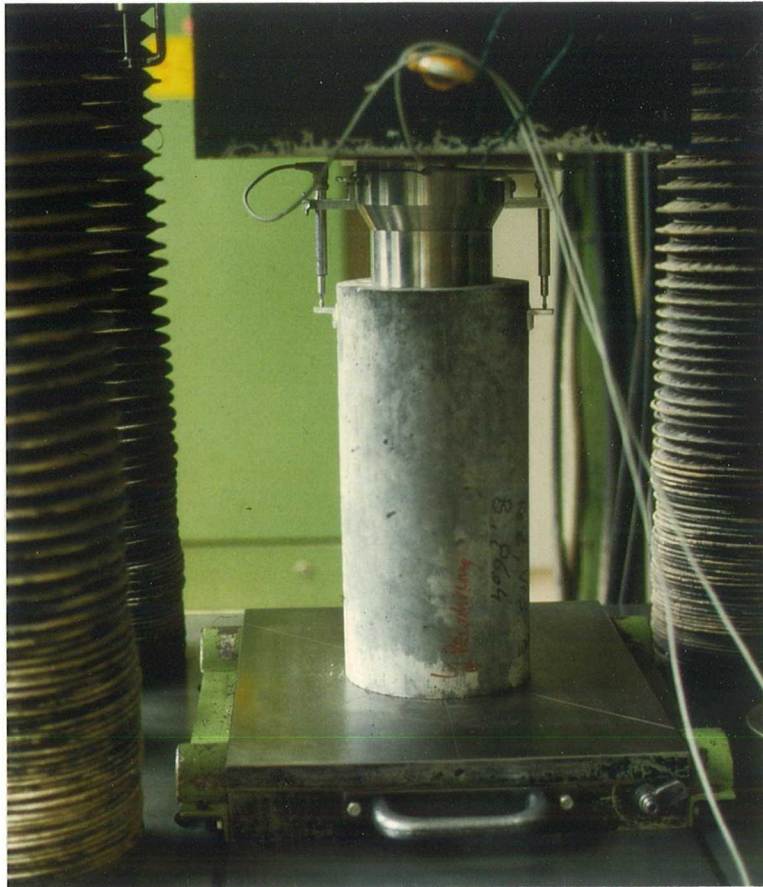


Bild A 2: Versuchsanordnung mit Prüfstempel, Betonzylinder und Wegaufnehmern

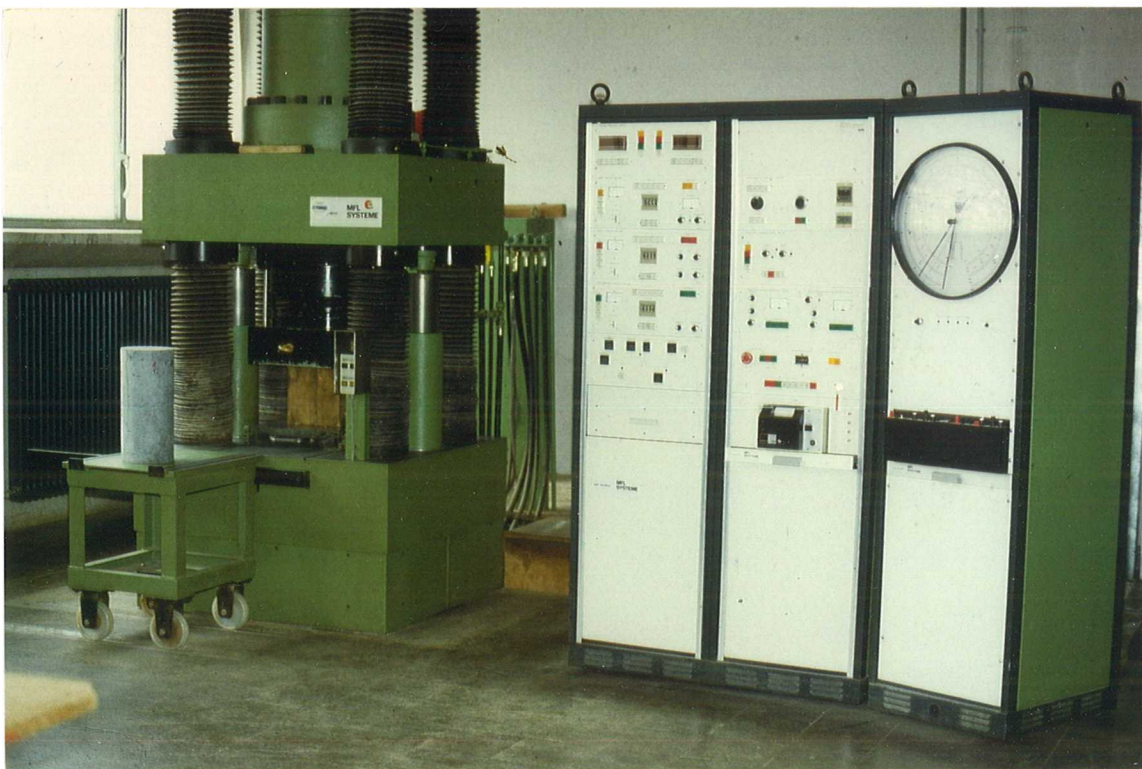


Bild A 3: 3000kN - Prüfmaschine mit Regel- und Anzeigeeinrichtungen

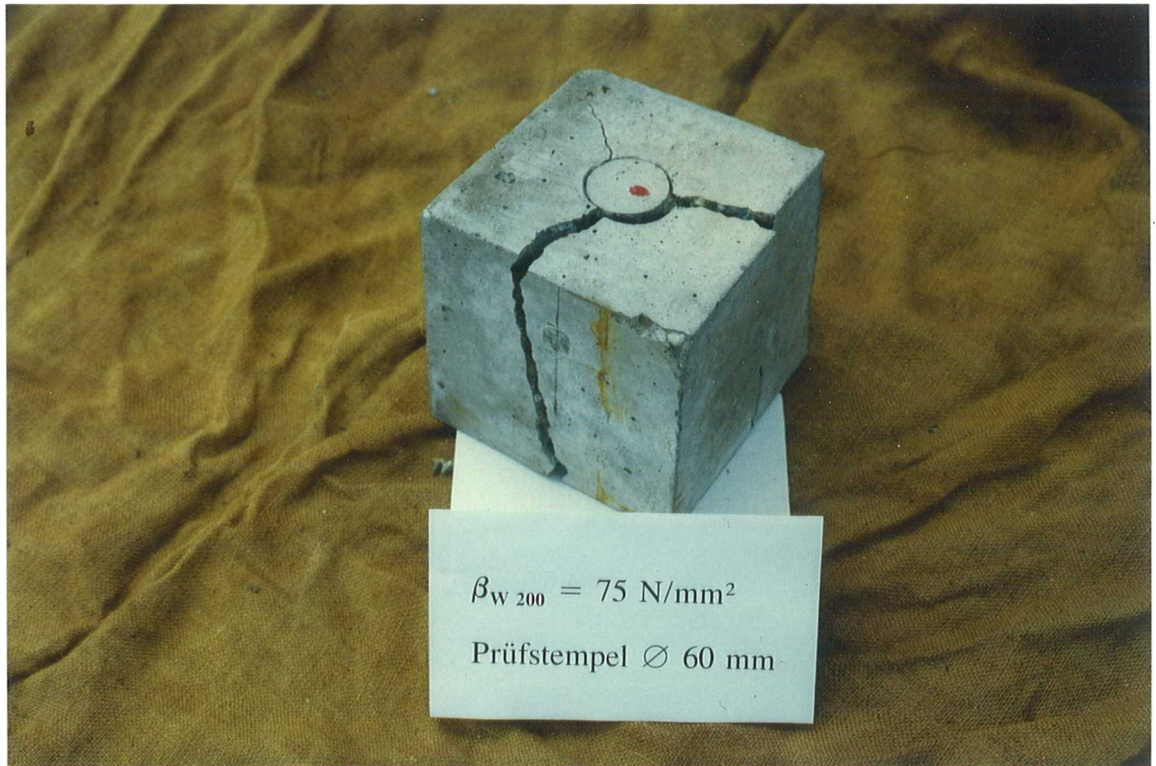


Bild A 4: Versagen durch Spalten, Versuchskörper der Reihe 0, Serie 1

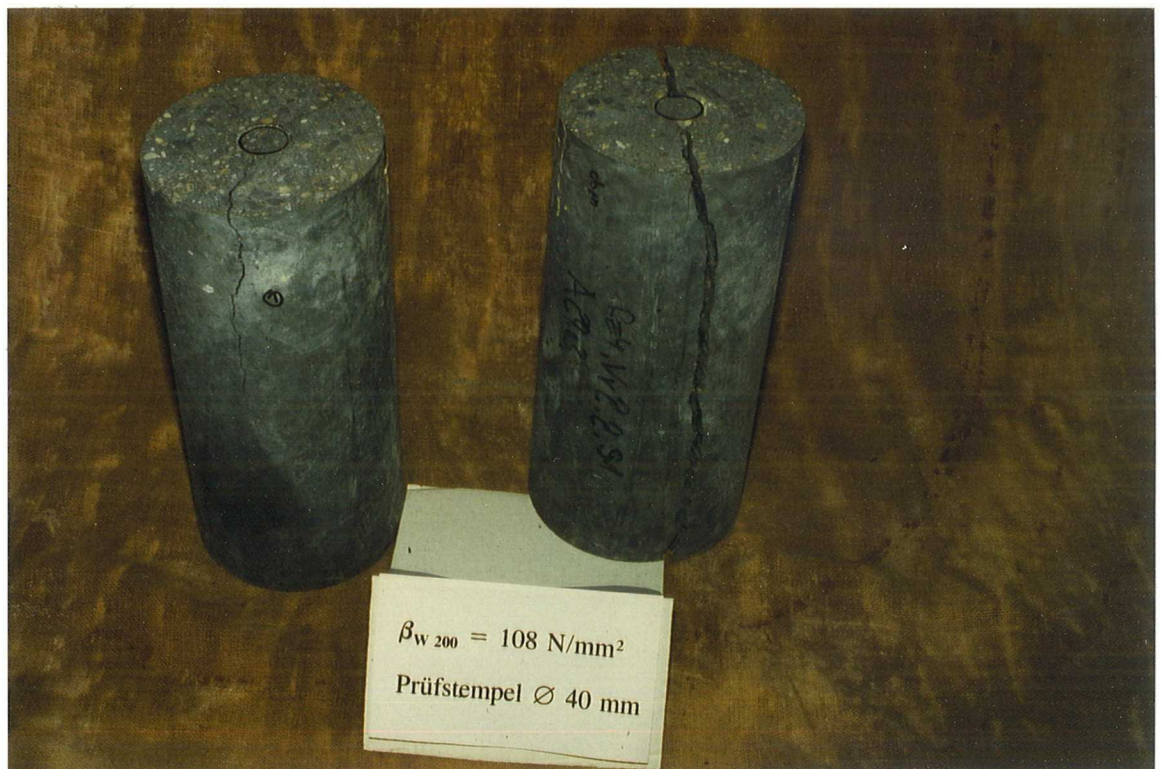


Bild A 5: Versagen durch Spalten, Versuchskörper der Reihe 2.2, Serie 2

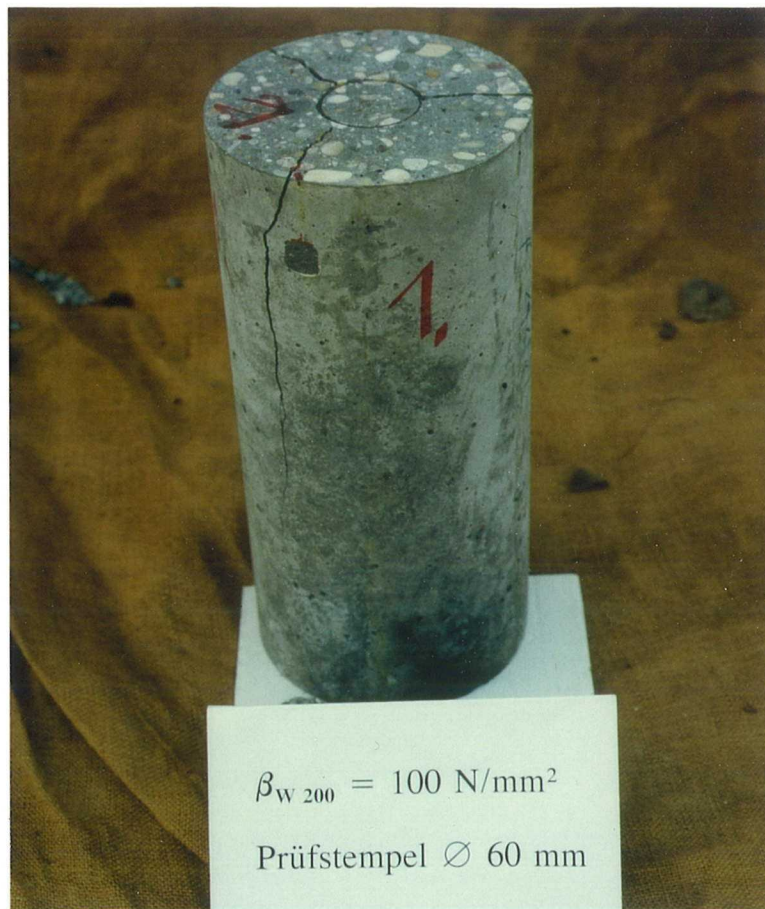


