

ISSN 0172-7613

Forschungsbericht 70

BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)
BERLIN

Schwellenwerte beim Betondruckversuch

von Dr.-Ing. Gerald Schickert

August 1980

135 Seiten, 163 Bilder

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon 030/8104-1
Telex 01-083 261 bamb d

Inhalt

Schwellenwerte beim Betondruckversuch

Die Festigkeit von Beton gilt als Maß für seine Güte. Um das Materialverhalten auch unterhalb der Versagensgrenze zu beschreiben, werden als „Schwellenwerte“ bezeichnete Kenngrößen nachgewiesen, die das mit der Höhe der Beanspruchung veränderte Widerstandsvermögen mineralischer Baustoffe in mehrere Phasen unterteilen. Diese Schwellen beruhen auf irreversiblen Übergängen im Betongefüge und zeigen damit wesentliche Veränderungen des inneren Zusammenhalts an. Sie lassen sich aus der Verformung des Materials bestimmen. Um den Einfluß der Versuchstechnik auf die Untersuchungsergebnisse – insbesondere Festigkeit, Schallemission, Verformungsarbeit und Völligkeitsgrad der Spannungs-Stauchungslinie – erkennen und ausschließen zu können, werden in rd. 1000 Versuchen mit Beton und Zementmörtel der Festigkeitsklassen B 15, B 25 und B 35 die Art der Krafteinleitung durch Verwendung von starren und schlaffen Druckplatten sowie die Schlankheit der prismatischen Probekörper mit Höhen-Seitenverhältnissen von $h/b = 4$ bis $h/b = 0,25$ variiert.

Summary

Threshold numbers for compressive testing of concrete

The strength of concrete is considered as a criterion for its quality. In order to describe the behaviour of the material also before collapse characteristic values called „threshold numbers“ are determined that divide the load bearing capacity of mineral materials –which changes with the level of loading – into several different phases. These thresholds are based on irreversible transitions in the concrete structure indicating in this way that considerable modifications of the cohesion of the material have occurred. They can be determined by means of the deformation of the material. In order to be able to find out and exclude the influence of the test method on the test results – especially strength, sound emission, energy-absorption capacity and shape factor of stress-strain curve – about 1000 tests were carried out with concrete and cement mortar of strength classes B 15, B 25 and B 35 by varying the kind of load application using rigid and flexible platens as well as by varying the slenderness of the prism-shaped test specimens with height-width ratios of $h/b = 4$ to $h/b = 0,25$.

Résumé

Valeurs seuil déterminées lors de l'essai de compression du béton

La résistance du béton est considérée comme un critère de sa qualité. En vue de définir le comportement du matériau aussi avant la limite de rupture on détermine des valeurs caractéristiques dites „valeurs seuil“ qui subdivisent la résistance de matériaux minéraux en plusieurs phases différentes. Ces seuils sont basés sur des transitions irréversibles dans la structure du béton et démontrent qu'il y a des modifications considérables de la cohérence du matériau. On peut les déterminer à partir de la déformation du matériau. En vue d'être à même de détecter et d'exclure l'influence de la méthode d'essai sur les résultats d'essai – concernant en particulier la stabilité (résistance), l'émission sonore, l'effort de déformation et l'indice de l'allure de la courbe tension-allongement – on varie dans mille essais environ réalisés avec du béton et du mortier au ciment des classes de résistance B 15, B 25 et B 35 le mode d'application de la charge en utilisant des plaques rigides et flexibles ainsi que l'élanement des éprouvettes prismatiques avec des rapports de hauteur/largeur de $h/b = 4$ à $h/b = 0,25$.

Die Untersuchungen zu diesem Bericht gehen zurück auf ein vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) finanziertes und vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) betreutes Forschungsvorhaben „Zwängungsfreie Einleitung von Druckkräften in Betonprobekörper“ (Förderungskennzeichen RK 1 I), das sich mit versuchs-technischen Voraussetzungen zur Untersuchung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung befaßte (vgl. Heft 277 DAfStb). Die in diesem Zusammenhang erprobte Prüfvorrichtung „Schlaaffe Druckplatte“ wird in der vorliegenden Arbeit für weitergehende einaxiale Druckversuche verwendet, die von der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) ermöglicht wurden.

Allen Beteiligten sei für die Förderung der Forschungsarbeit nachdrücklich gedankt.

Inhaltsverzeichnis

		Seite		
	Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	V	8	<u>Versuchsdurchführung und -auswertung</u> 41
1	<u>Einleitung und Aufgabenstellung</u>	1	8.1	Versuchsmaterial 41
			8.1.1	Ausgangsstoffe 41
			8.1.2	Frischbeton 42
2	<u>Gang der Bearbeitung</u>	1	8.2	Versuchskörper 42
			8.2.1	Herstellen der Probekörper 42
3	<u>Begriffe</u>	2	8.2.2	Probenvorbereitung 44
3.1	Stoff- und Materialkennwerte	2	8.2.3	Gütenachweis 45
3.2	Betonfestigkeit	2	8.3	Versuchsaufbau 48
3.3	Gestalt und Form von Probekörpern	3	8.4	Versuchsablauf 49
			8.5	Versuchsauswertung 49
			8.5.1	Kraftstufen 50
			8.5.2	Vollständige Arbeitslinien 50
4	<u>Druckfestigkeit und Verformung von Betonprobekörpern, Stand der Erkenntnisse</u>	4	8.5.3	Deformation der Druckflächen 52
			8.5.4	Bauchung von Seitenflächen 52
			8.5.5	Schallemissionen 54
4.1	Betonstruktur	4		
4.2	Tragverhalten	5	9	<u>Untersuchungsergebnisse</u> 55
4.3	Merkmale des Tragverhaltens	5	9.1	Bruchbilder 55
4.4	Einfluß der Probekörpergeometrie	7	9.2	Druckfestigkeit 57
4.5	Einfluß der Krafteinleitung	9	9.2.1	Probekörperfestigkeit 57
4.6	Spannungsverteilung im Probekörper	11	9.2.2	Einfluß der Probekörperherstellung 58
			9.2.3	Mittelwerte und Vertrauensbereiche 59
5	<u>Grundlegende Betrachtungen</u>	12	9.3	Verformungen 60
5.1	Dehnungsbehinderung und ihre Auswirkung	12	9.3.1	Aussagekraft von Verformungslinien 60
5.2	Einaxiale Betondruckfestigkeit	15	9.3.2	Längsstauchungen 61
5.3	Verformungsmessungen	17	9.3.3	Querdehnungen 64
5.4	Kennzeichnende Schwellen	20	9.3.4	Deformation der Druckflächen 65
5.4.1	Schwellenwerte	20	9.3.5	Bauchung von Seitenflächen 68
5.4.2	Bestimmungsmethoden	21	9.4	Schallemissionen 69
5.4.3	Mikrorißschwelle $mic\sigma_D$	22		
5.4.4	Makrorißschwelle $mac\sigma_D$	23	10	<u>Diskussion grundlegender Untersuchungsergebnisse</u> 70
5.4.5	Untere Gefügeschwelle $inf\sigma_D$	23	10.1	Festigkeitsergebnisse 70
5.4.6	Obere Gefügeschwelle $sup\sigma_D$	24	10.1.1	Bruchbild und Probekörperfestigkeit 70
6	<u>Versuchsplan</u>	26	10.1.2	Einaxiale Betondruckfestigkeit 72
6.1	Zielgrößen	26	10.1.3	Formfaktoren 74
6.1.1	Druckfestigkeit	26	10.2	Längsstauchungen 74
6.1.2	Längenänderungen	26	10.2.1	Einfluß von Probekörperschlankheit und Krafteinleitung 74
6.1.3	Schallemissionen	27	10.2.2	Einfluß der Meßmethode 76
6.1.4	Abgeleitete Kenngrößen	27	10.2.3	Unverfälschte Stauchungswerte 78
6.1.5	Deformation der Druckflächen	27	10.2.4	Form der Arbeitslinien 79
6.1.6	Bauchung von Seitenflächen	28	10.3	Verformungsarbeit 81
6.2	Versuchsprogramm	28	10.4	Querdehnverhalten 85
6.3	Probekörper	29	10.5	Kennzeichnende Schwellenwerte 87
6.4	Betonalter zum Zeitpunkt der Prüfungen	32		
7	<u>Versuchseinrichtungen</u>	33	11	<u>Zusammenfassung und Ausblick</u> 90
7.1	Prüfpresse	33		
7.2	Druckplattensysteme	33		
7.3	Meßwertaufnehmer	37		
7.3.1	Induktive Wegaufnehmer	37		
7.3.2	Näherungsinitiatoren	37		
7.3.3	Dehnungsmeßstreifen	40		<u>Schrifttum</u> 96
7.4	Meßdatenerfassung und -registrierung	40		
7.5	Meßanordnung für Schallemissionen	40		<u>Anhang: Diagramme und Tabellen</u> 102

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

A	Querschnittsfläche eines Probekörpers (in mm ²), Ausgangsquerschnitt	k	Krümmung
A_5	Querschnittsfläche eines Stempels der schlaffen Druckplatte ($A_5 = 400 \text{ mm}^2$)	l	"Länge" als allgemeiner Ausdruck für ein Maß (Abmessung)
B	Bestimmtheitsmaß (Korrelationsrechnung)	l_0	Ausgangslänge zu l (Probekörper unbelastet)
B_0, B_1, B_2 ...	Regressionskonstanten (Parameter der Regressionsrechnung)	$\Delta l = (l - l_0)$	Längendifferenz (Längenänderung bezogen auf Ausgangslänge)
E	Elastizitätsmodul (in N/mm ²)	m	Masse (in kg)
F	Kraft (in kN), Prüfkraft	n	Anzahl (insbesondere Anzahl Probekörper, Anzahl Meßwerte)
F_{25}	Angabe einer bestimmten Höhe der Prüfkraft: F beträgt 25 % der Höchstkraft (ebenso F_{98} , ...)	$r = \sqrt{B}$	Korrelationskoeffizient
F_G	Grundkraft (in kN), auf den Probekörper einwirkende Prüfkraft F bei Beginn der Verformungsmessungen	s	Standardabweichung (in der Dimension des zugehörigen Mittelwertes)
$\max F$	Höchstkraft, Prüfkraft zum Zeitpunkt des Versagens des Probekörpers	s_d	Durchschnittliche Standardabweichung (Rechengröße beim Vergleich von Mittelwerten, s. Bild A21)
L_E	Schallemission (Anzahl Impulse)	t	Prüfgröße (Student-Verteilung)
T	Temperatur (in Kelvin)	t_{95}	Größe von t bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95 %
V	Volumen (in dm ³)	x, y	Allgemeine Bezeichnung für einen Wert, z.B. Meßwert
V_D	Volumen der Deformation einer Druckfläche eines Probekörpers (nur bei Krafteinleitung über schlaffe Druckplatten)	\bar{x}	Mittelwert (arithmetisches Mittel) einer Meßreihe
V_S	Volumen der Bauchung (des untersuchten Teils) der Seitenfläche eines Probekörpers	x_0	Nullstelle der (hier mit Hilfe der Regressionsrechnung ermittelten) Funktion $y = f(x)$
VB	Vertrauensbereich des Mittelwertes einer Meßreihe	v	Meßweg (Verschiebung)
VB_{95}	Vertrauensbereich des Mittelwertes bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95 %, d.h. bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %	$w = \frac{W}{V}$	Spezifische Verformungsarbeit (in kJ/m ³), Dichte der Verformungsarbeit bzw. -energie W
W	Verformungsarbeit (in Joule, 1J = 1Nm)	α	Völligkeitsgrad (s. Abschn. 6.1.4)
a	Faktor (Rechengröße)	$\hat{\alpha}$	Geometrischer Völligkeitsgrad (s. Abschn. 6.1.4)
b	Breite eines Probekörpers (in mm)	$\beta = \frac{\max F}{A}$	Festigkeit (in N/mm ²) positiv: Zugfestigkeit negativ: Druckfestigkeit
c	Faktor (Rechengröße)	β_D	Druckfestigkeit (steht für $-\beta$)
d	Dicke eines Probekörpers (in mm)	β_e	Einaxiale ("wahre") Druckfestigkeit
$f = \frac{\beta_D}{\beta_e}$	Formfaktor, Verhältnis des am Probekörper ermittelten Wertes der Betondruckfestigkeit zur ("wahren") einaxialen Betondruckfestigkeit	β_Z	Zugfestigkeit (steht für $+\beta$)
\hat{f}	Bezugswert bei der Ermittlung von Formfaktoren	β_C	Zylinderdruckfestigkeit: β_D ermittelt an zylindrischen Probekörpern
f_W	Formfaktor bezogen auf die Würfel- druckfestigkeit (hier 100mm-Würfel)	β_P	Prismendruckfestigkeit: β_D ermittelt an prismatischen Probekörpern
h	Höhe eines Probekörpers, beim einaxialen Druckversuch Maß des Probekörpers in Richtung der Kraftwirkung	β_W	Würfel- druckfestigkeit: β_D ermittelt an Probewürfeln
		β_{W200}	Druckfestigkeit eines Probewürfels mit 200 mm Kantenlänge (sofern nicht anders angegeben im Alter von 28 Tagen geprüft nach DIN 1048 Teil 1)

β_{WN}	Nennfestigkeit des Betons nach DIN 1045, Abschn. 6.5
β_{WS}	Serienfestigkeit des Betons nach DIN 1045, Abschn. 6.5
β_{WM}	Mittlere Druckfestigkeit (in N/mm ²) einer Würfelserie, geprüft nach DIN 1048 Teil 1
δ	Meßweg (in μm), insbesondere Relativbewegung der Einzelstempel der schlaffen Druckplatte bezogen auf den Mittienstempel
ε	Auf die Ausgangslänge bezogene Längenänderung positiv: Dehnung (bezogene Verlängerung) negativ: Stauchung (bezogene Verkürzung)
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$...	Bezogene Längenänderungen bei Kraftwirkung in mehr als einer der drei Hauptrichtungen (mehraxiale Belastung)
ε_l	Längsstauchung (in Richtung der Wirkungslinie einer Druckkraft)
ε_l^{DF}	Längsstauchung gemessen auf der Oberfläche eines Probekörpers in mittlerer Höhe
ε_l^{ZT}	Längsstauchung gemessen zentrisch ("zwischen den Druckplatten") in der Achse der Kraftwirkungslinie über die gesamte Höhe eines Probekörpers
ε_q	Querdehnung (quer zur Richtung der Wirkungslinie einer Druckkraft)
ε_q^{DF}	Querdehnung gemessen auf der Oberfläche eines Probekörpers in mittlerer Höhe
ε_q^{EF}	Querdehnung gemessen auf der Oberfläche eines Probekörpers nahe der Berührungsfläche Probekörper/Druckplatte (d.h. nahe der Endfläche)
ε_q^{MT}	Querdehnung mittig (Meßachse schneidet senkrecht die Kraftwirkungslinie) gemessen in einer Ebene, die in einem Abstand von 50 mm parallel zur anliegenden Druckplatte liegt
$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_l + 2 \cdot \varepsilon_q$	Dehnungssumme (Schätzungswert für ε_{vol})
$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$	Volumendehnung
$\xi = \ln \varepsilon_l $...	Logarithmisches Maß der Längsstauchung
$\eta = \ln \varepsilon_q $...	Logarithmisches Maß der Querdehnung Hinweis: Ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit wird in dieser Arbeit bezüglich ξ und η von Mikrodehnungen ε_l und ε_q (d.h. von Beträgen in 10 ⁻⁶) ausgegangen.
δ	Bezogener Schallemissionswert L_E

$\mu = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l}$	Querdehnrzahl
ρ	Dichte (in kg/dm ³)
ρ_{Rb}	Rohdichte des Festbetons (in kg/dm ³)
σ	Normalspannung (in N/mm ²), bei einaxialer Kraftwirkung Spannung im Querschnitt senkrecht zur Kraftwirkungslinie positiv: Zugspannung negativ: Druckspannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$...	Hauptspannungen
σ_D	Druckspannung (steht für - σ)
σ_Z	Zugspannung (steht für + σ)
$inf\sigma_D$	Untere Gefügeschwelle (lat. infernus: unten befindlich); Untere Grenze der Gefügauflockerung
$sup\sigma_D$	Obere Gefügeschwelle (lat. supernus: oben befindlich); Obere Grenze der Gefügauflockerung bzw. untere Grenze der Gefügezerstörung
$max\sigma_D$	Äußerste Gefügeschwelle; Grenze der Tragfähigkeit ($max\sigma_D \approx \beta_D$)
$mic\sigma_D$	Mikrorißschwelle
$mac\sigma_D$	Makrorißschwelle
$\xi = \Delta\varepsilon_l - 2 \cdot \Delta\varepsilon_q $	Kenngröße in der Art der Volumendehnung, ermittelt aus inkrementalen Werten

Sonstige Bezeichnungen

Fußzeiger:

j	Laufvariable: $x_1, x_2, \dots, x_j \dots, x_n$
i	Ordnet eine Größe der Kraftstufe i zu
u	Ordnet eine Größe der Versagensgrenze (Höchstkraft) zu

Beton:

B25	Bezeichnung einer Betonfestigkeitsklasse nach DIN 1045
B25/16	Betonfestigkeitsklasse mit Angabe des Zuschlag-Größtkorns (16 mm)

Ausgezeichnete Spannungswerte

$dis\sigma_D$	Diskontinuitätsgrenze, gekennzeichnet durch die Lage des Wendepunktes der Linie der Volumendehnung
$crit\sigma_D$	Kritische Druckspannung, gekennzeichnet durch Minimum der Volumendehnung
$ver\sigma_D$	Scheitelpunkt der Spannungs-Stauchungslinie (lat. vertex: Scheitel)

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Eigenschaften von Werkstoffen lassen sich anhand von Kennwerten beschreiben. So gibt der Festigkeitswert Auskunft über das Widerstandsvermögen gegenüber mechanischer Beanspruchung; er bezieht sich auf die im Kurzzeitversuch ermittelte maximale Tragfähigkeit eines Materials. Um die Widerstandsfähigkeit auch unterhalb der Versagensgrenze darzustellen, sind weitere Kenngrößen notwendig. Zusammen mit dem Festigkeitswert geben diese dann ein vollständigeres Bild des Materialverhaltens. Im Metallbau dienen hierzu sogenannte Grenzwerte, wie z.B. die Elastizitätsgrenze bzw. die $\sigma_{0,2\%}$ -Grenze und die Fließgrenze. Demgegenüber sind im Betonbau derartige Kennwerte bisher weitgehend unbekannt.

Es ist Ziel der vorliegenden Arbeit, auch für Beton einschließlich Zementmörtel einige solcher charakteristischen Kenngrößen unterhalb der Festigkeitsgrenze zu ermitteln und hierzu Bestimmungsmethoden aufzuzeigen. Bei mineralischen Baustoffen werden diese Grenzwerte nachfolgend Schwellenwerte genannt. Sie beruhen auf mechanisch-irreversiblen Übergängen im Gefüge eines Stoffes und grenzen beim Druckversuch die einzelnen Phasen der Rissefreiheit, Gefügauflockerung und -zerstörung gegeneinander ab. Die Kenntnis derartiger Schwellenwerte ist sowohl für die Grundlagenforschung als auch für die Baupraxis von Interesse, wo sie in Stoffgesetzen, bei numerischen Methoden der Bemessung komplizierter Bauteile und für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen benötigt werden.

Zur Ermittlung der Schwellenwerte sind Druckversuche erforderlich. Die maßgebenden Änderungen im Betongefüge sind dabei allerdings einer direkten Beobachtung nicht zugänglich. Auch ist unbekannt, ob die grundlegenden versuchstechnischen Parameter - wie Größe und Geometrie des Probekörpers, Steifigkeit der Druckplatten und Prüfmaschine usw. - die Schwellenwerte in gleicher Weise beeinflussen wie nachweislich die Betonfestigkeit. Man muß deshalb im Versuchsprogramm wichtige Parameter systematisch derart verändern, bis die unvermeidbare Wechselwirkung zwischen Werkstoffverhalten und Versuchsbedingungen keinen nennenswerten Einfluß mehr auf den gesuchten Kennwert hat.

Als maßgebende Parameter werden die Probekörperschlankheit und die Art der Kräfteinleitung mit zwei völlig unterschiedlichen Druckplattensystemen variiert,

und zwar mit herkömmlichen starren und den aus gebündelten Einzelstempeln bestehenden schlaffen Druckplatten. Derartige Parallelversuche ermöglichen es schließlich, die Schwellenwerte auf zwei verschiedenen Wegen zu bestimmen. Dies dient - da die Literatur keine ausreichenden Vergleichsmöglichkeiten bietet - der notwendigen Kontrolle der Resultate und gibt zusätzlich Aufschluß über den Einfluß wichtiger Parameter beim Druckversuch, insbesondere zur Abhängigkeit der Betonfestigkeit von der Probekörperschlankheit bei zwängender im Vergleich zu zwängungsarmer Kräfteinleitung.

2 Gang der Bearbeitung

Der Sprachgebrauch in Festigkeitstheorie, Baupraxis und Materialprüfung ist teilweise unterschiedlich. Es sind daher zunächst einige Begriffe zu erläutern, wie sie in der vorliegenden Arbeit verwendet werden. So wird zwischen der Gestalt und der Form von Probekörpern unterschieden. Insbesondere erfordert die hier vorgesehene parallele Versuchsdurchführung mit zwei verschiedenen Kräfteinleitungssystemen einen geeigneten Bezugswert für die Festigkeitsergebnisse. Dieser muß von den Versuchsbedingungen unabhängig sein und sich mit beiden Prüfsystemen gesondert bestimmen lassen. Der Begriff der "wahren" Betonfestigkeit wird diskutiert und außerdem zwischen Material- und Stoffkenngrößen unterschieden.

Dann werden kurz diejenigen Eigenschaften von Beton angesprochen, die für die nachfolgenden Untersuchungen besondere Bedeutung haben. Aus der Vielzahl von Einflüssen, denen Beton von seiner Herstellung an unterliegt, sind dabei nur diejenigen genannt, die aus der Sicht dieser Arbeit seine Festigkeit und Verformung maßgeblich bestimmen.

Ausführlicher wird sodann der Stand der Kenntnisse zum äußerlich erkennbaren Widerstandsvermögen des Betons gegenüber mechanischer Druckbeanspruchung dargestellt. Die hieraus entwickelten Überlegungen führen zu einem Lösungsweg zur Ermittlung der "wahren" Betonfestigkeit. Hieran anschließend werden die als Ergebnis der vorliegenden Arbeit gesuchten, als Schwellenwerte bezeichneten Kennwerte des Festbetons erläutert, zu ihrer Bestimmung bekannt gewordene Verfahren kritisch überprüft, z.T. erweitert und eine neue Bestimmungsmethode entwickelt. Aus diesen Vorstellungen ergeben sich dann die Zielgrößen und das Versuchsprogramm mit rd. 1000 Probekörpern.

Die Versuchsauswertung erstreckte sich über mehrere Jahre. Mit elektronischer Datenverarbeitung wurden mehr als 1 Mill. Werte auf Magnetbändern gespeichert und daraus die nachfolgend auszugsweise wiedergegebenen Verformungslinien des Betons, die Ganglinien der Schallemissionen usf. ermittelt. Eingeschlossen waren dabei Teilaufgaben, wie die Berücksichtigung des Zeiteinflusses bei Meßabfragen unter kontinuierlichem Kraftanstieg, die Bestimmung der Lage der Spannungs-Stauchungslinie im Bereich des Ursprungs (Berücksichtigung des "Anlaufs") sowie vor allem das Problem der Verformungsmessung an gedungenen Probekörpern. Aus Messungen "zwischen den Druckplatten" und meist hiervon abweichenden, an mittleren Teilbereichen der Probekörperoberflächen gewonnenen Ergebnissen mußte die tatsächliche Betonverformung bestimmt werden. Besondere Überlegungen hinsichtlich Versuchstechnik und -auswertung erforderte schließlich auch die - soweit bekannt erstmalige - Beobachtung der Deformation der Probekörperdruckflächen.

Der Aufgabenstellung entsprechend sind die ermittelten Verformungswerte jedoch nicht die eigentlichen Ergebnisse der Untersuchung, sondern Hilfsgrößen, welche Informationen über Änderungen im Gefüge des druckbeanspruchten Betons enthalten. Sie sind allerdings meist durch die Art der Versuchsdurchführung beeinflusst. Die Diskussion der Versuchsergebnisse konzentriert sich daher zunächst auf die Frage der Zuverlässigkeit der Aussagen, indem wiederholt zwischen den voneinander unabhängig gewonnenen Resultaten aus den Parallelversuchen mit starren und schlaffen Druckplatten verglichen wird.

Aus den so überprüften, auf die ermittelte "wahre" Betonfestigkeit bezogenen Versuchsdaten, können dann die gesuchten Schwellenwerte des Betons bestimmt werden.

3 Begriffe

Die nachfolgenden Untersuchungen sind sowohl Teil der nach R ü s c h /R14/ gleich wichtigen Grundlagen - wie Zweckforschung. Damit werden zwei Bereiche mit teilweise eigenständigen Begriffsbestimmungen miteinander verknüpft. Die Verwendung einiger Begriffe muß daher erläutert werden.

3.1 Stoff- und Materialkennwerte

Beton wird in erster Linie nach seiner Druckfestigkeit beurteilt. Die Zuordnung

zu einer Festigkeitsklasse erfolgt nach Prüfungsergebnissen, welche gemäß DIN 1048 /D3/ an Versuchskörpern bestimmter Größe und Gestalt unter bestimmten Versuchsbedingungen ermittelt werden. In DIN 1045 /D2/ sind die Regeln zur Güteprüfung von Beton festgelegt. Es sind bewährte, vom Umfang her bewußt beschränkt und von der Durchführung her einfach gehaltene Materialprüfungen, die als technologische Prüfungen anzusehen sind. Darunter sind nach R i e d l e r /R6/ Versuche zu verstehen, in deren Ergebnisse die Art der Versuchsdurchführung mit eingeht; die Versuchsergebnisse sind Materialkennwerte, aber nicht notwendigerweise Stoffkennwerte. Als Stoffkennwerte können sie nur gelten, wenn tatsächlich allein stoffabhängige Parameter das Versuchsergebnis bestimmen. Wie die in DIN 1045 angegebene Abhängigkeit der Würfeldruckfestigkeit von der Größe der Probekörper bereits zeigt, trifft dies offensichtlich für Betonstandardprüfungen nicht zu. Bei Normprüfungen ergeben sich vielmehr Kraftwirkungen auf den Probekörper, die nicht eindeutig faßbar und daher auch nicht auf die Verhältnisse im Bauteil übertragbar sind. Wie N e w m a n /N10/ hervorhebt, stellen solche Prüfungsergebnisse somit nur ein indirektes Maß für die mechanischen Eigenschaften des Betons dar.

Für den Konstrukteur sind derartige Materialkennwerte dennoch wichtige Vergleichs- und Bezugswerte. Auf sie beziehen sich die Rechenfestigkeit und die zulässigen Spannungen, die den Bemessungsverfahren im Betonbau zugrunde liegen. Für Stoffgesetze jedoch, die den Zusammenhang zwischen Kraft- und Verformungsgrößen beschreiben, werden versuchs-unabhängige Stoffkennwerte benötigt. Materialkenngrößen können diese nur näherungsweise ersetzen.

3.2 Betonfestigkeit

Unter Betonfestigkeit wird die obere Grenze des Widerstandsvermögens des Baustoffs Beton gegenüber äußeren Krafteinwirkungen verstanden. Wird dieser phänomenologische Begriff durch Angabe der Art der Beanspruchung ergänzt - wie z.B. in "Betondruckfestigkeit" -, so soll er damit gleichzeitig als Materialkennwert ausgewiesen werden (apparent strength). Für die Wertung einer derartigen Größe müssen die Randbedingungen bekannt sein, unter denen der Festigkeitswert ermittelt wurde. Sind demgegenüber die Versuchsbedingungen ohne Einfluß auf das Festigkeitsergebnis, so stellt dieses einen Stoffkennwert - auch als Stoffkon-

stante bezeichnet - dar. In diesem Fall wird die Druckfestigkeit des Betons häufig als "wahre" /F₂/, "tatsächliche" /L₃/, mitunter auch als "wirkliche" Betondruckfestigkeit bezeichnet.

Auch in der vorliegenden Arbeit wird unter der Druckfestigkeit von Beton stets ein auf einen bestimmten Probekörper bezogener Festigkeitswert verstanden (Probekörperfestigkeit), dessen Aussagekraft unter ganz bestimmten Versuchsbedingungen zu sehen ist. Im einzelnen werden wie üblich die Würfeldruckfestigkeit mit β_W , die Zylinderdruckfestigkeit mit β_C und die Prismenfestigkeit mit β_P bezeichnet.

Als übergeordneter Begriff, der sich nicht auf eine bestimmte Probekörperform bezieht, aber von den jeweiligen Versuchsbedingungen abhängt, wird β_D für die Druckfestigkeit von Betonprobekörpern verwendet.

Um den wesentlichen Unterschied zu dieser Probekörperfestigkeit hervorzuheben, wird hier der von Versuchsbedingungen einschließlich Probekörpergeometrie unbeeinflusste Wert der Betondruckfestigkeit - d.h. die "wahre" Druckfestigkeit von Beton - als *axiale* Betondruckfestigkeit bezeichnet. Durch den Zusatz "axial" soll dieser Festigkeitswert deutlich als Stoffkonstante hervorgehoben werden. Ein einaxialer Festigkeitswert bedingt im Sinne der Stoffmechanik eine einaxiale Spannungsverteilung im Probekörper. Wie üblich, wird dabei idealisierend angenommen, daß ein Körper aus beliebig kleinen Körperelementen besteht, die alle dasselbe Stoffverhalten zeigen (Körper ist homogen und isotrop).

Die Versagensgrenze des Betons bei Kraftwirkung in mehr als einer der drei Richtungen des Raumes ist danach als mehraxiale Betonfestigkeit zu bezeichnen. Hierbei kann es sich grundsätzlich auch um Zugfestigkeit handeln. Es muß deshalb die allgemeine Vorzeichenregel gelten, wonach Druckspannungen durch ein negatives und Zugspannungen durch ein positives Vorzeichen gekennzeichnet sind.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich ausschließlich mit einaxialen Druckversuchen. Um negative Zahlenwerte zu vermeiden, wird die einaxiale - nach o.a. Erläuterungen "wahre" - Betondruckfestigkeit (uniaxial compressive strength /H14/) mit β_e bezeichnet.

3.3 Gestalt und Form von Probekörpern

Unter Gestalt ist das äußere Erscheinungsbild eines Körpers zu verstehen *). Ein Vollzylinder hat danach eine andere Gestalt als ein Hohlzylinder. Der eine ist einfach, der andere zweifach zylindrisch. Ebenso hat ein Betonzylinder eine andere Gestalt als ein Betonwürfel oder als ein Betonpflasterstein (Bild 3.1). Körper gleicher Gestalt sind im mathematischen Sinne ähnlich; sie stimmen in den wichtigsten geometrischen Merkmalen überein.

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Gestalt häufig mit Form des Probekörpers gleichgesetzt. In der Materialprüfung ist es jedoch zweckmäßig, diese beiden Begriffe getrennt zu halten, um zwischen völlig unterschiedlichen (verschiedene Gestalt) und gleichartigen Probekörpern (gleiche Gestalt, aber z.B. unterschiedliche Größe) unterscheiden zu können. Verschieden große Betonwürfel zum Beispiel haben danach dieselbe Gestalt, aber unterschiedliche Form.

Nach dieser Festlegung der Begriffe sind die in DIN 1045 /D2/ im Abschnitt 7.4.3.5.3 genannten Umrechnungsfaktoren für den Bezug von Zylinderdruckfestigkeiten β_C auf Würfeldruckfestigkeiten β_W als Gestaltsbeiwerte zu bezeichnen. Demgegenüber finden sich Formfaktoren in der britischen Norm für Betonprüfungen. Dort werden Korrekturfaktoren für den Bezug unterschiedlich schlanker Bohrkern auf die Festigkeit eines Kerns mit einem Höhen-/Durchmesser Verhältnis von $h/d = 2$ angegeben /B2/.

Die vorliegende Arbeit untersucht das Festigkeitsverhalten prismatischer Probekörper. Platten und Würfel werden hierbei als Sonderfälle eines Prismas angesehen und in die Untersuchungen mit einbezogen. In Bild 3.1 ist der untersuchte Bereich der Probekörperformen durch starke Umrandung hervorgehoben.

*) Gestalt im Sinne der technischen Morphologie ist nicht bloße Vielfalt, sondern gesetzmäßige Ganzheit von Bestandteilen der äußeren Erscheinung (aus Meyers Enzyklopädischen Lexikon, 9. Auflage, Mannheim 1974)

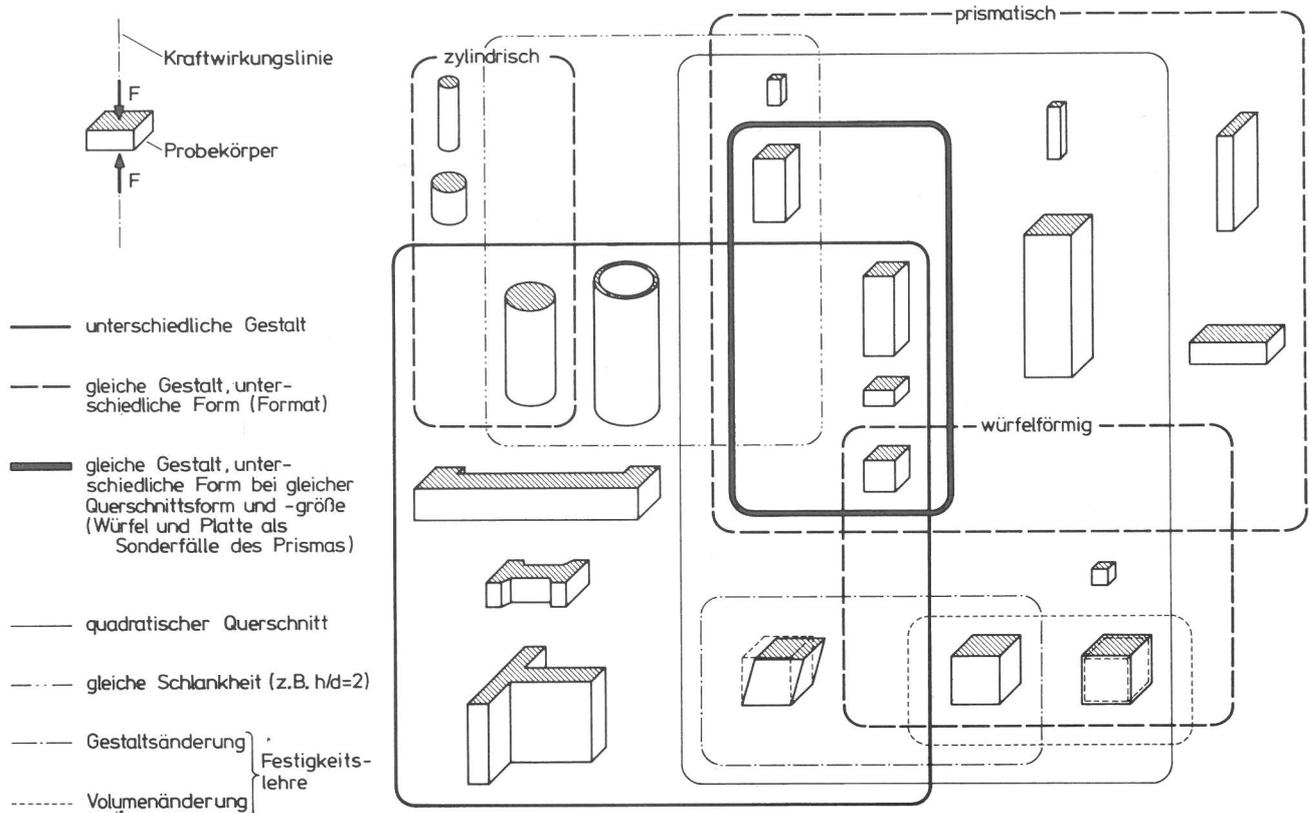


Bild 3.1

Schema zur Verdeutlichung der Begriffe "Gestalt" und "Form": Probekörper haben nur dann dieselbe Form, wenn sie einander völlig gleich sind. Sind sie lediglich ähnlich - wie z.B. unterschiedlich große Würfel - so haben sie dieselbe Gestalt, aber nicht dieselbe Form

4 Druckfestigkeit und Verformung von Betonprobekörpern, Stand der Erkenntnisse

Berichte über Untersuchungen zur Bestimmung der Festigkeit und Verformung von Betonprobekörpern sind überaus zahlreich. Für Normalbeton haben E i b l und I v á n y i /E2/ 1976 eine sehr umfangreiche Literaturstudie vorgelegt. Die Diskussion der Erkenntnisse kann sich daher im folgenden auf solche Komponenten der Betonprüfung beschränken, die für die vorliegende Problemstellung von übergeordneter Bedeutung sind.

4.1 Betonstruktur

Beton ist ein nichtmetallischer, anorganischer Baustoff, der aus Zuschlägen, Zement, Wasser sowie ggf. Zusätzen hergestellt wird und ein bestimmtes Porenvolumen aufweist. Er ist vom Aufbau her heterogen, verhält sich hinsichtlich Verformung, Festigkeit und Bruchvorgang anisotrop, wird aber bei Festigkeitsbetrachtungen allgemein als statistisch isotroper Stoff angesehen, wenn die größten Zuschlagkörner klein gegenüber den Abmessungen des Betonkörpers sind.

Beim Mischen von Zement und Wasser entsteht Zementleim, der aufgrund chemischer und physikalischer Vorgänge zu Zementstein erhärtet. Mit den Feinstanteilen des Betonzuschlags bildet dieser einen als Matrix bezeichneten Feinstmörtel, in dem die größeren Zuschläge eingebettet sind. Beton wird daher in neueren Forschungsarbeiten als ein Zweistoffsystem aus Matrix und Zuschlag angesehen (u.a. /M2/, Bild 44 in /H13/). Diese Betrachtungsart eignet sich besonders gut für strukturorientierte Untersuchungen /H11, S5/. Es können auf diese Weise zur Deutung des Versagensmechanismus von Beton Rissebildungen in der Matrix und an den Grenzflächen der Matrix mit den Zuschlägen /L6/ sowie die Rolle der Zuschlagkörner als Reißbremse /H9/ beschrieben werden

Die Eigenschaften von Beton ändern sich mit dem Alter beträchtlich. Sie sind auch abhängig vom Feuchtigkeitsgehalt. Zu schnelles Trocknen kann zu Rissebildungen an den inneren Grenzflächen führen. Andererseits werden durch das Austrocknen die Bindekräfte zwischen den Partikeln insgesamt erhöht und dadurch höhere Druckfestigkeiten bewirkt /N10/. Um diese Einflüsse auszuschließen, müs-

sen deshalb vergleichende Untersuchungen bei festgelegtem Betonalter und unter stets gleichbleibenden Versuchsbedingungen durchgeführt werden.

Bei Normalbeton mit dichtem Gefüge werden die mechanischen Eigenschaften überwiegend durch die Eigenschaften des Zementsteins - bzw. der Matrix - und durch die Menge der darin eingeschlossenen luft- und wassergefüllten Poren bestimmt. Dies führt zu einem Tragverhalten, das in erster Näherung dem eines elastisch-viskosen Festkörpers entspricht.

R a s c h , C o r d e s u.a. /R1,C1/ berichten hierzu über Modellvorstellungen, bei denen im Sinne der Rheologie (vgl. Abschn. 36 in /F3/ oder Bild 4 in /H2/) das Verhalten eines Betonkörpers unter einer Spannung bzw. unter einer aufgezwungenen Stauchung mit einer Kombination aus Maxwell- und Kelvin-Elementen beschrieben wird. Ein erheblicher Teil der aufgebrachten Energie wird danach im Betonkörper nicht elastisch gespeichert, sondern verzehrt. Dieser Verlust an durch Rückfederung wiedergewinnbarer Energie wird durch den heterogenen Aufbau des Betons mitverursacht. Im Innern eines Körpers treten bei einer derartigen Betonstruktur erhebliche Spannungsspitzen auf /G7,H9/, die zur Bildung innerer Oberflächen in Form von örtlichen Mikrorissen und Zerquetschen einzelner Partikelchen führen /W11/. Bei steigender äußerer Druckbeanspruchung zeigen sich schließlich auch unmittelbar plastische Verformungen /R12/. Dadurch wird weitere zugeführte Energie verbraucht, ebenso auch durch innere Dämpfung. Die Tragfähigkeit von Beton endet daher nicht unmittelbar, wenn die Speicherfähigkeit an elastischer Energie erschöpft ist. Auch im Kurzzeitversuch ist somit sein Versagen nicht ausgesprochen spröde.

4.2 Tragverhalten

Die obere Grenze der Tragfähigkeit wird als Versagensgrenze bezeichnet. Sie ist keinesfalls mit dem Bruch des Betonkörpers gleichzusetzen. Der Bruch ist vielmehr ein Vorgang, der bereits bei sehr geringen Kraftstufen beginnt und erst nach der erreichten Höchstkraft endet.

In der Regel braucht ein Stoff eine gewisse Zeit, um sich aufgezwungenen Verformungen anzupassen. Nach B e r g treten dabei im Beton - den Verformungseigenschaften seiner Komponenten entsprechend - inhomogene Spannungsfelder auf. Diese stehen in Wechselwirkung zu weiteren Spannungsfeldern, die sich aus der

komplexen Struktur des Zementsteins und seinem Zusammenwirken mit den Zuschlägen ergeben /B5/. Vornehmlich in den Kontaktzonen der Matrix mit den Zuschlagkörnern bilden sich zunächst vereinzelt Mikrorisse. Gleichzeitig können sich andere Risse erweitern, die z.B. bereits im unbelasteten Zustand - begünstigt durch den Wasserverlust und das damit verbundene Schrumpfen und Schwinden des Zementsteins - entstanden sind /H16/. Mit der fortschreitenden Bildung von Mikrorissen und deren Vereinigung zu größeren Rissen beginnt der eigentliche komplexe Bruchvorgang. Aus einem örtlich begrenzten Zerfall entsteht bei ansteigender Krafteinwirkung allmählich ein zusammenhängendes Netz von Diskontinuitäten, die schließlich zur Ausbildung durchgehender Bruchflächen führen. Wird eine kritische Stauchung erreicht, so zerfällt der Betonkörper in Form von Gleitbrüchen. Das Überschreiten einer kritischen Dehnung führt demgegenüber zu Trennbrüchen /R8/.

4.3 Merkmale des Tragverhaltens

Die Druckfestigkeit ist zwar ein grundlegendes Merkmal des Widerstandsvermögens von Beton gegenüber äußerer Krafteinwirkung, im Zuge der ständigen Bemühungen um höhere Ausnutzung der vorhandenen Materialeigenschaften reicht eine einzige Kenngröße zur Beschreibung des Tragverhaltens aber nicht aus. Der Festigkeitswert kann als Einzelwert keine Auskunft geben über das Verhalten von Beton während ansteigender Druckbeanspruchung. Eine derartige Kenntnis ist aber notwendig, um z.B. Gebrauchslasten im Hinblick auf die Begrenzung schädlicher Rissebildungen festlegen zu können. Die Betonfestigkeit ist somit nur ein Eckwert, der die obere Grenze der Tragfähigkeit ausweist. Zur vollständigen Angabe des Tragverhaltens vor dem Versagen eines Probekörpers bzw. Bauteils müssen noch weitere kennzeichnende Druckspannungswerte hinzukommen, die eine Beurteilung von Änderungen im Betongefüge während zunehmender Krafteinwirkung gestatten.

Mit den zur Verfügung stehenden Meßmethoden sind Änderungen im Gefüge des Betons allerdings nicht unmittelbar zu bestimmen. Auf das Geschehen im Inneren des Betons während eines Versuchsablaufs muß daher indirekt aus dem äußeren Erscheinungsbild des Probekörpers geschlossen werden.

Hierzu stehen unmittelbar zwei voneinander unabhängige Meßgrößen zur Verfügung:

die Längsstauchung ϵ_L und die Querdehnung ϵ_Q . Wie L. ' H e r m i t e und R ü s c h /H8,R14/ bereits in den 50er Jahren und später F ä c ç o a r u et al. /F1/ gezeigt haben, ist der Rißfortschritt im Beton außerdem durch Schall-Laufzeitmessungen und durch die Aufnahme von Eigengeräuschen (Schallemissionen) nachzuweisen. Die mit der Prüfung auf Druckfestigkeit gegebene einparametrische Materialbeschreibung erweitert sich so zur mehrfach-parametrischen Charakterisierung des Widerstandsvermögens von Beton und zielt nicht nur auf die obere Grenze der Tragfähigkeit, sondern schließt das gesamte Widerstandsverhalten bis zu diesem Grenzwert mit ein (Bild 4.1).

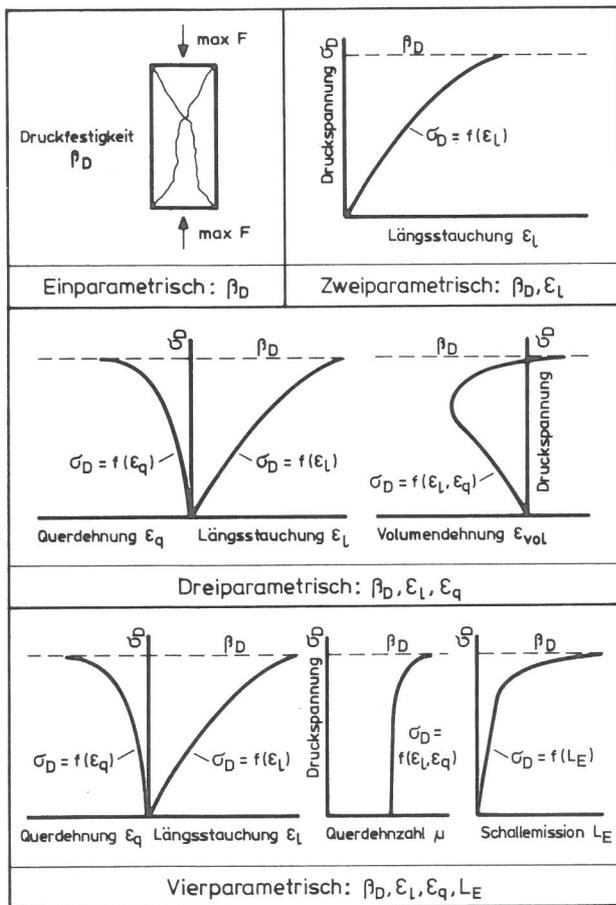


Bild 4.1

Mehrfach-parametrische Charakterisierung des mechanischen Widerstandsvermögens von Beton bei Druckbeanspruchung

Die mit steigender Druckspannung σ_D einhergehenden Gefügeänderungen im Beton werden in der Literatur /G9,K1/ in eine stabile und eine anschließende instabile Phase der Rissefortpflanzung unterteilt. Erstere ist anfänglich gekennzeichnet durch vereinzelte Mikrorißbildungen, die bei höheren Druckspannungen zu Gefügeauflockerungen führen. In der instabilen

Phase erweitern sich dann die Rissebildungen, schließlich wird das Betongefüge zerstört. Nach bisher vorliegenden Angaben liegt der Übergang von der stabilen zur instabilen Phase etwa bei 75 % der Prismendruckfestigkeit /E2/.

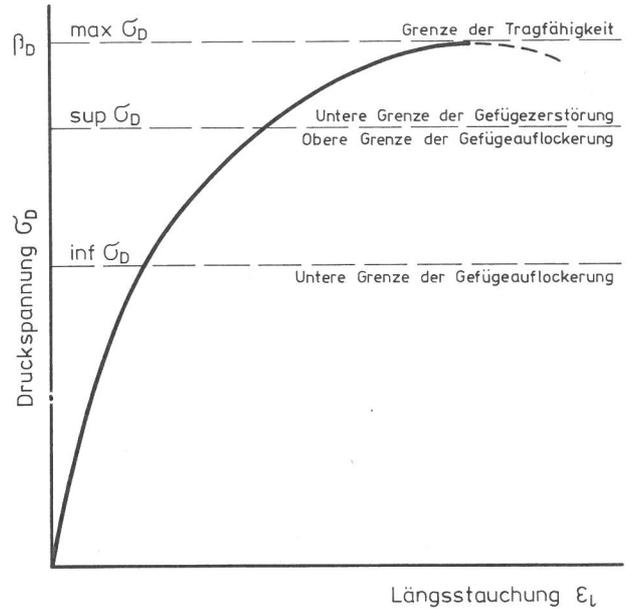


Bild 4.2

Charakteristische Zustände der Gefügeänderungen im Beton bei mechanischer Beanspruchung

In Bild 4.2 sind diese Zustände der Rissebildungen der Spannungs-Dehnungslinie von Beton gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß es nicht ohne weiteres möglich ist, aus dieser Kurve quantitative Aussagen über die Größe der einzelnen Phasen im Zustand des Betongefüges bei zunehmender mechanischer Beanspruchung zu gewinnen.

Eine Analyse der Querdehnungslinie führt zu demselben Ergebnis. Erst eine Kombination der beiden unabhängigen Meßgrößen für die Längsstauchung und Querdehnung des Probekörpers läßt die charakteristischen Übergänge im Tragverhalten von Beton deutlicher hervortreten /D9/.

So nimmt der anfänglich etwa konstante Wert des Quotienten aus Querdehnung und Längsstauchung, d.h. die Querdehnzahl μ /A1/, bei höheren Druckspannungen deutlich zu (Bild 4.1). B e r g /B5/ bezeichnet diesen Spannungswert, bei dem die Querdehnzahl von ihrem ursprünglichen Wert abzuweichen beginnt, als "ersten parametrischen Punkt". Dieser charakterisiert das Ende der Phase der Verdichtung, bei dem sich das Volumen des Probekörpers laufend verringert. Nach Ansicht von R ü s c h /R15/ tritt in die-

ser Anfangsphase bis etwa 55 % der Höchstkraft auch eine gewisse Verfestigung ein, wobei sich etwa schon vorhandene innere Gefügerisse teilweise wieder schließen.

Bei höheren Druckspannungen beginnt die Phase der Gefügauflockerung /B11/. Beim Druckversuch geht dann die Volumenabnahme des Probekörpers entsprechend langsamer voran. Der "erste parametrische Punkt" ist daher ebenfalls gekennzeichnet durch die Lage des Wendepunktes der Kurve der Volumendehnung ϵ_{vol} (Bild 4.3). Auch K. Newman /N12/ sieht hier den Beginn einer merklichen Mikrorißbildung und nennt die Höhe der zugehörigen Druckspannung "Diskontinuitätsgrenze" (discontinuity point). Er bestimmt sie zu etwa 50 bis 60 % der maximalen Druckspannung /N10/. Andere Autoren erwarten den Beginn der Rissebildung zwischen 40 und 60 % /U1/ bzw. bei 50 bis 75 % /H8/ der Probekörperfestigkeit.

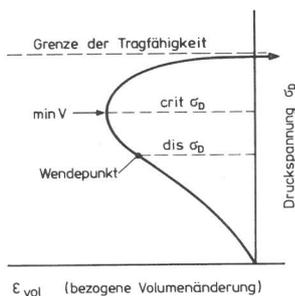


Bild 4.3
Ermittlung der Diskontinuitätsgrenze $dis \sigma_D$ und der kritischen Druckspannung $crit \sigma_D$ anhand der Volumendehnung ϵ_{vol}

Bei weiter ansteigender Druckspannung wird nach Brandt z a e g /B13, R4/ ein dritter Abschnitt im Zustand des Betongefüges mit einer kritischen Spannung $crit \sigma_D$ erreicht, von der an das Volumen des Probekörpers nicht mehr ab-, sondern wieder zunimmt. Bereits ein geringfügiges Überschreiten dieser Grenze genügt, daß die Rissebildung im Probekörper selbständig fortschreitet. Es ist dann nur noch eine Frage der Zeit, wann durch viskose Vorgänge die innere Reibung aufgehoben wird, die vorübergehend eine höhere Tragwirkung erlaubt /R15/. B e r g bezeichnet diese kritische Druckspannung, die durch das minimale Volumen des Probekörpers gekennzeichnet ist, als "zweiten parametrischen Punkt". Nach S h a h und C h a n d r a /S17/ liegt dieser bei einem desto höheren Prozentsatz der Prismenfestigkeit, je feinkörniger der Betonzuschlag ist. Für Zementstein fand S p o o n e r /S22/ überhaupt keine minimale Volumendehnung, sondern ein mit steigender Druckspannung bis zur Höchstkraft kontinuierlich abnehmendes Volumen der Versuchskörper. Über-

einstimmend gehen die genannten Autoren davon aus, daß der im Anschluß an die anfängliche Verdichtung sich abzeichnende Übergang ebenso wie die spätere Volumenzunahme (Bild 4.3) auf Rissebildungen im Grenzbereich zwischen Zuschlagkörnern und Zementstein zurückzuführen ist.

4.4 Einfluß der Probekörpergeometrie

L e w i c k i /L3/ hat darauf hingewiesen, daß alle bisherigen Kenntnisse über die Beziehung zwischen der Geometrie des Probekörpers und der Betondruckfestigkeit rein empirisch sind. Für die vorliegende Arbeit ist zu klären, ob sich Hinweise auf einen gesicherten Weg zur Bestimmung der "wahren" Betonfestigkeit finden.

In einigen Veröffentlichungen wird die Tragfähigkeit von Beton bei besonderen Querschnittsformen diskutiert /W1/. Meist setzen sich die Arbeiten aber mit den Festigkeitsunterschieden zwischen verschiedenen großen Betonwürfeln auseinander /G2, N6, D12/ oder behandeln den Festigkeitsvergleich gängiger Probekörper untereinander, wie Würfel, Prisma und Zylinder /H6, K7, L2, R7, S21, W3/. Dabei wird festgestellt, daß für Beton mit Leichtzuschlag andere Verhältniswerte der Probekörperfestigkeit gelten, als für Normalbeton /K2, R11/.

L ' H e r m i t e , B o n z e l , N e w m a n , A l b r e c h t , P o p o v i c s u. a. /H8, B10, N10, A2, P6/ haben versucht, die bisherigen Erkenntnisse zusammenzufassen und allgemeingültige Aussagen zu finden. 1971 sind die von P e t e r s o n s zusammengestellten Ergebnisse eines internationalen Joint Committee erschienen /P1/. Die Vergleichsmöglichkeiten zwischen den vielfältigen Untersuchungsergebnissen mit Probekörpern unterschiedlicher Form und Gestalt bleiben trotzdem sehr erschwert.

Für den Einfluß der Probekörpergeometrie auf die Betondruckfestigkeit werden verschiedene Gründe angeführt /G1/. Wie bei anderen Werkstoffen /B9, S2, Bild 27 in H2/, so wird auch bei Beton das augenscheinliche Festigkeitsverhalten vor allem mit der Probekörperschlankheit in Verbindung gebracht. Als Schlankheit h/d (Zylinder) oder h/b (Prisma) wird hierbei das Verhältnis der Höhe eines Probekörpers zur kleinsten Querschnittsabmessung bezeichnet.

Daneben zeigt ein und derselbe Beton aber auch eine Abhängigkeit des Festigkeitsergebnisses vom Volumen und von der Querschnittgröße des Probekörpers. Mit geringeren Abmessungen nimmt in der Regel die

Druckfestigkeit zu. Eine Erklärung wird u.a. darin gesehen, daß bei größeren Betonkörpern die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von festigkeitsmindernden Schwachstellen höher ist /P4,W6/. Daneben wird in der Literatur auf eine Reihe anderer betontechnologischer Einflüsse hingewiesen, die S c h l e e h in /S15/ zusammengestellt hat.

Auch N e v i l l e /N7/ geht davon aus, daß die Probekörperfestigkeit eine Funktion dieser drei Variablen Schlankheit, Volumen und Querschnitt ist. Der auf das Volumen beziehbare Einfluß zeigt sich z.B. bei den bekannten Umrechnungswerten für Betonwürfel mit 100, 150 oder 200 mm Kantenlänge /D12,I3,N10/. Ähnliche Verhältnisse gelten für zylindrische Probekörper. So weist ein Probezylinder mit einem Durchmesser von 100 mm bei gleicher Schlankheit $h/d = 2$ einen größeren Festigkeitswert auf als ein solcher mit $d = 250$ mm /R7/. Allgemein wird ferner festgestellt, daß die Festigkeitsergebnisse desto mehr streuen, je kleiner die Versuchskörper sind /H1,N6/.

Weil die Geometrie derart entscheidend für das Festigkeitsergebnis ist, wird immer wieder über die günstigste Gestalt - Würfel oder Zylinder - und die zweckmäßigste Größe von Probekörpern diskutiert /H1,K7,R13/. Um die Vielfalt der möglichen Formen einzugrenzen, sind schließlich international Vorzugsgrößen für Zylinder und Würfel festgelegt worden /I1,I2/. Dennoch bleiben das Problem der Umrechnung von Betonfestigkeiten und die bei der Angabe pauschaler Umrechnungsfaktoren /D2/ unvermeidbaren Unsicherheiten. Für die Beurteilung von Festigkeitswerten, die an dünnen Probekörpern ermittelt werden, finden sich in der Literatur überhaupt nur in wenigen Ausnahmefällen Angaben, und dann selten für den Baustoff Beton /D1,D4,S7,T3/, s.a. Bild A1. Für dünnformatige Ziegel wird in diesem Zusammenhang die Umrechnung der Einzelsteinfestigkeit auf die Druckfestigkeit eines Modellwürfels mit 100 mm Kantenlänge nach einer in /T2/ angegebenen Formel empfohlen.

Bei der üblichen Prüfung mit starren Druckplatten können die ermittelten Festigkeitswerte nur bei ausreichend schlanken Probekörpern üblicher Abmessungen ohne Umrechnung miteinander verglichen werden. Hierzu muß die Schlankheit bei prismatischen Betonkörpern etwa $h/b = 3$ und bei Betonzylindern mindestens $h/d = 2$ betragen. Die erhaltenen Werte werden dann "Prismenfestigkeit" bzw. "Zylinderfestigkeit" genannt. Bei gleicher

Größe der Druckfläche stimmen sie erfahrungsgemäß überein /R12/. Sie werden daher häufig als Bezugswerte für die an anderen Probekörpern ermittelte Druckfestigkeit verwendet /A5,S20/. Die Prismenfestigkeit als "wahre" - in dieser Arbeit als "einaxial" bezeichnete - Betondruckfestigkeit anzusehen, ist jedoch ungenau /L3/. Soweit aus dem Schrifttum /D10,D11/ ersichtlich, existiert aber noch keine anerkannte Methode zur Bestimmung einer von den Versuchsbedingungen unbeeinflussten Betondruckfestigkeit.

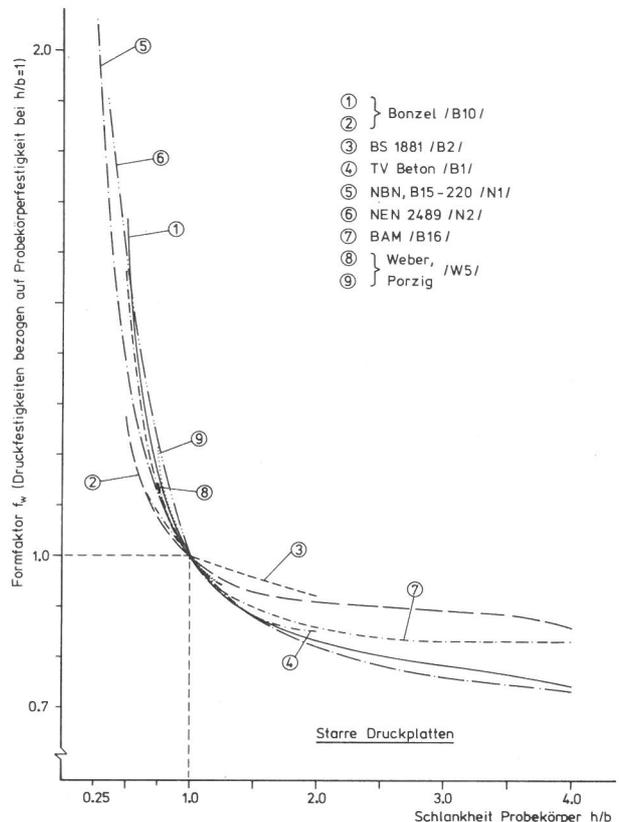


Bild 4.4

Verhältniszahlen der Betondruckfestigkeiten (Formfaktoren) in Abhängigkeit von der Probekörperschlankheit (vgl. Tabellenwerte in Bild A1 des Anhangs)

In Bild 4.4 sind einige der vielen Untersuchungsergebnisse zum Einfluß der Probekörperschlankheit auf die Betondruckfestigkeit wiedergegeben. Die Darstellung läßt etwa die Streubreite der Angaben erkennen. Große Unterschiede zeigen sich vor allem bei dünnen Probekörpern, wo offensichtlich die durch Anwendung der starren Druckplatte geschaffenen versuchstechnischen Bedingungen das eigentliche Materialverhalten überdecken. U p p a l und K e m p /U1/ sprechen in diesem Zusammenhang von einer "Bruchlänge" der Probekörper. Unterschreitet die Höhe eines Körpers dieses kritische Maß, so wird nach ihrer Theorie die Knickung der

aufgrund vorangegangener Rissebildungen ausgeprägten Einzelelemente des Betonkörpers beeinträchtigt, was dann zu erhöhten Druckfestigkeitswerten führt.

Nach einer RILEM-Studie läßt sich die Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Probekörperschlankheit zu dem in Bild 4.5 wiedergegebenen prinzipiellen Verlauf zusammenfassen /R7/. Auch

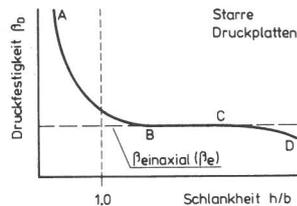


Bild 4.5
Prinzipielle Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Probekörperschlankheit (aus /R7/)

Murdoch und Kessler /M5/ berichten über eine derartige Abhängigkeit, wobei sie sich auf Versuchsergebnisse stützen, die z.T. bereits 1914 veröffentlicht wurden. Danach ist nur in einem mittleren Bereich zwischen den Punkten B und C die Schlankheit der Probekörper offenbar ohne wesentlichen Einfluß auf die Betondruckfestigkeit. Bei großer Schlankheit fallen demgegenüber die Festigkeitswerte etwas ab, während sie unterhalb von $h/b = 1$ steil ansteigen.

4.5 Einfluß der Krafteinleitung

Bei Festigkeitsuntersuchungen werden Prüfkräfte in den Beton eingeleitet, d.h. auf ihn übertragen. Diese Vorstellung von der mechanischen Beanspruchung ist auch bei Druckversuchen mit herkömmlichen Prüfvorrichtungen zulässig, obwohl hier den Probekörpern im Grunde nicht Spannungen, sondern Verformungen aufgezwungen werden. Erst aus der Reaktion auf den Werkstoffwiderstand entsteht die Prüfkraft. Ihr Verlauf durch den Probekörper und die anliegenden Druckplatten hindurch wird "Kraftwirkungslinie" genannt /P2/.

Der Einfluß der Krafteinleitung auf das Festigkeitsergebnis kann erheblich sein. Für die vorliegende Aufgabenstellung ist von Interesse, ob sich hierin eine Erklärung für die in Bild 4.4 wiedergegebene Abhängigkeit findet.

Zur Betonprüfung mit starren Druckplatten liegen zahlreiche Untersuchungen vor. Stellvertretend hierfür sind die Arbeiten von K. Newman und Sigvaldason /N11,S19/ zum Einfluß der Prüfmaschine, Gaele /G2/ zum Einfluß der Steifigkeit der Druckplatten, Pily /P2/ zur Lage der Kraftwirkungslinie beim Druck-

versuch und Krause sowie Sparks und Menzies /K5,S20/ zum Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit zu nennen. Danach mindern unebene oder nicht ausreichend steife Druckplatten /Z2/ sowie ballige Druckflächen der Probekörper /M1,S11/ den Festigkeitswert. Eine außerhalb der Maschinenachse verlaufende Kraftwirkungslinie hat jedoch im Regelfall nur einen geringen Einfluß auf das Festigkeitsergebnis. Im Probekörper entsteht keine zusätzliche Biegebeanspruchung, solange sich die Kugelpfanne der starren Druckplatte nicht verdreht /P2/. Selbst bei beidseitig gelenkig gelagerter Versuchsvorrichtung führt nach den in Bild A2 wiedergegebenen Versuchsergebnissen von Rusch /R12/ eine absichtlich hervorgerufene Ausmittigkeit der Prüfkraft nur zu einer vergleichsweise geringfügigen Minderung der Tragkraft. Realistisch ist bei sorgfältig durchgeführten Prüfungen ein außermittiger Einbau des Versuchskörpers von vielleicht 1 oder 2 mm. Dies würde für das Festigkeitsergebnis einen Abminderungsfaktor von etwa 0,97 bedingen. Es ist zu wenig, um damit in Bild 4.4 die geringere Tragfähigkeit schlanker Probekörper gegenüber gedrungenen erklären zu können. Ebenso wenig ist das verminderte Festigkeitsergebnis durch vorzeitiges Knicken bei den hier interessierenden Schlankheit der Betonkörper bis zu $h/b = 4$ erklärbar.

Einen entscheidenden Einfluß auf das Versuchsergebnis haben demgegenüber aber Querdehnungsbehinderungen, die durch Zwängungen in den Berührungsflächen der Probekörper mit den Druckplatten entstehen. Die Auswirkung einer mehr oder weniger zwängungsarmen Krafteinleitung läßt sogar alle übrigen genannten Einflüsse weit in den Hintergrund treten /G4/. Die Größe der durch Zwängungen entstehenden Reibungskräfte hängt u.a. von der Betongüte und der Zuschlagkörnung ab /H1/. Ein feinerer Zuschlag bewirkt geringere Zwängungen /S13/. Je kleiner die Reibungskräfte sind, desto geringer ist auch der Einfluß der Probekörperschlankheit auf das Festigkeitsergebnis /N3/.

Man erkannte bereits frühzeitig diesen Zusammenhang zwischen Querdehnungsbehinderung und Festigkeitsergebnis und umging die Lösung des Problems durch die Wahl ausreichend schlanker Probekörper. Gleichzeitig wurden andere Versuchstechniken erprobt. So hat Föppel bereits vor 1900 die Reibung auf den Prüfflächen mit einer Talg-Stearin-Schmierung reduziert /F2/. Mit den Jahren kamen an-

dere Krafteinleitungssysteme hinzu, deren Wirksamkeit in /N4/ und /W8/ diskutiert wird. Sie lassen sich vom Aufbau her in starre Druckplatten mit Zwischenlagen zwischen Betonkörper und anliegender Druckplatte und in Sonderbauweisen unterteilen (Bild 4.6).

material - also auch mit den gleichen Eigenschaften - als Kopfstücke verwendet werden /N9,S25/. Diese Methoden sind aber unsicher und für die Prüfung von Beton nicht geeignet.

Bei einigen Sonderbauformen ersetzen nun andere Konstruktionen das herkömmliche

Konstruktionsprinzip bzw. Wirkungsweise	Biegesteif (nicht längsverformbar)		Flexibel (längsverformbar)
	querverformbar: nein	querverformbar: ja	querverformbar: ja
Mechanisch	Starre Druckplatte	Schlitzplatte Stahlbürste Mosaikplatte	
Mechanisch (geschichtet)		Starre Druckplatten mit Gleitpaketen	
Mechanisch/ hydraulisch		Starre Druckplatten mit Zwischenlagen aus Gummi (Elastomeren)	Schlaffe Druckplatten
Hydraulisch			Druckkissen

Als Zwischenlagen dienten Gleitschichten unterschiedlicher Dicke aus Gummi /N10/, Karton /H8/, Polyethylen /B7,H17/ oder Polytetrafluorethylen (PTFE) /G6/ sowie verschiedene, häufig aus Aluminiumfolien zusammengesetzte Gleitpakete, die mit einem geeigneten Schmiermittel versehen waren /B14,H14,H15,L1/. Auch eine in Schmierfett eingebettete Schicht aus kleinen Stahlkugeln wurde verwendet /T1/. Tatsächlich konnte mit diesen unterschiedlichen Mitteln die Zwängung an den Endflächen vermindert werden /G5/; die Querdehnung des Betons war weniger stark vom Abstand zu den Druckplatten abhängig /J1,S12/. Damit ergab sich dann auch für die Druckfestigkeitswerte jeweils eine andere Abhängigkeit von der Probekörperschlankheit /N10,T3,vgl. auch Bild 101 in R10/. Auch die Bruchbilder änderten sich /H8/. Die Gleitwirkung hing außerdem von der Höhe der einwirkenden Prüfkraft ab /S9,S10,S12/.

Um die Behinderung der Querdehnung wirklich den jeweiligen Gegebenheiten entsprechend auszuschalten, müßte jedoch ein Druckplattensystem mit regelbarer Querverformung entwickelt werden. Dieses Prinzip liegt bereits denjenigen Versuchsmethoden zugrunde, wo Materialien für die Druckplatten nach möglichst gleichen Querdehnungseigenschaften wie das Probestmaterial ausgewählt /H12/, oder aber zusätzliche Körper aus demselben Versuchs-

System der starren Druckplatten. Abgesehen von hydraulischen Druckkissen /A4,K4,S4,S26/ wird dabei die vormals geschlossene Fläche der Druckplatte in eine größere Anzahl von Teilflächen aufgelöst. Die Querverformung des Probekörpers soll hierdurch möglichst wenig behindert werden; die sich sonst über die gesamte Druckfläche aufbauende Zwängung wird auf viele kleinere Bereiche verteilt und dadurch reduziert. Die Teilflächen sind entweder fest - wie bei der Schlitzplatte /Z1/ - oder nur lose - wie bei der Mosaikplatte /D8/ - mit einer Grundplatte verbunden. Bei der von H i l s d o r f /H10/ entwickelten Stahlbürste ist die Druckfläche in besonders kleine Teilflächen aufgelöst. Die Biegesteifigkeit der einzelnen Stäbchen bestimmt die Querverformbarkeit und Belastbarkeit dieses Systems /K8,L5/. Auch bei den in der vorliegenden Arbeit verwendeten schlaffen Druckplatten (Bild 4.7) ist die Druckfläche in eine größere Zahl von Teilflächen unterteilt (vgl. Abschnitt 7.2).

Soweit bekannt, ist der Einfluß der angeführten Sonderbauformen auf die Abhängigkeit der Druckfestigkeitswerte von der Schlankheit der Probekörper bisher noch nicht systematisch untersucht worden. Für die schlaffe Druckplatte ist diese Frage erstmals in der vorliegenden Aufgabenstellung enthalten. Schon jetzt

kann aber davon ausgegangen werden, daß die mit all diesen Systemen ermittelten Druckfestigkeitswerte keineswegs unabhängig von der Probekörpergeometrie sind. Für jedes Krafteinleitungssystem dürfte vielmehr eine besondere, mehr oder weniger stark ausgeprägte Abhängigkeit bestehen, die zudem noch bei Betonen verschiedener Festigkeitsklassen und Kornzusammensetzung unterschiedlich sein kann.

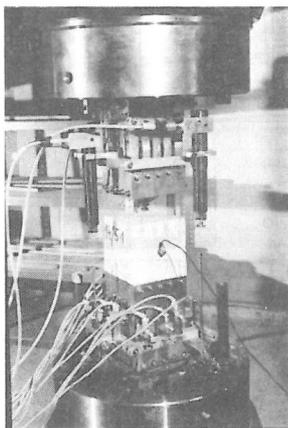


Bild 4.7

Schlaffe Druckplatten mit Meßwertaufnehmern für Längsverformungen (am Probekörper Beschleunigungsaufnehmer für Schallemissionen)

4.6 Spannungsverteilung im Probekörper

Die in den vorangegangenen Abschnitten mitgeteilten Forschungsergebnisse können kurz dahingehend zusammengefaßt werden, daß die aus Bild 4.4 ersichtliche Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Probekörperschlankheit dem Einfluß bzw. Ausmaß der Zwängungen bei der Krafteinleitung zuzuschreiben ist. Diese Zwängungen verursachen Zusatzspannungen. Durch Überlagerung mit den von der Prüfkraft herrührenden Normalspannungen entsteht im Versuchskörper ein räumlicher Spannungszustand, der am stärksten an den Prüfflächen ausgeprägt ist und nach dem Prinzip von *de Saint-Venant* mit zunehmendem Abstand von den Druckplatten abklingt. Der Spannungszustand im Probekörper ist demzufolge auch beim anscheinend einaxialen Druckversuch ausgesprochen kompliziert, da er sowohl von der Krafteinleitung als auch von der Geometrie bzw. Schlankheit des Versuchskörpers abhängt. In der Kenntnis der Spannungsverteilung liegt jedoch die Erklärung für das Festigkeitsverhalten.

Aufschluß über die Spannungsverteilung im Innern der Probekörper ist vor allem durch theoretische Berechnungen zu erhalten /B13, F5, H3, H4, K7, S16, Z1/.

Buchhardt hat ein allgemeines Verfahren angegeben, mit dem bei einaxialer Druckbeanspruchung der dreiaxiale

Spannungszustand für beliebige Körper, Kräfte und Bedingungen der Auflagerung angegeben werden kann /B15/.

Demgegenüber bereitet die versuchstechnische Ermittlung der Spannungsverteilung erhebliche Schwierigkeiten. Meßwertnehmer im Innern von Probekörpern wirken dort als Störstellen. Außerdem gestatten es die mit der Zeit veränderlichen Eigenschaften und der heterogene Aufbau des Betons im allgemeinen nicht, aus Dehnungsmessungen auf den Spannungszustand zu schließen /R9/. In den gemessenen Längsänderungen sind bei Beton eigentlich immer außer den elastischen auch verzögert-elastische und plastische Verformungsanteile enthalten /R15/.

Hierin liegen auch die Gründe, weshalb es leider noch immer an Gesetzmäßigkeiten fehlt, die das Verhalten von Beton bis zum Versagen zutreffend beschreiben. Der besondere Wert theoretischer Berechnungen liegt daher weniger in der exakten Vorhersage von Probekörperverformungen o.ä., sondern vor allem in der grundlegenden Verdeutlichung von Auswirkungen, die geänderte Bedingungen bei experimentellen Untersuchungen haben.

So hat *Schleeh* mit den Erkenntnissen der Elastizitätstheorie zwei Grenzfälle der Krafteinleitung beim Druckversuch untersucht. Entsprechende Angaben für zylindrische Probekörper finden sich in /H2/, Bild 20. In Bild 4.8 ist aus /S15/ die Verteilung der Zwängungsspannungen bei einem Prisma (Rechteckscheibe) mit $h/b = 2$ im Vergleich zu einem Würfel (quadratische Scheibe) wiedergegeben. Eingetragen sind ausschließlich die Zusatzspannungen parallel und - hieraus resultierend - senkrecht zur Kraftwirkungslinie, die sich aus den Zwängungen an den Endflächen ergeben. Die Randbedingungen entsprechen dabei denen der vollständig starren Druckplatten: keinerlei Verformung in Richtung der Prüfkraft (absolut biegesteif) und der äußere Rand des Probekörpers verbleibt in seiner Lage (in der Berührungsfläche keine Querdehnung der Druckplatte, noch des Probekörpers). Bei diesen, der herkömmlichen Versuchstechnik sehr nahe kommenden Voraussetzungen klingen die zwangsbedingten Spannungsanteile bis zur mittleren Höhe des prismatischen Probekörpers auf Null ab, in der Mitte eines Würfels beeinflussen sie aber noch den allgemeinen Spannungszustand.

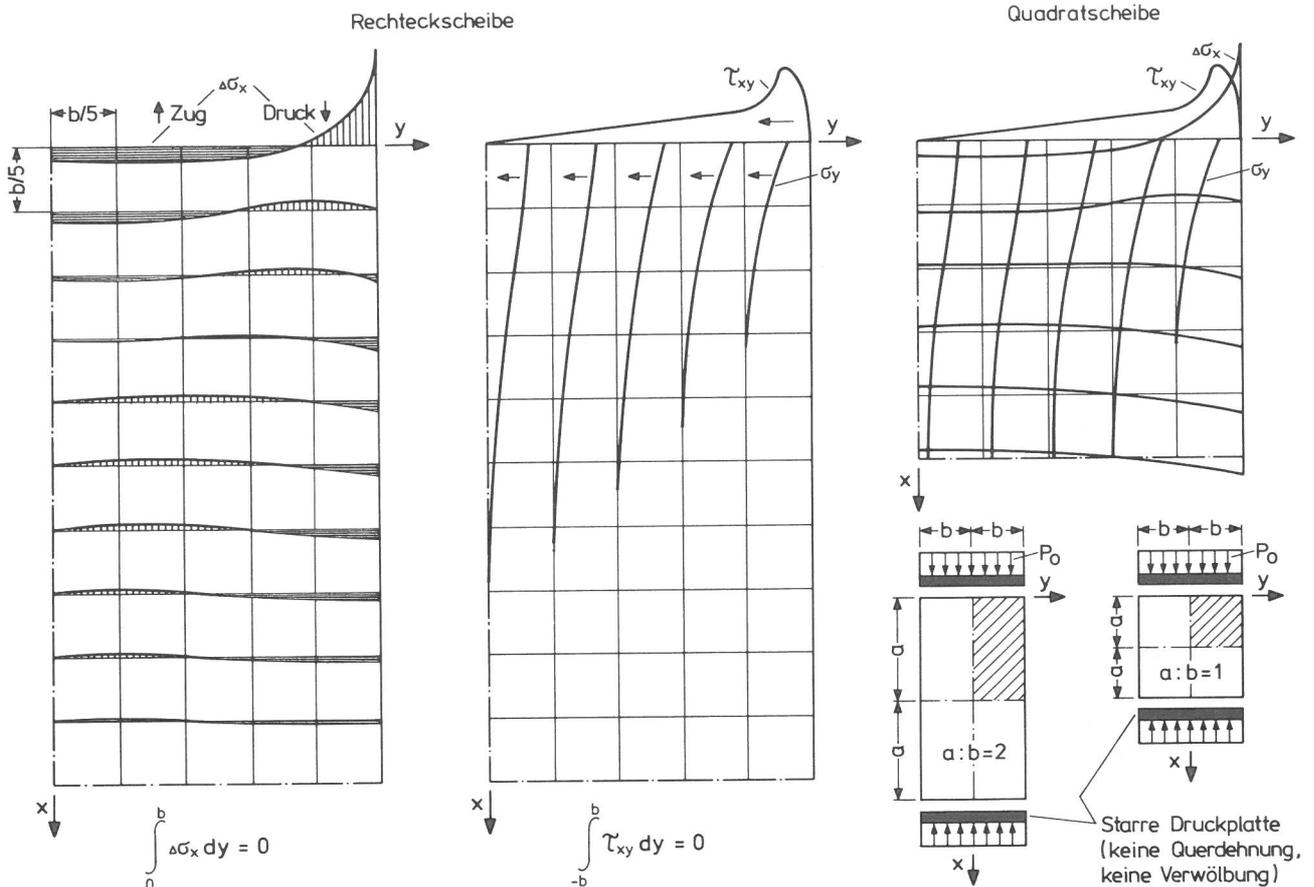


Bild 4.8

Zusatzspannungen in einer Längsebene eines Prismas bzw. Würfels infolge vollständiger Zwängung an den Druckflächen (starre belastete Querränder, Querdehnzahl $\mu = 0,2$), nach Schlee / S15/

5 Grundlegende Betrachtungen

Die vorliegende Aufgabe führt zu einigen Problemstellungen, welche sonst bei experimentellen Untersuchungen durch die Wahl geeigneter Parameter oder Meßmethoden möglichst ausgeklammert werden. Im Vordergrund steht das Problem der Verformungsmessung an Betonproben in sog. gestörten Bereichen. Dies betrifft vor allem gedrungene bis dünne Versuchskörper. Ferner muß für die mit zwei verschiedenen Krafteinleitungssystemen ermittelten Festigkeitswerte ein gemeinsamer Bezugswert gefunden werden. Außerdem macht die Feststellung charakteristischer Druckspannungswerte, welche Gefügeänderungen im Betonkörper kennzeichnen sollen, es erforderlich, sich mit geeigneten Bestimmungsmethoden auseinanderzusetzen.

Nachfolgend werden hierzu Lösungswege erarbeitet, die dann das Versuchsprogramm bzw. die Versuchsauswertung bestimmen.

5.1 Dehnungsbehinderung und ihre Auswirkung

Ein längs einer Achse durch Druckkräfte gestauchter Betonkörper dehnt sich in allen Richtungen, die normal zur Kraftwirkungslinie liegen. Wird diese Querverformung behindert - oder auch unterstützt -, so ändert sich damit das Widerstandsvermögen gegenüber der äußeren Kraft. Dies gilt umso mehr, je größer der Bereich des durch zusätzliche Zwängungen bewirkten Dehnverhaltens im Verhältnis zum gesamten Probekörper ist.

Wie aus Bild 5.1 hervorgeht, sind Querdehnungsbehinderungen stets im Zusammenhang mit der Art der Krafteinleitung zu sehen. Druckplatten können im Prinzip die Querdehnung des Probekörpers an den Endflächen vollständig unterbinden oder im Gegensatz hierzu diese völlig unbehindert wirken lassen. Sie können ferner als Druckfläche selbst eben bleiben oder biegeweich sein. Die Skizzen 5.1a, 5.1c und 5.1e sind Grenzfälle dieses Verhaltens.

Die vollständig starre Druckplatte ist im Vergleich zum Betonkörper um ein Vielfaches steifer. Die Endflächen des Probekörpers bleiben daher eben und können sich nicht querdehnen. Wären demgegenüber die Druckplatten in dem rein theoretischen Fall c biegeweich und verhinderten trotzdem in den Berührungsflächen jegliche Querdehnung, so würde der Probekörper sich kissenförmig verformen. Hieraus wird verständlich, weshalb bei starren Druckplatten, die diese Endflächen deformation überdrücken, an den Rändern zusätzliche Druckspannungen auftreten, im Zentrum der Druckfläche sich aber eine Entlastung durch zusätzliche Zugspannungen ergibt (Bild 4.8). Sind schließlich, wie im Fall e, die Druckplatten nicht nur biegeweich, sondern lassen außerdem die Querdehnung unbehindert, so verformt sich der Probekörper bei isotropen, homogenen Materialien in allen Teilbereichen regelmäßig, wie es die Querdehnzahl zum Ausdruck bringt.

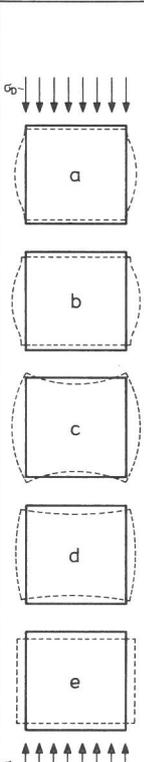
	Druckplatten		Bedingungen für den Zustand in den Berührungsflächen Probekörper / Druckplatten bei gleichmäßig verteilter Druckspannung σ_0	
	Endflächen des Probekörpers	Querdehnung		
a	Vollständig starr: Biegesteif, im Vergleich zum Probekörper praktisch nicht querdehnfähig	Erzwungen ebenflächig (wie Druckplatten)	Vollständig behindert	
b	Starr: Wenig Durchbiegung, kaum Relativbewegung Probekörper / Druckplatte in beiden Richtungen quer zur Kraftwirkung	Den Druckplatten angepaßt (weitgehend ebenflächig)	Weitgehend behindert	
c	Biegeweich: Leicht verformbar in Richtung der Kraftwirkung, keine Verformungen in den beiden Querrichtungen	Verwölbt	Vollständig behindert	
d	Schlaff: Teilflächen (Einzelstempel) in allen 3 Richtungen leicht zu bewegen	Deformiert	Weitgehend unbehindert	
e	Vollständig schlaff: Membranartig (frei beweglich in allen 3 Richtungen)	Bleiben eben (Probekörper isotrop und homogen)	Vollständig unbehindert	

Bild 5.1

Prinzipskizzen zur Verformung von Probekörpern bei Kräfteinleitung mit starren im Vergleich zu schlaffen Druckplattensystemen

In der Wirkungsweise zwischen diesen drei Grenzfällen liegen die beiden Kräfteinleitungssysteme der vorliegenden Untersuchung: die herkömmlichen starren Druckplatten (Bild 5.1b) und die schlaffen

Druckplatten (Bild 5.1d). Nach dem oben erläuterten Zusammenhang zwischen Querdehnungsbehinderung und Festigkeitsverhalten ist somit zu erwarten, daß sich bei beiden Druckplattensystemen eine - allerdings jeweils deutlich andere - Abhängigkeit der Festigkeitsergebnisse von der Schlankheit der Probekörper zeigen wird. Sollte außerdem bei Prüfungen mit schlaffen Druckplatten eine Deformation der Probekörper-Endflächen festzustellen sein, so müßten diese konkav gewölbt sein.

Hieraus wird deutlich, daß sich Probekörper und Druckplatten in den Berührungsflächen gegenseitig beeinflussen: Es ergeben sich Querdehnungsbehinderungen, wenn Druckbeanspruchungen im Probekörper zu anderen Querverformungen als in den Druckplatten führen. Das weniger verformungswillige Material behindert die Querverformung des anderen. In den Berührungsflächen entstehen Reibungskräfte. Gleichzeitig sucht die in der Querdehnung behinderte Endfläche sich zu verwölben. Dieser Längsverformung steht die Biegesteifigkeit der anliegenden Druckplatte - bei den Sonderbauformen die Biegesteifigkeit der Teilflächen - entgegen. Hierdurch ergeben sich weitere Zwängungen, so daß letztlich im Bereich der Probekörperendflächen ein dreiaxialer Spannungszustand entsteht.

Wie groß die Zwängungen im Einzelfall sind, ist meßtechnisch nicht zu erfassen. Sie bleiben daher unbekannt und können allenfalls abgeschätzt werden /H8/. In der Tendenz bewirken größere Betonzuschläge größere Zwängungen /S3/, die außerdem beim Beton im Vergleich zum Mörtel weniger schnell mit der Entfernung von der Endfläche des Versuchskörpers abnehmen /N10/. Die durch Reibung verursachten Zusatzspannungen quer zur Kraftwirkungslinie sind im Prinzip jedoch bei quadratischen und zentralsymmetrischen Querschnitten gleich groß, so daß sich im Probekörper ein dreiaxialer Spannungszustand mit zwei gleich großen Hauptspannungen $-\sigma_2 = -\sigma_3$ bzw. $\sigma_2 = \sigma_3$ einstellt.

Dies läßt sich im Spannungsraum (Bild 5.2) veranschaulichen. Die Achsen dieses Raumes werden - bis auf einen Maßstabsfaktor $1/\sqrt{3}$ - von den drei Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 gebildet. Sind diese gleich groß, so stellt sich der dreiaxiale Spannungszustand als Punkt auf der hydrostatischen Achse dar. Bei zwei gleich großen Hauptspannungen $\sigma_2 = \sigma_3$ liegen alle Spannungskombinationen in einer Ebene, die von der hydrostatischen Achse und der Koordinatenachse der jeweils unab-

hängigen Hauptspannung, hier σ_1 , gebildet wird. Dabei soll stets $|\sigma_1| \geq |\sigma_2| \geq |\sigma_3|$ gelten.

Die Schnittlinie dieser Ebene mit der aus den Grenzlinien der mehraxialen Tragfähigkeit von Beton gebildeten Spannungsglocke ist die in Bild 5.2 eingezeichnete Mantellinie. Sie zeigt für den einaxialen Druckversuch sehr anschaulich die Abhängigkeit eines Festigkeitsergebnisses von der Größe der Zwängungen quer zur Kraftwirkungslinie. Bei zwängungsfreier Krafteinleitung mit $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ schneidet die Mantellinie die Hauptspannungsachse σ_1 im Punkt der einaxialen Druckfestigkeit β_e . Treten jedoch die o.a. Zwängungen mit $\sigma_2 = \sigma_3$ quer zur Richtung der Prüfkraft auf, so versagt der Probekörper erst bei höheren Druckspannungen σ_1 ; die ermittelten Festigkeitswerte sind dementsprechend überhöht.

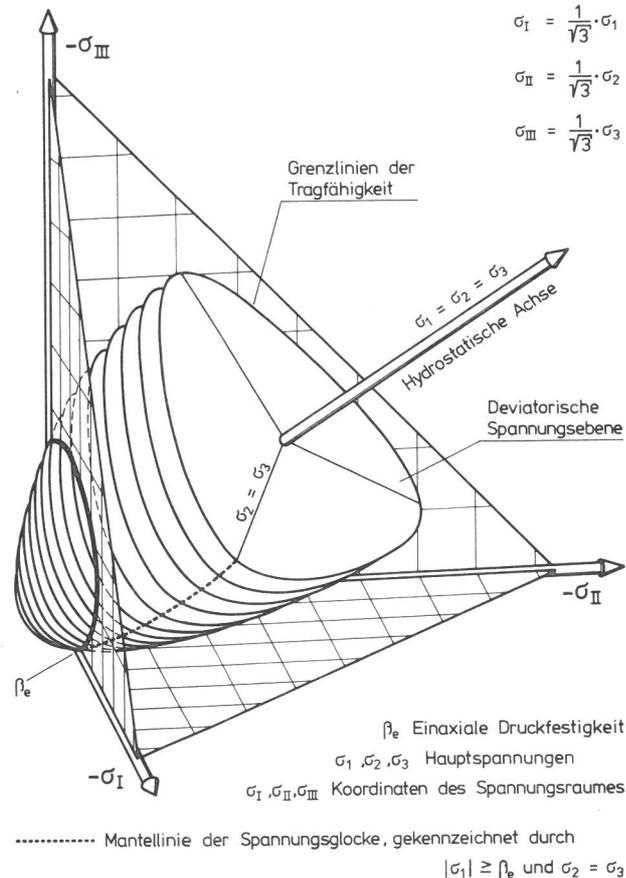
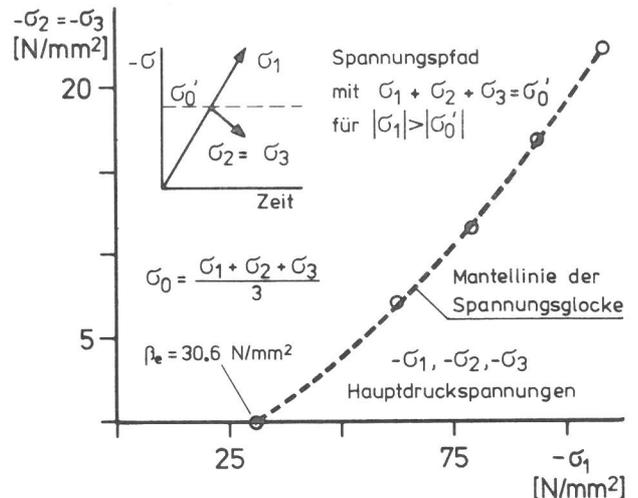


Bild 5.2
Spannungsraum mit Grenzlinien der Tragfähigkeit von Beton

In Bild 5.3 ist dieser Zusammenhang mit Versuchsergebnissen aus /S13/ für den Fall einer dreiaxialen Druckbeanspruchung dargestellt. Bei einwirkenden Querdruckspannungen $\sigma_2 = \sigma_3$ ergaben



Betonwürfel 100mm	σ_0'	σ_1	$\sigma_2 = \sigma_3$
Krafteinleitung über schlaife Druckplatten	-25.5	-62.1	-7.2
	-34.0	-78.9	-11.6
	-42.5	-93.5	-17.0
	-51.0	-108.3	-22.4

Bild 5.3
Dreiaxiale Betondruckfestigkeit bei gleich großen Querdruckspannungen (Versuchsergebnisse aus /S13/, Bild 6.5-3)

sich hiernach für die Achse 1 im Vergleich zum einaxialen Versuchsergebnis deutlich höhere Festigkeitswerte. Der Verlauf dieser Kurve steht in einem sachlichen Zusammenhang zu dem in Bild 4.4 gezeigten Einfluß der Probekörperschlankheit auf das Festigkeitsergebnis: Bei gedrunenen Probekörpern ist der infolge Zwängung dreiaxial beanspruchte Bereich relativ zum Probekörpervolumen größer als bei schlanken Versuchskörpern. Dadurch sind im Mittel auch die Querdruckspannungen größer. Dies wiederum bewirkt - wie der Verlauf der Mantellinie der Spannungsglocke zeigt - höhere Druckfestigkeitswerte in der Prüfrichtung.

Querdehnungsbehinderungen führen im einaxialen Druckversuch bei wenig schlanken Probekörpern aber nicht nur zu überhöhten Festigkeitsergebnissen, sondern beeinflussen auch die Längsverformung. Eine geringere Querdehnung bedingt zunächst eine ebenfalls geringere Längstauchung. Bezogen auf die Versagensgrenze ergeben sich bei behinderter im Vergleich zur zwängungsarmen Krafteinleitung aber dennoch größere Längsverformungen, da die überhöhte Tragkraft höhere Druckspannungen bedingt und damit größere Stauchungen verursacht.

Nach diesen Überlegungen müßte sich bei einer Krafteinleitung über schlaaffe Druckplatten (1) gegenüber starren Druckplatten (3) die in Bild 5.4 dargestellte prinzipielle Abhängigkeit der Verformungsarbeit W von der Schlankheit der Probekörper nachweisen lassen. Bei idealer Krafteinleitung und idealem Stoffverhalten zeigt jede Schicht eines Probekörpers bei einer gegebenen Druckspannung dieselbe Stauchung, erfordert also dieselbe Verformungsarbeit. Zwischen Probekörperhöhe und Verformungsarbeit besteht dann ein linearer Zusammenhang. Diese Gerade (1) müßte theoretisch durch den Koordinatenursprung verlaufen. Praktisch ist jedoch ein geringer Anlauf zu erwarten, weil beim Versuch u.a. Anfangsverformungen der Probekörper (Setzen) mitgemessen werden, die im Kurzzeitversuch von den spannungsbedingten Verformungen nicht zu trennen sind.

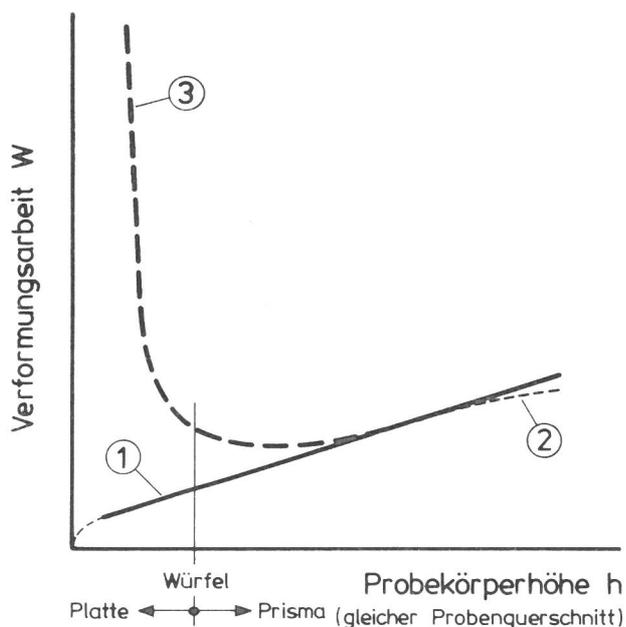


Bild 5.4

Prinzipielle Abhängigkeit der Verformungsarbeit W von der Probekörperhöhe h bei zwängungsfreier Krafteinleitung und von daher unbeeinflusstem Festigkeitswert (1), sowie bei vermindertem (2) und überhöhtem (3) Druckfestigkeitsergebnis

Im Gegensatz hierzu stehen die Auswirkungen einer starken bis nahezu totalen Dehnungsbehinderung bei gedrungenen bis hin zu sehr dünnen Proben, wie sie bei der Prüfung mit starren Druckplatten gegeben sind. In diesen Fällen steigt die aufzubringende Verformungsarbeit steil an (3), da die Druckspannungen in den Probekörpern und die hierdurch bedingten Stauchungen wesentlich größere Beträge erreichen als im Fall der weitgehend zwängungsfreien Krafteinleitung.