Bild A 6: Versagen durch Spalten, Versuchskörper der Reihe 1, Serie 2



Bild A 7: Versagen durch Spalten, Versuchskörper der Reihe 2.1, Serie 1

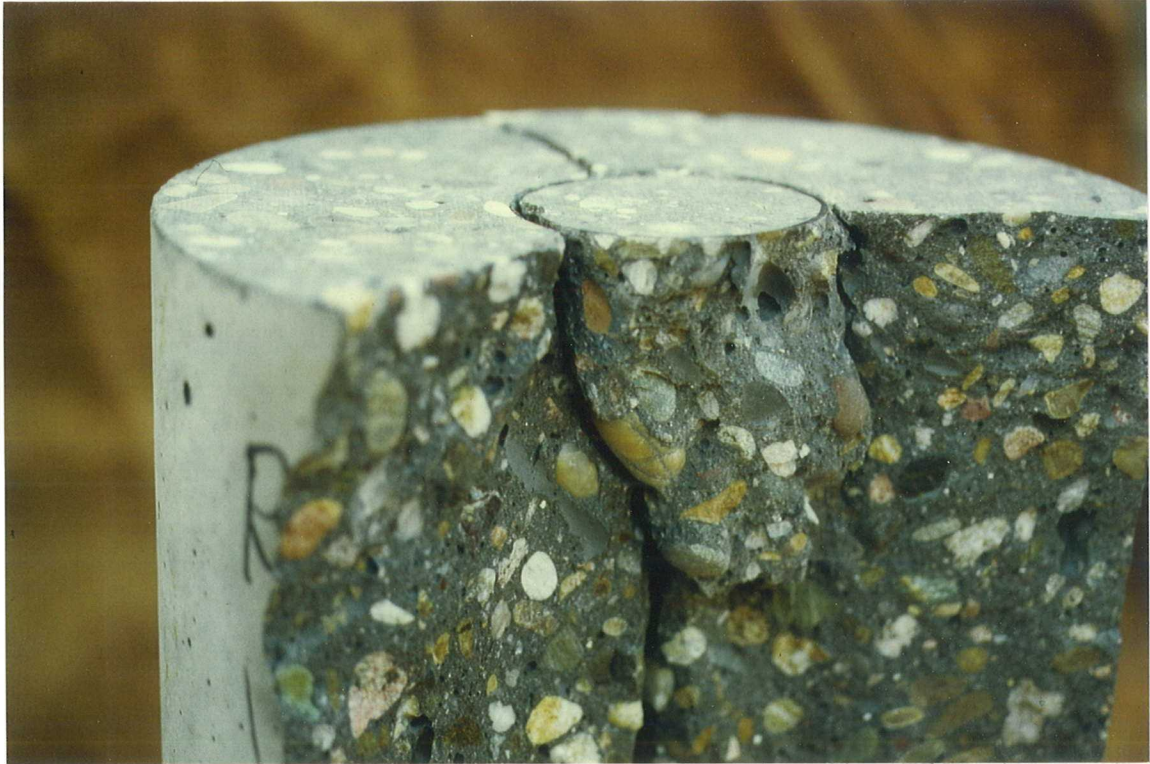


Bild A 8: Ausbruchkegel, Versuchskörper der Reihe 1, Serie 2



Bild A 9: Ausbruchkegel bei Stempeldurchmesser 40mm, Versuchskörper der Reihe 2.1, Serie 2



Bild A 10: Ausbruchkegel bei Stempeldurchmesser 60mm,
Homogenes Betongefüge in der Spaltfläche,
Versuchskörper der Reihe 1, Serie 3