Bei sehr großer Schlankheit der Probekörper können schließlich beide Linienzüge gemeinsam - wie in Bild 5.4 mit dem Kurvenabschnitt (2) angedeutet - einen zunehmend geringeren Anstieg als die Gerade aufweisen. Dies steht im Zusammenhang mit dem bereits erwähnten Festigkeitsverhalten sehr schlanker Probekörper (vgl. Bereich D in Bild 4.5). Im folgenden Abschnitt wird hierauf näher eingegangen.

5.2 Einaxiale Betondruckfestigkeit

Die einaxiale Betondruckfestigkeit β_e kennzeichnet das stoffliche Widerstandsvermögen von Beton gegenüber Druckbeanspruchungen (vgl. Abschnitt 3.2). Dieser Festigkeitswert ist unbeeinflusst von den beiden - voranstehend als maßgeblich erkannten - Parametern Probekörpergeometrie (Schlankheit) und Art der Krafteinleitung, welche die im Versuch feststellbare Tragfähigkeit von Betonkörpern, die sog. Probekörperfestigkeit, erheblich verändern können.

Bisherige Untersuchungen zur Ermittlung von Umrechnungswerten dienten zumeist speziellen Fragestellungen. Es war die Betonfestigkeit verschieden großer Würfel untereinander, diese mit Zylindern, Prismen und vielfältigen Sonderformen zu vergleichen, und dies wiederum bei unterschiedlichen Betongütern, anderer Porenstruktur, verschiedenem Größtkorn, anderer Herkunft der Ausgangsmaterialien usw. Die Vergleichsmöglichkeiten sind allzu vielfältig. Damit wird verständlich, weshalb es trotz einer großen Anzahl wertvoller Einzeluntersuchungen schwerfällt, hieraus grundlegende, über den jeweiligen Anwendungsfall hinausgehende Erkenntnisse zu gewinnen, die dann vielleicht weitere Einzeluntersuchungen überflüssig machen oder doch zumindest im Umfang stark begrenzen könnten.

Für den Vergleich von Betonfestigkeiten werden daher in DIN 1045 sämtliche Probekörperfestigkeiten auf einen ausgewählten Versuchskörper, den 200mm-Würfel, bezogen. Analog, aber teilweise mit anderen Bezugskörpern, wird in allen anderen Normenwerken verfahren. Der wesentliche Nachteil dieses Vorgehens besteht darin, daß eine derartige Bezugfestigkeit nur unter ganz bestimmten Versuchsbedingungen - Probekörpergeometrie und Art der Krafteinleitung eingeschlossen - gilt. Dies ist letztlich die Ursache für das notwendige Netz der Verknüpfung der an Probekörpern ermittelten Festigkeitswerte durch eine Vielzahl von Umrechnungsfaktoren.

Einfacher und übersichtlicher wäre der Bezug von Probekörperfestigkeiten auf einen einzigen Zentralwert. Dieser müßte von den jeweiligen Versuchsbedingungen unabhängig, also eine Stoff-Kenngröße sein. Nach den Festlegungen in dieser Arbeit ist die einaxiale Betondruckfestigkeit β_e ein solcher Kennwert. Wie erläutert, ist β_e u.a. auch unabhängig von der Art der Krafteinleitung. Hieraus ist zwingend zu schließen, daß es möglich sein muß, diesen Zentralwert mit verschiedenen Versuchstechniken zu ermitteln.

Somit stünde es tatsächlich frei, in welcher Weise die Probekörperfestigkeit nach den verschiedenen nationalen oder internationalen Richtlinien zu bestimmen ist. Mit den jeweiligen, u.U. höchst unterschiedlichen Verfahren müßte nur ebenfalls der Wert β_e festgestellt werden. Damit wäre dann der Anschluß für einen Vergleich mit Festigkeitswerten anderer Bestimmungsart gegeben.

Prüfmaschine und Versuchskörper bilden beim Betondruckversuch ein in sich geschlossenes System. Jede Komponente von Probekörper und Maschine wirkt bei der Prüfung mit und hat daher Einfluß auf das Versuchsergebnis. Vordergründig gesehen kann sich ein und dasselbe Versuchsergebnis nur wiederholen, wenn alle beteiligten Komponenten genau gleich sind. Dies entspricht der bisherigen Betrachtungsweise und führt zu der Forderung nach stets gleichen Versuchsbedingungen. Jede Änderung einer Versuchskomponente würde zu anderen Festigkeitsergebnissen führen.

Es sind aber auch Kombinationen geänderter Versuchskomponenten vorstellbar, bei denen zwar jeder Parameter variiert wird, sich in der Wirkung aber mit den übrigen Einflußgrößen aufhebt.

Derart zweckmäßige Verknüpfungen von Parametern sind allerdings zunächst unbekannt. Sie können aber durch Variation von Einflußgrößen schrittweise ermittelt werden. Ein Probekörper bestimmten Querschnitts oder gegebener Schlankheit wird dann bei Prüfung mit starren Druckplatten die gleiche Festigkeit zeigen wie ein anderer Versuchskörper desselben Betons, der z.B. mit einem anderen Krafteinleitungssystem geprüft wird und dabei eine völlig andere Gestalt, Form oder Schlankheit aufweist.

Schließlich ist davon auszugehen, daß die Wirkung eines Einflußparameters nicht sprunghaft einsetzt, sondern sich von den Idealbedingungen her erst allmählich

zunehmend verstärkt. Werden nunmehr Parameter variiert, die das Festigkeitsergebnis sowohl mindern als auch überhöhen können, so ist der unbeeinflusste Festigkeitswert, d.h. die einaxiale Betondruckfestigkeit, an dem Übergang bzw. an der sich abzeichnenden Tendenzwende (Wendepunkt oder Stufe wie z.B. in Bild 4.5) zu erkennen. Kann eine derartige allmähliche Umkehr der Wirkung der gegebenen Abhängigkeit nicht beobachtet werden, so ist die betrachtete Einflußgröße entweder von untergeordneter Bedeutung, oder aber sie ist zur Bestimmung der gesuchten Idealbedingungen ungeeignet, da sie nicht sowohl mit abmindernder als auch mit steigender Wirkung auf die Druckfestigkeit variiert werden kann.

Nach diesen Überlegungen weist somit die hier angesprochene Stufe im Kurvenzug der Abhängigkeit der Druckfestigkeit β_D von der Probekörperschlankheit h/b die einaxiale Betondruckfestigkeit β_e aus. In Bild 5.5, das auf Bild 4.5 zurückgeht, ist dies skizziert. Die Darstellung läßt außerdem die Unterschiede erkennen, die beim Betondruckversuch mit unterschiedlichen Krafteinleitungssystemen zu erwarten sind. Verschiedene Arten der Krafteinleitung können danach den Verlauf der gezeigten Kennlinien erheblich beeinflussen, verändern demgegenüber im Prinzip aber nicht den Wert von β_e . Dies eröffnet die Möglichkeit, die einaxiale Betondruckfestigkeit auf verschiedenen Wegen - wie hier durch Variation der Probekörperschlankheit und der Art der Krafteinleitung - zu ermitteln.

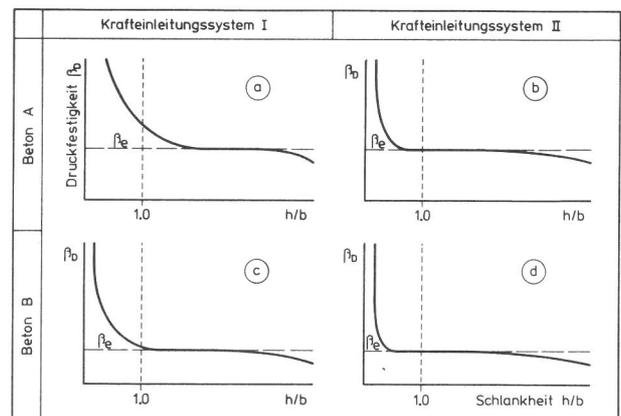


Bild 5.5

Kennlinien des Festigkeitsverhaltens von Beton: Prinzipielle Abhängigkeit der am Probekörper ermittelten Druckfestigkeit β_D von der Probekörperschlankheit h/b bei verschiedenen Betongütern und unterschiedlicher Krafteinleitung

In Bild 5.5 überrascht zunächst der abfallende Ast bei großen Probekörperschlankheiten. Gemäß Abschn. 4.5 scheidet eine befriedigende Erklärung mit statischen Berechnungen - etwa unter Berücksichtigung zusätzlicher Biegespannungen infolge exzentrischer Kräfteinleitung oder gar Knickung - aus. Die Ursache findet sich statt dessen im Bruchvorgang (vgl. Abschn. 4.2). Bei ansteigender Prüfkraft führt danach der Prozeß der Gefügezerstörung zu umfangreicher werdenden Diskontinuitäten, die bei größeren Probekörperschlankheiten immer weniger den gesamten Versuchskörper, sondern nur Teilbereiche durchziehen. Führen diese Rissebildungen schließlich zu durchgehenden Bruchflächen, so können sich die restlichen Teilstücke entspannen. Die in ihnen gespeicherte und nunmehr frei werdende Verformungsenergie unterstützt dabei den Bruchvorgang in den gefährdeten Bereichen und bewirkt so ein vorzeitiges Versagen, also eine niedrigere Tragfähigkeit des Versuchskörpers /S3/. Die aus der Rückverformung der Prüfmaschine kommende Energiezufuhr bleibt ebenfalls zu beachten. Bei modernen Prüfmaschinen mit schneller, an den Verformungen des Probematerials orientierter elektro-hydraulischer Regelung kann dieser Einfluß jedoch stark abgemindert werden.

Wenn also Probekörper, Prüfmaschine usw. ein in sich geschlossenes System bilden, der Versuchskörper selbst als Energiespeicher wirkt /G7,G8/ und - abhängig von seiner Zusammensetzung - unterschiedlich große Querdehnungen und Spannungsverteilungen im Innern zeigt, so müssen sich auch bei verschiedenen festen Betonen grundsätzlich unterschiedliche Abhängigkeiten für die Druckfestigkeit von der Probekörperschlankheit ergeben. In Bild 5.5 ist dies durch die Gegenüberstellung von Kennlinien für zwei verschiedene Betone mit unterschiedlich großer einaxialer Druckfestigkeit angedeutet. Die Betongüte ist hierbei aber nicht als Einflußparameter aufzufassen. Eine andere Betonzusammensetzung ergibt vielmehr einen anderen Werkstoff, der einen anderen einaxialen Druckfestigkeitswert aufweist.

Allgemein steigt mit der Betongüte die bis zum Versagen je Volumeneinheit aufzubringende Energie /W11/. Die Betongüte hat ferner einen Einfluß auf die Abhängigkeit des Festigkeitswertes von der Probekörperschlankheit /K2,H8/. Hierzu gibt auch DIN 1045 /D2/ in Abschnitt 7.4.3.5.3. einen Hinweis, indem dort Umrechnungswerte für den Vergleich von

Probekörperfestigkeiten von der Betongüte abhängig gemacht werden. Aus den bereits in Bild 4.4 - und ergänzend hierzu in Bild A1 - mitgeteilten Verhältniswerten von Betondruckfestigkeiten geht ebenfalls der Einfluß der Betongüte hervor. Es zeigen sich außerdem deutliche Unterschiede bei grobem im Vergleich zu feinkörnigem Zuschlag. Grundsätzlich gilt also für jeden Beton eine andere Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Probekörperschlankheit.

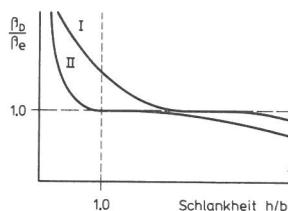


Bild 5.6

Auf die einaxiale Betondruckfestigkeit β_e bezogene Druckfestigkeiten β_b bei Kräfteinleitung über unterschiedliche Druckplattensysteme I und II

Weit mehr noch als die Betongüte beeinflusst jedoch ein Wechsel des Kräfteinleitungssystems die Probekörperfestigkeit. Dies kann - vgl. Bild 5.5 und 5.6 - zu voneinander völlig verschiedenen Kennlinien führen und eröffnet für die vorliegende Aufgabenstellung die Möglichkeit der Doppelbestimmung der einaxialen Betonfestigkeit β_e .

5.3 Verformungsmessungen

Bei Beton ist es schwierig, aus örtlichen Dehnungsmessungen auf die gesamte Verformung eines Probekörpers zu schließen /G13/. Die Dehnungswerte sind unmittelbar abhängig von der Verteilung des Zuschlags. Die Meßlänge muß ein Vielfaches des Größtkorns betragen /B8,M3/. S t ö c k l hat außerdem an Betonprismen ein unterschiedliches Verformungsverhalten der Rand- und Kernzonen nachgewiesen /S27/. Danach zeigen sich an der Oberfläche von Betonprobekörpern größere Stauchungswerte als im Innern. K l i n k findet an Betonzylindern Stauchungen, die ebenfalls mit dem Abstand von der Oberfläche abnehmen /K3/. In beiden Fällen betreffen die Angaben den mittleren, durch Zwängungen aus der Kräfteinleitung ungestörten Bereich und in Stahlformen hergestellte Probekörper. Auch N e w m a n , L a c h a n c e und L o v e d a y haben sich eingehend mit dem Problem der Oberflächenmessung auseinandergesetzt und stellen unterschiedliche Verformungsbeträge sowohl auf und unmittelbar unter der Oberfläche als auch bei Anwendung verschiedener Meßwertaufnehmer fest /N8/. Durch Vergleich mit Messungen an Prismen, die aus größeren Betonblöcken herausgesägt

wurden, kann S t ö c k l zeigen, daß die beobachteten Stauchungsunterschiede überwiegend der veränderten Betonstruktur an den Schalungsflächen im Vergleich zum Kernbeton zuzuschreiben sind. Bei gesägten Oberflächen werden geringere Verformungsdifferenzen gemessen. Es besteht allerdings die Gefahr der Ablösung flacher Kornsegmente. Je nach Lage des Dehnungsmeßstreifens kann dies ebenfalls zu überhöhten Meßwerten (Quetschungen am Kornrand) führen, aber auch zu kleine Meßwerte verursachen (Kornsegment trägt nicht mit).

Aus diesen Erkenntnissen ergeben sich für die vorliegende Arbeit einige Folgerungen, die den notwendigen Versuchsaufwand erheblich vergrößern: Um die Auswirkungen schalungsnaher Schichten auf die Verformungsmessungen möglichst auszuschließen, sind ausnahmslos Probekörper mit gesägten Seitenflächen zu verwenden. Die Sägearbeiten selbst erfordern einige zusätzliche Vorkehrungen, um die Versuchskörper besonders schonend aus größeren Betonblöcken herauszuarbeiten. Schließlich müssen die Dehnungsaufnehmer stets paarweise an den Probekörpern angebracht, aber gesondert registriert werden, um eventuelle Abweichungen erkennen zu können.

Wenn auf diese Weise einige Besonderheiten bei Verformungsmessungen am Werkstoff Beton ausgeglichen bzw. in ihrer Wirkung eingegrenzt werden, so verbleibt dennoch als wesentlich größeres Problem das Messen von Verformungen in solchen Bereichen der Probekörper, die durch die Zwängungen bei der Krafteinleitung gestört sind. Bei dünnen sowie gedrunge- nen Probekörpern und starrer Krafteinleitung erstreckt sich dieser gestörte Bereich über die volle Probekörperhöhe. Wie sich hierdurch die Querdehnungen ändern, hat insbesondere K. New m a n aufgezeigt /N10/. Bei der Bestimmung der Längsverformung dünner Probekörper kommt hinzu, daß Meßwerte an der Oberfläche solcher Betonkörper wegen fehlender Meßlänge mit Dehnungsmeßstreifen überhaupt nicht, und mit anderen, zwischen den Druckplatten angebrachten Aufnehmern, nur mit Vorbehalten ermittelt werden können.

Um bei der Prüfung mit starren Druckplatten Verformungen messen zu können, die unbeeinflußt von der Probekörpergeometrie sind, empfehlen S a n g h a und D h i r /S3/ nach ihren Versuchserfahrungen eine Schlankheit der Probekörper von $h/b = 2,5$. Aus den in Bild 4.8 wiedergegebenen Untersuchungsergebnissen

von S c h l e e h ist ebenfalls zu schließen, daß bei dieser Schlankheit in der mittleren Höhe der Probekörper ein genügend langer Meßbereich zu finden ist, in dem keine zwängungsbedingten Zusatzspannungen mehr auftreten. Dies gilt für eine total zwängende Krafteinleitung nach Bild 5.1a. Bei geringeren Dehnungsbehinderungen reichen die Störzonen auch bei weniger schlanken Probekörpern noch nicht in den Meßbereich hinein. Wegen des komplexen Spannungszustandes erscheint zwar eine Abgrenzung im einzelnen nicht möglich, es läßt sich aber die Tendenz angeben, in welcher Weise sich Zusatzspannungen auf die gemessenen Verformungen auswirken.

Dabei wird vorausgesetzt, daß es bei Stoffen wie Beton, für die keine eindeutig umkehrbare Abhängigkeit zwischen Spannungen und Verformungen besteht, bei vergleichenden Betrachtungen an ein und demselben Probekörper und zum gleichen Zeitpunkt zulässig ist, aus dem in Bild 4.8 gezeigten Spannungszustand auf die veränderte Dehnungsverteilung im Probekörper zu schließen. Danach wirkt sich die zwängende Krafteinleitung beim Prisma und erst recht bei gedrunge- nen Betonkörpern dahingehend aus, daß an der Oberfläche des Probekörpers entlastende Zusatzspannungen entstehen, die demzufolge zu einer Verringerung der örtlichen Betonstauchung führen. Reicht somit die Meßlänge einer Oberflächenmessung in den Störbereich hinein oder liegt sie sogar - wegen nicht ausreichender Schlankheit des Probekörpers - vollständig in dieser durch verminderte Stauchungsbeträge gekennzeichneten Zone, so müssen die gemessenen Verformungswerte zwangsläufig kleiner sein, als es der tatsächlichen Gesamtverformung des Probekörpers entsprechen würde.

Diese Gesamtverformung stellt sich als Abstandsänderung der beiden Endflächen eines Probekörpers dar und ist in Bild 5.7 mit Δh bezeichnet. Sie wird auf die Achse des Probekörpers bezogen und in der vorliegenden Untersuchung mit induktiven Wegaufnehmern, die zwischen den Druckplatten angebracht sind, ermittelt. Dieses Meßverfahren "zwischen den Druckplatten" ist jedoch nicht unproblematisch, da an den Probekörperendflächen Feinstmörtelschichten und/oder sonstige Abweichungen von der allgemeinen Struktur des Betonkörpers die Meßdaten stark verfälschen können.

In aller Regel führen zentrische Verformungsmessungen (ZT), welche die Endflächen der Probekörper einschließen,

zu überhöhten Versuchswerten. Dem stehen die Oberflächenmessungen (OF) gegenüber, die - wie zuvor erläutert - im gegebenen Fall zu geringe Längsverformungen ausweisen. Nur wenn die Meßstrecken der Oberflächenmessung bei genügend schlanken Probekörpern vollständig außerhalb des Störbereichs der Krafteinleitung liegen, kann aus diesen Meßwerten ausreichend zuverlässig auf die Längsverformung des Probekörpers geschlossen werden. Ein etwaiger Differenzbetrag δ_p zur zentrischen Verformungsmessung (Bild 5.7 oben) ist dann auf ein abweichendes Verformungsverhalten der Feinstmörtel- bzw. schalungsnahen Schichten und der damit verbundenen Auswirkung auf die Messung "zwischen den Druckplatten" zurückzuführen.

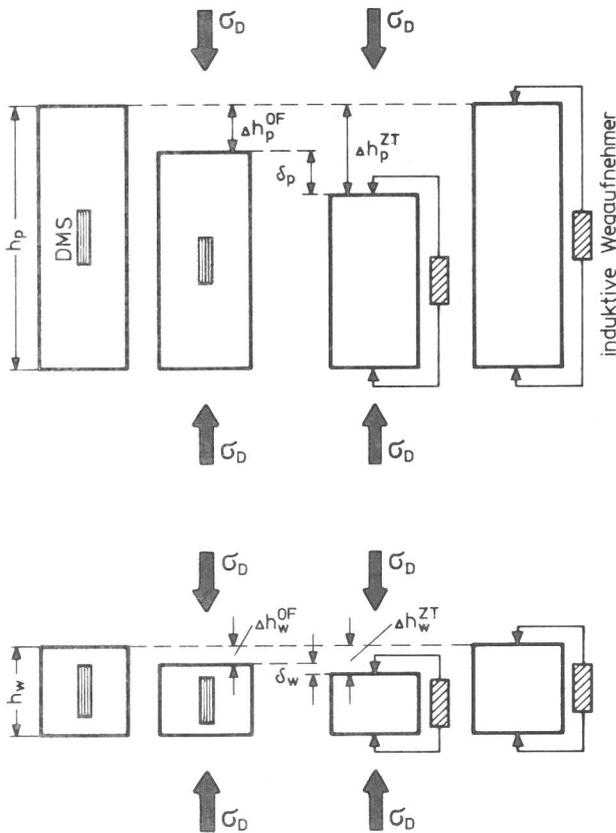


Bild 5.7

Längsverkürzung Δh bei schlanken bzw. gedrunenen Probekörpern: Unterschiedliche Ergebnisse aus Verformungsmessungen an der Oberfläche (OF) und zentrisch (ZT) in der Probekörperachse führen zu Differenzbeträgen δ

Dies gilt zunächst auch für gedrungene Probekörper (Bild 5.7 unten). Trotzdem sind hier größere Unterschiede in den Ergebnissen der beiden Arten der Verformungsmessungen zu erwarten. Einmal hat eine sonst gleiche Feinstmörtelschicht bei kurzen Probekörpern einen

größeren Anteil am zentrisch gemessenen Ergebnis als bei hohen Betonkörpern. Vor allem aber liefert hier die Oberflächenmessung bei starrer Krafteinleitung in jedem Fall zu geringe Stauchungsbeträge, so daß nach den aus Bild 5.7 ersichtlichen Beziehungen stets $\delta_w \geq \delta_p$ zu erwarten ist.

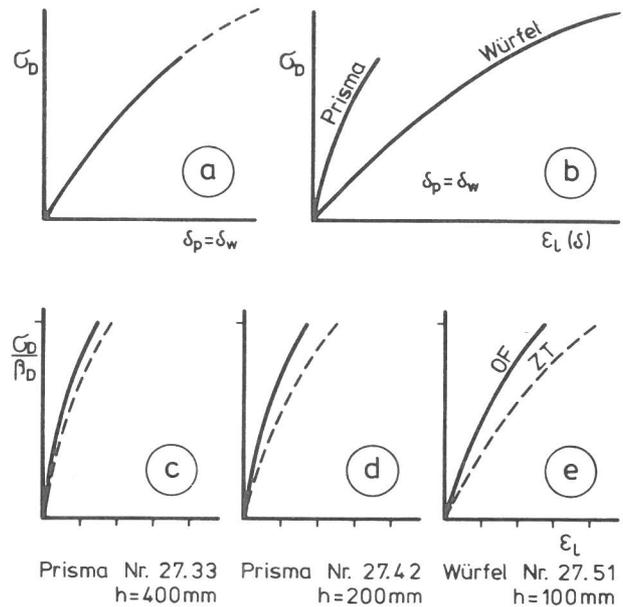


Bild 5.8

Prinzipieller Verlauf von Spannungs-Stauchungslinien schlanker bzw. gedrunener Probekörper bei gleich großen Differenzbeträgen δ der Längsverformung (obere Reihe) im Vergleich zu (untere Reihe) mit abnehmender Schlankheit sich vergrößernden Unterschieden aus Verformungsmessungen an der Probekörperoberfläche (OF) und zentrisch (ZT) zwischen den Druckplatten

Aus diesen Betrachtungen folgt für die Ermittlung von Längsverformungen, daß die Differenz zwischen Oberflächen- und zentrischer Messung mit abnehmender Schlankheit der Probekörper zunimmt. Eine Darstellung nach Bild 5.8 unten mit bezogenen Spannungen (bezogen auf die Probekörperfestigkeit β_D) und bezogenen Längsverformungen (d.h. Stauchungen ϵ_l) enthält aber noch einen Maßstabs-effekt, der leicht zu Fehlschlüssen verleitet. Werden Meßergebnisse von Probekörpern gleicher Länge miteinander verglichen, ist dies ohne Bedeutung. In dieser Arbeit steht aber der Vergleich unterschiedlich hoher Probekörper im Vordergrund.

Es sei vereinfachend angenommen, das Prisma und der Würfel in Bild 5.7 würden zwar bei Druckbeanspruchung verschieden große Längsverformungen erfahren, der Unterschiedsbetrag δ zwischen Oberflächen- und zentrischer Messung wäre je-

doch bei gleich hoher Druckspannung gleich groß. Die Kurven für die Abhängigkeit der Druckspannung von dieser Differenzverformung wären dann nach Bild 5.8a deckungsgleich. Der Linienzug für den Würfel würde lediglich wegen der höheren Probekörperfestigkeit über den Endpunkt des Prismas hinausreichen. Werden aber statt dessen (Bild 5.8b) die Verformungsdifferenzen nicht unmittelbar aufgetragen, sondern bezogen auf die Probekörperlänge (d.h. als Stauchungsbeträge), so unterscheiden sich die beiden Kurvenzüge deutlich voneinander. Dieser Effekt verstärkt sich noch, wenn auch für die Druckspannungen (y-Achse) die bezogene Form der Darstellung gewählt wird.

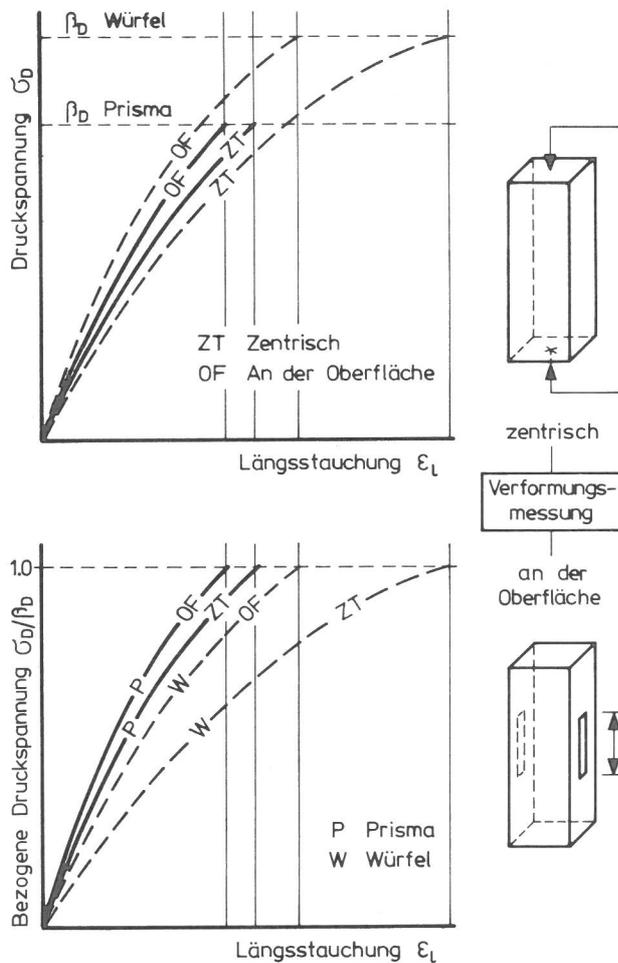


Bild 5.9
Spannungs-Stauchungslinien aus Oberflächen- und zentrischen Verformungsmessungen in unmittelbarer (oben) und auf die Probekörperfestigkeit β_D bezogener Darstellung

Bild 5.9 soll diesen Zusammenhang nochmals im Hinblick auf die in den nachfolgenden Untersuchungsergebnissen zu erwartenden Differenzen zwischen Oberflächen- und zentrischer Verformungsmessung

aufzeigen. Es verdeutlicht, wie stark sich die Reihenfolge von Spannungs-Dehnungslinien je nach Darstellungsart ändert. Bei vergleichenden Betrachtungen muß dies berücksichtigt werden.

5.4 Kennzeichnende Schwellen des Tragverhaltens

Nach den Ausführungen in Abschnitt 4.3 lassen sich die bei ansteigender Druckbeanspruchung im Betongefüge auftretenden Änderungen unterscheiden nach den Zuständen

- X Verdichten,
- Y Gefügebrauflockerung (Mikrorißbildungen und Mikrozerstörungen),
- Z Gefügezerstörung (Makrorißbildungen, später Entstehen von Bruchflächen).

Die Übergänge zwischen diesen Phasen sind durch charakteristische Spannungswerte gekennzeichnet.

5.4.1 Schwellenwerte

Die Spannung zu Beginn des Stadiums der Gefügebrauflockerung ist ein unterer Kennwert. Er wird in dieser Arbeit mit $\text{inf}\sigma_D$ bezeichnet. Dementsprechend erhält die obere Grenze der Gefügebrauflockerung, d.h. der Übergang zum Zustand Y nach Z, die Bezeichnung $\text{sup}\sigma_D$ (Bild 5.10). Den Abschluß bildet die maximal erreichte Druckspannung $\text{max}\sigma_D$, die das Versagen des Probekörpers markiert.

Bei eingehenderer Betrachtung der Vorgänge im Innern von druckbeanspruchten Betonkörpern lassen sich die hier aufgeführten drei Stadien des mechanischen Widerstandsvermögens von Beton noch weiter unterteilen. So gehen Wischers und L u s c h e von vier Abschnitten im Tragverhalten des Betons aus, indem sie im Zustand Z zwischen dem Anwachsen der Mikrorisse zu durchgehenden Längsrissen - also der eigentlichen Makrorißbildung, die den Betonkörper in stabbüdelartige Gebilde zerlegt - und dem späteren Ausknicken und Abscheren der Einzelstäbe dieses Stabbündels - also dem Entstehen der Druckflächen - unterscheiden /W9/. Dieser Grenzwert wird nachfolgend mit $\text{mac}\sigma_D$ bezeichnet.

Wichtiger für die Beurteilung der Belastbarkeit von Beton erscheint demgegenüber eine genauere Verfolgung der Mikrorißbildung im Zustand Y. Hierzu wird mit den vorliegenden Untersuchungen eine Schwelle $\text{mic}\sigma_D$ nachgewiesen, die das Stadium der überwiegenden Aufweitung bereits entstandener Risse vom Abschnitt der Ausbildung erster Mikrorisse in der Haftzone zwischen Zuschlag und Matrix

sowie erster Gefügerisse und Mikroer-
störungen trennt.

Grundlage hierfür liefert die Vorstel-
lung, daß auch bei linearem Anstieg der
mechanischen Beanspruchung nicht anzu-
nehmen ist, daß die Änderungen im Beton-
gefüge ebenfalls gleichmäßig fortschreiten.
Innerhalb des Zustandes Y beginnt
vielmehr die Bildung von Mikrorissen zu-
nächst langsam, beschleunigt sich dann
und erreicht ein Maximum. Von da an bil-
den sich weiterhin in schneller Folge
Risse, aber nicht mehr, als zum jewei-
ligen Zeitpunkt davor. Zu Beginn des Zu-
stands Y entstehen also an immer anderen
Stellen im Betonkörper neue Risse, wäh-
rend sich gleichzeitig bereits vorhandene
Risse aufweiten. Schließlich aber sind
überall verteilt bereits Rißansätze vor-
handen, Neubildungen sind selten; gegen
Ende von Zustand Y überwiegt die Aufwei-
tung von Gefügerissen.

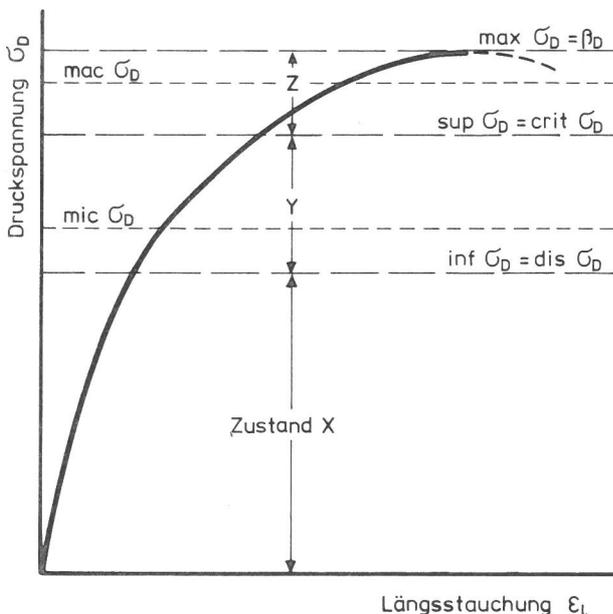


Bild 5.10
Kennzeichnende Gefügeschwellen und Spannungs-
Stauchungslinie von Beton

Zur Beschreibung der Gefügeänderungen im
Beton infolge mechanischer Beanspruchung
stehen damit die in Bild 5.10 eingetra-
genen fünf Grenzwerte an den Übergängen
zwischen den verschiedenen Stadien zur
Verfügung. Es sind Druckspannungswerte,
die das Tragverhalten des Betons charak-
terisieren. Sie werden nachfolgend "kenn-
zeichnende Schwellen" genannt. Damit soll
zum Ausdruck gebracht werden, daß bei
Steigerung der Druckspannungen über diese
Grenzwerte hinaus wichtige, für das Trag-
verhalten insgesamt entscheidende Schwel-
len überschritten werden. Übersteigt ei-

ne mechanische Beanspruchung einen
Schwellenwert, so führt eine Rückkehr zur
ursprünglichen Höhe der Druckspannung
nicht mehr zu dem zuvor vorhandenen Zu-
stand des Betongefüges.

5.4.2 Bestimmungsmethoden

Zur Bestimmung der Lage dieser Schwellen-
werte finden sich in der Literatur ver-
gleichsweise wenig Angaben. Mit $\max \sigma_D$
liegt zunächst nur die obere Versagens-
grenze fest. Wird allein dieser Wert er-
mittelt, so entspricht dies nach Bild 4.1
einer einparametrischen Charakterisie-
rung des Baustoffs, wie sie für standard-
mäßige Festigkeitsprüfungen typisch ist.
Für jede weitergehende Beschreibung des
Widerstandsvermögens von Beton müssen
zusätzliche Informationen vorliegen
(mehrfach-parametrische Charakterisie-
rung). Diese sind aus den Längs- und
Querverformungen sowie aus den Schall-
emissionen zu gewinnen.

Zur Erleichterung der Versuchsauswertung
bieten sich mathematische Darstel-
lungsformen für die Beschreibung der
Spannungs-Stauchungslinie an.

Ausführliche Angaben hierzu finden sich
bei E i b l und I v á n y i in
Abschnitt A1.3.2.2 /E2/. Danach werden
für den einaxialen Druckzustand nahezu
ausschließlich nichtlinear-elastische
Gesetzmäßigkeiten zugrunde gelegt. Die
Festlegung der Freiwerte im jeweiligen
Funktionsansatz erfolgt derart, daß eine
möglichst weitgehende Übereinstimmung
zwischen den in Versuchen ermittelten
Kurvenzügen und den idealisierenden Re-
chenansätzen erreicht wird. Ein Teil der
Stützpunkte zur Bestimmung des Kurven-
verlaufs kann dabei auch im fallenden
Ast der Spannungs-Stauchungslinie liegen
/W4/.

Ein solcher Weg schien zunächst auch für
die vorliegende Arbeit Vorteile zu bie-
ten. Ebenso wie in den Untersuchungen
von H e r m a n n /H7/ erwies sich
als mathematischer Ansatz die Funktion

$$\sigma = a_0 \cdot \epsilon^b \cdot e^{c \cdot \epsilon} \quad (1)$$

als besonders geeignet, zumal diese
durch logarithmieren in eine für multip-
le Regressionsrechnungen gut brauchbare
lineare Form übergeht:

$$\ln \sigma = \ln a_0 + b \cdot \ln \epsilon + c \cdot \epsilon \quad (2)$$

Dies entspricht:

$$y = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 \quad (3)$$

Der Vorteil einer derartigen mathematisch gefaßten Beschreibung einer Arbeitslinie kann darin liegen, daß durch die Ausgleichsrechnung gewisse Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf überbrückt werden. Aus den gefundenen Gleichungen könnten dann Tangentenrichtungen, die Lage ausgezeichneter Punkte usw. berechnet werden. Ebendies ist aber auch der entscheidende Nachteil eines derartig rechentechnisch ausgerichteten Vorgehens, da wesentliche Charakteristika des Kurvenverlaufs durch die Art des Funktionsansatzes bereits vorweggenommen sind, der physikalische Inhalt der Versuchsergebnisse somit weitgehend verloren gehen kann.

Aus diesem Grunde wird in der vorliegenden Arbeit darauf verzichtet, Spannungs-Stauchungslinien mit Gleichungen zu beschreiben, und statt dessen die Auswertung an physikalischen Vorgängen im Beton während des Druckversuchs orientiert.

Die Literatur enthält hierzu Angaben zum unteren Schwellenwert der Gefügauflockerung $\text{inf}\sigma_D$, welcher der Diskontinuitätsgrenze entspricht (vgl. Bilder 4.2 und 4.3), sowie zum oberen Schwellenwert $\text{sup}\sigma_D$, der der kritischen Druckspannung gleichzusetzen ist (vgl. Bild 5.10). Nachfolgend werden diese Auswertverfahren unter Berücksichtigung insbesondere der Arbeiten von Berg /B5/, B é r e s /B3,B4/ und K . N e w m a n /N12/ erläutert und kritisch überprüft. Zur Bestimmung der Mikrorißgrenze $\text{mic}\sigma_D$ müssen dagegen neue Wege beschritten werden, die sich dann auch als vorteilhaft zum Auffinden der unteren Gefügeschwelle $\text{inf}\sigma_D$ erweisen. Im übrigen ergibt sich die Reihenfolge der zu diskutierenden Gefügeschwellen aus der Anzahl der zur quantitativen Bestimmung erforderlichen Parameter (zunächst zwei- und dann dreiparametrische Beschreibung des Betons nach Bild 4.1).

5.4.3 Mikrorißschwelle $\text{mic}\sigma_D$

Die Spannungs-Stauchungslinie des Betons läßt in der Regel keine ausgezeichneten Punkte erkennen. Sie ist von Beginn an wenig und dann stärker gekrümmt. Wie in Bild 5.11a skizziert, zeigt die Arbeitslinie allerdings - wenn oftmals auch schwach ausgeprägt - einen Scheitelpunkt, der sich deutlicher als Maximum des Krümmungsverlaufs (Bild 5.11c) markiert. Die Lage dieses Scheitelpunktes könnte mit einer Änderung des Betongefüges im Zusammenhang stehen; sie ist aber abhängig von den Achsenmaßstäben /A3/. Damit scheidet die dem Scheitelpunkt zugeordnete Druck-

spannung $\text{ver}\sigma_D$ als möglicher Schwellenwert aus, da eine Größe, die sich mit dem gewählten Maßstab der Darstellung ändert, kein stofflicher Kennwert sein kann.

Wenn aber in Anlehnung an die Auswertung von Sieblinien /D7/ Spannungs-Stauchungslinien mit

$$\xi = \ln|\epsilon_l| \quad (4)$$

in eine halblogarithmische Form übergeführt werden, so zeigt ihr Kurvenverlauf deutlich einen Wendepunkt (Bild 5.12). Dessen Lage ist invariant gegenüber dem Ordinaten-Maßstab /A3/. Der Wendepunkt der halblogarithmierten Arbeitslinie nach Bild 5.11b markiert somit unabhängig von den Achsenmaßstäben stets eine bestimmte Höhe der Druckspannung.

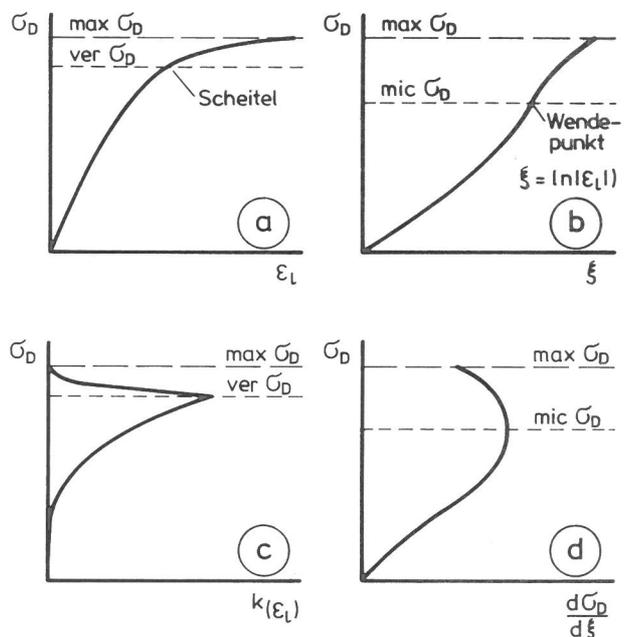


Bild 5.11

Spannungs-Stauchungslinie in einfacher (a) und halblogarithmischer Darstellung (b) mit Krümmungsverlauf (c) und Kurve der Tangentensteigung der halblogarithmierten Form (d)

Eine nicht-logarithmische Maßstabstransformation würde allerdings zu einem anderen Ergebnis führen. Derselbe physikalische Sachverhalt könnte dann möglicherweise mit einem anderen charakteristischen Wert beschrieben werden. Die halblogarithmierte Arbeitslinie hebt aber besonders deutlich einen Wechsel in der Entwicklung der Längsstauchung hervor, der auf wesentliche Änderungen im Betongefüge schließen läßt. Ein direkter Bezug z.B. zum Ausmaß der Risseaufweitung ist bisher jedoch noch nicht bekannt. Auch steht der Wendepunkt in keinem Zusammenhang mit dem o.a. Scheitelpunkt.

Er charakterisiert in jedem Fall aber einen Übergang, der auf der Mikrorißbildung im Betongefüge beruht, ist also als stoffspezifischer Kennwert geeignet. Die dem Wendepunkt zugeordnete Druckspannung wird deshalb nachfolgend als Mikrorißschwelle $\text{mic}\sigma_D$ bezeichnet.

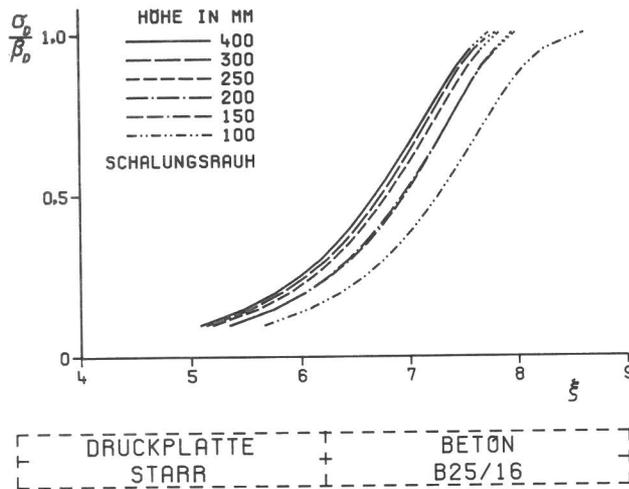


Bild 5.12
Spannungs-Stauchungslinien in halblogarithmischer Darstellung mit $\xi = \ln|\epsilon_l|$

Bild 5.12 läßt hierzu allerdings erkennen, daß bei dieser Darstellung die Lage des Wendepunktes wegen schleifender Schnitte nur ungenau bestimmt werden könnte. Ausgewertet wird daher

mit
$$\hat{\xi} = \frac{d\sigma_D}{d\xi} \quad (5)$$

die Kurve der Tangentensteigung der halb-logarithmierten Spannungs-Stauchungslinie, die zum Wendepunkt gehörig ein deutliches Maximum aufweist (Bild 5.11d).

5.4.4 Makrorißschwelle $\text{mac}\sigma_D$

Damit sind die Möglichkeiten, kennzeichnende Schwellenwerte aus den Arbeitslinien des Betons zu gewinnen, offensichtlich erschöpft. Zur Bestimmung des Maximums der Makrorißbildung $\text{mac}\sigma_D$ muß somit auf eine andere Kombination von Meßdaten zurückgegriffen werden. Umfangreiche Vorversuche haben gezeigt, daß hierfür die in Bild 5.13 skizzierte Abhängigkeit zwischen Druckspannung und Schallemission L_E geeignet ist. Als kennzeichnende Schwelle $\text{mac}\sigma_D$ wird demzufolge in der vorliegenden Untersuchung diejenige Druckspannung angesehen, bei der die Summe der Schallimpulse steil ansteigen beginnt. Gemäß den Erkenntnissen über den Bruchvorgang von Betonkörpern mit feinkörnigem Zuschlag (vgl. Abschnitt

4.3) ist allerdings zu erwarten, daß in diesen Fällen der Schwellenwert $\text{mac}\sigma_D$ dem maximalen Spannungswert $\text{max}\sigma_D$, d.h. der Festigkeitsgrenze, sehr nahe kommt. Meßtechnisch bedeutet dies, daß sich der Aufnehmer für die Schallemissionen zufällig an bereits ablösenden Bruchstücken befinden kann. Die aufgenommenen Geräusche wären dann ohne Aussagekraft.

Die Bestimmungsmethode für $\text{mac}\sigma_D$ ist demnach noch nicht befriedigend. Aber auch Ultraschall-Laufzeitmessungen wären - aus den gleichen Gründen - keine bessere Lösung für das hier interessierende Geschehen, kurz bevor die Prüfkraft ihren Maximalwert erreicht. Außerdem kämen Schwierigkeiten bei der Ankopplung von Sender und Empfänger hinzu /M4/.

5.4.5 Untere Gefügeschwelle $\text{inf}\sigma_D$

Beginnende Gefügauflockerungen lassen sich mit der Beobachtung der Laufzeit von Ultraschallimpulsen zuverlässig erkennen /G3,H15/. Diese Versuchsmethode ist daher grundsätzlich zur Bestimmung des unteren Schwellenwertes $\text{inf}\sigma_D$ geeignet. Trotzdem mußte für die vorliegende Arbeit auf derartige Messungen verzichtet werden, da an den Probekörpern neben den anderen Meßwertaufnehmern für die beiden Ultraschall-Meßköpfe kein Platz mehr blieb. Zudem wären Laufzeitmessungen an dünnen Versuchskörpern nicht sinnvoll gewesen, da sich hier den Impulsen der kurze Umweg über die anliegenden Druckplatten anbietet.

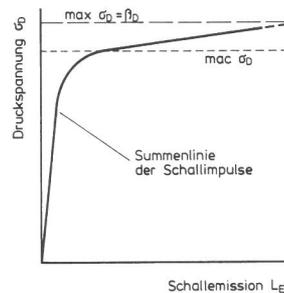


Bild 5.13
Ermittlung des Makroschwellenwertes $\text{mac}\sigma_D$ der Gefügeänderung von druckbeanspruchtem Beton mit Hilfe von Schallemissionen

Versuche, die Gefügeschwelle $\text{inf}\sigma_D$ statt dessen aus der Aufzeichnung von Schallemissionen nach Bild 5.13 zu bestimmen, schlugen fehl. Dieser Grenzwert ließ sich auch nicht unmittelbar aus der Spannungs-Stauchungslinie bestimmen. Es mußten daher andere Auswertverfahren herangezogen werden (Bild 5.14).

Ausgegangen wird hierbei von der Längsstauchung ϵ_l und der Querdehnung ϵ_q , in Verbindung mit der Probekörperdruckfestigkeit β_D nach Bild 4.1 also von einer dreiparametrischen Beschreibung der Be-

toneigenschaften. Im übrigen gelten dieselben Überlegungen wie bei der Bestimmung der Mikrorißschwelle $\text{mic}\sigma_D$. Analog zu den Gleichungen (4) und (5) ergeben sich danach aus der Querdehnung das logarithmische Maß der Querdehnung

$$\eta = \ln/\varepsilon_q / \quad (6)$$

und die Rechengröße

$$\hat{\eta} = \frac{d\sigma_D}{d\eta} \quad (7)$$

Das Maximum der Hilfsgröße $\hat{\eta}$ ist nach den Erfahrungen der vorliegenden Untersuchungen ein Anzeichen für die Lage der unteren Gefügeschwelle $\text{inf}\sigma_D$. Auch läßt sich die Querdehnzahl mittelbar durch ihren Anstieg auswerten, wobei das logarithmische Maß der Längsstauchung bzw. Querdehnung nach den Gleichungen (4) und (6) zugrunde gelegt wird:

$$\hat{\psi} = \frac{d\eta}{d\xi} \quad (8)$$

Der Schwellenwert $\text{inf}\sigma_D$ ergibt sich dann aus der Linearitätsgrenze dieser Hilfsgröße $\hat{\psi}$.

Diese Art der Bestimmung der untersten der fünf Schwellen des Tragverhaltens von Beton (vgl. Bild 5.10) erscheint kompliziert und wenig anschaulich. Sie ist letztlich aber nur eine Wiederholung der Überlegungen zu Bild 5.11 und auch notwendig, da bisherige Bestimmungsmethoden häufig versagen, zu ungenau sind oder sogar im Ergebnis vom jeweiligen Auswerter abhängen.

So bestimmt S h a h /S18/ eine "Rißeinleitungsgrenze" (initiation stress) aus der Höhe der Druckspannung, von der ab die Querdehnzahl deutlich größer wird. K . N e w m a n und J . N e w m a n haben demgegenüber den von ihnen "Diskontinuitätsgrenze" (discontinuity point) genannten Schwellenwert durch die Lage des Wendepunktes der Volumendehnung (vgl. Bild 4.3) definiert /N12/. Ebenso verfährt B é r e s (inflexion point) /B4/. Dieser Wendepunkt der Volumendehnung ist aber nur selten vorhanden und wenn, dann auch nur sehr schwach ausgeprägt. Es wird daher auch die Auffassung vertreten, die Kurve der Volumendehnung verlaufe linear bis etwa 70 oder 80 % der Probekörperdruckfestigkeit /U1/.

Der hier aufgezeigte Weg läßt demgegenüber Änderungen im Verformungsverhalten des Betons wesentlich deutlicher hervortreten und bietet bei der Auswertung der Diagramme nach Gleichungen (7) und (8) zugleich die Möglichkeit einer Doppelbe-

stimmung und damit Kontrolle des ermittelten Schwellenwertes.

Im übrigen ist davon auszugehen, daß sowohl die Bestimmung der Rißeinleitungs- oder der Diskontinuitätsgrenze als auch des Maximums der Hilfsgröße η ebenso wie der Linearitätsgrenze der Hilfsgröße $\hat{\psi}$ zu demselben Ergebnis führt, da alle drei genannten Auswertmethoden den gleichen physikalischen Inhalt haben: den Beginn eines deutlich geänderten Querdehnverhaltens. Natürlich ist der hier gegebene Zusammenhang nicht mathematisch exakt. Die angegebenen Formeln könnten nur dann ineinander übergeführt werden, wenn die Spannungs-Stauchungs- bzw. Dehnungslinien in Form von Funktionsansätzen vorlägen. Gerade dies wurde aber eingangs als möglicherweise verfälschend verworfen. Bewußt wird dabei in Kauf genommen, daß auch die hier vorgeschlagenen Bestimmungsmethoden in einigen Fällen unscharf sein können. Die angegebene Möglichkeit der Doppelbestimmung soll dies ausgleichen.

5.4.6 Obere Gefügeschwelle $\text{sup}\sigma_D$

Oberhalb des Schwellenwertes $\text{sup}\sigma_D$, der den Übergang von der Gefügeauflockerung zur Gefügezerstörung kennzeichnet, erfährt der Zusammenhalt des Versuchsmaterials erhebliche Veränderungen. Dabei stellt sich die Frage, bis zu welchem Zustand ein Probekörper noch als Ganzes aufzufassen ist, oder aber bereits als ein Gebilde, das zunehmend aus einer Vielzahl von ineinander verhakten Einzelstücken besteht.

Tatsächlich ist die genannte Zerstörung die wichtigste Ursache für die flacher werdende Neigung der Spannungs-Stauchungslinie im Bereich höherer Druckspannungen. Die gemessenen Verformungswerte enthalten einzelne oder aufsummierte Diskontinuitäten /R1/. Sie zeigen damit weniger das Dehnverhalten des Materials an, als die augenscheinliche Dehnfähigkeit des Probekörpers /I4/. Das aber ist keine Einschränkung, da gerade dieses Verhalten die Information beinhaltet, die Aufschluß über Gefügeänderungen im Beton gibt.

In Anbetracht der sich verstärkenden Bildung von Makrorissen ist es verständlich, daß das Volumen eines Probekörpers von einer bestimmten Druckspannung an nicht mehr ab-, sondern zunimmt. Hierdurch zeichnet sich ein minimales Probekörpervolumen $\text{min}V$ ab. Die dazu gehörige Spannung wird nach den Erläuterungen zu Bild 4.3 als kritische Druckspannung $\text{crit}\sigma_D$ bezeichnet. Sie ist ein

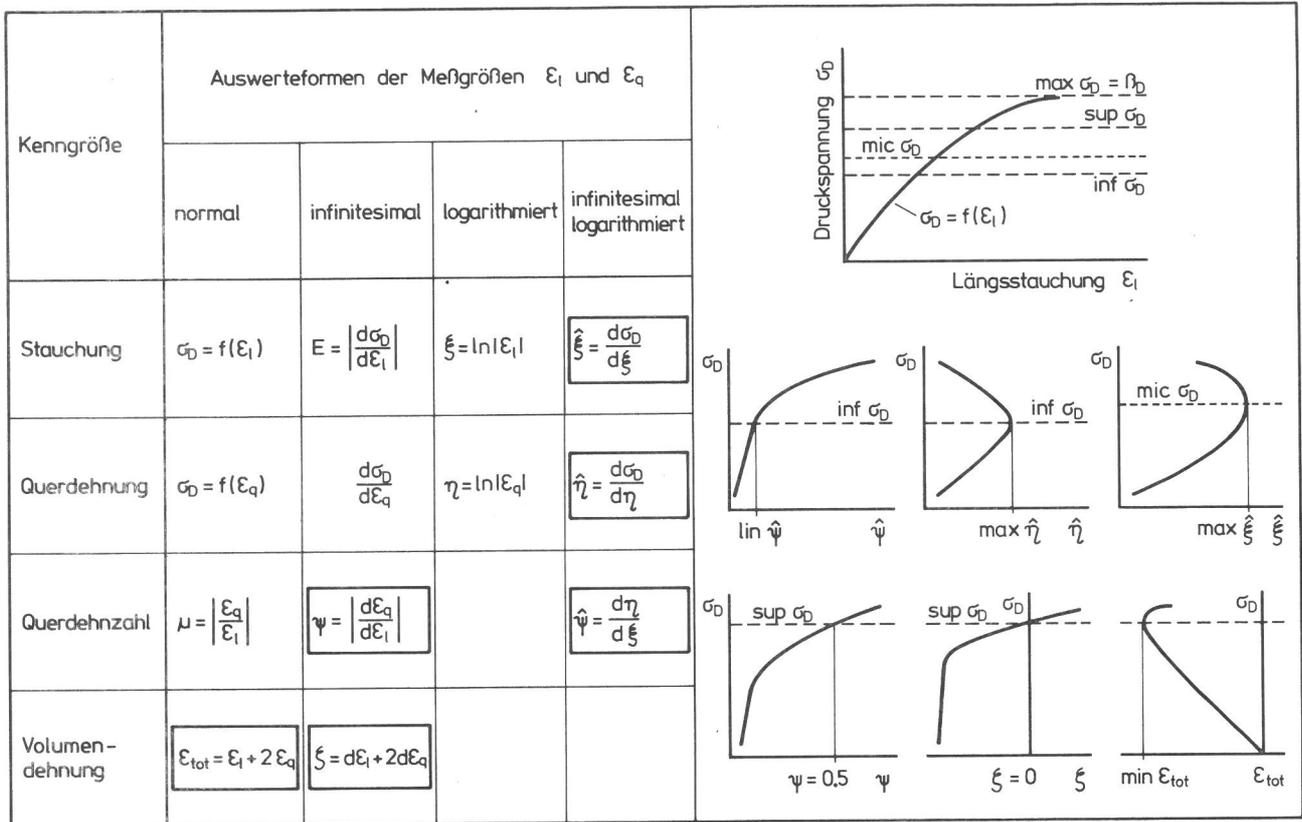


Bild 5.14

Rechengrößen zur Bestimmung kennzeichnender Schwellen im Widerstandsvermögen von Beton gegenüber Druckbeanspruchung

geeigneter Schätzwert zur Bestimmung der Gefügeschwelle $\text{sup}\sigma_D$ (Bild 5.10). Anstatt aus der Volumenänderung ΔV läßt sich dieser Schwellenwert auch unmittelbar aus der Volumendehnung

$$\epsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V} \quad (9)$$

entnehmen. Mit $V = b \cdot d \cdot h$

und $V + \Delta V = (b + \Delta b) \cdot (d + \Delta d) \cdot (h + \Delta h)$

sowie $\epsilon_1 = \frac{\Delta h}{h}$ $\epsilon_2 = \frac{\Delta b}{b}$ $\epsilon_3 = \frac{\Delta d}{d}$

ergibt sich unter Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (10)$$

Hierin wird somit vorausgesetzt, daß sich die bei Druckbeanspruchung auftretende Volumenänderung des Probekörpers ausreichend zuverlässig mit den Werten Δh , Δb und Δd bzw. ϵ_1 , ϵ_2 und ϵ_3 beschreiben läßt. Tatsächlich stellt dies jedoch je nach Probekörpergröße eine mehr oder weniger grobe Näherung dar, da die Verformung meist nur an wenigen Stellen der Betonkörper - in der Regel in

mittlerer Probekörperhöhe - gemessen werden kann und außerdem dort nur örtliche Verzerrungen festzustellen sind. Auch ist das Zusammentreffen von Bruch- und Meßstelle rein zufällig /R14/. Dementsprechend unsicher sind Rückschlüsse auf die gesamte Volumenänderung aufgrund lokaler Erscheinungen. Um dies zum Ausdruck zu bringen, wird hier die Addition der Dehnungsbeträge nicht als Volumendehnung ϵ_{vol} angesehen und deshalb einschränkend als Dehnungssumme ξ_{tot} bezeichnet. Bei idealer Verformung des Probekörpers nach Bild 5.1e wäre $\xi_{tot} = \epsilon_{vol}$.

Aus Gleichung (10) ergibt sich damit beim einaxialen Druckversuch mit

$$\epsilon_l = \epsilon_1 \quad \text{und} \quad \epsilon_q = \epsilon_2 = \epsilon_3$$

die Beziehung

$$\xi_{tot} = \epsilon_l + 2\epsilon_q \quad (11)$$

Es bleibt anzumerken, daß die Volumendehnung mit ihrem Minimum - und damit die Gefügeschwelle $\text{sup}\sigma_D$ - zuverlässiger als hier anstatt rechnerisch aus Längs-

stauchung und Querdehnung mit einer direkten Meßmethode ermittelt werden könnte. Ein derartiges Verfahren /E1,S23/ ist allerdings für Versuchsserien mit Probekörpern unterschiedlicher Höhen weniger geeignet und hätte im vorliegenden Fall - wo die Volumenänderung nicht die einzige Zielgröße ist - u.a. auch das Anbringen weiterer Meßwertaufnehmer am Probekörper ausgeschlossen.

Neben der Bestimmung der kritischen Druckspannung über das Minimum der Dehnungssumme ϵ_{tot} sind in Bild 5.14 noch zwei weitere Nachweismöglichkeiten für den Schwellenwert $sup\sigma_D$ angegeben, die auf Vorschläge von **B e r g** /B5/ zurückgehen. Danach wird nicht der Verlauf von ϵ_{tot} als Ganzes betrachtet, sondern die Änderung dieser Größe von Kraftstufe zu Kraftstufe:

$$\xi = d\epsilon_l + 2d\epsilon_q \quad (12)$$

Ist die Druckspannung mit dem minimalen Probekörpervolumen erreicht, so wechselt die Volumenänderung von negativen zu positiven Werten. Bei $sup\sigma_D$ ist somit die Hilfsgröße $\xi = 0$.

Die obere Gefügeschwelle $sup\sigma_D$ kann schließlich auch aus der Querdehnzahl ermittelt werden. In gleicher Weise ergibt sich hier eine schärfere Bestimmungsmöglichkeit, wenn nicht unmittelbar von den Dehnungswerten, sondern von den Dehnungsänderungen je Kraftstufe ausgegangen wird:

$$\psi = \left/ \frac{d\epsilon_q}{d\epsilon_l} \right/ \quad (13)$$

Ist $sup\sigma_D$ erreicht, so wird das Verhältnis dieser infinitesimalen Dehnungsbeiträge $\psi = 0,5$. Dies ist der für einen festen Körper theoretisch größtmögliche Wert, wie aus Gleichung (12) für $\xi = 0$, d.h. keine Volumenänderung des Probekörpers bei erreichtem Minimalvolumen, leicht zu ersehen ist.

6 Versuchsplan

6.1 Zielgrößen

Nach den voranstehenden Überlegungen läßt sich das Tragverhalten von Beton durch eine Reihe ausgezeichneter Spannungswerte beschreiben, die als kennzeichnende Schwellen der Änderungen im Betongefüge anzusehen sind. Es hat sich gezeigt, daß für die Ermittlung derartiger Gefügeschwellen eine im Sinne von Bild 4.1 mehrfach-parametrische Beschrei-

bung des Widerstandsvermögens des Versuchsbetons notwendig ist. Neben der Druckfestigkeit müssen damit auch die Verformungen der Probekörper bekannt sein.

Die Versuche sind demzufolge auf vier Zielgrößen auszurichten: auf die Ermittlung der Druckfestigkeit, der Längs- und Querverformungen und die Aufnahme von Schallemissionen. Hieraus lassen sich dann weitere Kenngrößen - wie Volumenänderung, Verformungsarbeit und Völligkeitsgrad - ableiten. Wünschenswert sind außerdem Meßdaten über die Deformation von Außenflächen der Versuchskörper. Hierfür sind zusätzliche Verformungsmessungen in einem Meßraster erforderlich.

6.1.1 Druckfestigkeit

Als Druckfestigkeit β_D gilt der im Kurzzeitversuch maximal erreichte Spannungswert. Die Höchstkraft $maxF$ wird hierbei stets auf den Ausgangsquerschnitt des Probekörpers bezogen. Wie **H e r m a n n** /H7/ gezeigt hat, ist der Fehler gegenüber der rheologischen Betrachtungsweise, bei der die Querschnittsänderung berücksichtigt wird, unbedeutend. Er liegt bei Beton etwa in der Größenordnung von maximal 5 %.

6.1.2 Längenänderungen

Längenänderungen sind die Längsverformung Δl sowie die beiden Querverformungen Δb und Δd . Sie beziehen sich in der vorliegenden Untersuchung stets auf Maßlinien durch den Schwerpunkt des Probekörpers. Bei der schlaffen Druckplatte werden Längsverformungen deshalb auf den Mittenstempel bezogen. Diese Festlegung ist außerdem wichtig bei möglicherweise kissenförmigen Deformationen von meist gedrungenen Probekörpern, wie sie z.B. in Bild 5.1 und in /H15/ skizziert sind.

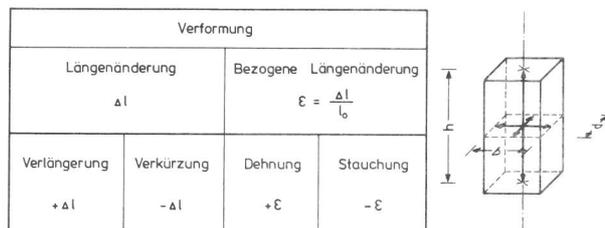


Bild 6.1

Maße und Verformung von Probekörpern ("Länge" l als allgemeiner Ausdruck für ein Maß)

Für Längenänderungen gilt die allgemeine Regel, wonach Verkürzungen als nega-

tive Verformungen angegeben werden (Bild 6.1).

6.1.3 Schallemissionen

Eigengeräusche werden durch Änderungen im Betongefüge ausgelöst. An der Probekörperoberfläche können sie in Form von Schwingungsenergie registriert werden /R14/ mit schmalen Schwingungsbreiten /N5/. Es ist anzunehmen, daß nicht nur Häufigkeit und Amplitude der Emissionen vom Geschehen im Innern des Versuchskörpers abhängen, sondern auch die Schallfrequenz (Tonhöhe). Probekörper mit unzerstörtem Gefüge werden höhere Frequenzen aufweisen als solche mit Mikrorissen. Ein verlässlicher Überblick über Gefügeänderungen in druckbeanspruchtem Beton ist daher wahrscheinlich nur durch eine Analyse des gesamten Frequenzbandes zu erhalten. Derartige Untersuchungen erfordern jedoch umfangreiche Meß- und Auswerteinrichtungen.

Wertvolle Aufschlüsse lassen sich aber auch bereits aus der Häufigkeit des Auftretens von Eigengeräuschen gewinnen. Ausgehend von Erfahrungen aus vorangegangenen Untersuchungen /S8/ wird in der vorliegenden Arbeit deshalb die Anzahl I_E von solchen Geräusch-Impulsen registriert, die in einem schmalen Band des Ultraschallbereichs liegen und eine vorgewählte Amplitude überschreiten. Diese Impulse werden während des Versuchs aufsummiert und als Ganglinien in Abhängigkeit von der Druckspannung aufgezeichnet.

6.1.4 Abgeleitete Kenngrößen

Die für die Bestimmung der kennzeichnenden Schwellen wichtige V_{01} wurde bereits im Zusammenhang mit den in Abschnitt 5.4.6 angegebenen Gleichungen (9) bis (12) diskutiert.

Zur Verformungsarbeit W leistet beim einaxialen Druckversuch während des Kraftanstiegs bis zur Kraftstufe i nur die Verkürzung Δh des Probekörpers in Richtung der Prüfkraft F einen Beitrag:

$$W = \int_0^i F \cdot d(\Delta h)$$

Mit $\sigma = \frac{F}{A}$ und $d\epsilon_l = d\left(\frac{\Delta h}{h}\right)$

wird $W = A \cdot h \cdot \int_0^i \sigma \cdot d\epsilon_l$

$$\text{oder } W = V \cdot w \quad (14)$$

$$\text{wobei } w = \int_0^i \sigma \cdot d\epsilon_l \quad (15)$$

die spezifische, d.h. auf das Probekörpervolumen bezogene Verformungsarbeit w ist, die sich als Fläche unterhalb der Spannungs-Stauchungslinie darstellt.

Der Völligkeitsgrad α bezieht sich ebenfalls auf die Fläche unterhalb der Spannungs-Stauchungslinie. Für eine Kraftstufe i gibt er das Verhältnis der Größe dieser Fläche zum umschließenden Rechteck an.

$$\alpha_i = \frac{1}{\sigma_{D,i} \cdot \epsilon_{l,i}} \cdot \int_0^i \sigma_D(\epsilon_l) \cdot d\epsilon_l \quad (16)$$

beschreibt damit also die Krümmung der Spannungs-Stauchungslinie.

Dies gilt ebenso für den Geometrischen Völligkeitsgrad $\hat{\alpha}$, nur daß hier sowohl die Druckspannungen σ_D als auch die Stauchungen ϵ_l in bezogener Form vorliegen. Bezugswerte sind z.B. die Meßgrößen bei erreichter Höchstkraft $\max F$:

$$x = \frac{\epsilon_{l,i}}{\epsilon_{l,u}} \quad y = \frac{\sigma_{D,i}}{\sigma_{D,u}} = \frac{\sigma_{D,i}}{\beta_D}$$

Hiermit ergibt sich

$$\hat{\alpha} = \int_0^i y(x) \cdot dx \quad (17)$$

6.1.5 Deformation der Druckflächen

Bei Versuchen mit der schlaffen Druckplatte kann während des Versuchsablaufs die Deformation der Probekörperdruckflächen gemessen werden. Dies ist eine zusätzliche Möglichkeit, Informationen über das Verformungsverhalten von Betonkörpern zu gewinnen. Dabei ergibt sich das Meßrastrer aus der Anzahl der Stempel der schlaffen Druckplatte (s. Abschnitt 7.2). Im vorliegenden Fall sind es 25 Einzelstempel. Jeder hat eine quadratische Aufstandsfläche von $A_S = 400 \text{ mm}^2$. Gemessen werden die Längsbewegungen δ_j der Einzelstempel relativ zu einem Meßrahmen, der eine Bezugsebene darstellt.

Ebenso wie sich die Balligkeit von Würfeldruckflächen mit einem einzigen Zahlenwert ausdrücken läßt /S11/, so wird auch hier als Maß für die Abweichung von der ebenen Fläche das Volumen V_D der deformierten Druckfläche ermittelt:

$$V_D = A_S \cdot \sum_{j=1}^{25} v_j \quad (18)$$

$$\text{mit } v_j = \max \delta - \delta_j \quad j = 1 \dots 25 \quad (19)$$

Bei der Berechnung von V_D wird damit nicht unmittelbar von den o.a. δ -Werten ausgegangen, sondern von Verschiebungen v der Einzelstempel, die sich auf eine parallele Ebene im Abstand $\max \delta$ zum Meßrahmen beziehen. Damit wird ausgeschlossen, daß sich - rein rechnerisch - bei der Summenbildung negative und positive Relativbewegungen der Einzelstempel gegenseitig aufheben.

6.1.6 Bauchung von Seitenflächen

Bei Parallelversuchen mit zwei grundverschiedenen Krafteinleitungssystemen, wie hier mit starren und schlaffen Druckplatten, liegt der Wunsch nahe, Aufschluß über das vermutlich unterschiedliche Querdehnverhalten der Probekörper - vor allem in der Nähe der Endflächen - zu erhalten. In erprobter Weise /S10, S12/, werden hierzu zunächst Dehnungsmeßstreifen an den Seitenflächen der Probekörper angebracht. Diese Meßwertaufnehmer können aber keine Auskunft darüber geben, um wieviel die Probekörperseitenflächen in der Nähe der Druckplatten u.U. nach außen oder innen ausbauchen.

Die Bauchungswerte werden bei Probekörpern aus Beton vergleichsweise gering sein. Das Messen derart kleiner Wege ist aber außerordentlich schwierig, da die Meßunsicherheit bereits in der Größenordnung des Meßwertes liegen kann.

formungsverhalten der Probekörper dienen. Bei der Aufnahme der Meßdaten wird hierzu in gleicher Weise wie bei der Bestimmung der Druckflächendeformationen vorgegangen. Mit einem ähnlichen Meßraster wird die 100 mm x 100 mm große Beobachtungsfläche ebenfalls in 25 Teilflächen unterteilt und analog zu Gleichung (18) eine Maßzahl V_S für das Bauchungsvolumen ermittelt. Probekörper mit Schlankheiten $h/b < 1$ können damit allerdings nicht einbezogen werden. Gemessen werden die Abstandsänderungen einer Probekörperseitenfläche. Als Bezugsebene dient eine Meßträgerplatte, die am Probekörper befestigt wird.

6.2 Versuchsprogramm

Vorgesehen waren Kurzzeitversuche an Probekörpern aus Beton und Mörtel mit geschlossenem Gefüge und je zwei Festigkeitsklassen. Die notwendigen Parallelversuche mit starren und schlaffen Druckplatten führten zu einem Versuchsprogramm mit 24 Hauptserien und 9 Zusatzserien (Bild 6.2). Dabei wurden mit den Zusatzserien Vorversuche durchgeführt sowie Einflüsse einiger Versuchskomponenten auf das Untersuchungsergebnis geklärt (Einfluß des Verdichtens des Frischbetons, Einfluß der Kraftregelung, Festigkeitsentwicklung mit dem Betonalter). Über die Verwendung der insgesamt 33 Versuchsserien gibt im einzelnen Bild A3 Auskunft. Insgesamt wurden 894 Probekörper geprüft. Hinzu kamen 111 Betonwürfel mit 200 mm Kantenlänge für die Güteprüfung der über einen Zeitraum von 6 Monaten hergestellten Betonmischungen.

Insgesamt 33 Versuchsserien	Material	Zuschlag- Größtkorn	Anzahl Versuchsserien je Festigkeitsklasse			Anzahl Probekörper
			B15	B25	B35	
24 Hauptserien	Mörtel	4mm	4	8		324
	Beton	16mm		8	4	324
9 Zusatzserien	Mörtel	4mm	1	1		42
	Beton	16mm		6	1	204

Bild 6.2
Anzahl Versuchsserien

Die Versuchsergebnisse der vorliegenden Untersuchung zur Bauchung von Probekörperseitenflächen sollen deshalb mehr der allgemeinen Orientierung über das Ver-

In den Hauptserien wurden je zur Hälfte Probekörper aus Mörtel mit einem Größtkorn von 4 mm und Beton mit 16 mm Größtkorn geprüft. Die Versuche erstreckten

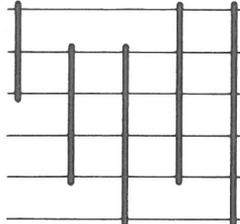
Mörtel bzw. Beton (Kurzbezeichnung mit Angabe des Größtkorns)	Sägemuster	Versuchsserie Nr.																											
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
B 25/16	I	●		○		○																					●		
	II		●		○		○																						●
B 25/04	I							●		●		○		○															
	II								●		●		○		○														
B 15/04	I																			○		●							
	II																				○		●						
B 35/16	I															●		○											
	II																●		○										
Zielgrößen der Messungen		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Zeichenerklärungen		Krafteinleitung : ● starre Druckplatten ○ schlafe Druckplatten																Meßdatenerfassung : L_E Schallemission β_D Druckfestigkeit ϵ_L Längsstauchung ϵ_q Querdehnung V_S Bauchung Seitenflächen V_D Deformation Druckflächen											

Bild 6.3

Versuchsprogramm und Zielgrößen der 24 Hauptserien (Einzelangaben im Anhang Bild A3)

sich außerdem auf drei Festigkeitsklassen: B15, B25 und B35. Art und Anzahl der Zielgrößen waren bei allen Serien gleich. Beim B25 stand jedoch gegenüber den beiden anderen Betongütern die doppelte Anzahl an Probekörpern zur Verfügung.

In welcher Weise die Meßdatenerfassung für die 6 Zielgrößen auf die verschiedenen Serien verteilt wurde, ist aus den Bildern 6.3 und A3 ersichtlich. Danach waren bei sämtlichen Probekörpern der 24 Hauptserien die Druckfestigkeit β_D und die Längsstauchung ϵ_L zu ermitteln. Die übrigen Verformungsgrößen wurden demgegenüber in der Regel nur an jedem zweiten, teilweise auch nur an jedem dritten Versuchskörper bestimmt. Die Ermittlung der Deformation der Druckflächen beschränkte sich naturgemäß auf die Versuchsserien mit schlaffen Druckplatten.

6.3 Probekörper

Um den Einfluß der Schlankheit im gesamten Bereich untersuchen zu können, der für Festigkeitsprüfungen von Beton interessant ist, wurden Probekörper mit stets gleichem Querschnitt von 100 mm x 100 mm hergestellt und die Höhen von $h = 25$ mm bis 400 mm variiert. Für die praktische Versuchsdurchführung war es dabei aus terminlichen Gründen und bedingt durch die zur Verfügung stehenden Geräte notwendig, die Gesamtzahl der Probekörper auf jeweils zwei Versuchsserien aufzuteilen. Im ersten Teil wurden Probekörper mit Schlankheiten von $h/b = 4$ bis $h/b = 1$ (also Prismen und Würfel) geprüft, im zweiten Teil dann gedrungene Probekörper mit Schlankheiten von $h/b = 1$ bis $h/b = 0,25$ (Würfel und Platten). Die Würfel bildeten somit das Bindeglied zwischen den zusammengehörigen Serien. Nach der Art der Her-

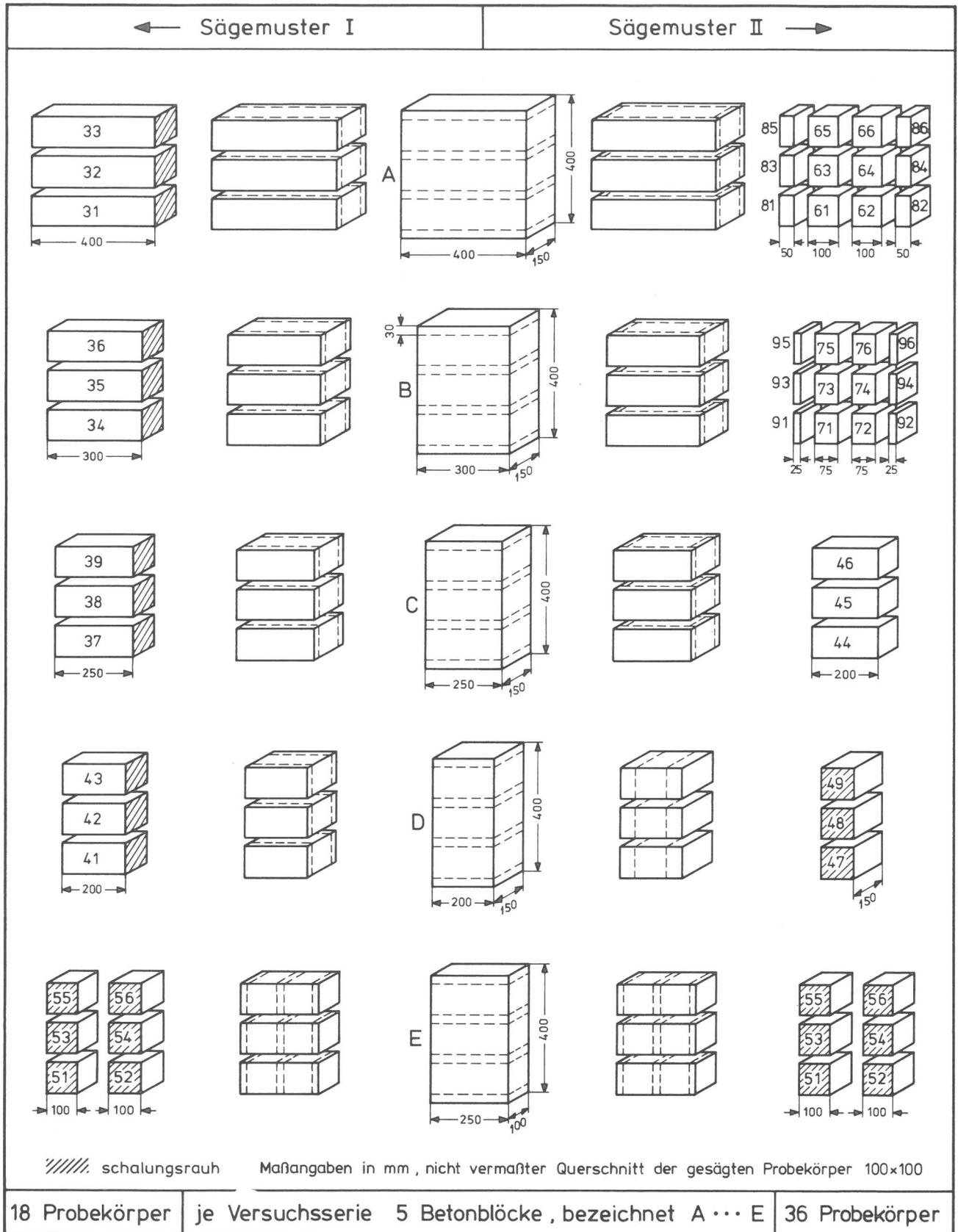


Bild 6.4

Sägemuster für das Herausarbeiten der Probekörper aus Betonblöcken

stellung der Probekörper sind diese Doppelserien im Bild 6.3 mit Sägemuster I bzw. II bezeichnet. Hieraus ist ersichtlich, daß die Probekörper der vorliegenden Untersuchung nicht wie üblich in Formen hergestellt, sondern aus größeren Betonblöcken herausgesägt wurden (Bild 6.4). Dies geschah aus mehreren Gründen.

Zunächst war zu berücksichtigen, daß die kleinsten Abmessungen eines Probekörpers mindestens viermal so groß sein sollten wie das Größtkorn des Zuschlags /N10/. Anderenfalls wäre ein Übermaß an Matrix bzw. Mörtel erforderlich, um die Hohlräume zwischen den Körnern und den Wandungen der Herstellform zu füllen (sog. Wandungseffekt). Würde es an Mörtel mangeln, wären kleine Probekörper notgedrungen weniger verdichtet als große. Außerdem blieb zu beachten, daß sich der Anteil des Grobkorns am Gesamtvolumen eines Probekörpers mit steigender Formengröße vermindert /H8/. In den Ecken von Betonkörpern, die in Formen hergestellt sind, fehlen ohnehin Größtkörner, was sich vor allem bei gedrun-genen Probekörpern auswirken müßte. Dies alles hätte mit Sicherheit einen Einfluß auf das Festigkeitsergebnis /S3/, würde also den für die vorliegenden Untersuchungen maßgeblichen Einfluß der Probekörperschlankheit verfälschen.

Bei in Formen hergestellten Probekörpern bildet sich außerdem an den Wandungsflächen eine dünne Mörtelschicht, die im Vergleich zu tiefer liegenden Bereichen ein deutlich anderes Verformungsverhalten zeigt (vgl. Abschnitt 5.3). Eine Ungleichheit der Stauchung zwischen Kern- und Randbereichen würde aber ebenfalls die Versuchsergebnisse der vorliegenden Arbeit - vor allem im Zusammenhang mit der quantitativen Bestimmung der kennzeichnenden Gefügeschwellen - entscheidend verändern.

Sowohl ungewollte Einflüsse auf die Festigkeitsergebnisse als auch auf die Verformungswerte erforderten somit für die vorliegende Untersuchung gesägte und nicht geschalte Probekörper. Ein Teil der Probekörper sollte jedoch schalungsraue Druckflächen behalten, um auch diesen Einfluß studieren zu können. Unerwünscht war hierbei allerdings die bekannte Schwächezone an der "Stampfseite", die beim Herstellen der Probekörper durch das abschließende Glätten und ein Absetzen von Wasser bzw. Zementleim entstehen kann. Die Probekörper wurden deshalb mit horizontalen Schnitten aus den Betonblöcken herausgearbei-

tet. Dies brachte gleichzeitig den Vorteil einer gleich großen Verdichtung an beiden Probekörperenden. Bei schalungsrauen Druckflächen mußte damit die Breite der Betonblöcke der späteren Probekörperhöhe entsprechen. Auf diese Weise ergaben sich für die Betonblöcke die in Bild 6.4 skizzierten fünf Formate A bis E. Nach dem Sägemuster I (links im Bild) entstanden daraus je drei Prismen mit Höhen von 200, 250, 300 und 400 mm. Ebenso wie die aus dem Betonblock E herausgesägten sechs Würfel hatten sie alle schalungsraue Druckflächen.

Bei der nächsten Versuchsserie wurden demgegenüber nach Sägemuster II (rechts in Bild 6.4) überwiegend gedrungene Probekörper mit gesägten und anschließend geschliffenen Druckflächen herausgearbeitet, und zwar - wegen der bei dünnen Probekörpern zu erwartenden größeren Streuung der Versuchsergebnisse - nicht nur drei, sondern jeweils sechs Probekörper mit Höhen von 25, 50, 75 und 100 mm. Zusätzlich entstanden je drei 150mm-Prismen mit schalungsrauen und 200mm-Prismen mit gesägten Druckflächen. Aus Betonblock E ergaben sich wiederum sechs Würfel mit schalungsrauen Druckflächen. Sie ermöglichten einerseits einen Vergleich mit den aus Block A gewonnenen Würfeln, die gesägte Druckflächen aufwiesen, und dienten außerdem als Bezug auf die vorangegangene Versuchsserie nach Sägemuster I.

Die Probekörper waren mit laufenden Nummern gekennzeichnet, die das gesamte Versuchsprogramm hindurch sowohl Größe als auch ursprüngliche Lage im Betonblock erkennen ließen (Bild 6.4). Sie erhielten außerdem nach ihrer Höhe und Beschaffenheit der Druckflächen eine Gruppennummer. Damit ergaben sich 11 Gruppen, die - wie Bild 6.5 zeigt - bis zur Würfelgröße jeweils mit sechs, bei Prismen mit je drei Probekörpern besetzt waren. Eine Versuchsserie nach Sägemuster I hatte auf diese Weise 18, eine Serie nach II insgesamt 36 Probekörper. Für die Beurteilung des Einflusses der Schlankheit auf das Festigkeitsergebnis standen damit für jede Betonfestigkeitsklasse und für jede der beiden Arten der Krafteinleitung jeweils $18 + 36 = 54$ Versuchskörper zur Verfügung. Dabei dienten die einerseits mit schalungsrauen, zusätzlich aber auch mit gesägten Druckflächen hergestellten Würfel und 200mm-Prismen neben der Bestimmung der eingangs angegebenen Zielgrößen vor allem der Ermittlung des Einflusses, den dünne Mörtelschichten an den Endflächen der

Gruppe Nr. →		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Anzahl Probekörper		
Blockform	Sägemuster	Probekörperhöhe in mm											Sägemuster (Serie)		
		400	300	250	200	200	150	100	100	75	50	25	I	II	
A	I	3								6		6		3	12
	II														
B	I		3											3	12
	II									6		6			
C	I			3										3	3
	II					3									
D	I				3									3	3
	II						3								
E	I								6					6	6
	II								6						
Druckflächen der Probekörper:													18	36	
											<input type="checkbox"/>	schalungsrau			
											<input type="checkbox"/>	gesägt und geschliffen			

Bild 6.5

Übersicht zur Anzahl der aus den Betonblöcken A...E herausgesägten Probekörper mit Angabe der Beschaffenheit der Druckflächen

Probekörper auf zentrische Verformungsmessungen haben. Dies war, wie im Zusammenhang mit den Bildern 5.7 bis 5.9 bereits erläutert, für die spätere Versuchsauswertung (Abschn. 10.2.2) von erheblicher Bedeutung.

6.4 Betonalter zum Zeitpunkt der Prüfung

Die Hydratationsprozesse im Zementstein dauern lange Zeit an, wodurch sich die Betoneigenschaften verändern. Besonders in jungem Alter nimmt die Druckfestigkeit von Beton stark zu. Bei Vergleichsprüfungen stört dieser Einfluß der Nacherhärtung des Betons.

Für die vorliegenden Versuche wurde deshalb ein Betonalter von 56 Tagen vorgesehen und außerdem zur Betonherstellung

ein schnell erhärtender Zement verwendet. Unter diesen Bedingungen war die Festigkeitsentwicklung des Betons zum Zeitpunkt der Prüfung nur noch sehr schwach ausgeprägt /W10/. Dies erleichterte die Durchführung der Versuche, da die vorgesehene große Zahl der Probekörper je Versuchsserie dann auf einen Prüfzeitraum von zwei bis drei Tagen verteilt werden konnte. Die hohe Anfangsfestigkeit ermöglichte außerdem das rechtzeitige Heraussägen der Probekörper aus den Betonblöcken. Zu diesem Zeitpunkt mußte der Beton bereits genügend fest sein. Schließlich durfte auch die anschließende Trocknungszeit nicht zu kurz sein, um eine Beeinflussung der Längenänderungen durch unterschiedliche Feuchtigkeitsverteilung /P3/ in den Probekörpern möglichst auszuschließen.

7 Versuchseinrichtungen

Die Bilder 7.1 und 7.2 zeigen den Versuchsaufbau mit der Prüfpresse, den Einrichtungen zur Meßdatenerfassung und -registrierung sowie der Meßanordnung zur Aufnahme von Eigengeräuschen der Probekörper (Schallemissionstechnik).

7.1 Prüfpresse

Die Universalprüfpresse, Baujahr 1974, mit Prüfkraften bis 1600 kN in acht Bereichen hatte einen eingeschliffenen hydraulischen Arbeitskolben und entsprach gemäß DIN 51 300 der Güteklasse 1. In den für die vorliegenden Versuche hauptsächlich benutzten Prüfkraftbereichen betrug der mittlere relative Fehler der Kraftanzeige weniger als $\pm 0,4\%$. Das obere bewegliche Querhaupt war mit den Spindeln hydraulisch verspannt. Insgesamt war der Maschinenrahmen für höhere Prüfkraft als 1600 kN ausgelegt, hatte somit eine größere Steifigkeit als andere vergleichbare Baustoffpressen.

Die Kraftregelung erfolgte elektrohydraulisch /K6/. Am Sollwertgeber der Regeleinrichtung konnten der Anstieg der Prüfkraft je Zeiteinheit oder auch die Zunahme der Verformung des Probekörpers, wahlweise als Weg oder als Stauchung, eingestellt werden. Elektronische Grenzwertmelder überwachten den Prüfverlauf. Sie kontrollierten u.a. den Abfall der Prüfkraft an der Versagensgrenze des Betonkörpers. Hierdurch wurden einerseits die maximalen Prüfkraften in stets gleicher Weise erfaßt. Dies war besonders bei der Prüfung dünner Probekörper mit starren Druckplatten bedeutsam, da hier leicht im Anschluß an die eigentliche Zerstörung des Probekörpers Umformvorgänge und das Zerquetschen einzelner Zuschlagkörner zu völlig unrealistischen Versuchsergebnissen führen können. Andererseits mußten die Grenzwertmelder bei Prüfungen mit der schlaffen Druckplatte den Versuch nach erreichter Maximalkraft abschalten, sonst hätte die Gefahr bestanden, daß bei einem Zerfall des Probekörpers in verschiedene Bruchstücke einige der Einzelstempel der schlaffen Druckplatte keinen Widerstand mehr gefunden hätten und dann - wegen der Abstützung auf einem hydraulischen Kissen - durch die weiterwirkenden Lagerungskräfte nachgestoßen worden wären.

7.2 Druckplattensysteme

Die 420 mm x 420 mm großen starren Druckplatten der Prüfmaschine hatten

eine Dicke von 120 mm, die Druckflächen waren 20 mm tief gehärtet, geschliffen und eben. An der oberen Druckplatte befand sich eine Kugelkalotte, deren Mittelpunkt in der Druckfläche lag. Der zugehörige Stützring hatte einen äußeren Durchmesser von 240 mm. Um bei der Versuchsdurchführung Platz für die Meßwertaufnehmer zu schaffen, wurde auf die untere, am Kolben des Hydraulikzylinders befestigte Druckplatte ein 52 mm hohes, durchgehärtetes Zwischenstück gesetzt, dessen Auflagerfläche dem Probekörperquerschnitt entsprach. Dies erleichterte gleichzeitig die Zentrierung beim Einbau der Versuchskörper.

Der Querschnitt der schlaffen Druckplatte (Bild 7.3) muß ohnehin in Form und Größe stets gleich dem Querschnitt des Probekörpers sein. Dies ergibt sich zwangsläufig aus der Wirkungsweise dieses Druckplattensystems. Es besteht im Prinzip aus einer größeren Zahl von einzelnen Stahlstempeln (Bild 7.4), die sich auf ein Elastomer-(Gummi-)Kissen abstützen /S6/. Da Elastomere den auf sie einwirkenden Druck wie eine Flüssigkeit nach allen Seiten nahezu in gleicher Größe weitergeben, ist die schlaffe Druckplatte damit quasi-hydrostatisch gelagert. Alle Einzelstempel übertragen dadurch - bei gleichem Querschnitt - stets einen ebenso großen Anteil der Prüfkraft.

Eingehende Überprüfungen der hier verwendeten Bauart der schlaffen Druckplatte haben gezeigt, daß die Abweichung der Teilprüfkraften vom rechnerischen Mittelwert in der Regel geringer als $\pm 3\%$ ist und auch in Ausnahmefällen $\pm 5\%$ nicht überschreitet. Dies bedeutet, daß die schlaffe Druckplatte in der Berührungsfläche mit dem Probekörper praktisch eine gleichmäßige Spannungsverteilung bewirkt.