Bild A 11: Ausbruchkegel bei Stempeldurchmesser 120mm,
Versuchskörper der Reihe 2.1, Serie 1



Bild A 12: Homogenes Gefüge in der Spaltfläche, Versuchskörper der Reihe 1, Serie 2

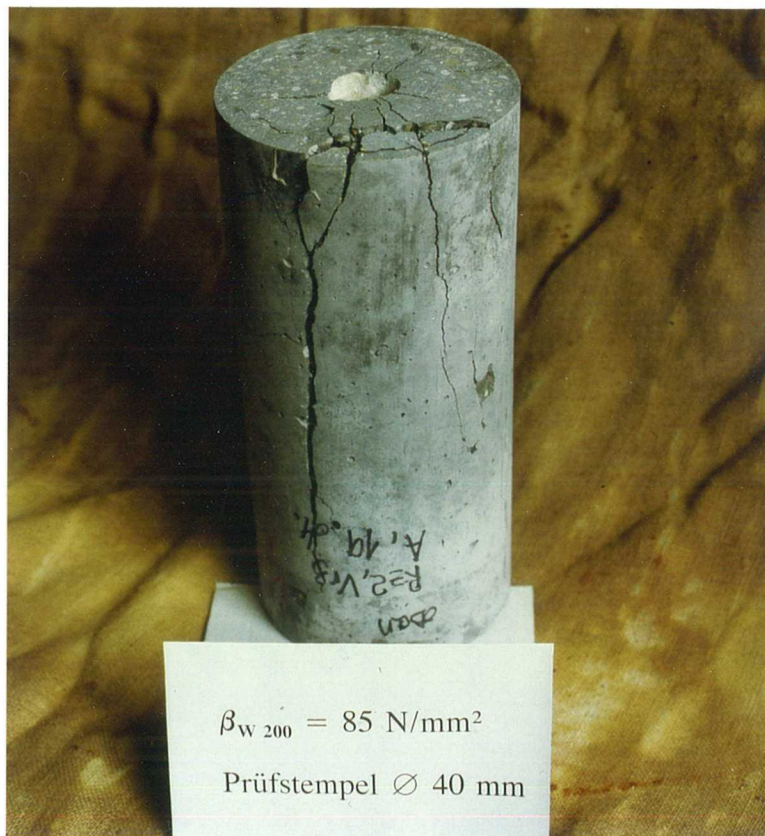


Bild A 13: Versagen nach Überschreiten der Höchstlast ohne Spalten, Versuchskörper der Reihe 3, Serie 1

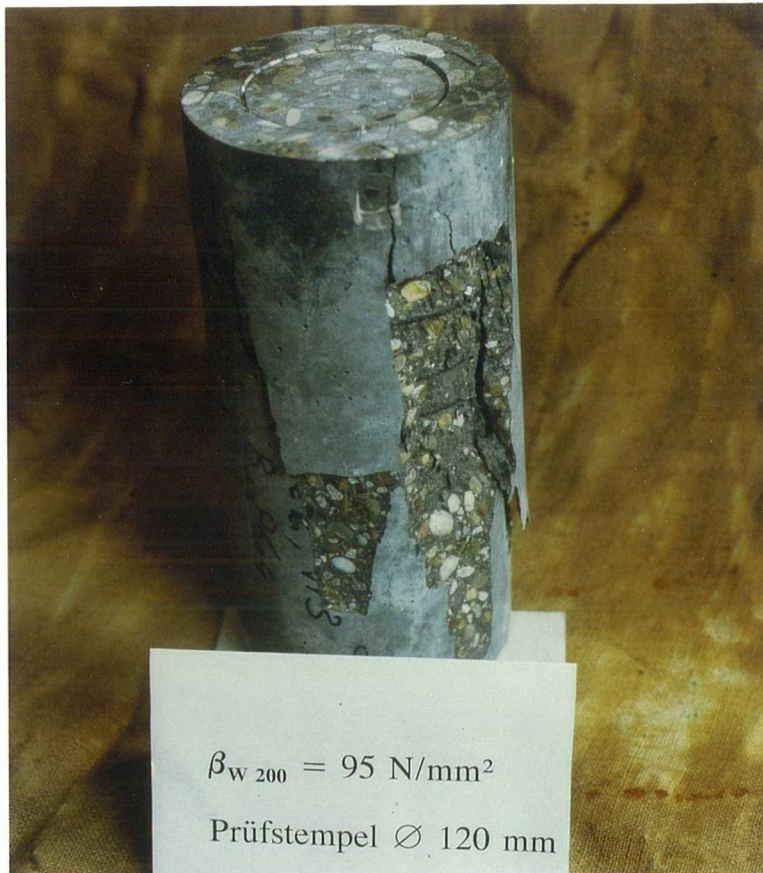


Bild A 14: Versagen nach Überschreiten der Höchstlast ohne Spalten, Versuchskörper der Reihe 3, Serie 3