Länge und Querschnitt der Einzelstempel werden den jeweiligen Erfordernissen angepaßt. Die Stablängen können sehr kurz sein. Im vorliegenden Fall werden sie durch den Platzbedarf der unterzubringenden Meßwertaufnehmer bestimmt (Bild 7.3). Außerdem ist zu beachten, daß die Querdehnung des Probekörpers eine geringfügige Richtungsänderung vor allem der äußeren, im Stahlbett wie in einem Kugelgelenk drehbar, aber weitgehend ortsfest gehaltenen Stempel bewirkt. Dieser Winkel zwischen der Kraftwirkungslinie und der Achse eines Stabes ist um so kleiner, je länger die Einzelstempel sind; desto weniger wird demzufolge der Probekörper durch unerwünschte horizon-

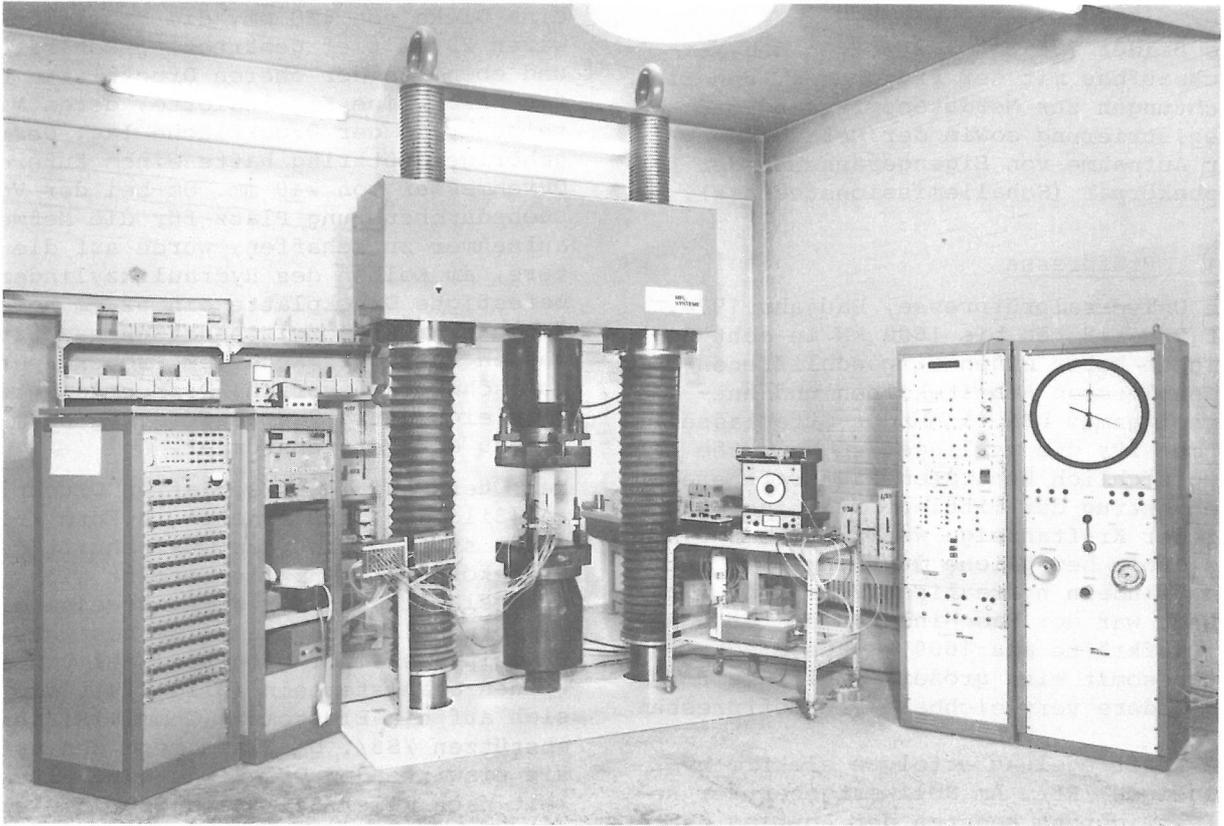
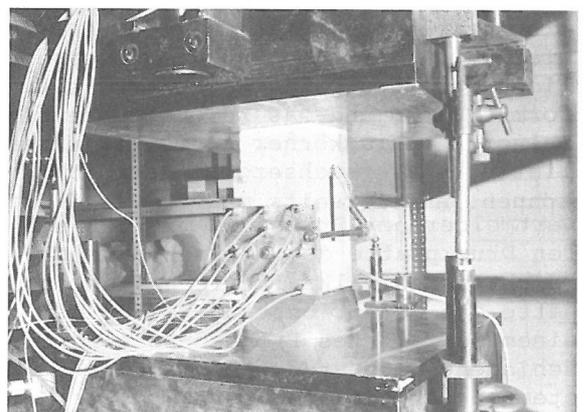
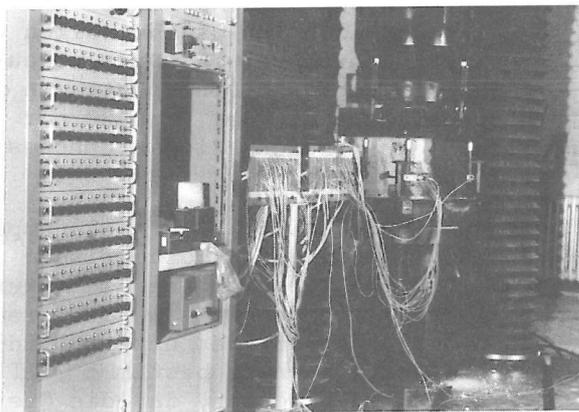


Bild 7.1

Prüfanlage mit Universalprüfmaschine einschließlich Steuer- und Regeleinrichtungen (rechts), Meßdatenerfassung (links) und Meßplatz zur Aufnahme von Schallemissionen (rechts neben der Prüfpresse)



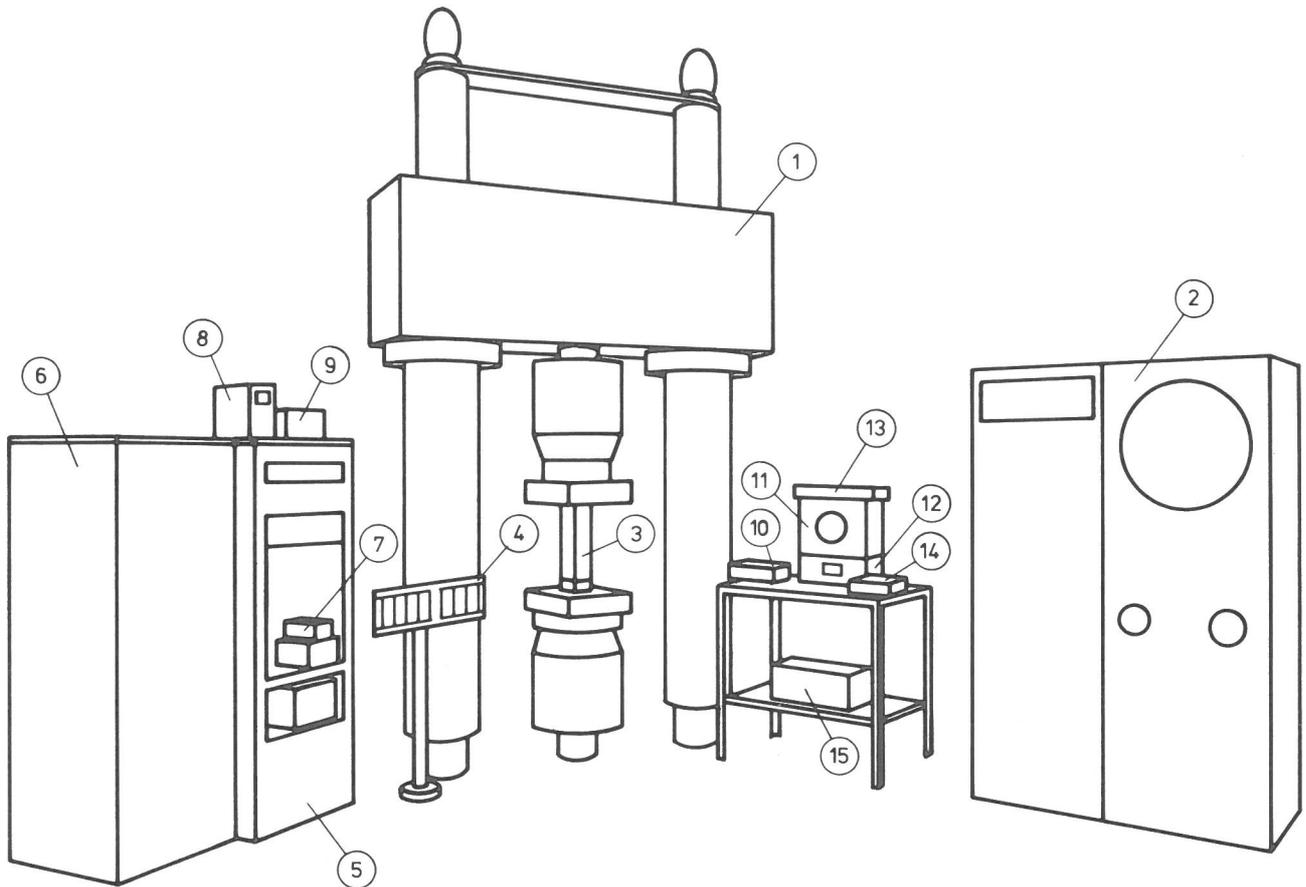


Bild 7.2

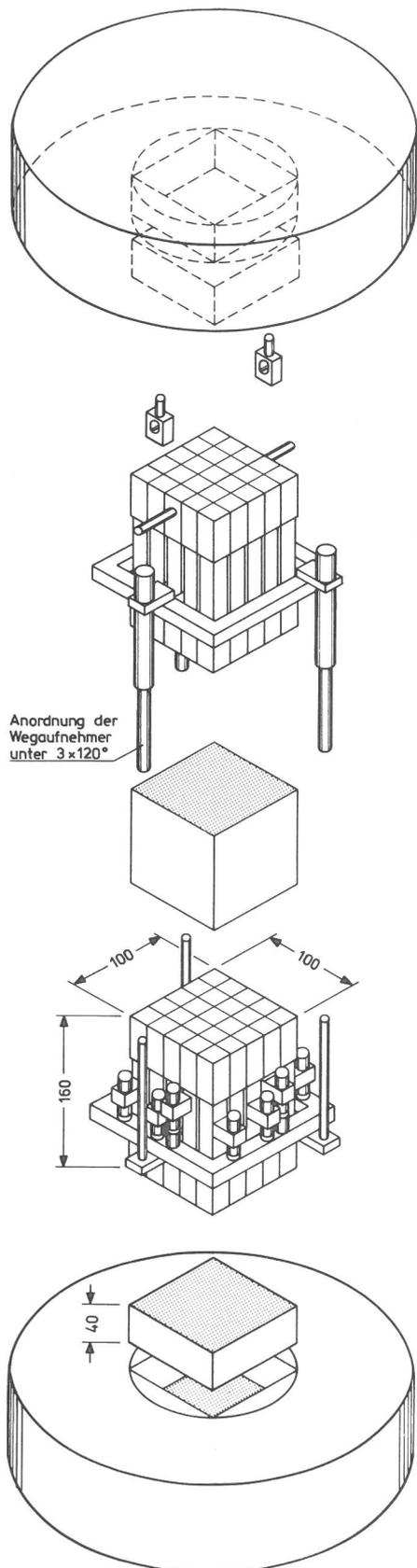
Prüfmaschine und Geräte der Versuchsanordnung (vgl. Bild 7.1)

- ① Universalprüfmaschine für Kräfte bis zu ± 1600 kN
- ② Elektro-hydraulische Regeleinrichtung mit analoger und digitaler Anzeige der Prüfkraft
- ③ Probekörper
- ④ Verteilerplatte für den Anschluß der Kabel von Meßwertaufnehmern
- ⑤ Vielstellenmeßanlage mit Digitalvoltmeter, Anzeige der Meßstellen-Nr., Kreuzschieneverteiler zur Auswahl von bis zu 100 Meßstellen, usf.
- ⑥ Abgleicheinheit für 100 Meßstellen
- ⑦ Lochstreifenstanze
- ⑧ Spannungskonstanter
- ⑨ Impulsgeber zum automatischen Start von Meßzyklen in vorgewählten Zeitintervallen

Einrichtungen der Schallemissionstechnik

- ⑩ Vorverstärker
- ⑪ Filtereinheit
- ⑫ Meßverstärker
- ⑬ Universalzähler (Registrieren der Schallimpulse)
- ⑭ Impulsgeber zur automatischen Abfrage von Meßwert-Paaren in vorgewählten Zeitintervallen
- ⑮ Lochstreifenstanze

tale Anteile der Prüfkraft beansprucht. Die Größe des Stabquerschnitts richtet sich nach der Körnung des Betonzuschlags. Der Querschnitt der Einzelstäbe ist in



der Regel größer als der Kornquerschnitt. Es erscheint nicht sinnvoll, ihn wesentlich kleiner als das vorhandene Größtkorn zu wählen, da bei Normalbeton mit dichtem Gefüge die Druckbeanspruchung im Probekörper nicht feiner verteilt sein kann, als es die Kornquerschnitte zulassen.

Im vorliegenden Fall hatten die Einzelstäbe einen Querschnitt von rund 20 mm x 20 mm. Sie waren genügend biegesteif, es bestand große Sicherheit gegenüber Knickung. Jeder Stempel wurde auf den Innenflächen etwas abgeschliffen, so daß für die schlaaffe Druckplatte Spaltweiten von 0,1 mm entstanden. Damit sollten eventuell örtlich bedingte Querstauchungen des Probekörpers ermöglicht werden. Den Abstand zwischen den Einzelstäben sicherten kleine Gummischeiben. Diese wiederum befanden sich auf dünnen Gewindestangen, welche in beiden Richtungen durch die Einzelstäbe geführt waren (Bild 7.4) und die Stempel (mit schwachen Federscheiben an den Enden) lose zusammenhielten. Die Gewindestangen lagen in aufgeweiteten Langlöchern. Damit konnten sich die Einzelstempel der schlaaffen Druckplatte relativ zueinander um mindestens 1 mm in Längsrichtung und 0,5 mm in Querrichtung frei bewegen. Dies reichte für die zu erwartenden Betonverformungen bei weitem aus. Bei größeren Verformungsbeiträgen wären ggf. etwas andere Konstruktionsformen der schlaaffen Druckplatte verwendet worden /S13,W8/.

Bild 7.4 läßt erkennen, daß die schlaaffe Druckplatte lediglich lose auf das Elastomer-Kissen aufgesetzt wird. Es besteht keinerlei zusätzliche Halterung zwischen diesem Stabbündel und dem Stahlbett, welches während des Versuchs die auch zur Seite wirkenden Kräfte des Kissens aufnimmt. Auch die für die obere Druckplatte erforderliche Hängevorrichtung (Bild 7.3) stellt nur eine lose Verbindung her.

Bild 7.3

Aufbau des Systems der schlaaffen Druckplatte (von unten nach oben):

Stahlbett mit eingelegtem Elastomer-Kissen

Untere schlaaffe Druckplatte mit Meßrahmen und Halterungen für Meßwertaufnehmer

Probekörper

Obere schlaaffe Druckplatte mit Meßrahmen und 3 induktiven Wegaufnehmern

Vorrichtung zur losen Aufhängung der oberen Druckplatte

Stahlbett mit eingelegtem Elastomer-Kissen

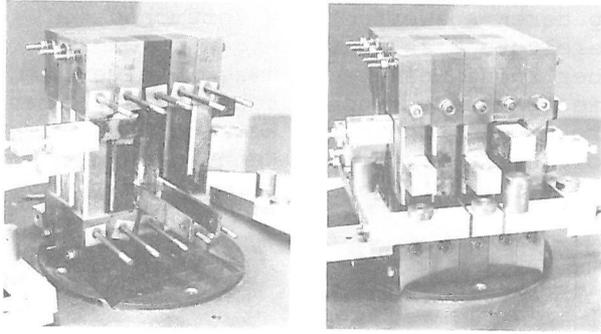


Bild 7.4

Aus einzelnen Stahlstempeln lose zusammengesetzte schlaaffe Druckplatte mit Halterungen und Meßrahmen für Wegaufnehmer

Aus Bild 7.4 geht schließlich auch hervor, weshalb die Einzelstäbe im mittleren Bereich einen reduzierten Querschnitt aufweisen. Es entstehen so verbreiterte Spalte, durch die Meßfühler geführt und an den einzelnen Stempeln befestigt werden können. Dabei trägt der Mittenstempel einen umlaufenden Rahmen. Dieser dient als Bezugsebene zum Messen der Längsverformung des Probekörpers mit drei induktiven Wegaufnehmern (Bild 7.3).

Auf dem Rahmen können außerdem Meßwertaufnehmer angeordnet werden, welche die Längsbewegungen der Einzelstempel der schlaaffen Druckplatte relativ zum Rahmen registrieren (s. Abschn. 7.3.2).

7.3 Meßwertaufnehmer

Die Prüfkraft wurde mit den in Abschnitt 7.1 angegebenen Unsicherheiten über mehrere Öldruckaufnehmer gemessen; sie konnte während des Versuchsablaufs zu jeder Zeit in digitaler oder analoger Form elektrisch abgefragt werden.

Für Verformungsmessungen am Probekörper wurden sowohl Weg- als auch Dehnungsaufnehmer verwendet. Die wichtigsten Meßergebnisse lieferten induktive Wegaufnehmer und Dehnungsmeßstreifen. Demgegenüber wurden zum Messen der Deformation von Druck- oder Seitenflächen der Probekörper nach Abschnitt 6.1.5 bzw. 6.1.6 aus Kostengründen und wegen der beengten Raumverhältnisse an den verhältnismäßig kleinen Probekörpern sogenannte Näherungsiniiatoren verwendet. Die Aufnahme der Eigengeräusche (Schallemission) erfolgte mit einem Beschleunigungsaufnehmer.

7.3.1 Induktive Wegaufnehmer

Die drei induktiven Wegaufnehmer für die

Längsverformung des Probekörpers - Typ HP 24 DC DT 100 - hatten einen integrierten Oszillator und Demodulator. Sie konnten deshalb mit Gleichstrom gespeist werden, die Speisespannung betrug 24 V. Als Linearitätsabweichung war 0,5 % bezogen auf den Meßbereich von $\pm 2,5$ mm angegeben. Jeder Aufnehmer wurde zuvor eingemessen, der ermittelte Umrechnungsfaktor dann bei den Auswertungen berücksichtigt. Die Kalibrierwerte lagen bei 0,00089 mm/mV. Dies entspricht einer Empfindlichkeit von rd. 1120 mV/mm.

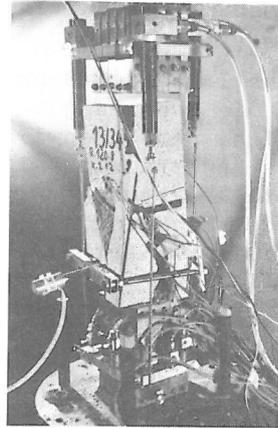


Bild 7.5

Induktive Wegaufnehmer für Längs- und Querverformung (rückwärtige Ansicht des Versuchsaufbaus, Probekörper h = 300 mm)

Ein weiterer induktiver Wegaufnehmer gleicher Art (Typ HP 7 DC DT 050) mit einem linearen Meßbereich von $\pm 1,25$ mm diente der Aufnahme der Querverformungen der Probekörper in einer Höhe, die stets 50 mm über der unteren Druckplatte lag (Bild 7.5). Auch dieser Wegaufnehmer hatte eine Empfindlichkeit von rund 1100 mV/mm. Er wurde mit 6 V Gleichspannung gespeist.

7.3.2 Näherungsiniiatoren

Im Vergleich zu den induktiven Wegaufnehmern zeigten die verwendeten Näherungsiniiatoren mit rd. 6000 mV/mm eine noch wesentlich höhere Empfindlichkeit. Sie waren daher für die Aufnahme der erwarteten sehr kleinen Längenänderungen der Probekörper besonders geeignet. Vorteilhaft waren ferner ihre Robustheit und kleinen Abmessungen (Bild 7.6).



Bild 7.6

Näherungsiniiatoren mit 13 und 6 mm Durchmesser

Die hier abgebildeten Typen dienen i.a. keineswegs als Meßwertaufnehmer, sondern als handelsübliche Näherungsschalter. Sie arbeiten ebenfalls induktiv und enthalten einen Oszillator, dessen hochfrequentes Feld an einer Stelle frei austreten kann. Sobald sich ein Metallteil nähert, wird dem Oszillator durch Wirbelstrombildung Energie entzogen. Dies dämpft die Amplitude der freien Schwingungen und vergrößert den Innenwiderstand des Aufnehmers. Die Meßspannung in der nach dem Prinzip eines Spannungsteilers aufgebauten Schaltung ändert sich dadurch mit dem Abstand des Initiators zum Metallteil.

Am Beginn eines Versuchs lag die Meßspannung etwa bei 3500 mV, die Schaltung wurde mit 10 V = gespeist. Der Innenwiderstand des Aufnehmers änderte sich mit der Spaltbreite zum Metallplättchen zwischen 1 k Ω und 7 k Ω , der Ergänzungswiderstand des Spannungsteilers (Metallfilmwiderstand, um Einfluß von Temperaturschwankungen gering zu halten) hatte 10 k Ω .

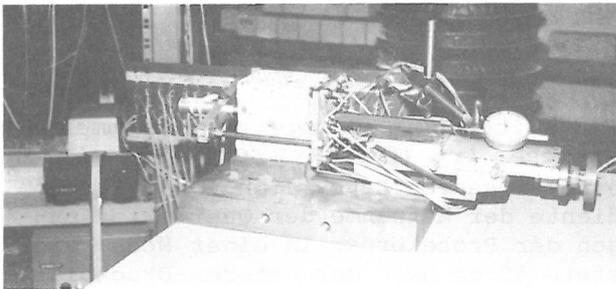


Bild 7.7

Einmessen einer Gruppe von 12 Näherungsinitiatoren auf einem Support mit induktivem Wegaufnehmer

Neben Robustheit, kleinen Abmessungen und hoher Meßempfindlichkeit lag ein weiterer Vorteil dieser Art von Näherungsinitiatoren in den niedrigen Beschaffungskosten. Dem stand dann aber ein erheblicher Aufwand gegenüber, der für das Einmessen der insgesamt $2 \times 12 = 24$ Geber erforderlich war. Der Meßbereich wurde hierzu mehrmals durchfahren und mittels einer Meßuhr in rd. 200 Wegstufen zu je 0,01 mm unterteilt. Die Meßspannungen der Näherungsinitiatoren sowie die zum Vergleich mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessenen Spaltbreiten wurden dabei über eine Vielstellenmeßanlage erfaßt und in Lochstreifen ausgegeben (Bild 7.7). Jeder Näherungsinitiator hatte eine andere Kennlinie (Bild 7.8), die nur in Ausnahmefällen abschnittsweise linear war. Bei der

späteren Auswertung der Versuchsdaten bereitete dies zwar einigen Aufwand, aber keine weiteren Schwierigkeiten, da die gesamte Versuchsauswertung auf einer großen elektronischen Rechenanlage erfolgte, in der die 24 Kennlinien mit dichter Punktfolge gespeichert waren.

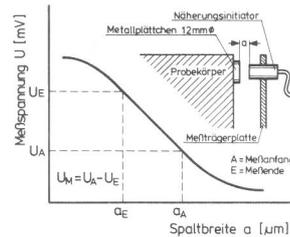


Bild 7.8

Kennlinie eines Näherungsinitiators

Mit diesen Näherungsinitiatoren sollten die Deformation der Druckflächen von Probekörpern und die Bauchung ihrer Seitenflächen ermittelt werden. Dies aber sind Differenzen von Betonverformungen, die sich in sehr kleinen Wegunterschieden ausdrücken. Trotz der im Vergleich zu den induktiven Wegaufnehmern sechsmal höheren Auflösung waren dennoch Differenzen der Meßspannungen von nur einigen mV zu erwarten, die Wegverformungen von wenigen μm entsprachen (Empfindlichkeit 6 mV/ μm). Es ist eine Größenordnung, in der die ermittelten Daten leicht durch vielerlei Einflüsse verfälscht sein könnten. Bei intervallmäßigem Abfragen durch Vielstellenmeßanlagen ist z.B. keineswegs ausgeschlossen, daß sich durch den dann geschlossenen Stromkreis die Aufnehmer infolge ihres inneren Widerstandes geringfügig aufheizen, hierdurch ihren eigenen Widerstand ändern und damit den Meßwert beeinflussen. Durch steigende Erwärmung während eines Versuchs könnte somit ein Aufnehmer bei geringen Meßwertunterschieden eine Tendenz vortäuschen, die mit dem eigentlichen physikalischen Vorgang in keinem Zusammenhang steht. Diese Gefahr bestand im vorliegenden Fall jedoch nicht. Die Näherungsinitiatoren hatten nicht nur während der Meßabfrage, sondern ständig Stromdurchfluß. Vor dem täglichen Versuchsbeginn mußte jedoch die Aufheizzeit für die Meßwertaufnehmer und Geräte genügend lang sein.

Von den beiden in Bild 7.6 gezeigten Typen wurde der größere zur Aufnahme von Längsbewegungen der Einzelstempel der schlaffen Druckplatte verwendet (Bilder 7.9 und 7.10). Jeder zweite Einzelstempel der unteren schlaffen Druckplatte erhielt einen solchen Aufnehmer. Ihre Anordnung ist aus Bild 7.10 zu ersehen. Wie die Halterungen für die Meßwertaufnehmer angebracht waren, ist ergänzend

zu Bild 7.4 im einzelnen in Bild 7.11 skizziert. Der aus Aluminium gefertigte Meßrahmen wurde mit zwei Haltestangen am Mittenstempel befestigt. Auf jeder der vier Seiten des Rahmens sind drei Metallscheiben zu erkennen, die als Gegenstück zu dem jeweiligen Näherungsinitiator dienen.

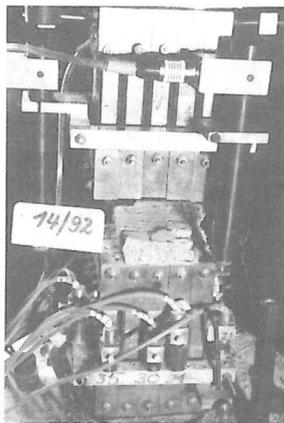


Bild 7.9
Näherungsinitiatoren am Meßrahmen der unteren schlaffen Druckplatte zur Aufnahme der Längsbewegung von Einzelstempeln (Probekörper $h = 25 \text{ mm}$)

Der größere der beiden Typen von Näherungsinitiatoren war auf diese Weise an die schlaffe Druckplatte gebunden. Der kleinere Typ für die Messung der Bauchung von Seitenflächen wurde demgegenüber sowohl bei Versuchen mit schlaffen als auch mit starren Druckplatten verwendet. Die als Gegenstücke erforderlichen Metallplättchen mußten hierzu jeweils auf die Probekörperseitenflächen aufgeklebt werden (Bild 7.12). Ebenfalls aufgeklebt wurde in der Mitte ein Haltedorn, an dem die Meßträgerplatte mit den 12 Näherungsinitiatoren festgeschraubt wurde. Jeder dieser Aufnehmer war in der Meßträgerplatte in seinem Abstand zum Metallplättchen durch eine Kunststoffschraube arretiert. Durch

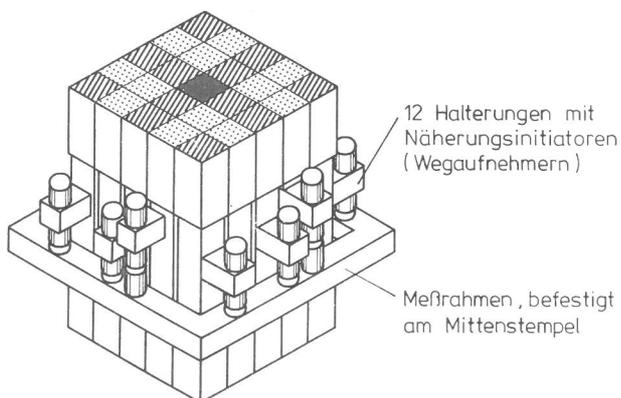


Bild 7.10
Untere schlaffe Druckplatte mit Meßrahmen und Wegaufnehmern zum Messen der Längsbewegungen der durch Schraffur hervorgehobenen Stempel

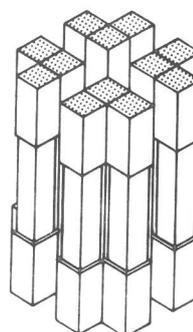
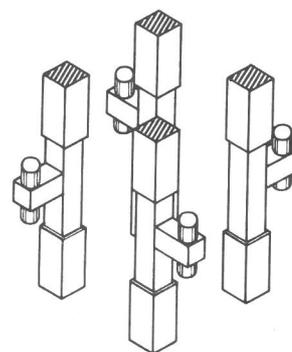
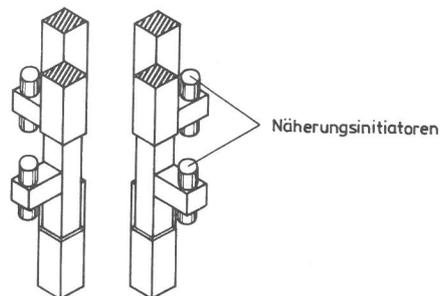
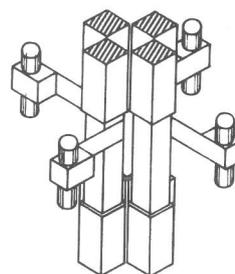
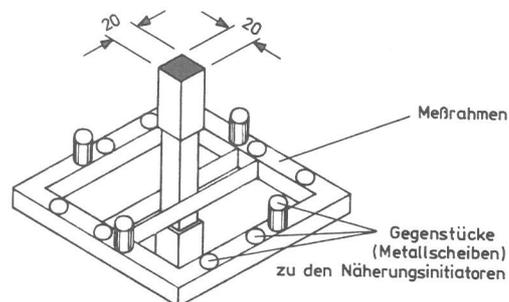


Bild 7.11
Bestückung von ausgewählten Stempeln der schlaffen Druckplatte mit Wegaufnehmern zur Ermittlung der Längsbewegungen relativ zum Mittenstempel

Lösen dieser Halterung wurde vor jedem einzelnen Versuch jeder der Näherungsinitiatoren auf seinen günstigsten Meßbereich eingestellt. An der Meßträgerplatte war außerdem der Rahmen mit dem bereits erwähnten induktiven Wegaufnehmer für die Messung der Querverformung des Probekörpers 50 mm oberhalb der unteren Druckplatte befestigt (Bild 7.13).

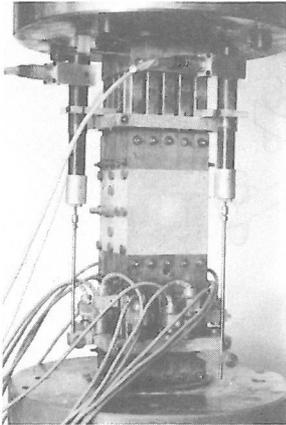


Bild 7.12
Probekörper mit Metallplättchen und Befestigungsschraube für Meßträgerplatte

Diese Meßanordnung zur Aufnahme der Querverformung einer Seitenfläche entsprach damit im Prinzip derjenigen in Längsrichtung, bei der die Deformation der Druckfläche des Probekörpers zu ermitteln war. In beiden Fällen wurden 12 Näherungsinitiatoren in einem ähnlichen Meßraster angeordnet. Bezugsebene war im ersten Fall der Meßrahmen, im zweiten die Meßträgerplatte. Beide Bezugsebenen behielten während des Versuchs in ihrem Mittelpunkt stets denselben Abstand zur Probekörperoberfläche. Im ersten Fall bewirkte dies der Mitten-

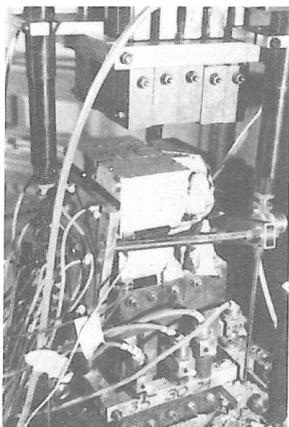


Bild 7.13
Meßträgerplatte mit 12 Näherungsinitiatoren und Rahmengestell einschließlich induktivem Wegaufnehmer für Querverformung

stempel, im zweiten die Befestigungsschraube. Die Aufnehmer waren rotations-symmetrisch zu diesen Zentralpunkten angeordnet. Sie registrierten die Verformung der Probekörperoberfläche (Druckfläche bzw. Seitenfläche) relativ zur

jeweiligen Bezugsebene. Diese Bezugsebenen dienten gleichzeitig zur Ermittlung der Gesamtverformungen des Probekörpers: längs mit drei induktiven Wegaufnehmern zwischen den beiden Meßrahmen (bei starrer Krafteinleitung als Druckplattenabstand) und quer mit einem induktiven Wegaufnehmer zwischen der Meßträgerplatte und dem dort befestigten Rahmengestell.

7.3.3 Dehnungsmeßstreifen

Die Dehnungsmeßstreifen waren für alle dafür vorgesehenen Meßstellen vom gleichen Typ (HBM 60/120 LP21). Sie hatten eine Gesamtlänge von 80 mm und eine Meßlänge von 60 mm. Nach den Angaben von R o h r b a c h /R9/ ist bei diesen Aufnehmern bei einem Zuschlaggrößtkorn von 16 mm und einem geschätzten mittleren Durchmesser der groben Zuschläge von etwa 6 mm mit einer maximalen Abweichung der gemessenen von der mittleren Dehnung von etwa 5 % zu rechnen. Bei der Prüfung von Mörtel dürfte dieser Wert auf rd. 1% absinken. In jedem Fall entsprechen die gewählten Dehnungsmeßstreifen der allgemeinen Empfehlung, wonach für Beton die Meßlänge mindestens dreimal so groß wie der Größtkorndurchmesser des Zuschlags /P5/ bzw. zehnmal so groß wie der mittlere Durchmesser der groben Zuschläge sein sollte.

Die Dehnungsmeßstreifen am Probekörper wurden zu einer Halbbrücke geschaltet und Temperaturschwankungen mit Dehnungsmeßstreifen gleichen Typs kompensiert, die auf unbelasteten Probekörpern derselben Versuchsserie geklebt waren.

7.4 Meßdatenerfassung und -registrierung

Sämtliche Meßdaten für Prüfkraft und Verformungen wurden in Lochstreifen registriert. Zur Datenerfassung stand eine Vielstellenmeßanlage zur Verfügung, die eine Abgleichseinheit für 100 Meßstellen besaß. Die Häufigkeit des Meßumlaufs wurde an einem Zeitgeber derart eingestellt, daß je Versuch jede Meßstelle etwa 30mal abgefragt wurde. Dabei wurden in dem Lochstreifen nicht nur die Meßdaten, sondern auch die Nummer der jeweiligen Meßstelle, die Serien- und Kennnummer des Probekörpers, Kontrollen der Speisespannung, Kolbenweg des Prüfszylinders usf. notiert.

7.5 Meßanordnung für Schallemissionen

Die zu einem Meßplatz zusammengestellten Geräte sind in Bild 7.14 angegeben.

Bild 7.15 zeigt hierzu den nur 10 mm langen Beschleunigungsaufnehmer, der auf einer Seitenfläche eines Probekörpers in mittlerer Höhe an einer dort angeklebten M3-Schraube befestigt wurde. Der Aufnehmer arbeitete nach dem piezoelektrischen Prinzip. Die Ladungsänderungen wurden in Spannungen umgesetzt und verstärkt. Als Aufnehmer wurde eine besonders leichte Ausführung gewählt, um die aus dem Probekörper kommende Schwingungsenergie möglichst wenig zu beeinflussen. Er war für ein breites Frequenzband mit einer oberen Grenzfrequenz von etwa 40 kHz ausgelegt.

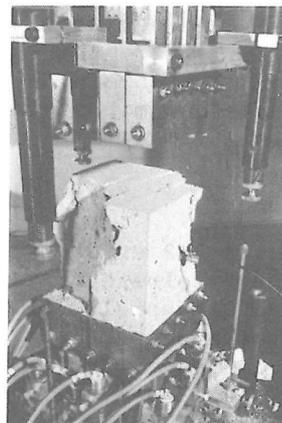
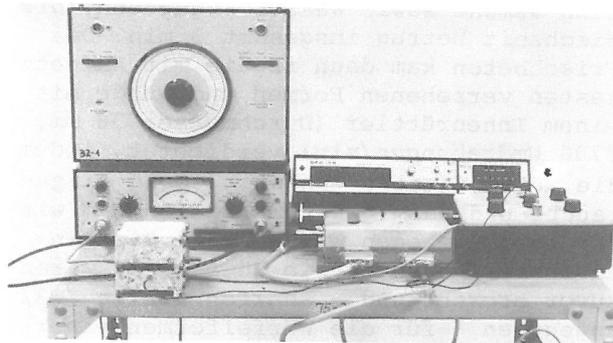


Bild 7.15
100 mm-Würfel mit seitlich angebrachtem piezoelektrischen Geber zur Aufnahme von Schallemissionen



Mit einem Frequenzfilter konnten Störgeräusche zurückgehalten werden. Einge- stellt war ein Terzband mit einer Mit- tenfrequenz von 31,5 kHz. Die im Univer- salzähler aufsummierten Schallimpulse wurden alle 10 Sekunden - ab etwa 90 % der Höchstkraft alle zwei Sekunden - abgefragt und zusammen mit der dazuge- hörigen Kraftanzeige in einen Loch- streifen zur späteren Datenverarbeitung gegeben.

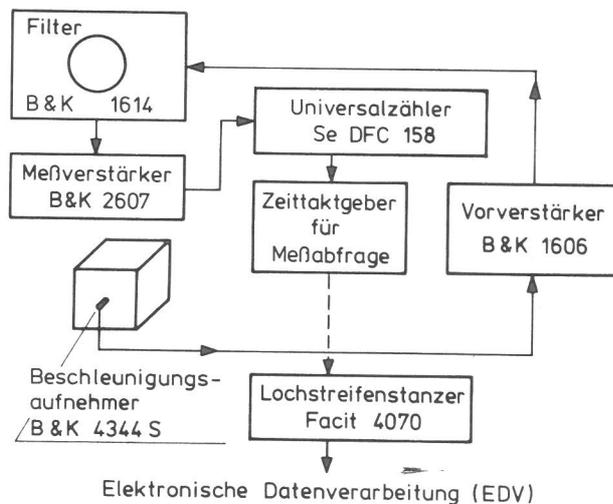


Bild 7.14
Meßplatz zur Aufnahme von Schallemissionen

Ermittelt werden sollte die Zahl L_E solcher Schallimpulse, deren Intensität einen vorgewählten Mindestwert übertraf. Welche Einstellung hierzu an den Geräten zur Verstärkung der Signale am besten geeignet war, wurde in Vorversuchen er- mittelt. Hierbei zeigte sich, daß die Verwendung von zwei anstatt nur einem Aufnehmer keinen Vorteil brachte. Offen- bar hat Beton ein so gutes Schalleitver- mögen, daß bei den verhältnismäßig klei- nen Probekörpern keine Unterschiede zu erkennen waren.

8 Versuchsdurchführung und -auswertung

8.1 Versuchsmaterial

8.1.1 Ausgangsstoffe

Zur Herstellung der Versuchsmischungen wurde ein Portlandzement PZ 45 F DIN 1164 verwendet, der eine hohe Anfangsfestigkeit aufwies. Er trug die Bezeichnung "Mark II" der Dyckerhoff Zementwerke AG in Neubeckum. Der Zement wurde in Säcken angeliefert und sofort in luftdicht ab- schließende Kunststoffbehälter umgefüllt, um so mögliche Veränderungen während der sich über rd. 6 Monate erstreckenden Be- tonierzeit auszuschließen. Seine Zusam- mensetzung und Eigenschaften sind aus den Bildern A4 und A5 ersichtlich.

Der Kiessand-Zuschlag stammte aus dem Raum Duisburg (Werksbezeichnung "Schif- ferstraße"). Das Material war ungebro- chen, überwiegend rundkörnig, teilweise plattig. Nach dem Trocknen bei 105 °C wurde es gesiebt und dabei in 6 Korngrup- pen aufgeteilt. Aus diesen Korngruppen mit einem Größtkorn von 16 mm wurde so- dann das Korngemisch nach den jeweiligen Beton-Rezepturen zusammengestellt. Als Betonzusatzstoff diente Quarzmehl (Werks- bezeichnung "Silicit"). Bei den beiden Rezepturen für die Betonmischungen ent-

sprach die gewählte Sieblinie der Regelsieblinie B₁₆ nach DIN 1045 /D2/. Für die Mörtel-Rezepturen ergab sich ein ähnlich abgestufter Kornaufbau mit einem Größtkorn von 4 mm (Bild A6).

8.1.2 Frischbeton

Der Versuchsplan nach Bild 6.2 erforderte zwei Beton- und zwei Mörtelrezepturen. Die Mischungen mußten so eingestellt werden, daß ungewollte Abweichungen beim Herstellen und Verdichten der Versuchskörper so klein wie möglich gehalten wurden. Eine geringe Festigkeitsstreuung innerhalb einer Serie und vor allem eine kleine Wiederholstreuung der bis zu 12 Serien einer Rezeptur waren für die anstehenden Vergleichsversuche besonders wichtig. Die Zusammensetzung der Mischungen wurde deshalb mit den gegebenen Ausgangsstoffen zunächst nach der Stoffraumrechnung /W7/ ermittelt und dann in Eignungsversuchen mehrfach überprüft.

Die so erprobten 4 Rezepturen für die 3 Betonfestigkeitsklassen B15, B25 und B35 sind in Bild 8.1 zusammengestellt. Die Tabelle enthält außerdem Mittelwerte der Frischbeton-Kenndaten, die auf den Ergebnissen der Frischbetonprüfungen von 28 Versuchsserien (Bild A7) beruhen.

Betonmischungen		Rezeptur Nr.			
		1	2	3	4
Betonfestigkeitsklasse		B25	B25	B15	B35
Zuschlag-Größtkorn		16mm	4mm	4mm	16mm
Massen für 1m ³ verdichteten Frischbeton	Zuschlag (getrocknet) kg	1901	1622	1685	1837
	Zement (PZ 450 F) kg	231	345	263	295
	Wasser kg	189	264	263	198
Rechnerischer Wasserzementwert		0.82	0.76	1.00	0.67
Frischbeton- Prüfungen	Verdichtungsmaß nach Walz	1.08	1.03	1.04	1.05
	Konsistenz	K3: weich			
	Rohdichte [kg/dm ³]	2.32	2.23	2.21	2.33

Bild 8.1

Rezepturen der Beton- bzw. Mörtelmischungen mit mittleren Kennwerten der Frischbetonprüfungen

8.2 Versuchskörper

Jede der insgesamt 33 Versuchsserien (vgl. Bild 6.2) wurde aus einer Mischerfüllung hergestellt. Dabei entstanden bei den Serien mit lfd. Nr. 1 bis 29 (Bild A3) stets 5 Betonblöcke, bezeich-

net mit A bis E, und 3 Betonwürfel mit 200 mm Kantenlänge für die Güteprüfung. Mit 4 Zusatzserien Z1 bis Z4 wurde ferner die zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit festgestellt. Hierzu dienten je Serie 21 Würfel mit 100 mm und 6 Würfel mit 200 mm Kantenlänge.

8.2.1 Herstellen der Probekörper

Die Herstellung der Mörtel- bzw. Betonmischungen erfolgte in einem 150 l Eirich-Zwangsmischer. Dabei wurden die zuvor einzeln nach den sechs Körnungen zugewogenen Zuschläge kurz trocken vorgemischt und dann Zement sowie Wasser zugegeben. Die Mischzeit betrug insgesamt 3 min. Der Frischbeton kam dann in die mit Aufsetzkästen versehenen Formen und wurde mit einem Innenrüttler (Durchmesser 38 mm, 8700 Umdrehungen/min) verdichtet, indem die Rüttelflasche zunächst zügig eingetaucht und dann gleichmäßig langsam wieder herausgezogen wurde /D3/. Die Eintauchstellen sowie die Rüttelzeit waren zuvor erprobt und - ähnlich wie in /W3/ angegeben - für die Würfelformen einerseits und für jede der Blockformen andererseits festgelegt worden.

Die zum Herstellen der Betonblöcke verwendeten fünf Formen (Bild 8.2) waren

eine Sonderanfertigung für die vorliegenden Versuche. Wie zu Bild 6.4 bereits erläutert, entsprach die Breite der Formen A bis D der Höhe der späteren Betonprismen. Die Prüfrichtung lag damit - wie auch bei allen anderen Probekörpern - immer senkrecht zur Herstellrich-

tung in den Blockformen. Bei den Formen D (Sägemuster II) und E war die Tiefe der Form die spätere Probekörperhöhe. Aus diesem Grunde wurden die in Frage kommenden Schalungsflächen, d.h. die den späteren Endflächen der Probekörper zugewandten Formenteile, in Stahl ausgeführt. Demgegenüber hatten die großflächigen Seitenteile der Formen A, B und C keine derartige Bedeutung. Aus Gründen der Gewichtersparnis wurden sie deshalb aus Vinidur gefertigt.

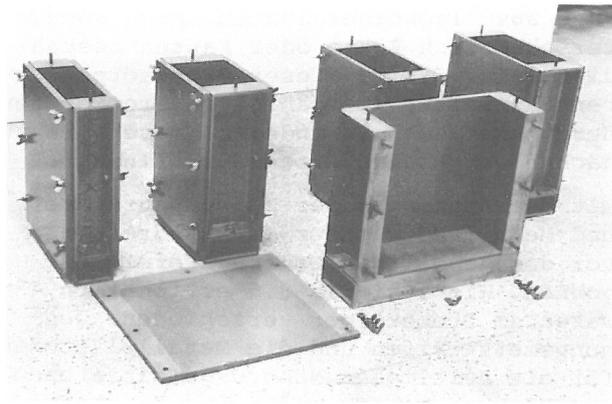


Bild 8.2

Formen zum Herstellen der Betonblöcke

Die fünf Betonblöcke einer Versuchsserie wurden zusammen mit den drei Gütewürfeln wie üblich /D3/ nach einem Tag entformt, lagerten bis zum siebenten Tag unter Wasser und dann in Raumluft bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte. Diese Lagerungsbedingungen mußten bei allen Serien genau eingehalten werden, um einen möglichen Einfluß der Nachbehandlung von Probekörpern auf die Druckfestigkeit zu vermeiden.

Am 28. Tag nach der Herstellung wurden die Betonblöcke (Bild 8.3) in den Sägeraum gebracht, der eine hohe Luftfeuchtigkeit aufwies. Das Herausarbeiten der verschiedenen hohen Probekörper nach den vorgegebenen Sägemustern I bzw. II (vgl. Bild 6.4) beanspruchte zwei bis drei Tage. Die Betonblöcke wurden hierzu zunächst in Streifen zersägt. Diese ka-

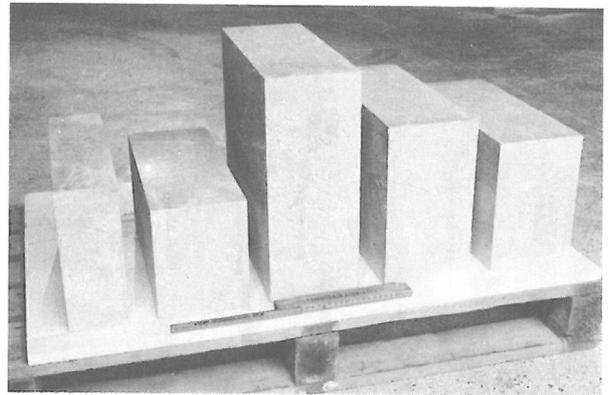


Bild 8.3

Betonblöcke vor dem Zersägen in 18 bzw. 36 Probekörper (vgl. Sägemuster I und II nach Bild 6.4)

men dann in eine für die vorliegende Arbeit entwickelte Spannvorrichtung, die auf einem Drehteller befestigt werden konnte (Bild 8.4). Die notwendigen Einstellungen an der Säge wurden hierdurch wesentlich vereinfacht. Außerdem wurde die Steinsäge mit zwei parallel laufenden Trennscheiben (Durchmesser 1000 mm) ausgerüstet, so daß Tandemschnitte - d.h. zwei Sägeschnitte gleichzeitig in festgelegtem Abstand - möglich waren.

Erfahrungsgemäß kann Beton im Alter von 28 Tagen ohne Schäden für das Versuchsmaterial gesägt werden. Bei nötiger Sorgfalt muß nicht befürchtet werden, daß sich hierbei Mikrorisse bilden bzw. die Haftung zwischen Matrix und Zuschlag beeinträchtigt wird /S3/. Im vorliegenden Fall wurden Diamant-Sägeblätter verwendet. Das Ausbrechen einzelner Zuschlagkörner gegen Ende eines Sägeschnitts

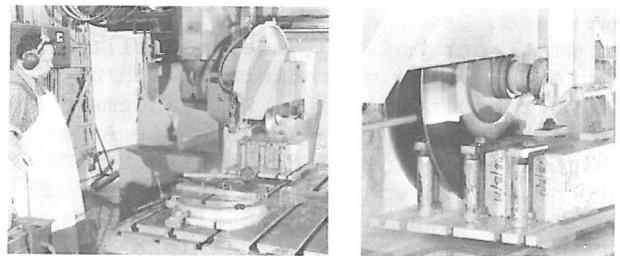


Bild 8.4

Heraussägen der Probekörper aus Betonblöcken

ließ sich fast immer durch einen langsamen, aber dennoch zügigen Schnittvortrieb vermeiden. Besonders bewährt haben sich in diesem Zusammenhang dicke Unterlagsplatten aus Asbestzement, in welche die Säge jeweils mindestens 5 mm tief einschritt. Die Probekörper erhielten auf diese Weise scharfe Kanten. Wenn

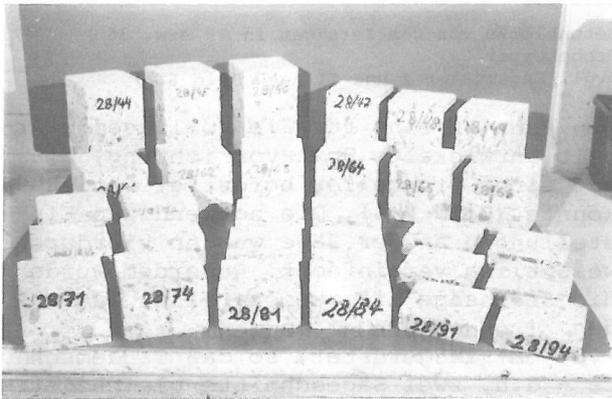


Bild 8.5

Aus je 5 Betonblöcken nach Sägemuster I (oben) bzw. II herausgearbeitete Probekörper für 2 zusammengehörige Versuchsserien mit Höhen von 25 bis 400 mm

Schwierigkeiten beim Sägen der Probekörper auftraten, so ergaben sich diese weniger bei dem hochfesten, als vielmehr beim wenig festen Beton.

Auf diese Weise entstanden die in Bild 8.5 gezeigten Probekörper. Durch den Tandemschnitt, der auf 100 mm eingestellt war, hatten sie alle garantiert gleich große Querschnittsflächen. Der Tandemschnitt erleichterte dabei besonders die Arbeiten für die beiden Sonderserien Nr. 17 und 18, wo ausschließlich 100mm-Würfel zu sägen waren. Auch bezüglich der Probekörperhöhen war die Maßhaltigkeit sehr gut. Die Seitenflächen der Versuchskörper erforderten keine weitere Bearbeitung; sie blieben sägerauh. Soweit beim Sägemuster II im Versuchsplan vorgesehen, wurden schließlich die Druckflächen der Probekörper mit einer Diamant-Topfscheibe planparallel geschliffen. Die anschließend festgestellte Abweichung von der Ebenheit der Druckflächen betrug weniger als $\pm 0,01$ mm.

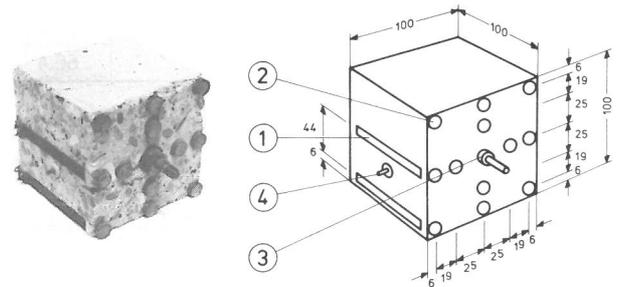
Anschließend lagerten die fertiggestellten Probekörper weitere drei Wochen bis

zum Beginn der Probenvorbereitungen auf Lattenrosten im Pressenraum, in dem dann die Versuche durchgeführt wurden.

8.2.2 Probenvorbereitung

Zu Beginn der Probenvorbereitung wurden alle Probekörper nochmals eingehend überprüft. Nur in wenigen Fällen stellten sich dabei Mängel heraus, z.B. derart, daß gerade an den Stellen, wo Dehnungsmeßstreifen aufzukleben waren, sich größere Poren befanden oder sich angeschnittene Zuschlagkörner lösten. Auch konnten versehentlich Ecken oder Kanten beschädigt sein. Einige dieser Probekörper waren dann nicht prüffähig, andere konnten durch Austausch in anderer Weise, als zunächst vorgesehen, Verwendung finden.

Mit dem Anbringen der Meßwertaufnehmer und Meßhilfen wurde zwei bis drei Tage vor dem jeweiligen Prüfungstermin begonnen. Wie aus Bild 8.6 ersichtlich, waren am Probekörper verschiedene Dehnungsmeßstreifen und die Metallplättchen für die seitlichen Näherungsinitiatoren anzukleben. Dabei wurde eine Schablone benutzt, die für die Ausrichtung der Befestigungsschraube für die Meßträgerplatte der Näherungsinitiatoren senkrecht zur Probekörperfläche sorgte und gleichzeitig Bohrungen aufwies, durch welche die 12 Metallplättchen mit den in der Skizze angegebenen Abständen auf eine Seitenfläche des Probekörpers geklebt



- ① Dehnungsmeßstreifen Typ 60/120 LP21 HBM
- ② Metallplättchen 12mm ϕ
- ③ Befestigungsschraube für Meßträgerplatte mit Näherungsinitiatoren
- ④ Befestigungsschraube für Beschleunigungsaufnehmer (Schallemission)

Bild 8.6

Probekörper vorbereitet für Festigkeitsversuche mit Verformungsmessungen und Aufnahme von Eigengeräuschen

wurden. Die kleine Befestigungsschraube (M 3) für den Beschleunigungsaufnehmer schließlich wurde direkt auf den Beton gesetzt und dort mit Kunststoffkleber festgehalten.

In welcher Weise die einzelnen Probekörper der Ermittlung der verschiedenen Zielgrößen dienten, ist Bild 8.7 zu entnehmen. Die Anzahl der Meßstellen je Versuchskörper war danach sehr unterschiedlich. Aus Kostengründen, aber auch vom Arbeitsumfang her, konnten nicht sämtliche Probekörper in gleicher Weise mit allen zur Verfügung stehenden Meßwertgebern versehen werden. Dehnungsmeßstreifen fanden Verwendung zur Aufnahme der Querdehnung und Längsstauchung in mittlerer Höhe der Probekörper. Bei gedrun- genen Probekörpern wurden sie außerdem möglichst nahe an die untere Endfläche geklebt, um so Auskunft über die Größe von Querdehnungsbehinderungen zu erhalten. Bei sehr dünnen Probekörpern mit nur 25 mm Höhe war die Seitenfläche für je zwei Dehnungsmeßstreifen allerdings zu klein. Die Querdehnung in mittlerer Höhe wurde deshalb an der einen Hälfte der sechs zur Verfügung stehen- den Probekörper (Nr. 91, 93 und 95), die Querdehnung nahe der Endfläche an den anderen drei Probekörpern (Nr. 92, 94 und 96) gemessen. Wie für alle übrigen Meßstellen mit Dehnungsmeßstreifen, so galt auch hier, daß die Dehnungsmeßstreifen stets paarweise auf zwei gegenüber- liegende Seitenflächen des Probekörpers angebracht wurden.

Die Zahl der anzubringenden Meßwertauf- nehmer war jedoch nicht nur abhängig von der Größe der Probekörper, sondern au- ßerdem auch von der Art der Versuchs- durchführung. Bild 6.3 zeigte bereits die für jede Versuchsserie maßgeblichen Zielgrößen. Die dort verwendeten Signa- turen stimmen mit denen in Bild 8.7 überein. So wird verständlich, daß sich z.B. für einen Probekörper mit vier seit- lichen Dehnungsmeßstreifen (Probekörper Nr. 53 und 54 bzw. 63 und 64) und An- schluß aller sonstigen Aufnehmer insge- samt 24 Meßstellen ergeben, wenn er mit starren Druckplatten geprüft wird, aber $24 + 12 = 36$ Meßstellen bei Versuchen mit schlaffen Druckplatten. Die 12 zusätz- lichen Meßwerte liefern die Näherungs- initiatoren, welche die Relativbewegun- gen der Einzelstempel der unteren schlaf- fen Druckplatte messen.

8.2.3 Gütenachweis

Die Güteprüfungen erbrachten den Nachweis, daß nach den Anforderungen der DIN 1045 /D2/ die Betonfestigkeitsklasse B25 und B35 erreicht worden waren. Beim B15 lag die mittlere Würfel Festigkeit β_{Wm} etwas unterhalb der Serienfestigkeit. Jedoch übertraf der Druckfestigkeitswert der

unteren 5%-Fraktile auch hier die Nenn- festigkeit β_{WN} (Bild 8.8). Die Standard- abweichung s /D6/ errechnete sich hier- bei aus

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2 \right]} \quad (20)$$

Die untere 5%-Fraktile wurde aus

$$\beta_{5\%} = \beta_{Wm} - 1,645 \cdot s \quad (21)$$

bestimmt /B12,G11/.

Die Streuung der Festigkeitswerte war erfreulich gering. Zwischen Mittelwert und unterer 5%-Fraktile ergaben sich Spannen zwischen 1,4 und 2,6 N/mm². Da- bei zeigte der Beton B25 mit 16 mm Größt- korn zunächst mit 1,61 N/mm² die größte Standardabweichung. Diese reduzierte sich jedoch auf $s = 0,587$ N/mm², wenn die beiden Vorserien Nr. 1 und 2, die lediglich der Erprobung der Versuchskör- perherstellung- und Versuchstechnik ge- dient hatten, außer Betracht blieben.

Wichtig für die Wertung der späteren Er- gebnisse der Vergleichsprüfungen war die Feststellung, ob tatsächlich alle an ver- schiedenen Tagen hergestellten Serien einer Betonrezeptur als aus ein und der- selben Mischung stammend angesehen wer- den konnten. Diese Fragestellung galt besonders dem B25/16, der im Gegensatz zu den übrigen Betonmischungen nicht in aufeinanderfolgenden Versuchsserien, sondern in drei Betonierabschnitten über einen Zeitraum von immerhin sechs Mona- ten hergestellt worden war.

Die Druckfestigkeitswerte der Versuchs- serien waren hierzu mit varianzanalyti- schen Methoden zu untersuchen, die nor- malverteilte Einzelwerte und Gleichheit der Varianzen s^2 voraussetzen. Nach all- gemeiner Erfahrung konnte für Normalbe- ton die Normalverteilung der Versuchser- gebnisse als gegeben angesehen werden /N6,S14,T4/. Die Gleichheit der Varian- zen wurde mit dem Cochran-Test (Ab- schnitt 722 in /S1/) überprüft (s. Bild A9), der gleich große Stichprobengruppen - wie hier mit drei Cütewürfeln/Serie - voraussetzt. Mit den in Bild A8 wieder- gegebenen Einzelergebnissen der Güteprü- fungen und den aus Bild A9 ersichtlichen Varianzen der Druckfestigkeiten konnte mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % die Nullhypothese auf Gleichheit der Varianzen für alle vier Rezepturen akzeptiert werden. Damit war die Voraus- setzung gegeben, auch die Mittelwerte varianzanalytisch zu vergleichen.

← Sägemuster I					Sägemuster II →						
					Sämtliche Probekörper mit Querschnitt 100mm x 100mm						
31 33	32	34 36	35	37, 38 39		Probekörper Nrn.	47, 48 49	53 54	51 56	52 55	
400	400	300	300	250	Höhe [mm]	150	100	100	100		
Anzahl der Meßstellen						Anzahl der Meßstellen					
7	7	7	7	7	□	7	7	7	7		
22	18	22	18	18	▣	18	22	20	18		
34	30	34	30	30	▤	30	34	32	30		
24	20	24	20	20	▥	20	24	22	20		
36	32	36	32	32	■	32	36	34	32		
					Druckflächen ~ schalungsrauh ▼ gesägt und geschliffen						
41 43	42	53 54	51 56	52 55	Probekörper Nrn.	44 46	45	63 64	61 66	62 65	
200	200	100	100	100	Höhe [mm]	200	200	100	100	100	
Anzahl der Meßstellen						Anzahl der Meßstellen					
7	7	7	7	7	□	7	7	7	7	7	
20	20	22	20	18	▣	20	20	22	20	18	
32	32	34	32	30	▤	32	32	34	32	32	
22	22	24	22	20	▥	22	22	24	22	20	
34	34	36	34	32	■	34	34	36	34	32	
	Anzahl Aufnehmer	Meßwert									
	1	Schallemission		Probekörper Nrn.	73 74	71, 72 75, 76	83 84	81, 82 85, 86	91, 93 95	92, 94 96	
	1 (2)	Prüfkraft			Höhe [mm]	75	75	50	50	25	25
	1	Kolbenweg		Anzahl der Meßstellen							
	3	Druckplattenabstand		□	7	7	7	7	7	7	
	1	Querverf., Höhe 50mm		▣	12	8	12	8	7	7	
	2	Längsstauchung (DMS)		▤	24	20	24	20	19	19	
	2 (4)	Querdehnung (DMS)		▥	14	10	14	10	9	9	
	12 (3)(0)	Bauchung Seitenfl.		■	26	22	26	22	21	21	
	12	Defor. Druckflächen									

Bild 8.7

Übersicht zur Lage und Zahl der Meßstellen im Zusammenhang mit der Art der Versuchsdurchführung (Prüfungen mit starren sowie schlaffen Druckplatten und unterschiedliche Anzahl der Zielgrößen, vgl. Bild 6.3)

Prüfung von 200mm-Würfeln auf Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen nach DIN 1048 Teil 1		Rezeptur Nr.			
		1	2	3	4
Betonfestigkeitsklasse		B25	B25	B15	B35
Zuschlag-Größtkorn		16mm	4mm	4mm	16mm
Anzahl Würfel-Tripel		12	9	4	4
Festbeton- Rohdichte [kg/dm³]	Mittelwert ρ_R	2.26	2.16	2.12	2.28
	Standardabweichung s_R	0.012	0.014	0.018	0.014
	untere 5%-Fraktile	2.24	2.14	2.09	2.25
Druckfestigkeit [N/mm²]	Mittelwert β_{Wm}	30.5	32.1	18.5	40.6
	Standardabweichung s_β	1.61	0.90	1.45	0.85
	untere 5%-Fraktile	27.9	30.6	16.1	39.2

Bild 8.8

Ergebnisse der Güteprüfungen von 29 Versuchsserien

Die hierzu verwendete Methode der Einfachen Varianzanalyse (F-Test) beruht auf einem Vergleich der Durchschnittsquadrate (Abweichungsquadrate) zwischen und innerhalb der Versuchsserien (Gruppen) /S1,R3/. Der Rechengang ist aus Bild A9 ersichtlich. Nach den Ergebnissen dieser Streuungszerlegung kann nur für den B35/16 mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % angenommen werden, daß die betrachteten Versuchsserien sich nicht wesentlich unterscheiden und daher als aus einer einzigen Betonmischung stammend angesehen werden können. Für die Versuchsserien der übrigen drei Betonrezepturen muß die Nullhypothese jedoch abgelehnt werden. Dies bedeutet, daß sich mindestens jeweils zwei Serien dieser Rezepturen bezüglich der mittleren Druckfestigkeit voneinander unterscheiden.

Als Konsequenz aus dieser Feststellung durften somit die später an den prismatischen Versuchskörpern ermittelten Festigkeiten β_D nur dann direkt miteinander in Beziehung gesetzt werden, wenn die betreffenden Probekörper aus derselben Versuchsserie stammten. Anderenfalls war der herstellungsbedingte Festigkeitsunterschied der einzelnen Serien zu berücksichtigen. Der notwendige Korrekturfaktor ergab sich aus dem Verhältnis der mit der Güteprüfung jeder Versuchsserie j festgestellten Betonfestigkeit β_{W28} zur mittleren Festigkeit $\bar{\beta}_{W28}$ aller Serien einer Betonrezeptur:

$$\text{kor}\beta_D = \frac{\beta_{W28,j}}{\bar{\beta}_{W28}} \cdot \beta_D \quad (22)$$

Bedeutsam für die Versuchsdurchführung war ferner die Festigkeitsentwicklung

der Versuchskörper. Einmal mußte überprüft werden, ob das Versuchsmaterial zum Sägetermin im Alter von 28 Tagen genügend fest war. Zum anderen sollte zum Prüftermin im Betonalter von 56 Tagen die Festigkeitszunahme möglichst abgeklungen sein, damit die umfangreichen Untersuchungen auf zwei bis drei Tage ausgedehnt werden konnten.

Den Bildern 8.9 und A10 ist zu entnehmen, daß beide Forderungen erfüllt wurden. Die 28-Tage-Festigkeit von 100mm-Würfeln betrug mindestens 93 % der im Alter von 90 Tagen erreichten Druckfestigkeit. Dabei waren die Verhältniswerte der Druckfestigkeiten von 100mm-Würfeln im Vergleich zu 200mm-Würfeln im Alter von 56 Tagen kleiner als bei 28 Tagen. Hierin zeigte sich die unterschiedliche Fe-

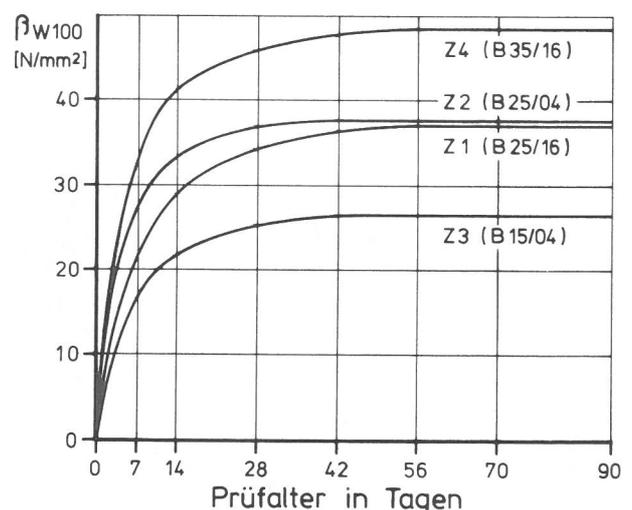


Bild 8.9

Festigkeitsentwicklung der 4 Betone bzw. Mörtel des Versuchsprogramms (ermittelt an 100mm-Würfeln der Zusatzserien Z1 bis Z4, Einzelangaben s. Bild A10)

stigkeitsentwicklung von Probekörpern, deren Volumen bzw. Querschnitt verschieden groß ist. Im Hinblick auf das Prüfalter von 56 Tagen und die bei Querschnitten von 100 mm x 100 mm dann weitgehend abgeschlossene Festigkeitsentwicklung, war dies hier jedoch nur am Rande von Interesse.

8.3 Versuchsaufbau

Bild 8.10 vermittelt einen Eindruck von dem Versuchsaufbau. Rechts im Bild sind die Geräte der Schallemissionsanalyse, links im Vordergrund ist eine der beiden Verteilerplatten zum Anschluß der Näherungsinitiatoren und Dehnungsmeßstreifen zu sehen (vgl. Nr. 4 in Bild 7.2). Von hier führten die Meßleitungen zur Vielstellenmeßanlage.

Weitere Einzelheiten des Versuchsaufbaus sind in Bild 8.11 zu erkennen. Die hier gezeigten Meßwertaufnehmer und ihre Aufgaben wurden bereits in Abschnitt 7.3 erläutert. Jede Meßstelle erhielt eine Meßstellen-Nummer, die für den gesamten Untersuchungszeitraum gleich blieb. Diese Nummer kennzeichnete dabei nicht nur die Lage der Meßstelle, sondern auch den jeweiligen Aufnehmer mit seinen Kenndaten. Wurde die eine oder andere Meßstelle für einen Versuch nicht benötigt (vgl. Angaben in Bild 8.7 zur Anzahl der Meßstellen), so konnte deren Meßabfrage durch entsprechende Auswahl am Kreuzschienenverteiler der Vielstellenmeßanlage übersprungen werden.

Da die Versuche im Wechsel mit starren und dann mit schlaffen Druckplatten durchgeführt wurden, mußten die beiden Krafteinleitungssysteme nach dem in Bild 6.3 angegebenen Testrhythmus wiederholt gegeneinander ausgetauscht werden. Sonst war der Versuchsaufbau in

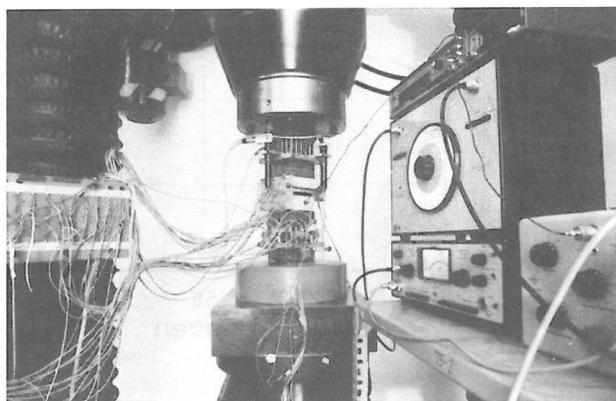


Bild 8.10
Versuchsaufbau mit schlaffen Druckplatten

beiden Fällen gleich. Die drei induktiven Wegaufnehmer für die Längsverformung des Probekörpers waren bei schlaffen Druckplatten zwischen den Meßrahmen (Nr. 6 in Bild 8.11), bei starren Druckplatten aber mit Magnetstativen zwischen den Druckplatten angeordnet (Bild 8.12).

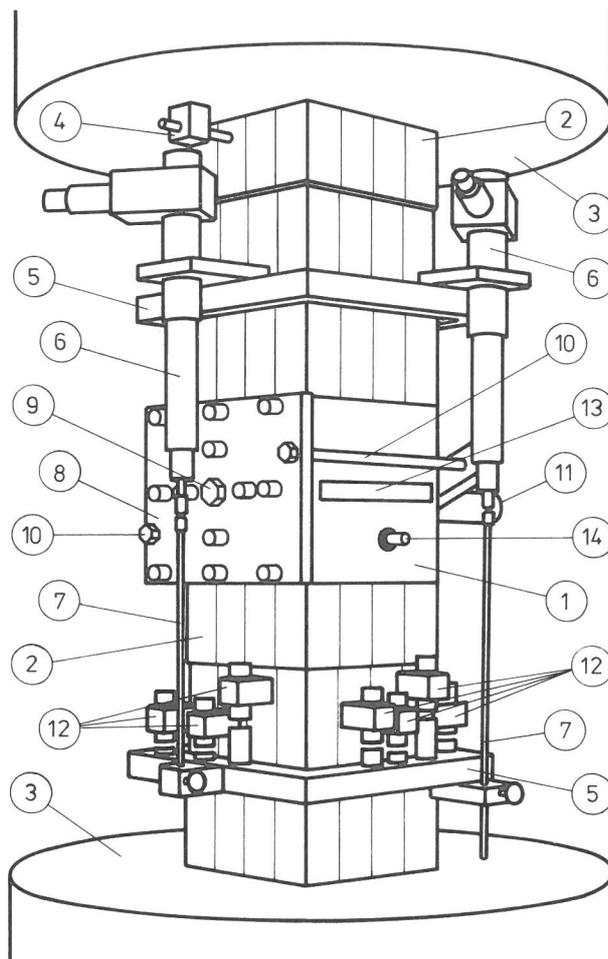


Bild 8.11

Mit Meßwertaufnehmern vollständig bestückter Versuchsaufbau:

- ① Probekörper
- ② Schlaffe Druckplatte
- ③ Stahlbett mit (verdeckt) Elastomerkissen
- ④ Aufhängung für obere Druckplatte
- ⑤ Meßrahmen (am Mittenstempel befestigt)
- ⑥ Induktiver Wegaufnehmer mit anliegender Meßstange (7): Druckplattenabstand
- ⑧ Meßträgerplatte mit 12 Näherungsinitiatoren: Bauchung der Seitenfläche
- ⑨ Befestigung der Meßträgerplatte am Probekörper
- ⑩ Verbindungsstange zur rückwärtigen Halterung für (11)
- ⑪ Induktiver Wegaufnehmer 50 mm oberhalb der unteren Druckplatte: Querverformung
- ⑫ Näherungsinitiatoren zum Messen der Wege der Einzelstempel relativ zum Meßrahmen (5): Deformation der Druckfläche
- ⑬ Dehnungsmeßstreifen
- ⑭ Beschleunigungsaufnehmer: Schallemission

8.4 Versuchsablauf

Die vorbereitenden Arbeiten zu Beginn eines jeden Versuchs waren recht umfangreich. Wie aus Bild 8.7 hervorgeht, waren je Versuch bis zu 36 Meßstellen anzuschließen. Nur die Dehnungsmeßstreifen mußten jeweils neu angelötet werden.

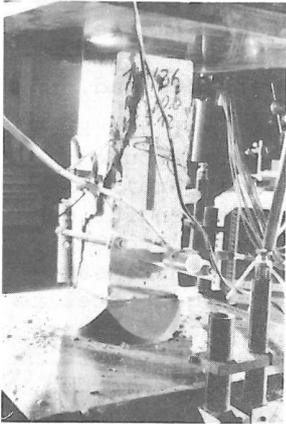


Bild 8.12
Versuchsaufbau mit
starren Druckplatten

Die übrigen Meßwertaufnehmer blieben über die Verteilerplatten ständig mit der Vielstellenmeßanlage verbunden. Sämtliche Aufnehmer mußten jedoch, nachdem der Probekörper mit einer Grundkraft belastet und damit festgehalten war, auf Null abgeglichen bzw. auf den günstigsten Meßbereich eingestellt werden. Einigen Zeitaufwand erforderten hierbei die 12, bei schlaffen Druckplatten insgesamt 24, Näherungsinitiatoren, bei denen jeweils die optimale Spaltbreite zum metallischen Gegenstück eingestellt wurde. In Bild 8.13 sind die Kunststoffschrauben am Sitz der einzelnen Näherungsinitiatoren in der Meßträgerplatte zu erkennen, die hierzu gelöst und dann wieder derart feinfühlig festgestellt werden mußten, daß der mit der hohen Meßauflösung zwangsläufig gekoppelte schmale Bereich der Wegmessung von rd. $\pm 0,2$ mm nicht überschritten wurde.

Nach derartigem Einrichten eines Versuchs, der festen Eingabe von Serien- und Probekörper-Nummern in die Vielstellenmeßanlage und Ausgabe aller Daten, die die einzelnen Wegaufnehmer bei Grundkraft zeigten, in den Registrier-Lochstreifen, konnte der Versuchsablauf gestartet werden. Dieser erfolgte dann vollautomatisch. Bis zum Erreichen der Höchstkraft wurden die angeschlossenen Aufnehmer jeweils mit rd. 30 Meßzyklen in zuvor festgelegten Zeitintervallen abgefragt.

Die elektro-hydraulische Regelung war dabei so eingestellt, daß die rechneri-

sche mittlere Druckspannung im Querschnitt eines Probekörpers je Sekunde um $0,05 \text{ N/mm}^2$ zunahm. Bei einer Druckfestigkeit von z.B. $\beta_D = 30 \text{ N/mm}^2$ ergab sich damit eine Versuchszeit von 10 min. Wird die so festgelegte Geschwindigkeit des Versuchsablaufs auf einen zu erwartenden Wert der Längsstauchung von rd. 2 mm/m bezogen, so ergibt sich eine Längsstauchung von 1 mm/m (d.h. 1%) in etwa 5 min. Die vorliegenden Druckfestigkeitsuntersuchungen zählen so eindeutig zu den Kurzzeituntersuchungen. Nach Bild 63 in /R1/ ist damit eine merkliche Beeinflussung der Versuchsergebnisse bei den hier infrage kommenden Unterschieden in der Versuchsdauer (bedingt durch unterschiedliche Festigkeitsergebnisse wegen des Einflusses von Probekörperschlankheit und Art der Krafteinleitung) nicht zu erwarten.

8.5 Versuchsauswertung

Die erforderlichen Versuchsauswertungen waren sehr umfangreich, überaus vielfältig und sehr zeitaufwendig. Der begrenzte Raum und die gebotene Übersichtlichkeit verbieten hier die Wiedergabe von Einzelheiten.

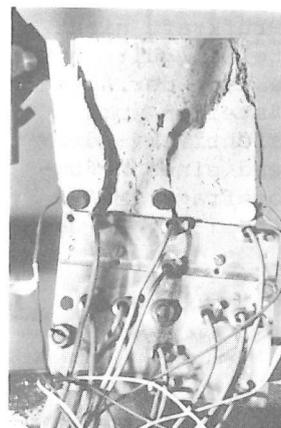


Bild 8.13
Meßträgerplatte mit
Näherungsinitiatoren
(Prisma nach einem Versuch mit starren Druckplatten)

Stichwortartig läßt sich die Abfolge der Arbeitsgänge wie folgt angeben: Prüfen der in Lochstreifen gestanzten Versuchsdaten auf formale Richtigkeit (Vollständigkeit der Meßzyklen, Fehllochungen durch Fehler der Datenerfassungsanlage, Kenn-Nummern des Versuchs usw.); Übernahme der Meßdaten aus den Lochstreifen auf Magnetband (elektronische Rechenanlage TR 86); Zusammenfassen der Daten zu Matrizen (je Versuch eine Ergebnis-Matrix mit 30 Zeilen und 100 Spalten, dies je gesondert für Verformungsmessungen und Schallemissionsanalyse); Sortieren der 712 Ergebnis-Matrizen der Verformungsmessungen und der 510 Schallemissions-Matrizen nach

der Art der Krafteinleitung, der Betonfestigkeitsklasse und nach der Probekörperschlankheit; Auswerten der Festigkeitsergebnisse; Vervollständigen der Arbeitslinien (s. Abschn. 8.5.2); Berechnen der abgeleiteten Zielgrößen, wie Volumen, Dehnung, Querdehnzahl usf.; Ausgabe der Ergebnisse in einer Reihe von Tabellen und verschiedenen, mit dem Plotter des Elektronenrechners gezeichneten Grafen.

Auf einige Besonderheiten dieser Auswertungen wird nachfolgend kurz eingegangen.

8.5.1 Kraftstufen

Die Versuche wurden zügig mit konstantem Kraftanstieg bis zum Versagen des Probekörpers gefahren. Je nach zu erwartender Höchstkraft erfolgten die Meßabfragen in solchen konstanten Zeitintervallen, daß sich bei jedem Versuch insgesamt 20 bis 30 Meßumläufe bzw. Kraftstufen i ergaben. Für die abzufragenden Meßdaten wurde der Kraftanstieg nicht unterbrochen. Bei maximal fünf Meßabfragen je Sekunde hatte dies zur Folge, daß jeder Meßumlauf eine derart lange Zeitspanne benötigte, daß die in zwischen angestiegene Prüfkraft nicht mehr als für alle Meßstellen gültig angesehen werden konnte. Je nach der Anzahl der angeschlossenen Meßstellen wurde - wie aus Bild 8.14 ersichtlich - die Prüfkraft deshalb während eines Meßumlaufs bis zu viermal abgefragt (Meßstellen 100, 115, 125 und 138). Bezugs-

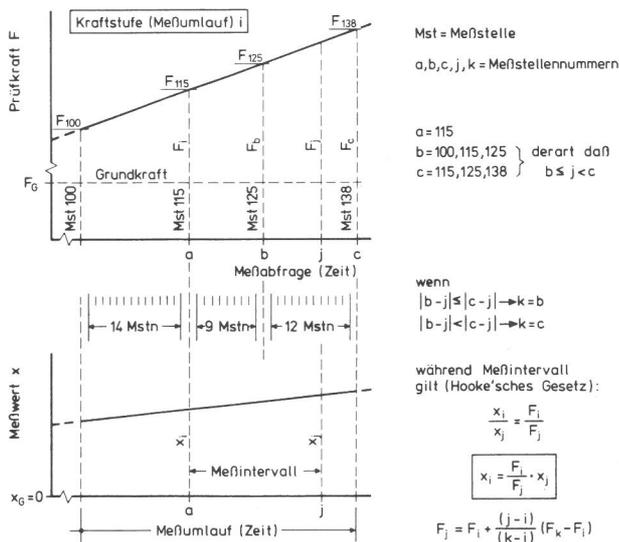


Bild 8.14

Kontinuierlicher Kraftanstieg ohne Halt zur Meßabfrage: Meßwerte x_j des Meßumlaufs i werden auf die an der Meßstelle 115 angezeigte Prüfkraft F_i bezogen

wert für die Auswertung war stets die Meßstelle 115. Die Meßwerte aller übrigen Meßstellen wurden auf die Höhe dieser Prüfkraft bezogen, wobei als weiterer Stützpunkt für die Interpolation die der jeweils betrachteten Meßstelle nächstgelegene Abfrage der Prüfkraft benutzt wurde. Dabei konnte davon ausgegangen werden, daß während dieser kurzen Meßintervalle (Bild 8.14) eine lineare Abhängigkeit zwischen der Prüfkraft und dem jeweiligen Meßwert bestand.

Dieses Vorgehen bereitete bei der Programmierung der Versuchsauswertung (Algol 60) keine besondere Mühe, erforderte aber zusätzlich Abfragen für den Fall, daß das Versagen eines Probekörpers ausgerechnet während eines Meßumlaufs eintrat. Dieselbe Aufgabe stellte sich auch dann, wenn ein Meßaufnehmer versagte, bevor die Höchstkraft erreicht war. Hier mußte sichergestellt werden, daß unbrauchbare Daten vom Programm her rechtzeitig erkannt wurden.

8.5.2 Vollständige Arbeitslinien

Vollständige Arbeitslinien geben die Abhängigkeit eines Verformungswertes von dem Zeitpunkt, an dem die Prüfkraft Null ist, bis zur erreichten Höchstkraft an. Bei der Bestimmung dieser Kurvenzüge bedürfen jedoch in der Regel sowohl der Anfangs- wie auch der Endbereich besondere Beachtung.

Für die Sonderstellung des Anfangsbereichs der Arbeitslinien ist in erster Linie das als "Setzen" bezeichnete Verhalten des Betons verantwortlich. Es führt zu einem Anlauf des Kurvenzuges (Bild 8.15a). Weder im Ursprungsbereich noch später ist bei Beton jedoch die Arbeitslinie derart hohl zur Kraft- bzw. Spannungsachse gekrümmt (H7). Verantwortlich für die vergrößerten Längenänderungen bei Beginn der Druckbeanspruchung eines Probekörpers sind vielmehr anfängliche Gleiterscheinungen von Teilchen im Probekörper /R1/; das Widerstandsvermögen des Betons muß sozusagen erst aktiviert werden. Auch das Schließen von Schrumpfrissen sowie von Mikrorissen, die u.U. beim Erhärten entstanden sind, kann die Ursache des Setzens sein. Sofern Längsverformungen zwischen den Druckplatten gemessen werden, bewirkt auch das erste Anpassen der Probekörperoberfläche an die steifere Fläche der Druckplatte einen Anlauf der Arbeitslinie /S5/. Hughes /H15/ hat in diesem Zusammenhang sogar Quersstauchungen bei Versuchsbeginn anstelle der in mittlerer Höhe von Betonwürfeln

erwarteten Querdehnung festgestellt.

Alle diese Besonderheiten wurden in der vorliegenden Untersuchung dadurch umgangen, daß die Versuche nicht vom Nullpunkt der Prüfkraft, sondern von einer Grundkraft aus gestartet wurden (Bild 8.15b). Diese betrug stets $F_G = 40 \text{ kN}$. Bei nahezu allen Arbeitslinien konnte damit der Anlauf ausgeschlossen werden. In Hinblick auf plastische Verformungsanteile des Betons durfte allerdings die Grundkraft - insbesondere bei dem wenig festen Beton B15 - nicht allzu lange gehalten werden. Ein zügiges Durchfahren der Grundkraft von einer niedrigen Vorlast aus (fliegender Start) war aber wiederum wegen der bereits angegebenen vielfältigen Einstellarbeiten an den Meßwertaufnehmern nicht möglich.

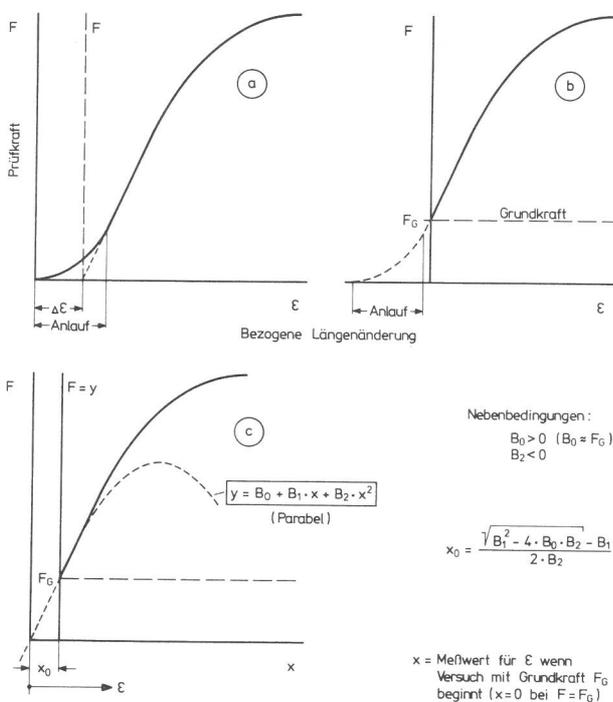


Bild 8.15

Verschieben des Koordinatenursprungs wegen des Anlaufs von Verformungslinien bei Versuchsstart (a) von einer Nullkraft $F=0$ aus und (b) von einer Grundkraft F_G mit analytischer Ermittlung (c) des Verschiebungsbetrages x_0 .

Der derart überbrückte Anlauf der Arbeitslinien bedingt eine Verschiebung des Koordinatenursprungs in den Stauchungsnullpunkt. Zur Bestimmung des Verschiebungsbetrages geht S a s s e /S5/ von einer näherungsweise linearen Spannungs-Stauchungsbeziehung aus und benutzt als Stützpunkte für die Extrapolation Meßwerte bei 20, 40 und 60 % der Probekörperfestigkeit. R ü s c h /R12/ hat die Lage des Stauchungsnull-

punktes auf grafischem Wege durch Verlängerung der Kurven bestimmt. So wird auch in anderen Untersuchungen verfahren, zumal dann, wenn die gewählte Grundkraft so gering ist, daß die Meßdaten im Ursprungsbereich noch einen Anlauf der Arbeitslinie ausweisen. Jeder Kurvenzug muß dann individuell bearbeitet werden, die visuelle Kontrolle ist kaum zu ersetzen.

Demgegenüber konnte bei den vorliegenden Auswertungen wegen der ausreichend hoch gewählten Grundkraft, die den Anlauf der Verformungslinien ausschloß (Bild 8.15b), der Betrag x_0 der notwendigen Koordinatenverschiebung auf analytischem Wege ermittelt werden. Die Lage des Verformungsnullpunktes von vornherein nur linear zu extrapolieren, erschien jedoch zu stark vereinfacht. Als Funktionsansatz zur Beschreibung der Verformungskurven im Bereich bis 60 % der Höchstkraft wurde deshalb ein Polynom zweiten Grades gewählt:

$$y = B_0 + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 \quad (23)$$

Diese Gleichung beschreibt eine Parabel mit vertikaler Symmetrieachse. Diese ist nach unten geöffnet, sofern $B_2 < 0$ ist.

Die drei Parameter B_0 , B_1 und B_2 wurden mit Hilfe der multiplen Regressionsrechnung ermittelt (Abschn. 613.1 in /L4/), wobei durch die Substitutionen

$$x_1 = x \quad \text{und} \quad x_2 = x^2$$

das Polynom in eine lineare Gleichung übergeführt wurde. Um auch an dieser Stelle jede Beeinflussung der Untersuchungsergebnisse durch die Art des Vorgehens bei der Datenauswertung auszuschließen, wurden die Ergebnisse der Regressionsrechnung nur dann akzeptiert, wenn sich ein Bestimmtheitsmaß von $B \geq 0.95$ ergab und wenn das Absolutglied B_0 in engen Grenzen mit der Höhe der Grundkraft übereinstimmte ($B_0 \approx F_G$). Mit den so ermittelten Parametern des Polynoms konnte dann die Größe des Verschiebungsbetrages x_0 nach der in Bild 8.15 angegebenen Gleichung ermittelt werden. Für den Fall $B_2 \rightarrow 0$ schloß diese Art der Bestimmung gleichzeitig den Fall einer linearen Extrapolation mit ein.

Ähnlich wie für den Ursprungsbereich wurde auch bei der Extrapolation der Verformungsbeträge im Bereich der Höchstkraft vorgegangen. Nur selten konnten die Spannungs-Verformungslinien bei den Versuchen bis zur Versagensgrenze des Probekörpers verfolgt werden. Dehnungs-

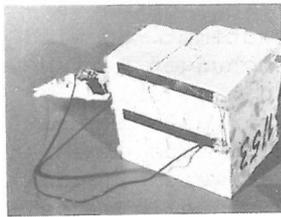


Bild 8.16
Rißbild eines Betonwürfels nach Prüfung mit schlaffen Druckplatten

meßstreifen und Aufnehmer zur Messung der Querverformungen (Bilder 8.16 bis 8.18 und A11) lieferten infolge örtlich auftretender Risse, Abplatzungen usf. während des Bruchvorgangs häufig keine verlässlichen Meßdaten mehr. Die Dehnungs- und Stauchungswerte zum Zeitpunkt der erreichten Höchstkraft mußten deshalb mitunter je nach vorangegangenen Kurvenverlauf linear oder auch quadratisch extrapoliert werden. In einem ersten Arbeitsgang wurde hierzu wiederum der Funktionsansatz nach Gleichung (23) verwendet, wobei als Stützpunkte in den Berechnungen nur Meßdaten der jeweils letzten Kraftstufen oberhalb von 50 % der Festigkeitsgrenze berücksichtigt wurden. So war auch hier sichergestellt, daß mit dem Polynom zweiten Grades nur Teilabschnitte, nicht aber der gesamte Verlauf der Verformungskurven beschrieben wurde.

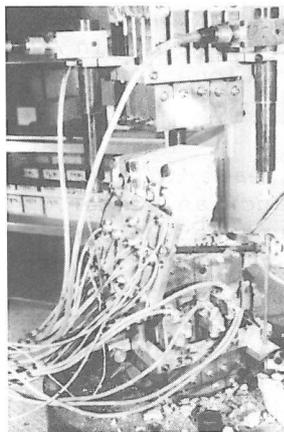


Bild 8.17
Beim Bruch eines Betonwürfels abgefallene Meßträgerplatte

Außerdem dienten die derart auf analytischem Wege ermittelten maximalen Verformungen nur als Schätzwerte, die in jedem Falle in einem zweiten Arbeitsgang anhand von Plotterzeichnungen visuell überprüft und gegebenenfalls berichtigt wurden. Dabei zeigte es sich, daß der Parabelansatz für den oberen Bereich von Spannungs-Stauchungslinien in der Regel recht gut brauchbar war im Gegensatz zur Beschreibung des Verlaufs von Querdehnungskurven, für die - offensichtlich durch die starke Zunahme der Querdehnungen kurz vor dem Versagen des Probekörpers - meist eine

lineare Extrapolation den tatsächlichen Verhältnissen am nächsten kam.

8.5.3 Deformation der Druckflächen

Die Einzelstempel der schlaffen Druckplatte sind zentralsymmetrisch zum Mitstempel angeordnet. Ihre Längsbewegungen δ können in Form von fünf Ringlinien um den Mittelpunkt der Druckfläche zusammengefaßt werden. In der Art von Höhenangaben über festgelegten Grundlinien geben die Meßwerte dann ein anschauliches Bild von der Deformation der Endfläche des Probekörpers bei ansteigender Druckbeanspruchung (Bild 8.19).

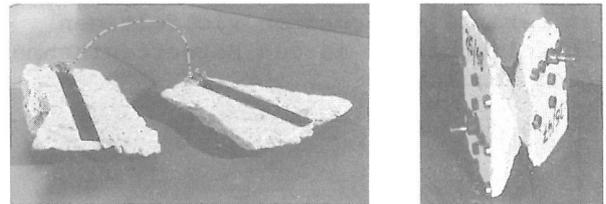


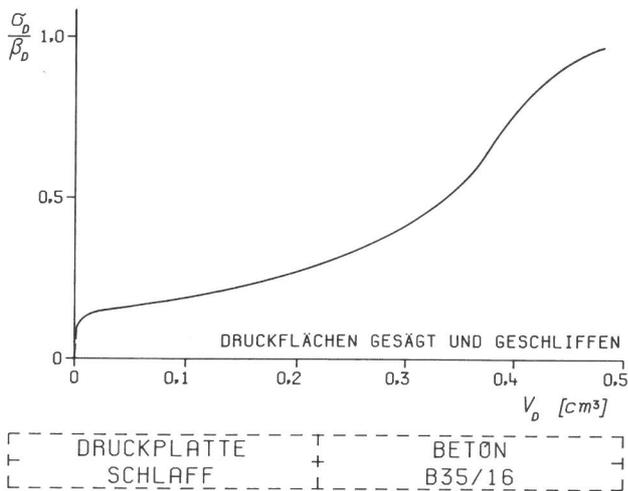
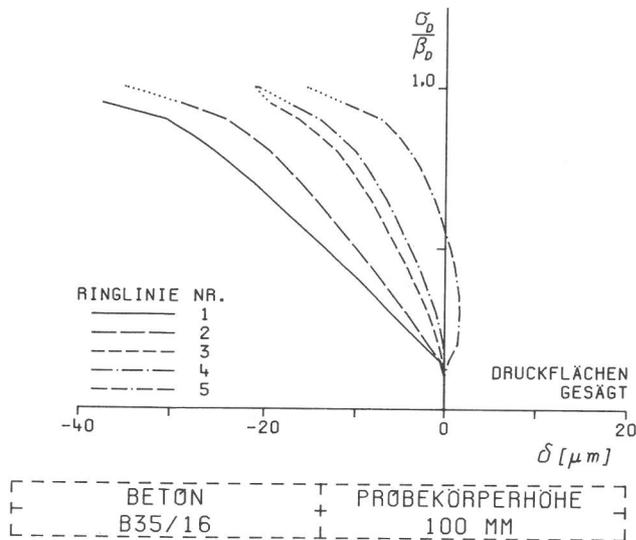
Bild 8.18
Bruchstücke mit Meßwertaufnehmern (s.a. Bild A11)

Dem gleichen Zweck dient das in Abschnitt 6.1.5 erläuterte Volumen V_D , indem es die Deformation einer Probekörperdruckfläche als Abweichung von einer ebenen Fläche beschreibt. In Bild 8.19 ist dies als Prinzipskizze dargestellt.

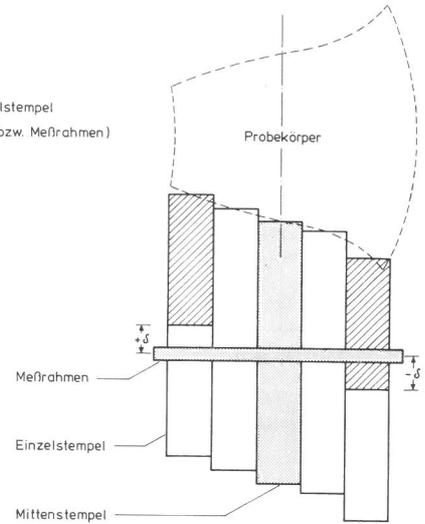
Über die Anordnung der Näherungsinitiatoren zur Aufnahme der Längsbewegungen der Einzelstempel wurde in Abschn. 7.3.2 mit den Bildern 7.10 und 7.11 berichtet. Danach erhielt jeder zweite Einzelstempel einen Meßwertaufnehmer. Die Längsbewegungen der dazwischen liegenden Stempel wurden nach Bild 8.20 interpoliert. Als Stützpunkte dienten jeweils drei Meßwerte bzw. - wie skizziert - aus benachbarten Meßwerten ermittelte Zwischenwerte. Damit waren dann auch mit Gleichung (19) alle 25 Verschiebungswerte v bekannt. Der Betrag von V_D konnte nach Gleichung (18) berechnet werden.

8.5.4 Bauchung von Seitenflächen

Analog zum Volumen V_D wurde in Abschnitt 6.1.6 als Maßzahl für die Bauchung von Probekörperseitenflächen ein Volumen V_S festgelegt. Das Meßraster entsprach dem für V_D (geringe Abweichungen bei Prismen gegenüber Würfeln seien hier nur erwähnt). Fehlende Meßwerte wurden in derselben Weise nach Bild 8.20 interpoliert.

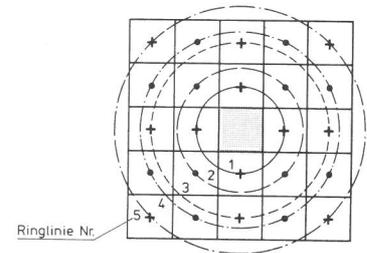


Meßweg δ
(Längsbewegung der Einzelstempel
relativ zum Mittienstempel bzw. Meßrahmen)



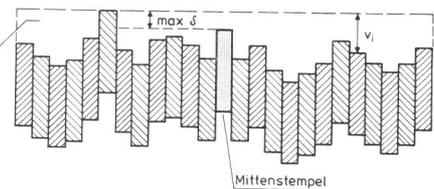
Lage der zu Ringlinien
zusammengefaßten Meßstellen
(Draufsicht auf untere
schlaffe Druckplatte)

+ gemessener } Wert δ
• interpolierter }



Volumen V_0 der
deformierten
Druckfläche

$$V_0 = A_S \cdot \sum_{i=1}^{25} v_i$$



Einzelstempel Nr. 1...25
Querschnittsfläche: $A_S = 400 \text{ mm}^2$

Bild 8.19

Prüfung mit schlaffen Druckplatten: Beschreibung der Deformation einer Probekörper-Druckfläche durch die Längsbewegungen δ von Einzelstempeln relativ zum Mittienstempel und durch das hieraus errechnete Volumen V_0 der Berührungszone des Probekörpers mit der schlaffen Druckplatte (bei ebener Druckfläche ist $V_0 = 0$)

Zusammengefaßt wurden die Verschiebungswege in diesem Fall jedoch nicht zu Ringlinien, wie in Bild 8.19, sondern zu Bauchungsprofilen, die in vertikaler Richtung im Abstand von 6, 25 und 50 mm von der Außenkante des Probekörpers, d.h. durch die ursprünglichen Meßpunkte (vgl. Bild 8.6), verliefen.