Bild A 15: Versagen nach Überschreiten der Höchstlast ohne Spalten, Versuchskörper der Reihe 3, Serie 3



Bild A 16: Eindringung des Laststempels ohne Spalten,
Versuchskörpers der Reihe 3, Serie 3

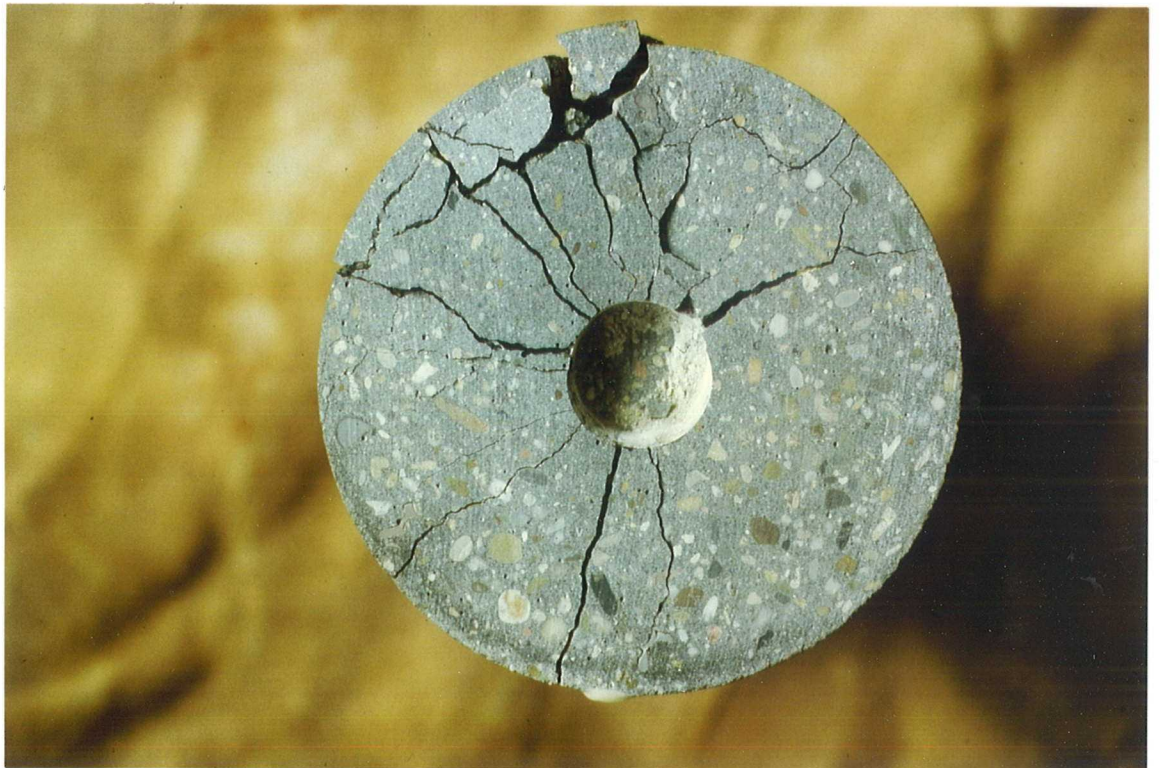


Bild A 17: Eindringung des Laststempels ohne Spalten,
Versuchskörper der Reihe 3, Serie 1