Weitergehende Auswertungen zur Bauchung der Probekörper sind nicht ohne weiteres möglich. Dies wäre nur gegeben, wenn z.B. die Meßträgerplatte, die als Bezugsebene dient, in ihrer Lage zum Probekörper während des gesamten Versuchsablaufs festliegen würde. Gerade dies ist aber nicht der Fall. Ebenso wie der Meßrahmen der schlaffen Druckplatte sich während der Probekörperverformung relativ zur Druckfläche des Probekörpers in

eine beliebige, schwer erfassbare Richtung neigen kann, so ist in gleicher Weise nicht auszuschließen, daß das Teilstück der Probekörperoberfläche, an dem die Meßträgerplatte (Bild 8.13) befestigt ist, während des Versuchs seine Lage relativ zum übrigen Probekörper ändert. Die Meßträgerplatte, also die Bezugsebene, erhält dadurch eine unbekannt bleibende Schiefstellung zur Probekörperoberfläche. Die Näherungsinhibitoren bewegen sich dabei auf Kugelschalen um den Befestigungspunkt an der Probekörperoberfläche.

Diese Verdrehung führt je nach der Neigung der Meßträgerplatte und der Lage des jeweiligen Meßpunktes zu einer Verringerung oder Vergrößerung des angezeigten Meßwertes. Für das berechnete

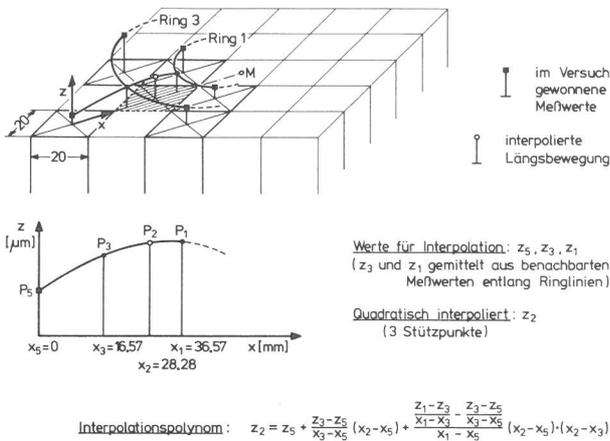


Bild 8.20

Aus benachbarten Meßwerten interpolierte Längsbewegung eines Einzelstempels der schlaffen Druckplatte

Volumen als Maß für die Abweichung von der Ebenheit der Probekörperoberfläche ist dies ohne Bedeutung, da sich die positiven und negativen Differenzen insgesamt aufheben. Ebenso ändert sich dadurch nicht die Form eines Bauchungsprofils. Sein(e) Lage/Abstand zur Probekörperoberfläche ist aber unbestimmt.

Aus Symmetriegründen können bei der Deformation der Probekörperdruckfläche trotzdem die Meßwerte zu Ringlinien zusammengefaßt werden. Bei der Bauchung von Seitenflächen wäre dies demgegenüber nur bei Würfeln, nicht jedoch bei Prismen möglich, da mit der Meßträgerplatte stets die unteren 100 mm einer Probekörperhöhe erfaßt wurden, also keine symmetrische Anordnung vorliegt (vgl. Bilder 8.6, 8.11 und 8.13).

8.5.5 Schallemissionen

Die Häufigkeit von Eigengeräuschen ist bei den einzelnen Probekörpern sehr unterschiedlich. Auch bei gleichem Versuchsmaterial und gleicher Probekörpergröße unterscheiden sich zuweilen die registrierten Impulse in ihrer Anzahl um mehrere 100 %. Da Störgeräusche durch die Meßapparatur (Bild 7.14) weitgehend herausgefiltert werden, ist dies vor allem auf Anfangsgeräusche unterschiedlicher Intensität zurückzuführen, die sich meist bis 25 % der Höchstkraft bemerkbar machen. Auch die vielleicht noch nicht optimale Anbringung der Befestigungsschraube für den Schallaufnehmer beeinflusst vermutlich die Zahl der registrierten Schallimpulse.

Bei der Auswertung der Schallemissionen wurde deshalb nicht von den absoluten Werten L_E der Häufigkeit von Eigengeräuschen ausgegangen, sondern von Relativwerten, wobei auf die bis zu 98 % der Höchstkraft aufgelaufene Summe L_E^{98} der Schallimpulse bezogen wurde:

$$\delta_i = \frac{L_{E_i} - L_E^{25}}{L_E^{98} - L_E^{25}} \quad (24)$$

Wie dieser Ausdruck zeigt, blieben bei der Auswertung sämtliche Schallimpulse unterhalb von 25 % der Höchstkraft unberücksichtigt, da diese offensichtlich auf Grundgeräusche zurückgingen, die in keinem ursächlichen Zusammenhang mit Gefügeänderungen im Probekörper standen. Hierdurch und durch die Betrachtung nicht von Absolut-, sondern von Relativwerten war es möglich, die Ganglinien der Schallemissionen trotz stark unterschiedlicher Zahl der insgesamt registrierten Impulse zu vergleichen.

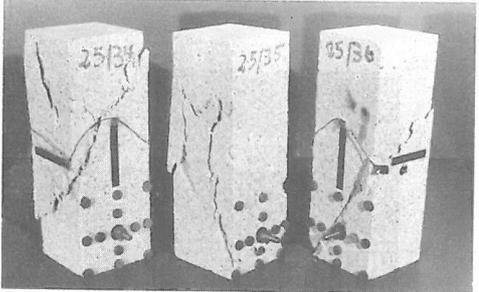
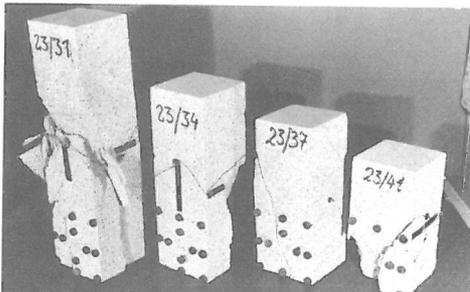
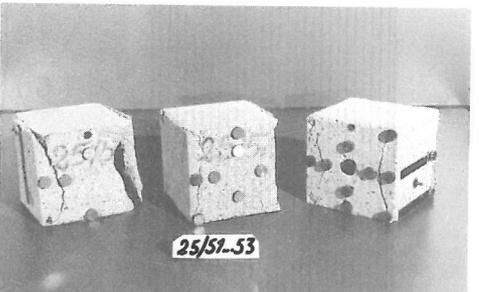
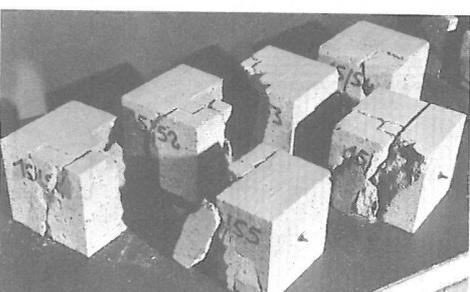
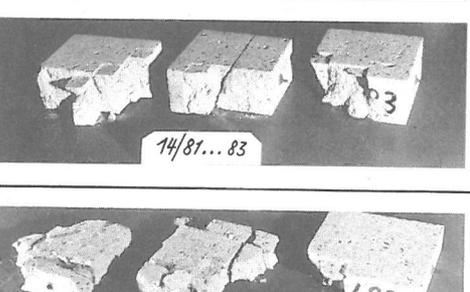
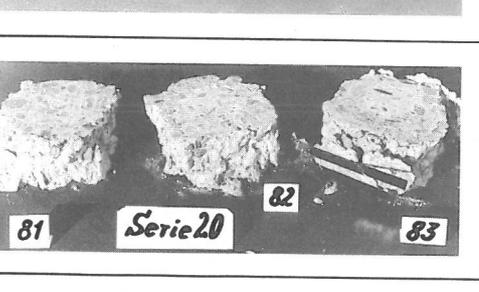
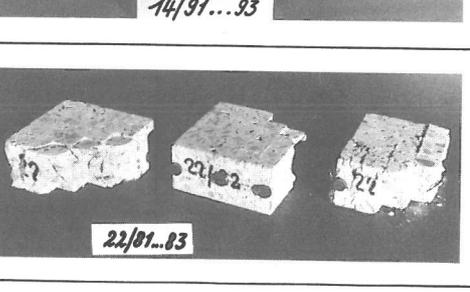
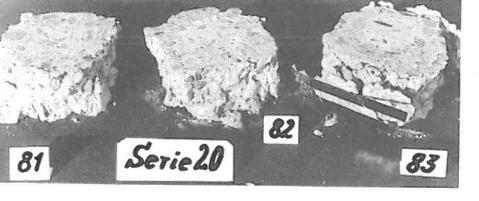
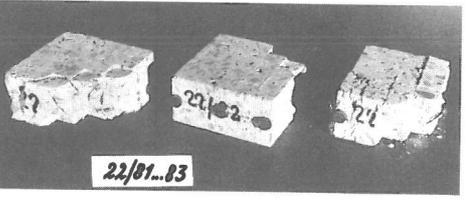
		Krafteinleitung über		Probekörper- höhe
		starre Druckplatten	schlaffe Druckplatten	
Mörtel				300 mm
				400 mm bis 200 mm
				100 mm
				50 mm
Beton			25 mm	50 mm

Bild 9.1

Bruchbilder von Probekörpern nach Prüfung mit starren im Vergleich zu schlaffen Druckplatten

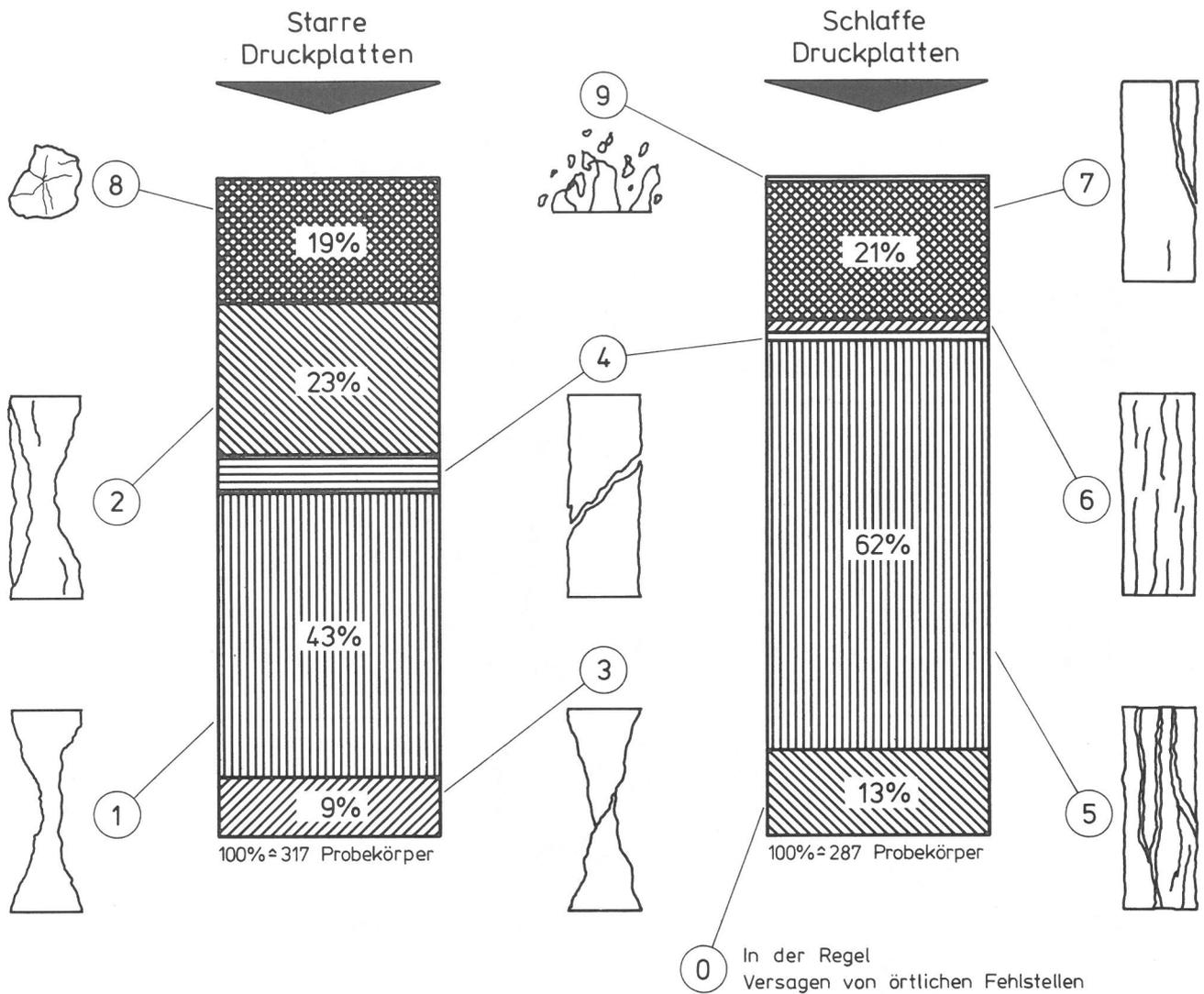
9 Untersuchungsergebnisse

9.1 Bruchbilder

Augenfällige Hinweise auf die starke Beeinflussung der Versuchsergebnisse sowohl durch die Probekörperschlankheit als auch durch die Art der Krafteinleitung geben bereits die Bruchbilder der Probekörper. Diese sind bei den vorlie-

genden Untersuchungen ohne Einschränkung miteinander vergleichbar (Bild 9.1), da der Versuchsablauf durch die automatische Regelung stets endete, unmittelbar nachdem die Prüfkraft ihren Höchstwert erreicht hatte.

Anhand von Kennziffern (Bilder 9.2 und A12) wurden in Bild 9.3 die Bruchbilder von insgesamt 604 Probekörpern zusammen-



Bruchbild	Risse bzw. Bruchstücke	Probekörperhöhe [mm]									
		25	50	75	100	150	200	250	300	400	
0	Örtliche Fehlstellen	○			○		○	○			
1	Doppelpyramide			●	●	●	●				
2	Doppelpyramide verdeckt		●	●	●	●	●	●	●	●	
3	Doppelpyramide / Schubbruch						●	●	●	●	
4	Überwiegend Schubbruch						●	●	●	●○	
5	Überwiegend säulenförmig	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
6	Längsrisse							○	○		
7	Kantenstück abgetrennt			○	○	○	○	○	○	○	
8	Gefüge zerquetscht	●	●	●							
9	Gefüge vollständig zerstört	○									

● Starre Druckplatten ○ Schlaffe Druckplatten

Bild 9.3

Häufigkeit charakteristischer Bruchbilder bei Krafteinleitung über starre und schlaffe Druckplatten

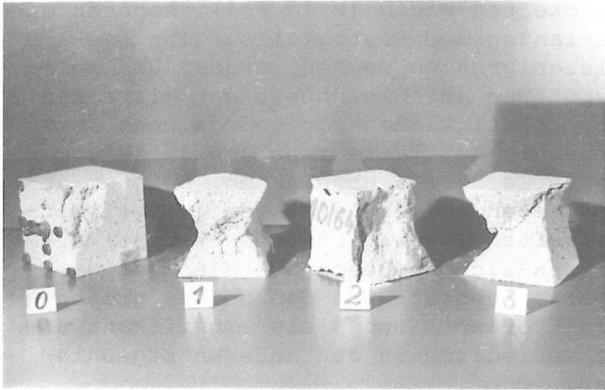


Bild 9.2

Kennziffern charakteristischer Bruchbilder
(Vgl. vollständige Zusammenstellung in Bild A12)

gefaßt. Dabei traten deutlich die Unterschiede zwischen der Prüfung mit schlaffen im Vergleich zu starren Druckplatten zutage. Während im ersten Fall erwartungsgemäß säulenförmig ausgeprägte Rissebildungen überwogen, herrschten bei starren Druckplatten als Bruchbilder die bekannten Doppelpyramiden vor. Diese waren besonders deutlich bei Probekörperhöhen von etwa $100 \text{ mm} < h < 300 \text{ mm}$ zu erkennen (Bild 9.4). Auch bei $h = 50 \text{ mm}$ zeigten sich noch Ansätze dieser für starre Druckplatten typischen Bruchausbildung der Probekörper (Bild A13).



Bild 9.4

Bruchbild eines
300mm-Prismas in Form
einer Doppelpyramide
nach der Prüfung mit
starren Druckplatten

Die Festigkeitsklassen bzw. die vier zugehörigen Betonrezepturen hatten keinen erkennbaren Einfluß auf die Bruchbilder. Lediglich bei Würfeln trat die verdeckte Doppelpyramide nur bei Beton-Probekörpern, nicht dagegen bei Versuchskörpern aus den beiden Mörtelmischungen auf. Auch die ursprüngliche Befürchtung, bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten könnten die Bruchbilder bei höheren Betongütern stärker von örtlichen Fehlpunkten abhängen, die dann Ausgangspunkt

für wenig charakteristische Rissebildung sein könnten, erwies sich als unbegründet (Bild A14).

9.2 Druckfestigkeit

9.2.1 Probekörperfestigkeit

Im Verlauf der vorliegenden Untersuchungen wurden die Druckfestigkeiten β_D von insgesamt 627 Probekörpern ermittelt. Je 208 Festigkeitsergebnisse betrafen den Beton B25/16 und den Mörtel B25/04, 106 Druckfestigkeitswerte den Mörtel B15/04 und schließlich 105 Ergebnisse den Beton B35/16. Dem Versuchsplan entsprechend waren die Probekörper unterschiedlich schlank. Es wurden ebenso viele Versuchskörper mit starren wie mit schlaffen Druckplatten geprüft.

Die ermittelten Probekörperfestigkeiten sind im Anhang in den Bildern A15 bis A20 zusammengestellt. Außer sämtlichen Einzelwerten enthalten die Tabellen für jede Probekörperhöhe die mittleren Druckfestigkeitswerte sowie die nach Gleichung (20) errechneten zugehörigen Standardabweichungen s . Außerdem sind die Grenzen des Vertrauensbereiches des Mittelwertes bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % angegeben:

$$VB95 = \bar{x} \pm t_{n,0.05} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (25)$$

Die t -Werte wurden hierzu einschlägigen Tafelwerken (z.B. /G11,S1/) entnommen. Für die beiden häufigsten Fälle $n = 3$ und $n = 6$ Probekörper, bei einem Freiheitsgrad von $(n-1)$ und der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % war

$$t_{2,0.05} = 4,303 \text{ und } t_{5,0.05} = 2,571$$

Als Ergebnis dieser Auswertungen kann festgestellt werden, daß bei der überwiegenden Zahl der Fälle die Streuung der Festigkeitswerte bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten geringer war als bei der herkömmlichen Versuchstechnik mit starren Druckplatten. Dies führte zu entsprechend engeren Vertrauensbereichen für die angegebenen mittleren Druckfestigkeitswerte. Dieses für die schlaffe Druckplatte günstige Bild blieb auch dann erhalten, wenn nicht die Absolutwerte der Standardabweichungen bzw. der Vertrauensbereiche betrachtet wurden, sondern deren Verhältnis zu den mittleren Druckfestigkeitswerten. Lediglich beim Mörtel der Festigkeitsklasse B15 war die Streuung der Festigkeitswerte

bei Prüfung mit starren Druckplatten et-
was geringer.

9.2.2 Einfluß der Probekörperherstellung

Bei der Auswertung der Güteprüfungen wurden in Abschnitt 8.2.3 bei drei der vier Betongüten signifikante Unterschiede in den mittleren Druckfestigkeiten der einzelnen Serien festgestellt (vgl. Bild A9). Demzufolge waren die ermittelten Probekörperfestigkeiten (Bild A15 bis A20) für die anstehenden Festigkeitsvergleiche noch nach Gleichung (22) zu korrigieren.

In gleicher Weise war zu prüfen, ob die Herstellung der Probekörper in den Blockformen A bis E (Bild 8.2) die Versuchsergebnisse beeinflusst haben könnte. Hierzu wurde zunächst die Homogenität der Betonblöcke (Bild 8.3) anhand der Rohdichten der aus den Blöcken herausgearbeiteten Versuchskörper überprüft. Wie bereits bei lange zurückliegenden Untersuchungen /B6/, so war auch hier die größte Rohdichte meist in der unteren Schicht festzustellen. Eine ausreichende enge Beziehung zwischen Rohdichte- und Festigkeitsschwankungen konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Als bedeutsam erwiesen sich demgegenüber jedoch die Festigkeitsunterschiede zwischen den Versuchskörpern aus einigen Blockformen. Zur Klärung dieses Einflusses wurden zwei Sonderserien, die Serie 17 aus Mörtel B25/04 und die Serie 18 aus Beton B25/16, betoniert und aus den Blöcken sodann ausschließlich Würfel mit 100 mm Kantenlänge herausgesägt. Wie die Auswertung der Würfelfe-

stigkeiten ergab (Bild A21), konnten die Varianzen der Festigkeitsergebnisse als gleich groß angesehen werden. Die Nullhypothese auf Gleichheit der mittleren Druckfestigkeiten war jedoch nach dem Ergebnis der Varianzanalyse für die Betonserie B25/16 abzulehnen. Bei dem anschließenden Vergleich von je zwei Mittelwerten (Zweistichproben-t-Test) erwiesen sich insbesondere die Festigkeitsergebnisse aus den beiden großen Blockformen A und B als signifikant unterschiedlich zu den anderen Ergebnissen.

Material	Korrekturfaktoren				
	Blockform				
	A	B	C	D	E
Mörtel	1.025	1.007	1.003	0.980	0.985
Beton	1.052	1.036	0.972	0.987	0.958

Bild 9.5

Korrekturfaktoren für Festigkeitswerte von Probekörpern bei Herstellung in den Blockformen A...E

Damit wurde neben der o.a. Berücksichtigung der Festigkeitsschwankungen zwischen den einzelnen Serien eine weitere herstellungsbedingte Angleichung aller Probekörperfestigkeiten nach der Herstellform erforderlich - und zwar aus Gründen der Vergleichbarkeit in allen Fällen, also sowohl für Beton als auch für Mörtel und für alle Blockformen. Dies geschah analog zu Gleichung (22) mit den in Bild A21 mitgeteilten Festigkeitsverhältnissen, die in Bild 9.5 nochmals als Korrekturfaktoren zusammengestellt sind.

Probekörper- höhe [mm]	Serie Nr.	Gruppe Nr. +)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	s_d [N/mm ²]	t_{vorh}	t_{95} ++)	Unterschied statistisch gesichert ?
	B15/04: Serien 23,24,25,26								
	B35/16: Serien 19,20,21,22								
	Starre Druckplatten: Serien 19,20,25,26								
	Schlaffe Druckplatten: Serien 21,22,23,24								
100	25	7	6	20.82	0.305	0.28991	7.0	2.23	ja
	26	7	6	22.00	0.274				
	19	7	6	46.65	1.050	1.17175	3.6	2.23	ja
	20	7	6	44.20	1.282				
	23	7	6	20.01	0.681	0.75004	1.4	2.26	nein
	24	7	6	19.37	0.801				
	21	7	6	36.91	2.130	2.04150	0.3	2.23	nein
	22	7	6	36.54	1.949				

+) Die Probekörper-Druckflächen der Gruppe 7 sind schalungsrauh

++) Aussagewahrscheinlichkeit 95%, Freiheitsgrad (n_1+n_2-2)

Bild 9.6

Mittlere Druckfestigkeit von 100mm-Würfeln des Mörtels B15 und des Betons B35, mathematisch-statistische Prüfung des Unterschieds der Mittelwerte zwischen je 2 zusammengehörigen Versuchsserien

9.2.3 Mittelwerte und Vertrauensbereiche

Die derart verbesserten Festigkeitswerte sind nunmehr vergleichbar und können je Probekörperart, hier also in Abhängigkeit von der Schlankheit der Probekörper, zusammengefaßt werden. Einen Auszug gibt Bild 9.6. Für die Festigkeitsklasse B25 sind die Angaben vollständig in den Bildern A22 und A23 enthalten.

Wiederum war zunächst mit dem in Bild A21 bereits angegebenen Zweistichproben-Test zu prüfen, ob statistisch gesicher-

te Festigkeitsunterschiede zwischen je zwei zusammengehörigen Versuchsserien vorlagen. Dies war jedoch nur in wenigen Ausnahmen der Fall, bei denen dann die aufgetretenen Differenzen unter Berücksichtigung besonderer Rohdichte-Unterschiede ausgeglichen werden konnten.

Die schließlich aus den Parallelserien gemittelten Festigkeitsergebnisse sind - untergliedert nach Betongüte, Probekörperschlankheit und Art der Krafteinleitung - in Bild 9.7 sowie in den

Beton	Probekörperhöhe [mm]	Krafteinleitung: Starre Druckplatten									
		Serie	Druckfläche)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Parallele Serien zusammengefaßt				
							Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Vertrauensbereich VB95 untere obere Grenze	
B25/16	400	3	r	3	26.45	1.115	6	27.13	1.471	26.41	27.83
		27	r	3	27.81	1.674					
	300	3	r	3	26.65	1.544	6	26.99	1.681	25.21	28.73
		27	r	3	27.32	2.083					
	250	3	r	3	25.97	2.122	6	26.87	1.794	24.99	28.75
		27	r	3	27.77	3.152					
	200	3	r	3	29.44	1.740	12	28.28	2.128	26.93	29.63
		27	r	3	29.05	2.327					
		4	ss	3	27.66	1.488					
	150	28	ss	3	27.01	2.897	6	28.05	2.058	25.89	30.21
		4	r	3	28.54	1.659					
		28	r	3	27.57	2.674					
	100	3	r	5	33.33	1.543	35	33.07	2.455	32.23	33.91
		27	r	6	32.87	2.270					
		4	r	6	31.32	0.961					
		28	r	6	31.80	3.311					
		4	ss	6	34.33	1.788					
	75	28	ss	6	34.92	2.667	6	38.89	2.488	36.28	41.50
4		ss	6	38.17	2.166						
28		ss	6	39.64	2.765						
50	4	ss	5	56.15	2.287	11	54.19	2.324	52.63	55.75	
	28	ss	6	52.55	4.977						
25	4	ss	6	116.89	7.920	12	113.88	7.777	108.95	118.82	
	28	ss	6	110.87	6.983						
Krafteinleitung: Schläffe Druckplatten											
B25/16	400	5	r	3	26.12	1.324	6	26.62	1.368	25.19	28.06
		7	r	3	27.13	1.473					
	300	5	r	3	26.97	0.476	6	26.92	0.679	26.21	27.63
		7	r	3	26.88	0.963					
	250	5	r	3	27.23	1.222	5	27.19	1.122	25.80	28.59
		7	r	2	27.15	1.427					
	200	5	r	3	28.26	1.026	12	26.88	1.429	25.97	27.79
		7	r	3	27.44	0.837					
		6	ss	3	26.02	1.744					
	150	8	ss	3	25.82	0.549	5	27.29	0.590	26.56	28.02
		6	r	3	27.02	0.625					
		8	r	2	27.73	0.131					
	100	5	r	6	28.76	1.628	34	27.59	2.154	26.87	28.31
		7	r	5	27.97	1.126					
		6	r	6	28.19	1.687					
		8	r	6	26.38	0.939					
		6	ss	5	26.91	2.147					
	75	8	ss	6	27.31	2.348	10	27.13	1.978	25.72	28.54
6		ss	4	25.68	1.651						
8		ss	6	28.12	1.602						
50	6	ss	5	28.38	0.819	11	27.49	1.543	26.45	28.53	
	8	ss	6	26.77	1.682						
25	6	ss	6	29.15	2.838	12	28.61	3.669	26.28	30.94	
	8	ss	6	28.08	4.580						

+) r=schalungsrauh ss=gesägt und geschliffen

Bild 9.7

Druckfestigkeitsergebnisse der Probekörper des Betons B25, zusammengefaßt in Abhängigkeit von der Probekörperschlankheit und der Art der Krafteinleitung

Bildern A24 bis A26 zusammengefaßt. Die dort mit Gleichung (25) errechneten Vertrauensbereiche der Mittelwerte geben in Bild 9.8 einen Überblick über die Streuung der Versuchsergebnisse und zeigen insbesondere das bei gedrunenen Probekörpern gesichert unterschiedliche Verhalten der beiden Krafteinleitungssysteme. Die Daten bestätigen ferner frühere Ergebnisse /S10,S12/, wonach ein Vergleich starrer mit schlaffen Druckplatten bei Probekörpern aus Mörtel bezüglich der Festigkeitsergebnisse zu anderen Verhältniszahlen führt als bei Beton. So beträgt z.B. die an den 100mm-Würfeln mit schlaffen Druckplatten ermittelte Druckfestigkeit der Mörtel B25/04 und B15/04 jeweils 90 % der mit

starrten Druckplatten erhaltenen Werte (vgl. Bilder A24 und A25). Für Beton ergab sich demgegenüber ein Wert von 83 % bei B25/16 (Bild 9.7) (33,07 N/mm² : 27,59 N/mm²) bzw. von 82 % bei B35/16 (Bild A26).

9.3 Verformungen

9.3.1 Aussagekraft von Verformungslinien

Aus der Vielzahl der Spannungs-Verformungslinien der vorliegenden Untersuchung enthält der folgende Abschnitt eine Auswahl charakteristischer Meßwertkurven. Dies sind Linienzüge, die bei

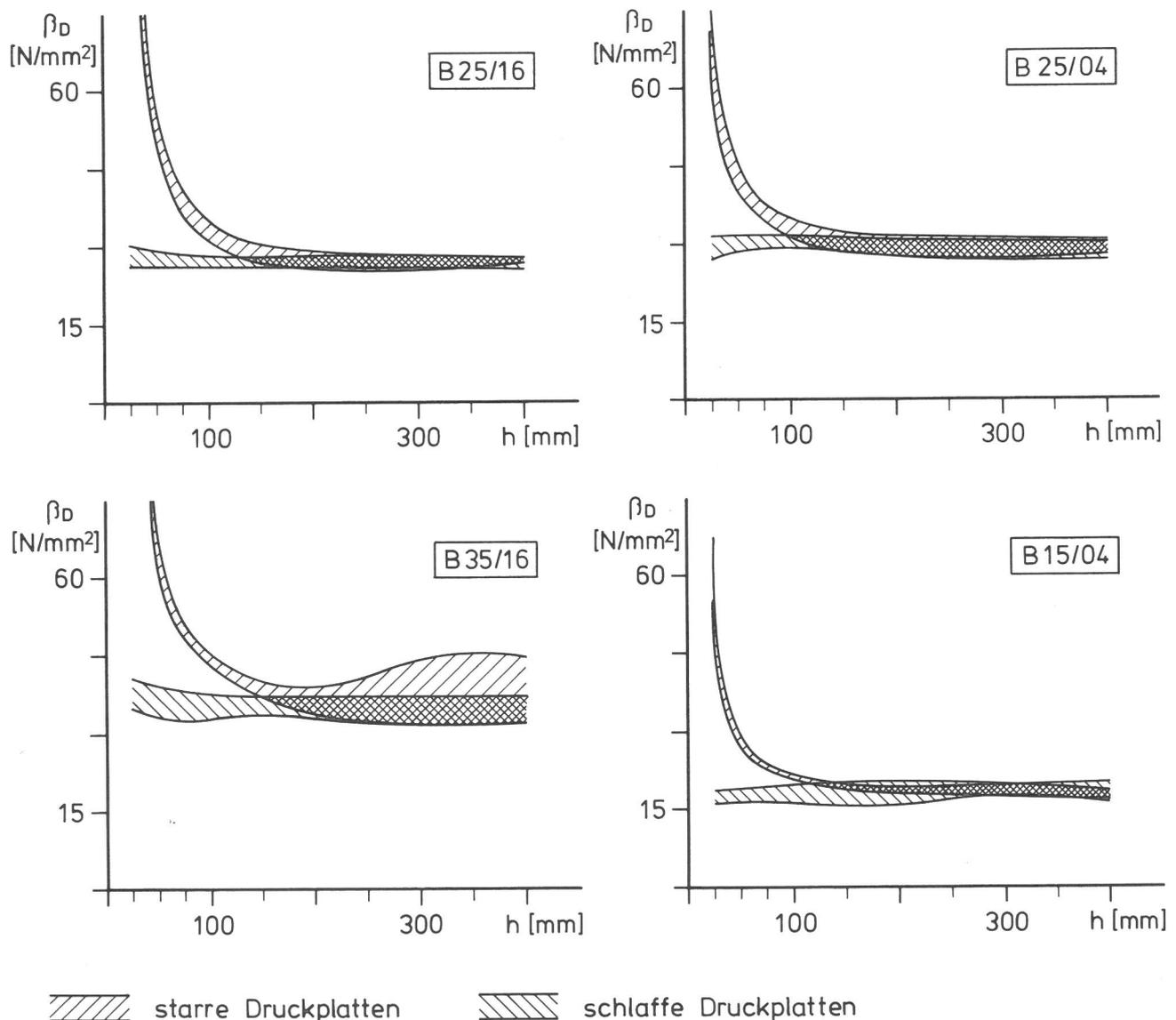


Bild 9.8

Vertrauensbereiche der mittleren Druckfestigkeiten β_D bei Krafteinleitung über starre und schlaffe Druckplatten (Aussagewahrscheinlichkeit 95%)

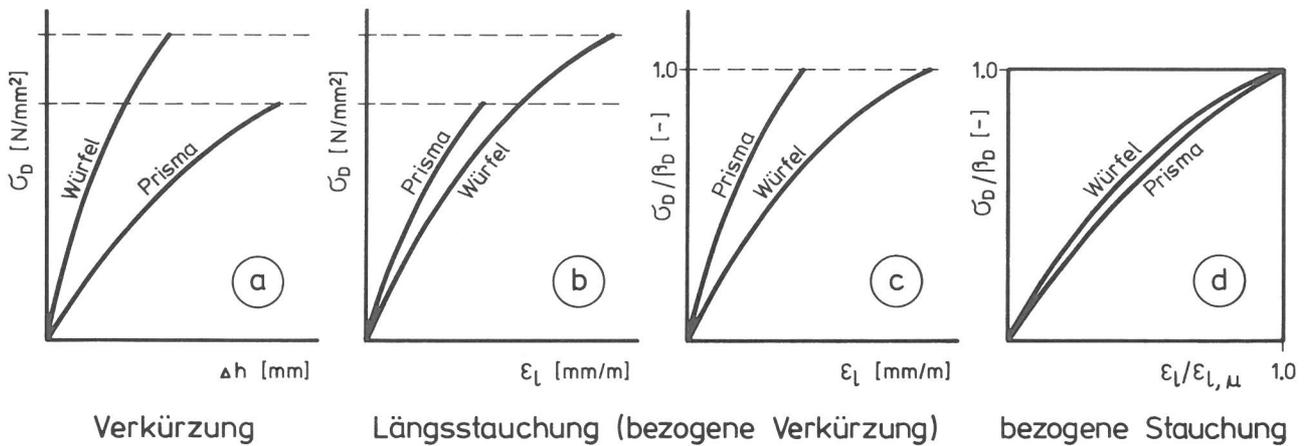


Bild 9.9
 Unterschiedliche Art der Darstellung von Verformungslinien

der Auswertung auf vergleichbare Kraftstufen und vor allem auf den Koordinatenursprung bezogen wurden (vgl. Erläuterung zu den Bildern 8.14 und 8.15), deren Aussage vorläufig jedoch nur für die jeweilige Meßstelle gilt. Vor allem die Längsverformungen bedürfen noch einer weiteren Bearbeitung, ehe sie als kennzeichnend für den gesamten Probekörper gelten können (vgl. Erläuterungen zu Bild 5.9). Es muß deshalb zunächst noch zwischen den Ergebnissen der Oberflächenmessung (OF) mit Dehnungsmeßstreifen und denen der zentralen Messung (ZT) mit induktiven Wegaufnehmern unterschieden werden. Hieraus wird in Abschn. 10.2 die "wahre" Längsstauchung ϵ_L jedes Probekörpers ermittelt. Diese bildet dann die Grundlage für weitere abgeleitete Größen, wie Verformungsarbeit und Völligkeitsgrad.

Um mögliche Fehlschlüsse zu vermeiden, sind in Bild 9.9 nochmals Darstellungsarten für Spannungs-Verformungslinien einander gegenübergestellt. Die Druckspannung σ_D ist dabei in den Skizzen (a) und (b) als selbständige Größe angegeben, in (c) und (d) aber auf die Probekörperfestigkeit β_D bezogen. Ebenso zeigt (a) die Verkürzung Δh des Probekörpers zunächst unmittelbar, in (b) und (c) ist sie jedoch als Stauchungsbetrag angegeben, der dann schließlich in (d) auf den bei Höchstkraft erreichten Stauchungswert bezogen wird.

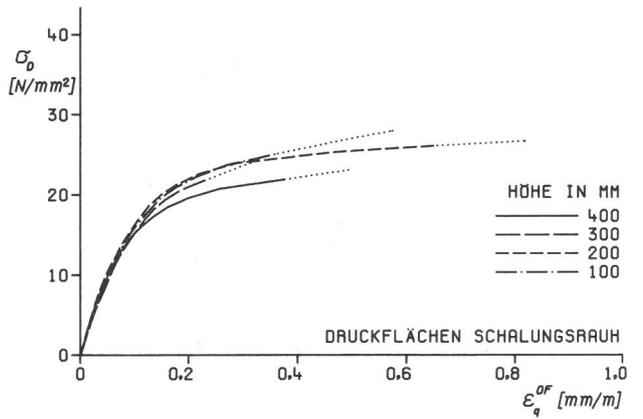
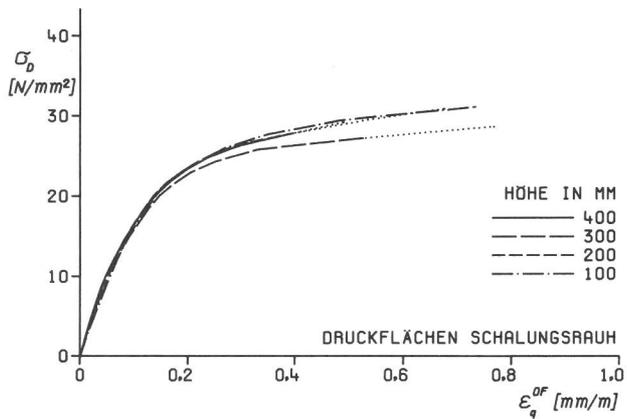
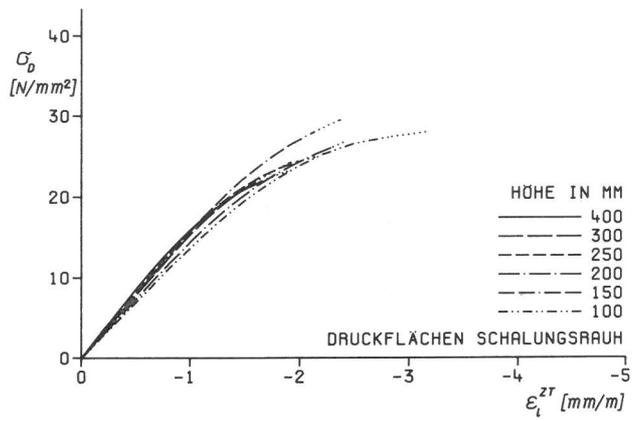
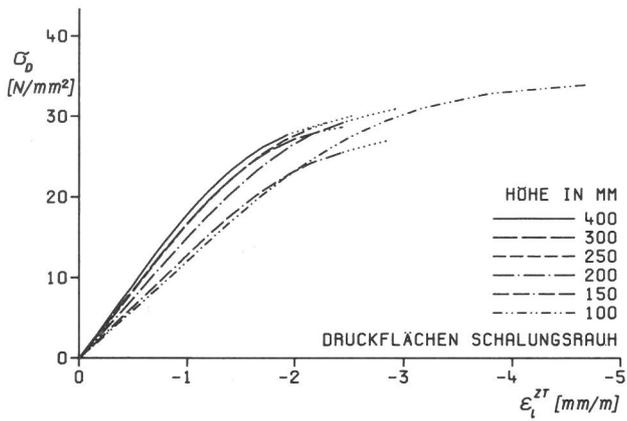
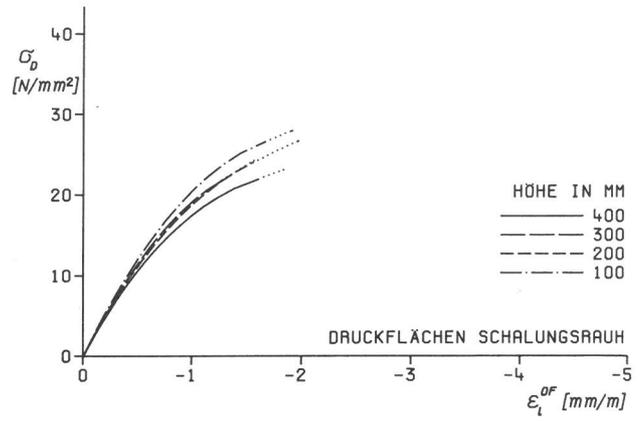
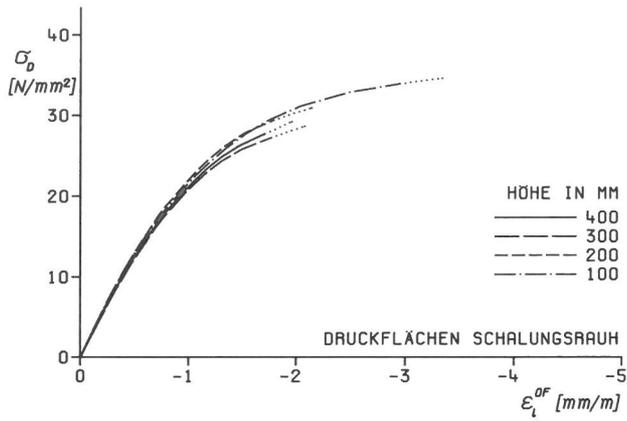
Wie dieser Vergleich mit einem Prisma und einem Würfel zeigt, muß die relative Lage eines Linienzuges stets im Zusammenhang mit der Darstellungsart ge-

sehen werden. Für die vorliegende Untersuchung ist dies von besonderer Bedeutung, da hier ständig Verformungen von unterschiedlich hohen Probekörpern zu vergleichen sind. Außerdem bleibt zu berücksichtigen, daß sich geringfügige Meßunsicherheiten oder Schwankungen der Absolutwerte Δh bei hohen Probekörpern kaum, bei dünnen dagegen sehr stark im Kurvenverlauf auswirken.

9.3.2 Längsstauchungen

Die Bilder 9.10 und 9.11 zeigen eine Reihe von Meßwertkurven der beiden Betongüten B25 und B35 in Abhängigkeit von der Probekörperschlankheit. Die als Oberflächenmessungen (OF) ausgewiesenen Werte beziehen sich dabei stets auf eine 60 mm lange Meßstrecke in mittlerer Probekörperhöhe (vgl. Bild 8.7), die zentrale Messung (ZT) erfaßt demgegenüber die gesamte Höhe eines Probekörpers (vgl. Bild 5.9).

Ein erster Vergleich läßt bereits erkennen, daß die Kurven in der unmittelbar zur Druckspannung σ_D gegebenen Darstellung (Bild 9.10) vergleichsweise eng gebündelt sind. Die vorhandenen Unterschiede werden erst bei Bezug der Druckspannungen auf die jeweiligen Probekörperfestigkeiten β_D deutlich (Bild 9.11). Hier zeigt sich bei starren im Vergleich zu schlaffen Druckplatten in dem breiter gefächerten Verlauf der Kurvenzüge der starke Einfluß der Probekörperschlankheit. Die Linienzüge bestätigen aber auch die bereits in Abschn. 5.3 angesprochenen Unterschiede zwischen den Versuchsergebnissen aus zentraler und Oberflächenmessung.