Bild A 18: Rißbildung und -ausbreitung, Versuchskörper der Reihe 3, Serie 1

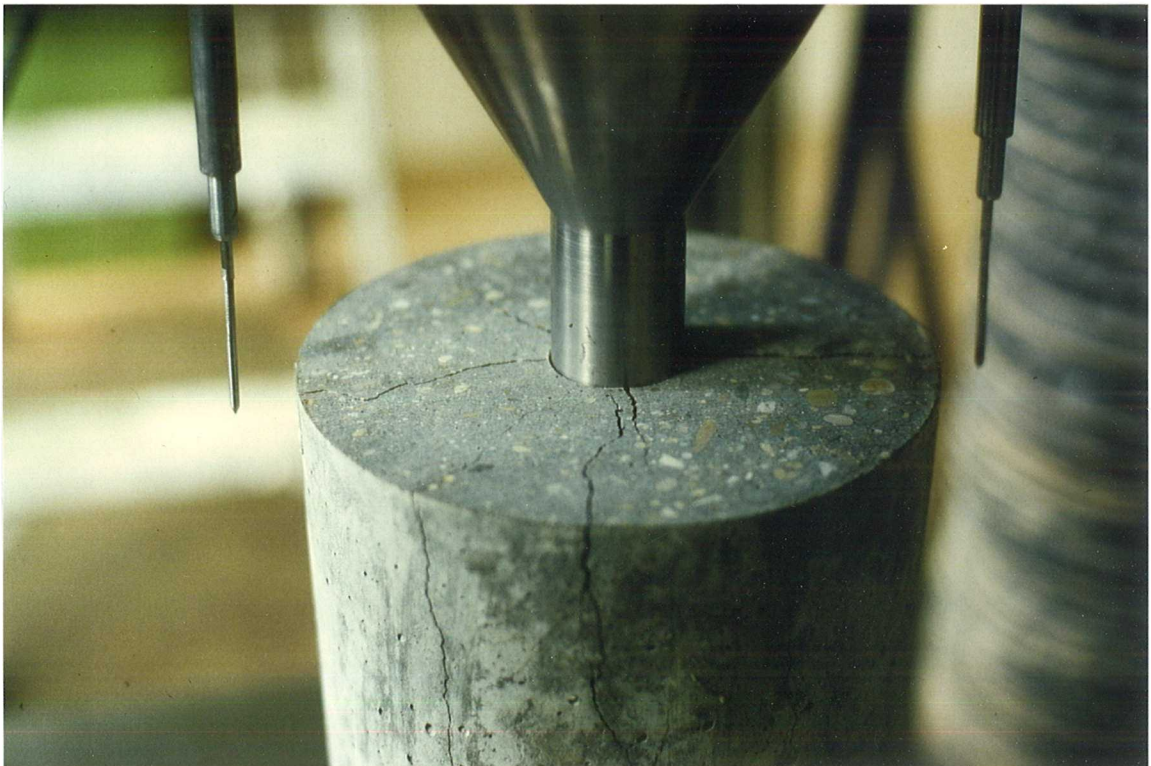


Bild A 19: Rißbildung und -ausbreitung, Versuchskörper der Reihe 3, Serie 1

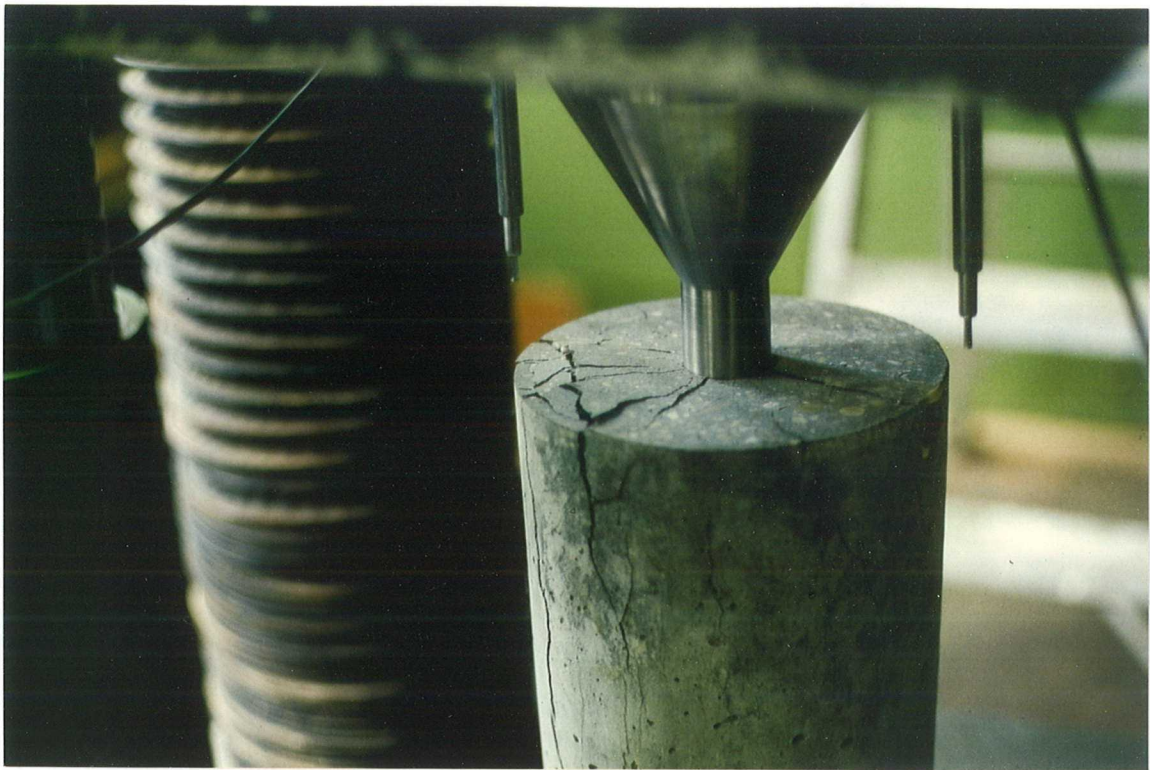


Bild A 20: Rißbildung und -ausbreitung, Versuchskörper der Reihe 3, Serie 1



Bild A 21: Abplatzung der Betondeckung während des Versuches, Versuchskörper der Reihe 3, Serie 3

Anhang B - Last-Verformungs-Kurven

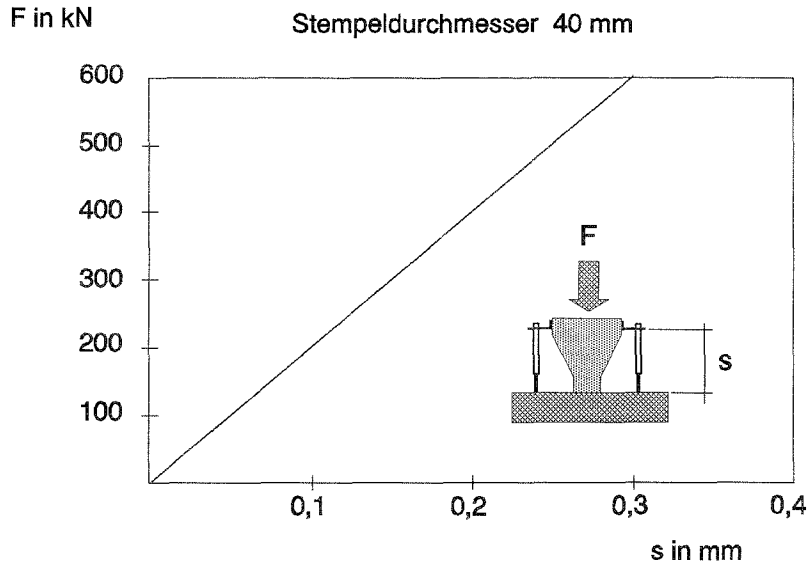


Bild B 1: Verformung des Stempels mit Durchmesser 40 mm bei Belastung

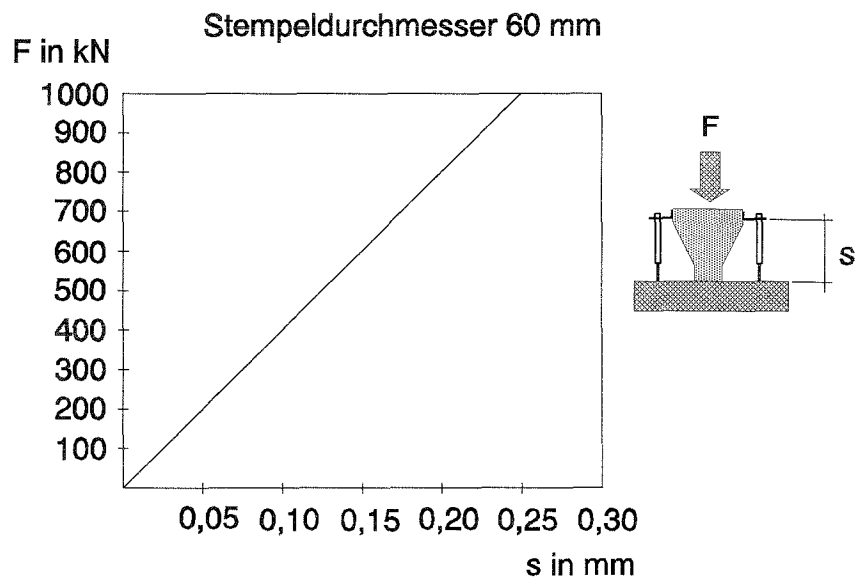


Bild B 2: Verformung des Stempels mit Durchmesser 60 mm bei Belastung

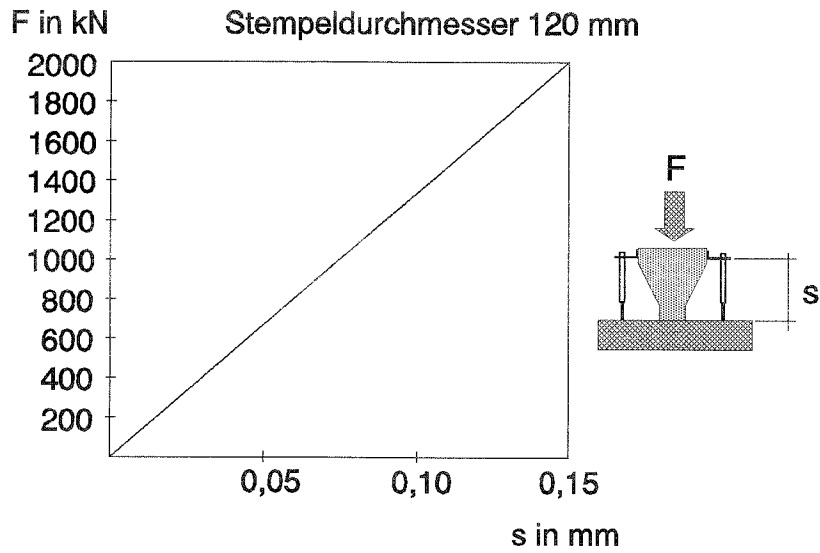


Bild B 3: Verformung des Stempels mit Durchmesser 120 mm bei Belastung

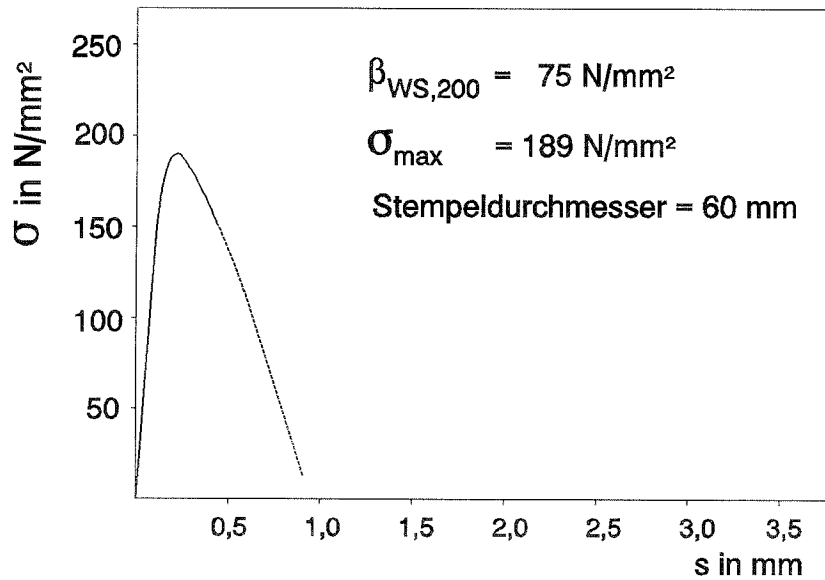


Bild B 4: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 1 der Reihe 0, Serie 1, vgl. Tabelle 5

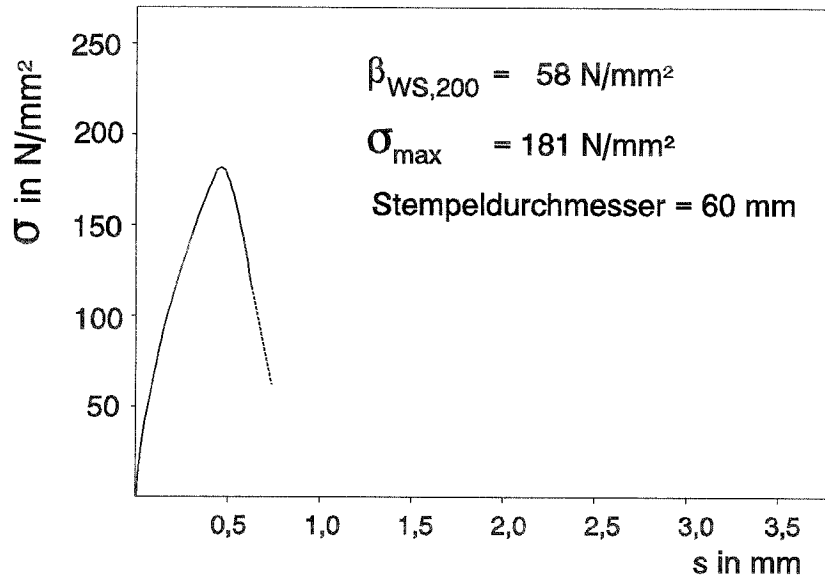


Bild B 5: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 1 der Reihe 0, Serie 2, vgl. Tabelle 5

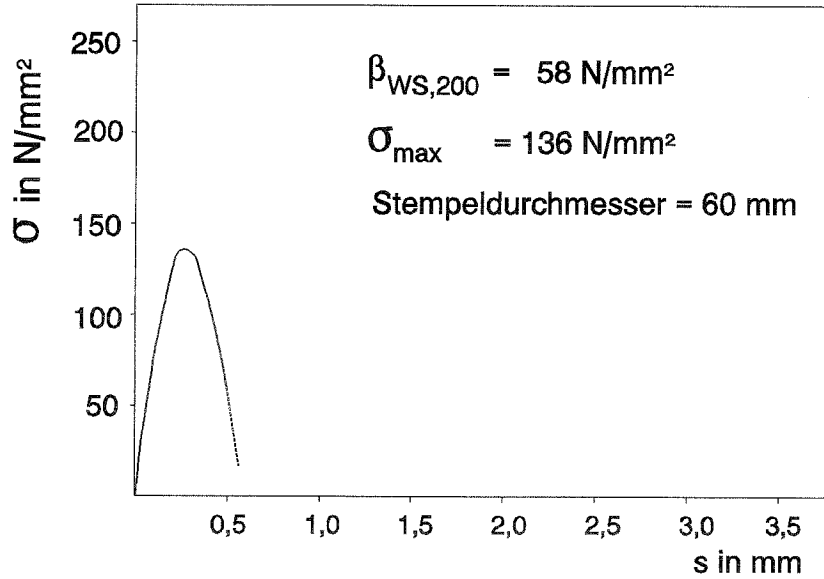


Bild B 6: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 2 der Reihe 1, Serie 1, vgl. Tabelle 5

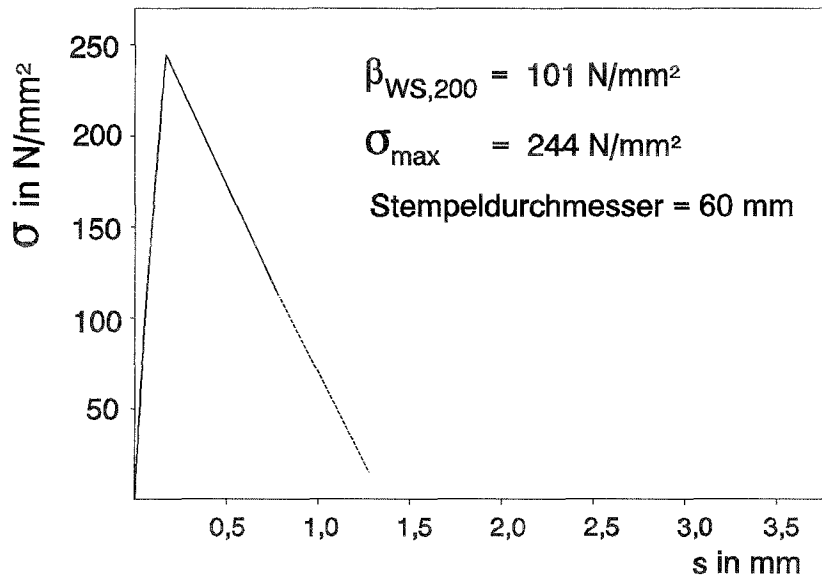


Bild B 7: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 1 der Reihe 1, Serie 2, vgl. Tabelle 5

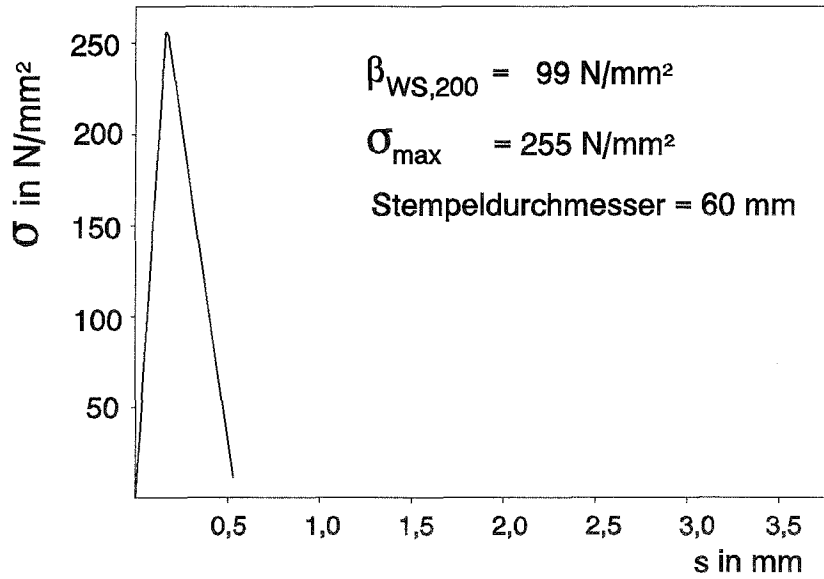


Bild B 8: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 2 der Reihe 1, Serie 3, vgl. Tabelle 5

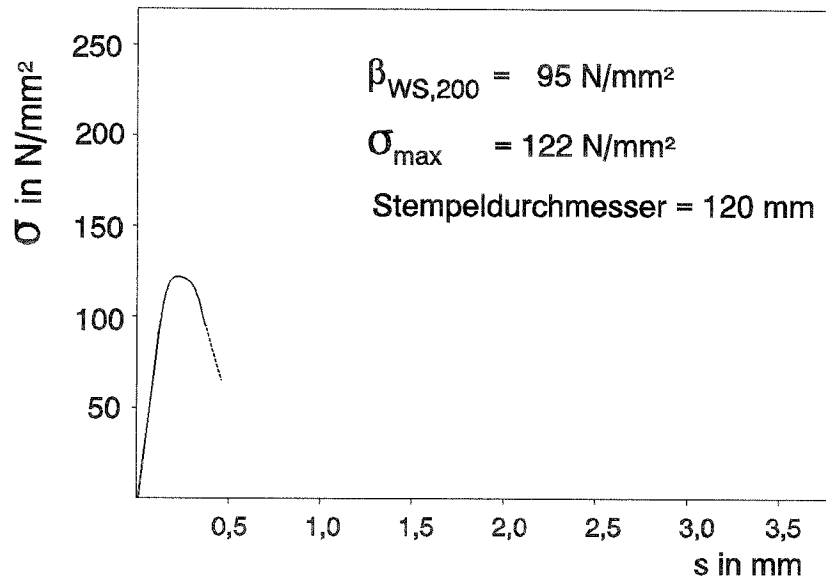


Bild B 9: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 4 der Reihe 2.1, Serie 1, vgl. Tabelle 5

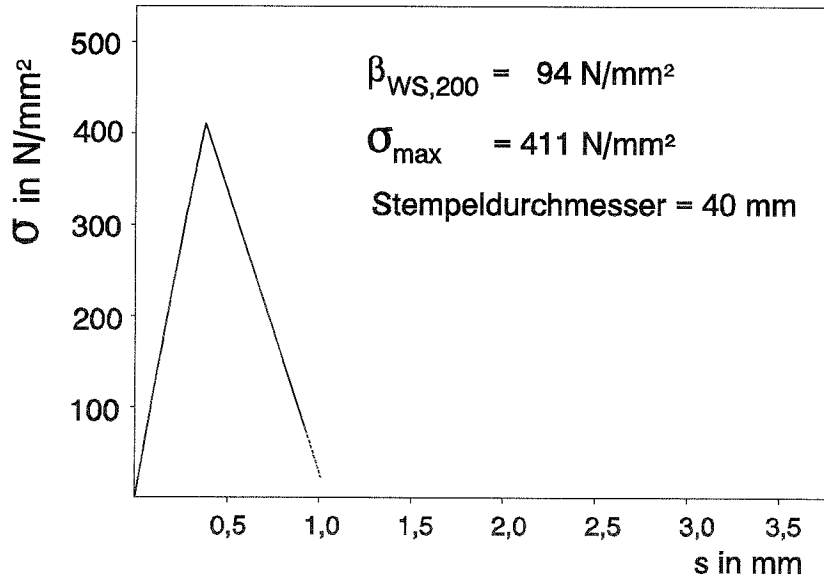


Bild B 10: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 2 der Reihe 2.1, Serie 2, vgl. Tabelle 5

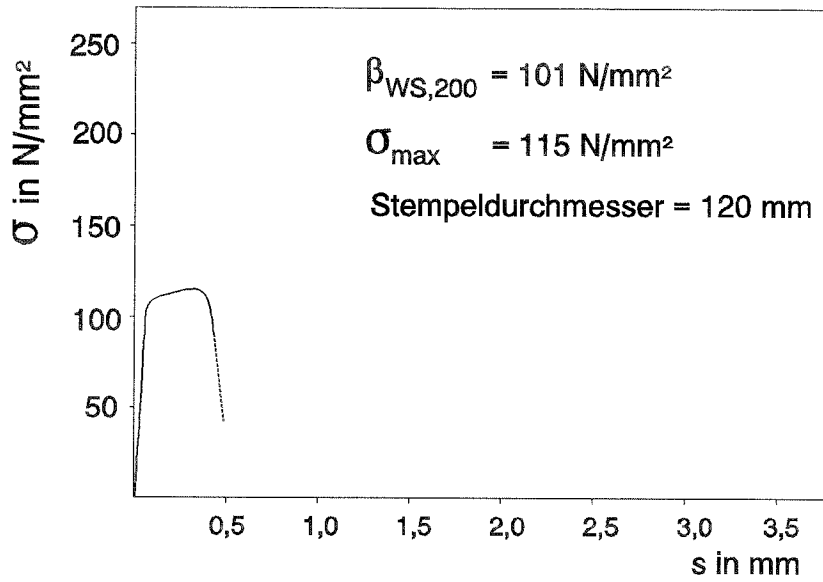


Bild B 11: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 2 der Reihe 2.2, Serie 1, vgl. Tabelle 5

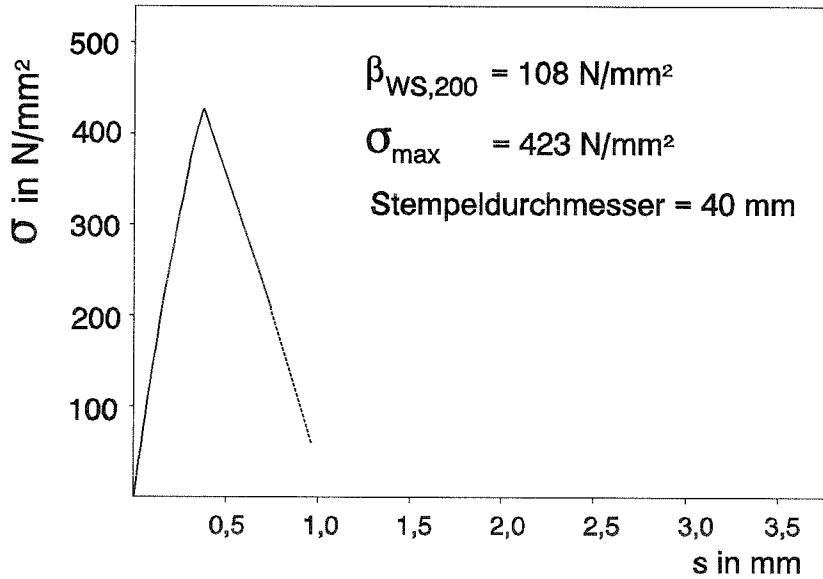


Bild B 12: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 1 der Reihe 2.2, Serie 2, vgl. Tabelle 5

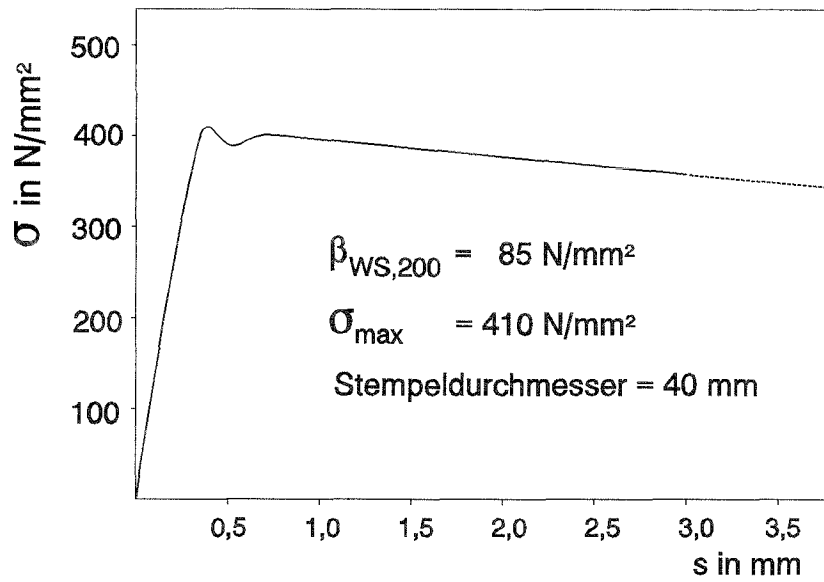


Bild B 13: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 2 der Reihe 3, Serie 1, vgl. Tabelle 6

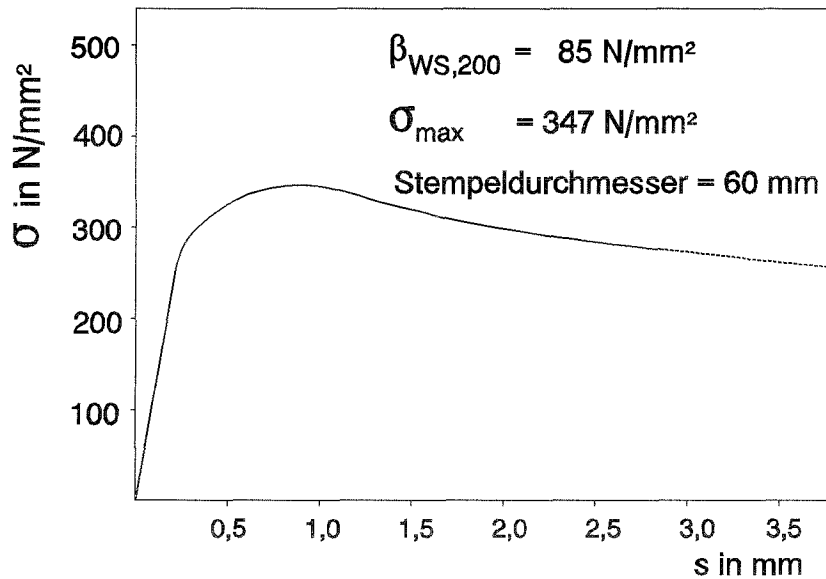


Bild B 14: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 2 der Reihe 3, Serie 2, vgl. Tabelle 6

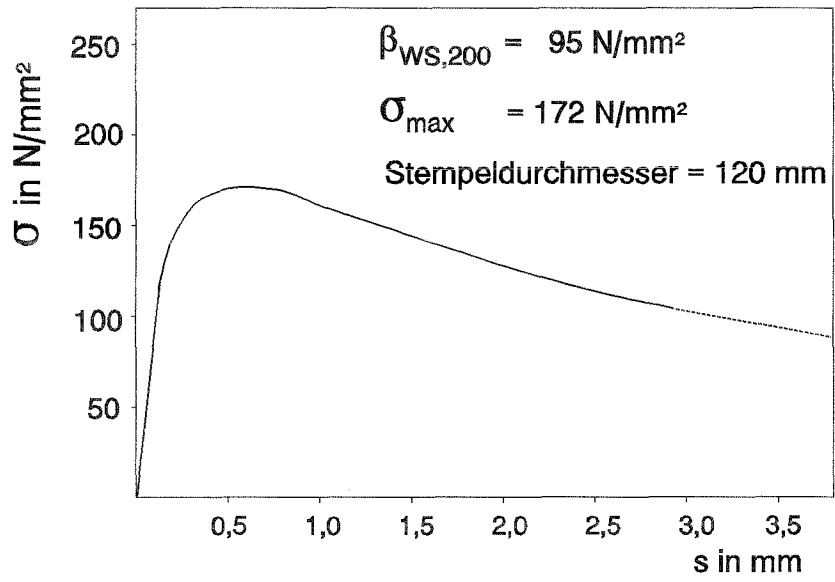


Bild B 15: Last-Eindrückungs-Kurve des Versuches 2 der Reihe 3, Serie 3, vgl. Tabelle 6