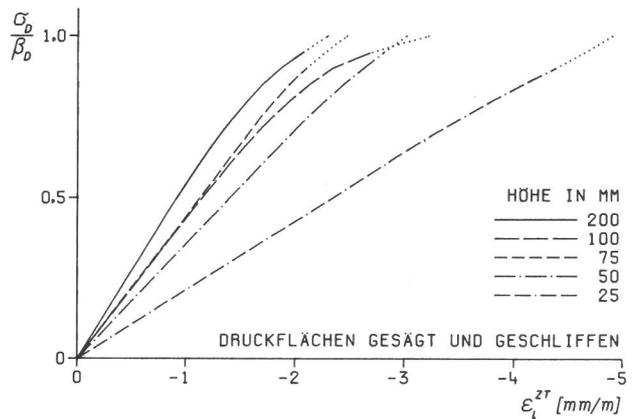
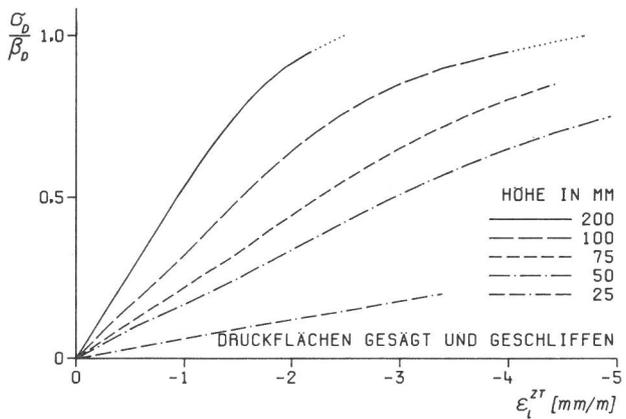
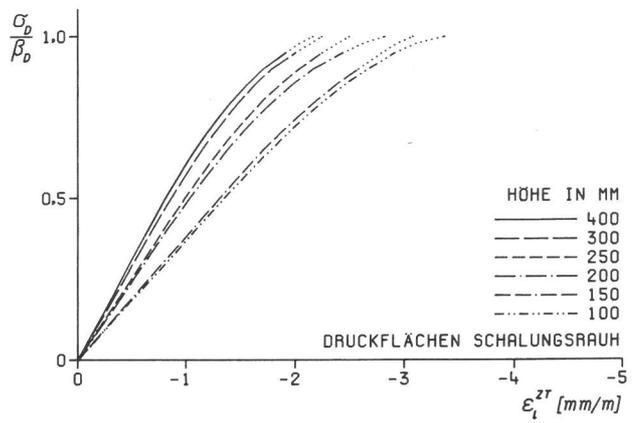
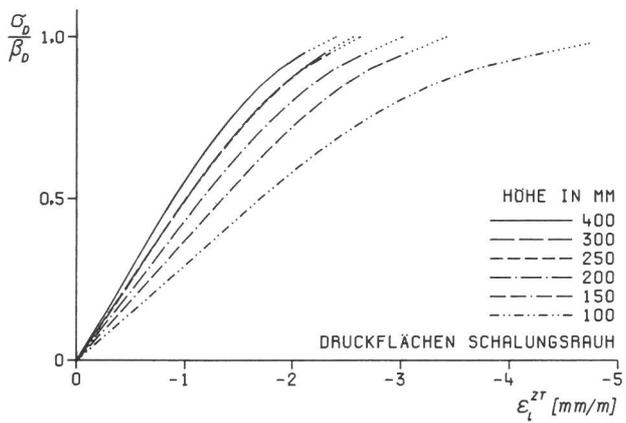
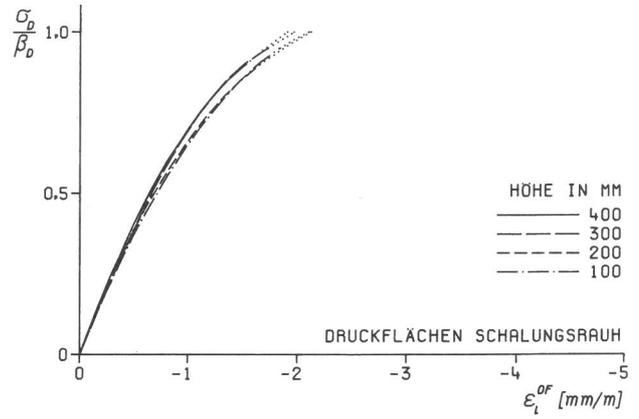
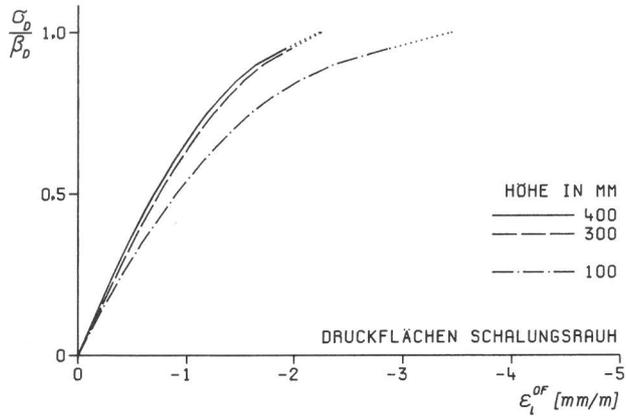


DRUCKPLATTE STARR + BETON B25/16

DRUCKPLATTE SCHLAF + BETON B25/16

Bild 9.10

Längsstauchung ϵ_l und Querdehnung ϵ_q von Probekörpern aus Beton B25 - gemessen an der Oberfläche (OF) und zwischen den Druckplatten (ZT) - bei Kräfteinleitung über starre und schlaffe Druckplatten



DRUCKPLATTE STARR + BETON B35/16

DRUCKPLATTE SCHLAFF + BETON B35/16

Bild 9.11

Längsstauchungen von Probekörpern aus Beton B35 - gemessen an der Oberfläche (OF) und zwischen den Druckplatten (ZT) - bei Kräfteinleitung über starre und schlaife Druckplatten (Druckspannungen σ_d bezogen auf Probekörperfestigkeiten β_d)

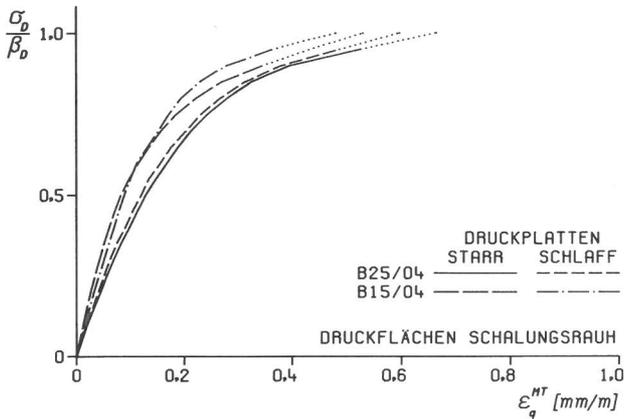
9.3.3 Querdehnungen

Querverformungen wurden sowohl in halber Probekörperhöhe als auch 50 mm oberhalb und nahe der unteren Endfläche gemessen. Charakteristische Ergebnisse sind in den Bildern 9.12 bis 9.15 gegenübergestellt.

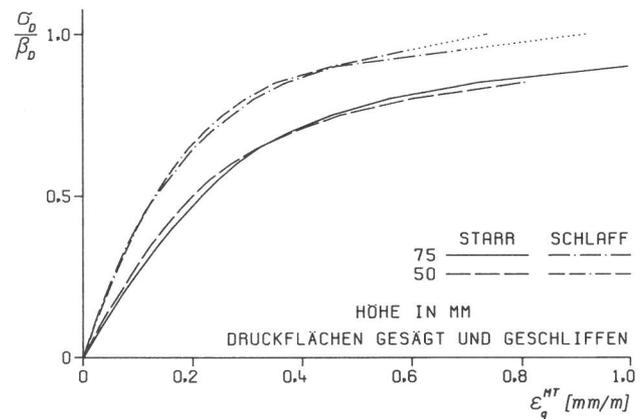
Wie Bild 9.12 an 300 mm hohen Prismen zeigt, ist offenbar in einem Abstand von 50 mm von der unteren Endfläche der Einfluß des Krafteinleitungssystems auf die Querdehnungen bei Mörtel geringer als bei Beton. Nach Bild A27 ist außerdem bei dieser Entfernung von der Endfläche bis zu etwa 50 % der Probekörperfestigkeit kaum ein Einfluß der Probekörperschlankheit - sowohl bei starren wie bei schlaffen Druckplatten - festzustellen. Dies kann sogar für dünne Probekörper gelten (Bild 9.13), sofern diese nur fei-

ne (Mörtel) und keine groben Zuschläge enthalten.

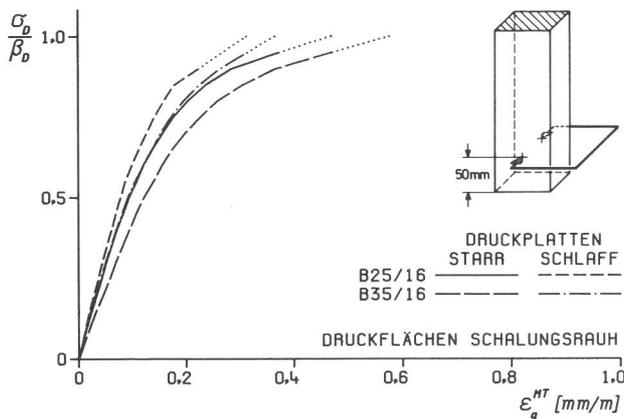
Dieses Ergebnis wird noch einmal durch Messungen in mittlerer Probekörperhöhe bestätigt (Bild 9.14). Die mit schlaffen Druckplatten an Würfeln und Prismen festgestellten Querdehnungsverläufe sind nahezu deckungsgleich. Nur die Kurven der 25 mm dicken Platten weichen von den übrigen Linienzügen ab. Dies ist auch bei starren Druckplatten festzustellen und wiederholt sich bei den Querdehnungen nahe der Probekörperendfläche (Bild 9.15). Es ist nicht auszuschließen, daß diese Abweichungen auf Randstörungen zurückzuführen sind, die beim Heraussägen der Versuchskörper aus den Betonblöcken entstanden sein können. Diese Querdehnungen sind daher nur unter Vorbehalt zu werten. Mit entsprechenden



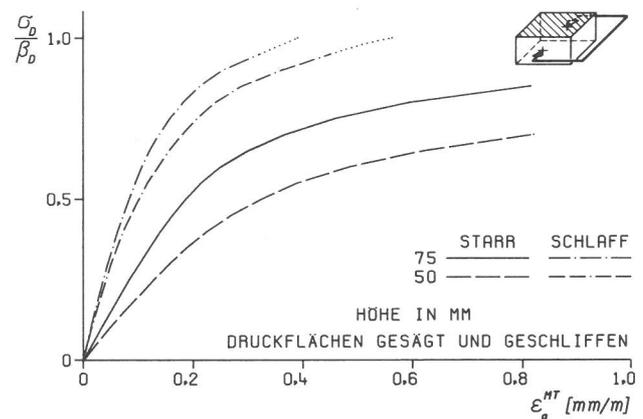
MÖRTEL + PRÖBEKÖRPERHÖHE 300 MM



DRUCKPLATTE + MÖRTEL B25/04



BETON + PRÖBEKÖRPERHÖHE 300 MM



DRUCKPLATTE + BETON B25/16

Bild 9.12

Querdehnung von Prismen, gemessen "mittig (MT)" im Abstand von 50 mm von der unteren Druckfläche

Bild 9.13

Querdehnung dünner Versuchskörper aus B25, gemessen "mittig (MT)" in halber Probekörperhöhe

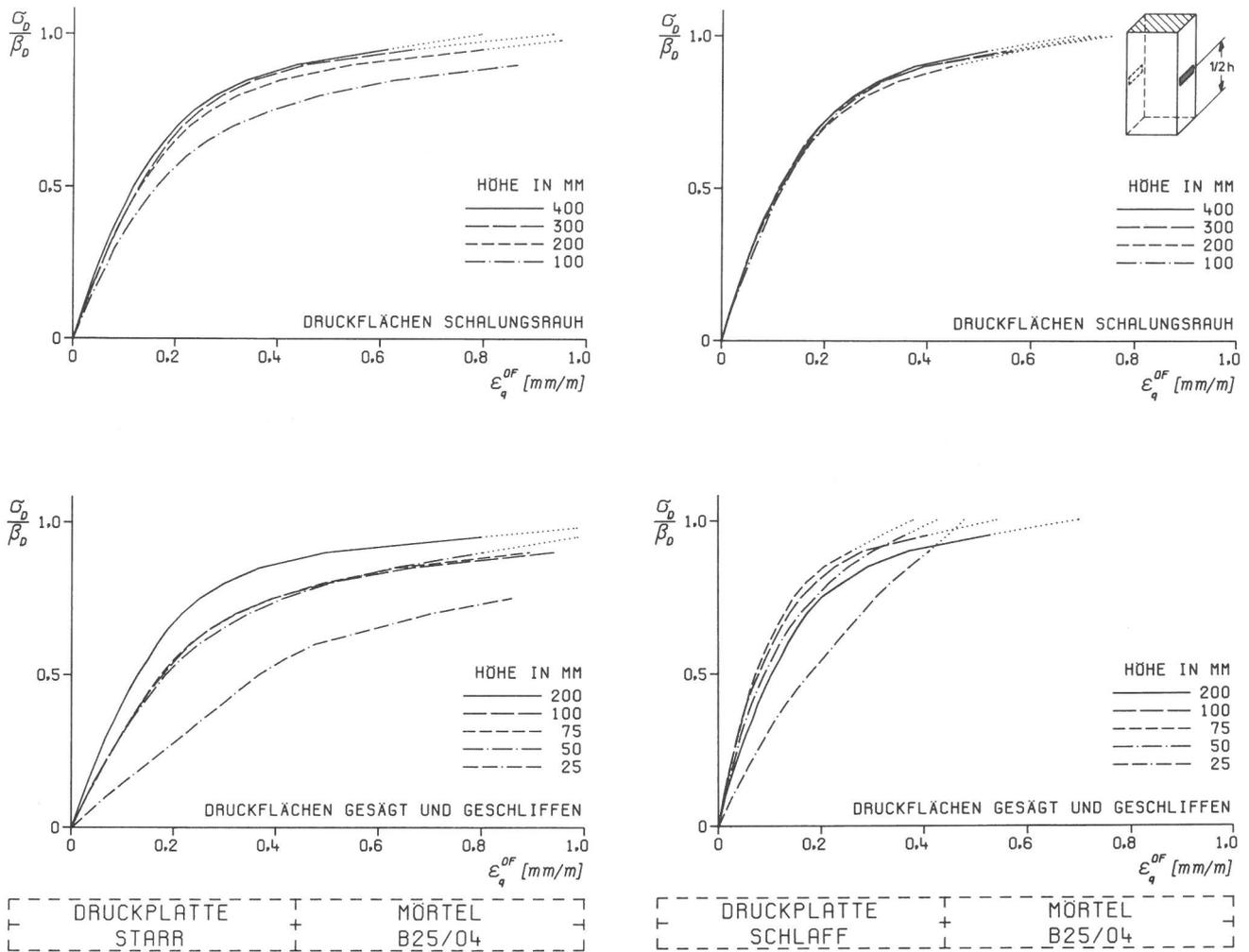


Bild 9.14

Querdehnung von Versuchskörpern aus Mörtel der Festigkeitsklasse B25, gemessen an der Oberfläche (OF) in halber Probekörperhöhe

Einschränkungen sind auch die übrigen Kurvenzüge für die Querdehnung nahe der Endfläche zu sehen, die im übrigen größere Querverformungen bei schlaffen als bei starren Druckplatten erkennen lassen.

9.3.4 Deformation der Druckflächen

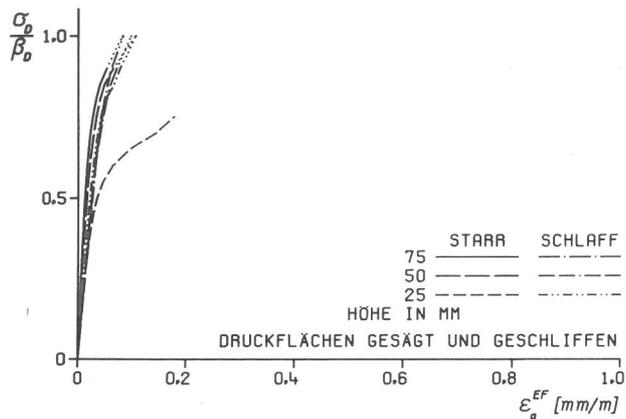
Die schlaffe Druckplatte gestattet durch die Beobachtung der Längsbewegungen ihrer Einzelstempel quantitative Angaben über die Verformung der Probekörperdruckfläche während eines Versuchsablaufes. Die Meßanordnung geht aus Bild 7.11 hervor, über die Auswertung der Meßdaten geben die Bilder 8.19 und 8.20 Auskunft.

Bild 8.19 enthält auch bereits erste Versuchsergebnisse zum spannungsabhängigen Verlauf der Längsbewegungen der Einzelstempel. Diese Linienzüge gelten

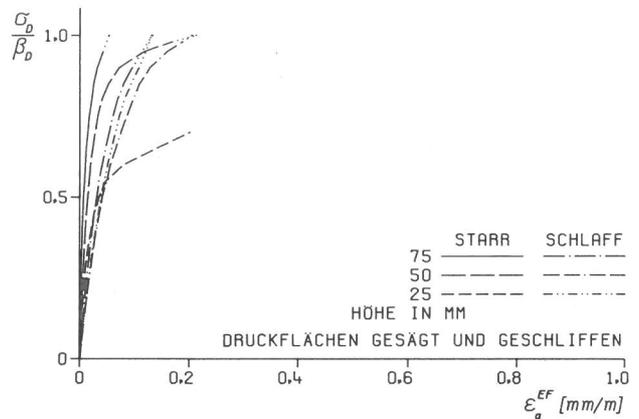
für Probekörper aus Beton; für Mörtel sind weitere Ergebnisse in Bild A28 dargestellt. Beide Bilder zeigen neben diesen nach Bild 8.19 zu Ringlinien zusammengefaßten Verschiebungswegen auch das Volumen V_D als Maß für die Abweichung der deformierten Probekörperdruckfläche von der ursprünglichen Ebenflächigkeit. Weitere Kurvenzüge sind in Bild 9.17 für zwei verschiedene Betonfestigkeitsklassen gegenübergestellt.

Bei allen Linien wurde auf eine Extrapolation des Kurvenverlaufs in den Koordinatenursprung (wie nach Bild 8.15 bei Längsstauchungen und Querdehnungen) verzichtet. Sie beginnen deshalb bei einem der gewählten Grundkraft F_G entsprechenden Spannungswert.

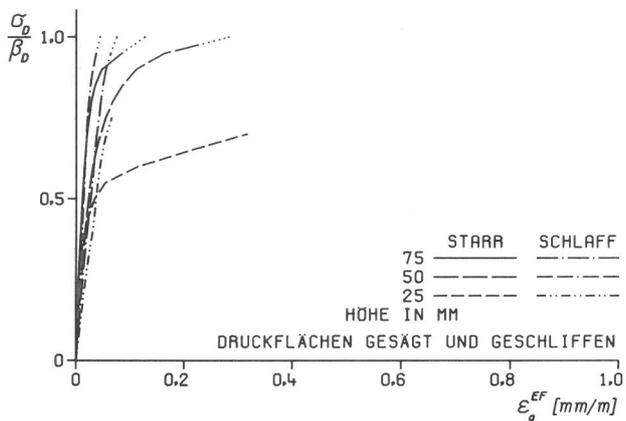
Nach den theoretischen Überlegungen (Abschn. 5.1) zur Auswirkung querdehnungsbehindernder Krafteinleitung auf



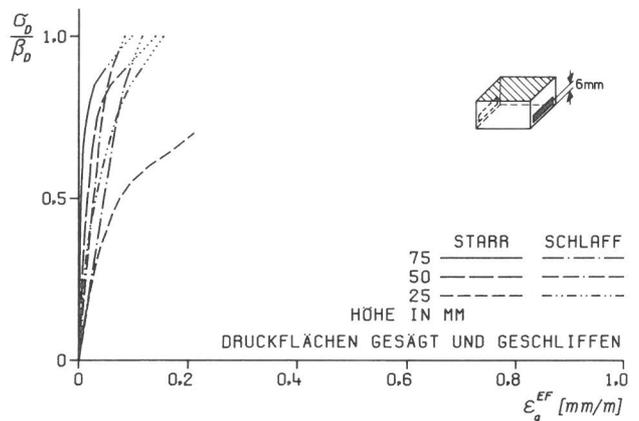
DRUCKPLATTE + MÖRTEL B25/04
STARR SCHLAFF



DRUCKPLATTE + MÖRTEL B15/04
STARR SCHLAFF



DRUCKPLATTE + BETON B25/16
STARR SCHLAFF



DRUCKPLATTE + BETON B35/16
STARR SCHLAFF

Bild 9.15

Querdehnung dünner Probekörper nahe der Endfläche (EF)

die Verformung der Versuchskörper ist zu erwarten, daß sich - wie bereits in Bild 5.1d skizziert - die Endflächen der Probekörper während eines Druckversuchs zunehmend konkav verformen. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse haben dies bestätigt. Bezogen auf den Meßrahmen ergaben sich negative Beträge der Stempel-Längsbewegungen (Vorzeichenregelung wie in Bild 8.19 rechts oben angegeben), also Vertiefungen. Stets zeigte dabei die dem Zentrum nächstgelegene Ringlinie Nr. 1 die dem Betrage nach größten δ -Werte (Bild A28). Positive Werte waren nur bei schalungsrauh Druckflächen festzustellen, und dies auch nur anfänglich bei geringen Druckspannungen. Derartige Abweichungen lassen sich durch das unterschiedliche Materialverhalten der äußersten Feinstmörtelschicht an den Schalungsflächen erklären.

Eine Abhängigkeit der Verformung der Druckfläche von der Probekörperhöhe war nicht eindeutig erkennbar. Die Längsbewegung der Einzelstempel relativ zum Mittenstempel betrug in der Regel bei



Bild 9.16

Probekörperdruckflächen mit eingedrücktem Raster der schlaffen Druckplatte

allen Probekörperhöhen und Festigkeitsklassen bis zu etwa 20 μm . In einigen Fällen wurden bei Beton B35 an der Versagensgrenze Werte von maximal $\delta = 40 \mu\text{m}$ festgestellt. Auch diese Deformation der Probekörperendfläche ist vergleichsweise noch sehr gering. Immerhin darf selbst bei neuen Würfelformen aus Gußeisen oder Stahlblech die Abweichung von der Ebenheit bis zu 80 μm betragen /D5/.

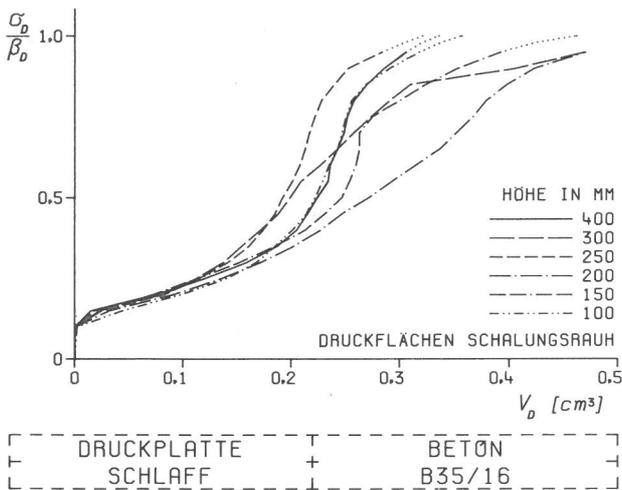
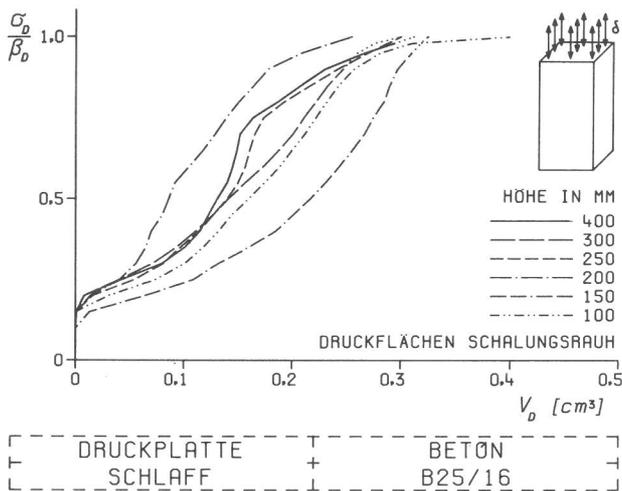


Bild 9.17

Volumen V_D der deformierten Druckfläche von Probekörpern aus Beton bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten (vgl. Bild 8.19)

Dennoch muß u.U. die Deformation der Probekörperdruckflächen bei Verformungsmessungen berücksichtigt werden. So führen konkave Endflächen zu Stauchungswerten an den Seitenflächen der Probekörper, die geringer als der zentrische Meßwert sind. Je gedrungener ein Versuchskörper ist, desto stärker wirkt

sich dieser Unterschied als Anteil an der Gesamtverformung aus. Allerdings wäre zu klären, ob sich die Deformation der Druckflächen tatsächlich über die gesamte Höhe des Probekörpers auswirkt oder vielleicht doch nur von örtlichem Einfluß ist. Für die vorliegende Arbeit ist diese Frage jedoch ohne Bedeutung, da später (Abschn. 10.2.3) für die Angabe von Längsstauchungen nur zentrisch ermittelte Meßwerte, nicht aber Messungen von der Oberfläche der Probekörper verwendet werden.

Neben den δ -Werten der Ringlinien gestattet schließlich auch der Verlauf des eingangs erwähnten Volumens V_D der deformierten Probekörperendflächen einen aufschlußreichen Einblick in die Vorgänge während eines Druckversuchs. Wie die Bilder 9.17 und A28 zeigen, ist der Kurvenverlauf in den meisten Fällen s-förmig. Er läßt sich von der Grundkraft F_G bis zur Versagensgrenze $\text{max}F$ gut mit der gebräuchlichen Weibull-Summenfunktion (s. Abschn. 14 in /G6/) beschreiben in der Fassung

$$y = 1 - (1 - y_0) \cdot e^{-\left(\frac{x - x_0}{a - x_0}\right)^c} \quad (26)$$

mit $x = V_D$ $y = \frac{\sigma_D}{\beta_D} = \frac{F}{\text{max}F}$

und $y_0 = \frac{F_G}{\text{max}F}$

a und c sind hierbei Parameter, die zunächst geschätzt und dann mit der Simplex-Methode optimiert werden. Für die in den Bildern dargestellten Linienzüge mit $x_0 \approx 0$ und Werten bis zu $V_D = 500 \text{ mm}^3$ lagen die Parameter im Mittel etwa bei $a = 240$ und $c = 3,4$.

Sämtliche V_D -Kurven zeigen von der Grundbelastung an zunächst einen mehr oder weniger konstanten Anstieg, der sich bei fortschreitenden Druckspannungen stark vergrößert, um dann nach einem Wendepunkt zur Versagensgrenze hin schließlich wieder zu verflachen. Bis zu diesem Wendepunkt steigen somit die Druckspannungen kontinuierlich an, das Volumen V_D hingegen nimmt ständig weniger zu. Dies kann auf eine Phase der Gefügeverdichtung im Probekörper hindeuten, die in Bild 5.10 des Abschn. 5.4 als Zustand X ausgewiesen wurde. Die Lage des Wendepunktes würde danach den Übergang zur beginnenden Gefügezerstörung, also den unteren Schwellenwert $\text{inf}\sigma_D$, markieren. Offensichtlich liegt dieser

Wendepunkt bei den meisten V_D -Kurven bei knapp 2/3 der Probekörperfestigkeit.

9.3.5 Bauchung von Seitenflächen

Nach den Erläuterungen in Abschn. 8.5.4 läßt sich beim Druckversuch die seitliche Bauchung der Probekörper mit Bauchungsprofilen (Bild 9.18) beschreiben und außerdem durch Angabe derjenigen Volumendifferenz V_S , die sich zwischen der eben bleibenden Meßträgerplatte und der bauchenden Seitenfläche des Probekörpers ergibt (Bild 9.19).

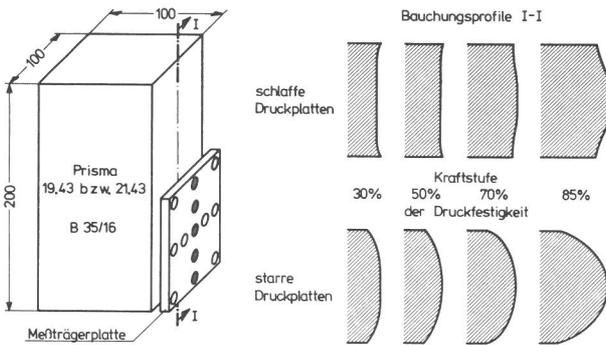
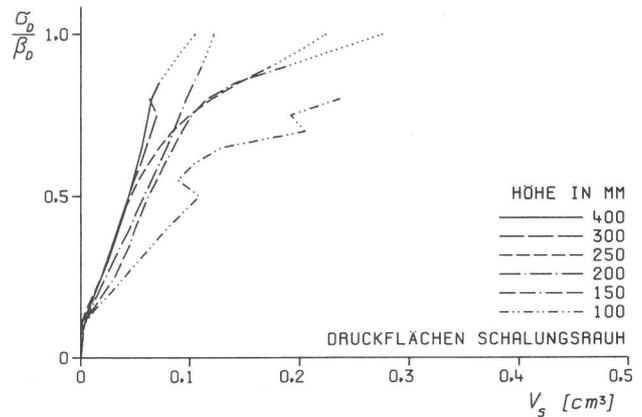


Bild 9.18

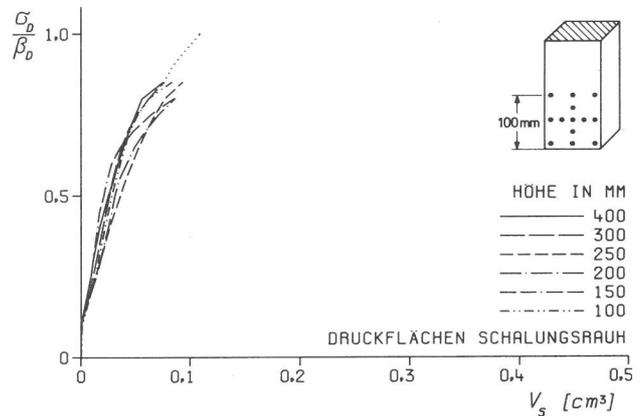
Unterschiedliche Bauchungsprofile bei Prüfung mit starren im Vergleich zu schlaffen Druckplatten

Beide Darstellungen zeigen deutlich die unterschiedliche Ausbildung der Querverformungen bei Prüfung mit starren im Vergleich zu schlaffen Druckplatten. Der spannungsabhängige Verlauf des Volumens V_S ist bei schlaffen Druckplatten wesentlich weniger von der Probekörperhöhe beeinflusst als bei herkömmlicher Prüfmart. Das Bauchungsvolumen ist außerdem kleiner, aber keineswegs Null.

Das gleiche ergibt sich aus den Bauchungsprofilen. In Bild 9.18 sind hierzu zwei Prismen gegenübergestellt. Die Querdehnungsbehinderung an den Endflächen ist danach bei schlaffen Druckplatten erheblich geringer als beim starren Krafteinleitungssystem. Außerdem scheinen sich bei schlaffer Prüfung merkliche Unterschiede zwischen der Querdehnung in mittlerer Probekörperhöhe und der Endfläche erst bei höheren Druckspannungen, also bei beginnender Gefügezerstörung, zu zeigen. Dies wäre dann eher als eine zunächst in mittlerer Probekörperhöhe auftretende Volumenvergrößerung zu sehen als eine von den Endflächen ausgehende Behinderung der Querdehnung. Querdehnungsbehinderungen sind vielmehr auf die durch die Einzelstempel gegeb-



DRUCKPLATTE STARR + BETON B35/16



DRUCKPLATTE SCHLAFF + BETON B35/16

Bild 9.19

Bauchung eines 100 mm hohen Teils einer Seitenfläche von prismatischen Probekörpern bei Krafteinleitung über starre (oben) im Vergleich zu schlaffen Druckplatten

nen Teilflächen beschränkt. Dementsprechend geringer ist deren Wirkung. Dies geht auch deutlich aus Bild 9.20 hervor. Die dort gezeigten Reststücke aus Probekörpern sind zwar klein, entsprechen aber sonst völlig den bekannten Pyramiden bei Prüfungen mit starren Druckplatten (vgl. u.a. Bild 9.4). Ähnliche Reststücke stellte Graf bei Teilflächenbelastungen fest (Bild 18 in /G10/), die wiederum den Bruchfiguren bei Streifenlasten entsprechen /H5/. Riedel /R5/ hat diese Bruchform (bei Zylindern) als "Rutschkegel" bezeichnet, die nach seiner Ansicht selbst keine Verformungen erleiden, dafür aber die benachbarten Stoffteilchen nach außen drängen und so Ausbauchungen und weiterhin die Tonnenform herbeiführen.

Diese Vorstellung deckt sich mit der aus Bild 9.18 ersichtlichen, bei schlaffen Druckplatten schnell abklingenden Bauchung (viele, aber kurze "Rutschpyramiden") und der wesentlich stärker ausgeprägten Tonnenform bei starren Druckplatten, die durch nur eine einzige, dafür aber wesentlich größere "Rutschpyramide" bedingt ist.

9.4 Schallemissionen

Die vorhandenen Meßgeräte (Bild 7.14) gestatteten die Aufnahme von Schallimpulsen in einem herausgefilterten Frequenzband (hier Terzfilter mit 31,5 kHz Mittenfrequenz), die nach Gleichung (24) ausgewertet wurden. Die Ergebnisse sind auszugsweise in den Bildern 9.21 und 9.22 sowie A29 in Form von Summenlinien dargestellt.

Während sich zwischen den vier Versuchsbetonen keine nennenswerten Unterschiede zeigten (Bild A29), traten solche beim Vergleich zwischen starren und schlaffen Druckplatten sehr deutlich zutage (Bild 9.22). Bei schlaffer Kraft-

einleitung spielte dabei die Probekörperhöhe nur eine untergeordnete Rolle. Die Summenlinien stiegen in etwa kontinuierlich an, mit einer verstärkten

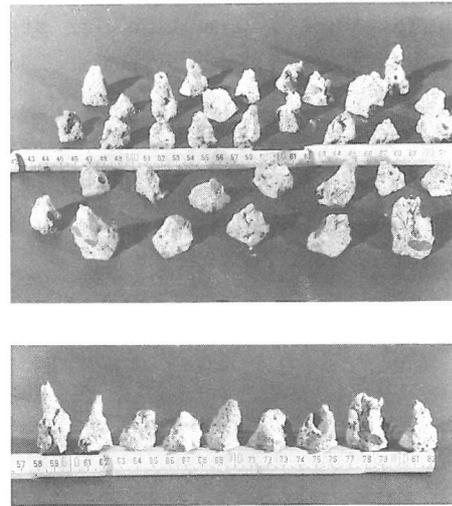


Bild 9.20

Von den Stempeln der schlaffen Druckplatte geprägte pyramidenförmige Reststücke

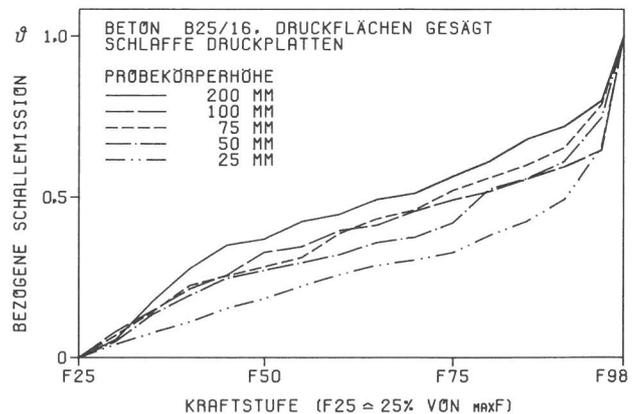
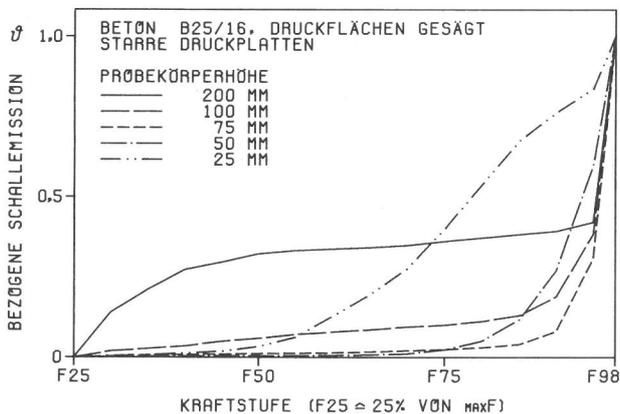
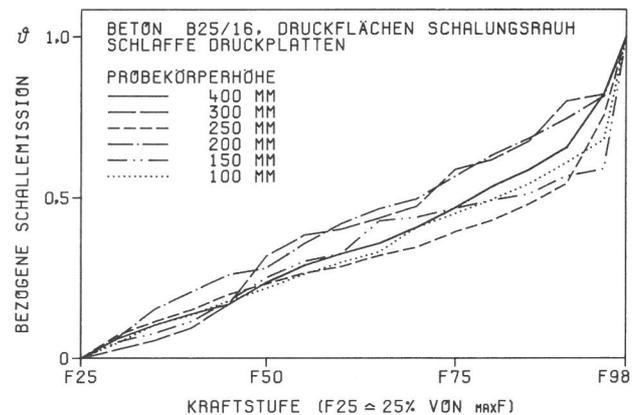
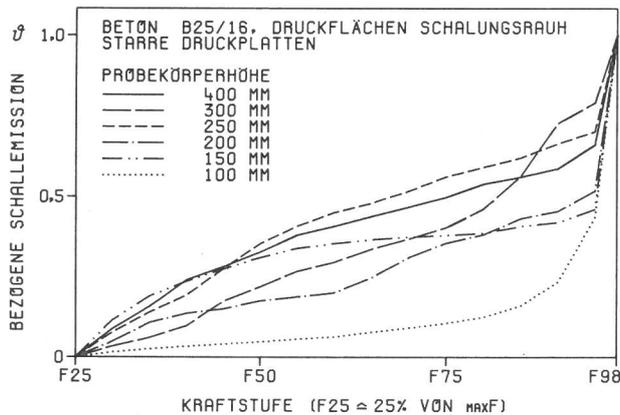


Bild 9.21

Schallemissionen - dargestellt als Summenlinien von Schallimpulsen - von Probekörpern aus B25 bei Kräfteinleitung über starre im Vergleich zu schlaffen Druckplatten

Zunahme kurz vor der Versagensgrenze. Bei starren Druckplatten wiesen hingegen nur schlanke Probekörper einen derartigen Kurvenverlauf auf. Je gedrungener ein Probekörper war, desto flacher verlief anfänglich die Summenkurve und desto ausgeprägter war dann der steile Anstieg gegen Versuchsende.

Probekörperhöhe $h=25\text{ mm}$

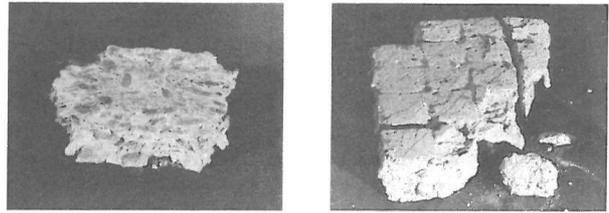


Bild 9.23

Typische Bruchbilder dünner Probekörper bei Prüfung mit starren (links) und schlaffen Druckplatten

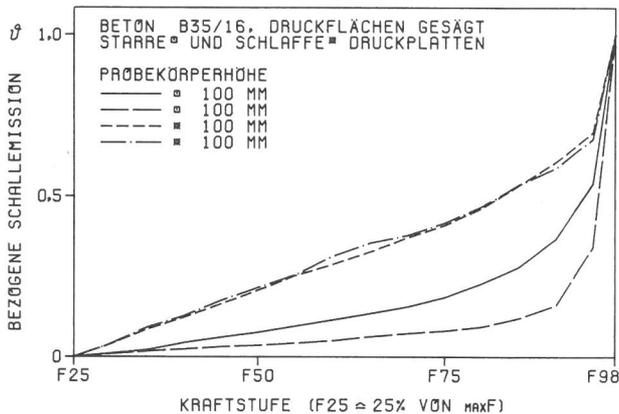
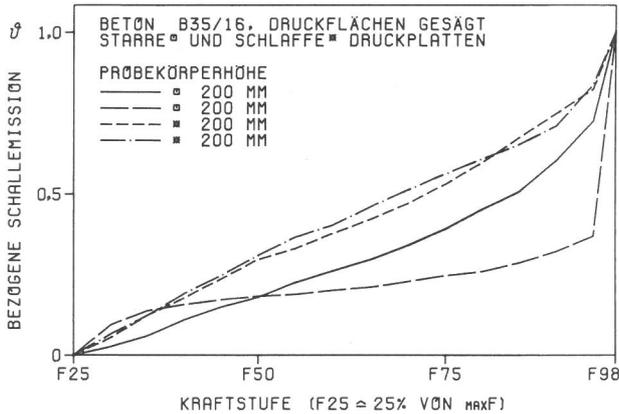


Bild 9.22

Ganglinien der Schallemissionen bei Prüfung mit starren und schlaffen Druckplatten

Auch die Ganglinien der 25 bzw. 50 mm dünnen Platten in Bild 9.21 links unten folgen an sich dieser Regel. Die Kurvenwerte sind hier jedoch auf einen überhöhten Festigkeitswert - der eher als Quetschwiderstand anzusehen ist - bezogen. Bild 9.23 links zeigt hierzu eine 25 mm dünne Platte nach der Prüfung mit starren Druckplatten. Der Querschnitt war ursprünglich quadratisch. Wegen der radial nach außen strebenden Teilchen blieb nur ein kreisförmiges Kernstück übrig. Die vom Gefüge bestimmte Versagensgrenze des Probekörpers lag somit bei einer wesentlich geringeren Kraftstufe, als durch die Höchstkraft ausgewiesen wurde. Nach dieser Versagens-

grenze registrierte Schallimpulse sind demnach lediglich Umformgeräusche, welche die Summenlinie der Schallemissionen früher ansteigen lassen, einen Vergleich mit den übrigen Ganglinien aber ausschließen.

10 Diskussion grundlegender Untersuchungsergebnisse

Wichtigste Zielgröße der vorliegenden Arbeit ist die eingangs als "wahre" Festigkeit erläuterte einaxiale Betondruckfestigkeit β_e . Auf diesen Wert beziehen sich alle übrigen Versuchsergebnisse. Dabei lassen sich die Formfaktoren zur Berücksichtigung unterschiedlicher Probekörperschlankheiten allein aus Festigkeitswerten bestimmen. Die kennzeichnenden Schwellen im Verhalten von druckbeanspruchtem Beton können dagegen nur mit ergänzenden Verformungsmessungen ermittelt werden. Für die vorliegende Aufgabenstellung sind Probekörperverformungen daher lediglich Hilfsgrößen zur Bestimmung ausgezeichneter Druckspannungswerte, die für die Rissefreiheit, Dauerfestigkeit und insgesamt für das Widerstandsvermögen von Beton bedeutsam sind. Sie werden nachfolgend vorwiegend unter diesem Gesichtspunkt diskutiert. Wegen des erheblichen Umfangs des vorliegenden Datenmaterials müssen dagegen weitere, an sich naheliegende Auswertungen der Verformungsergebnisse - wie Elastizitätsmodul, Querdehnzahl, Änderung der Querschnittsform usw. - späteren Bearbeitungen vorbehalten bleiben.

10.1 Festigkeitsergebnisse

10.1.1 Bruchbild und Probekörperfestigkeit

Wenn auch nicht die absolute, so doch die relative Druckfestigkeit kommt be-

reits im Bruchbild eines Probekörpers zum Ausdruck. So sind die Prismen in Bild 10.1 offensichtlich kaum durch die unterschiedliche Art der Versuchstechnik beeinflusst. Die ermittelten Probekörperfestigkeiten werden sich daher nur wenig von dem einaxialen Festigkeitswert β_e unterscheiden. Dem stehen die Bruchbilder in Bild 10.2 gegenüber, die Spuren zentripetal wirkender Reibungskräfte in der Berührungsfläche mit der starren Druckplatte erkennen lassen. Dies führt zu Quetschungen und immer deutlicher zu kreisförmigen Bruchquerschnitten, je dünner der Probekörper ist. Die Festigkeitsergebnisse sind nach dem in Abschn. 5.1 erläuterten Zusammenhang zwischen Querdehnungsbehinderung und Probekörperfestigkeit entsprechend überhöht.

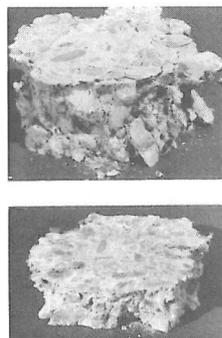


Bild 10.1
Ähnliche Bruchbilder von 400 mm hohen Prismen bei Prüfung mit starren (links) und schlaffen Druckplatten

Die einander sehr ähnlichen Bruchbilder bei Prüfung von Würfeln und Platten mit der schlaffen Druckplatte (Bilder 10.3 und 10.4) lassen demzufolge keine großen Unterschiede in den ermittelten Probekörperfestigkeiten erwarten. Die Probekörper sind überwiegend säulenförmig zerbrochen. Dabei tritt eine Besonderheit der schlaffen Druckplatte hervor,



Mörtel B25/04
h=100,75,50 und 25 mm



Beton B25/16
h=50 mm und h=25 mm

Bild 10.2

Am Bruchbild erkennbare Wirkung von Reibungskräften in der Berührungsfläche mit der starren Druckplatte

wonach der Bruch meist nur in Teilbereichen des Querschnitts erfolgt, der restliche Teil dem ersten Anschein nach aber unbeschädigt bleibt. Dies führt im Extremfall sogar zu einem Bruchbild, wo lediglich eine Ecke des Probekörpers unter einem Einzelstempel herausgebroschen ist (Bild 10.5).

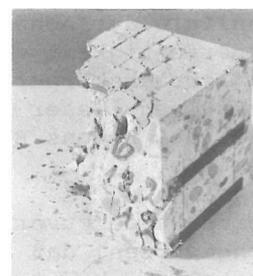


Bild 10.3
25 mm dicke Betonplatte nach Prüfung mit schlaffen Druckplatten

Trotzdem war in diesem Fall die Druckfestigkeit der übrigen 200mm-Prismen der betreffenden Serie gleich groß; deren Bruch zeigte keine Besonderheiten. Ein unvollkommenes Bruchbild beruht somit nicht unbedingt auf einer zufälligen Fehlstelle im Probekörper. Es wird auch durch die Konstruktion der schlaffen Druckplatte mit ihrer Abstützung auf einem Elastomerkissen beeinflusst. Die Druckbeanspruchung kann nur so lange erfolgen, wie jeder Teil des gesamten Querschnitts des Probekörpers mitträgt. Ist schließlich an einer Stelle die Grenze des Widerstandsvermögens erreicht, so ist der Versuch unmittelbar zu diesem Zeitpunkt beendet. Eine Umlagerung der Kräfte auf weiter entfernte Stempel ist nicht möglich. Der betroffene Einzelstempel würde vielmehr - wegen der hydraulischen Lagerung - bei nachlassendem oder fehlendem Widerstand herauschießen. Bei schlaffen Druckplatten gleicht das Bruchbild des Probekörpers daher einer Momentaufnahme; die übrigen im Betonkörper bereits vorhandenen Gefügerisse haben sich manchmal nur unvollständig zu durchgehenden Rissen vereint, die dann zu einem Zerfall in einzelne Bruchstücke geführt hätten.



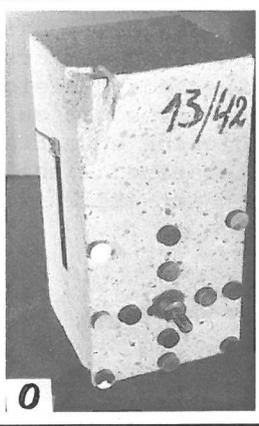
B15/04



B35/16

Bild 10.4

100mm-Würfel nach Prüfung mit schlaffen Druckplatten

Probekörper	Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]	
13,41	30,6	
13,42	30,1	
13,43	30,9	
$\bar{\beta}_D$	30,5	
s	0,40	

Mörtel B25/04, Höhe h = 200 mm
Krafteinleitung über schlaife Druckplatten

Bild 10.5

Übereinstimmende Probekörperfestigkeiten trotz unvollständigen Bruchbildes eines von 3 Prismen nach Prüfung mit schlaffen Druckplatten

Die Größe der ermittelten Höchstkraft $\max F$ wird hierdurch jedoch nicht, allenfalls nur unwesentlich, beeinflusst. Zum Ausweiten des im Probekörper bereits vorhandenen Rissebildes wären nicht etwa größere, sondern eher geringere bis gleich große Prüfkräfte erforderlich. Dies entspricht dem bekannten Vorgang bei der Festigkeitsprüfung mit starren Druckplatten, wo die Prüfkraft nach erreichtem Höchstwert ein wenig abfällt, sodann einige Augenblicke verharret, um erst dann abrupt abzufallen. In dieser Phase nach der eigentlichen Versagensgrenze erweitern sich die Rissebildungen. Die abschließende Zerstörung des Probekörpers erfolgt also in der Regel bei einer Druckbeanspruchung, die unterhalb der ermittelten Höchstkraft liegt.

10.1.2 Einaxiale Betondruckfestigkeit

Nach den Überlegungen im Abschn. 5.2 (Bilder 5.5 und 5.6) zeigt sich der einaxiale Festigkeitswert als Stufe in der Kennlinie der Abhängigkeit der Probekörperfestigkeit von der Schlankheit der Versuchskörper. Die Rechengänge zur Ermittlung dieser Kennlinie sind am Beispiel des Betons B25/16 in Bild A30 angegeben.

Hierzu wurde zuvor (Bild A22) bereits nachgewiesen, daß nach Korrektur der herstellungsbedingten Einflüsse (s. Abschn. 8.2.3 und 9.2.2) zwischen den verschiedenen Serien keine gesicherten Unterschiede bestehen, die in den Versuchen ermittelten und dann korri-

gierten Probekörperfestigkeiten β_D also zusammengefaßt werden dürfen. Außerdem war der Versuchsplan derart angelegt, daß auch ein möglicher Einfluß der Beschaffenheit der Probekörperdruckflächen berücksichtigt werden konnte. In den Versuchsserien befanden sich hierzu sowohl 100mm-Würfel mit schalungsrauhem als auch mit gesägt/geschliffenen Druckflächen.

Unter Bezug auf diese Würfelfestigkeiten β_{W100} wurden je nach Beschaffenheit der Druckfläche eines Versuchskörpers Verhältniswerte

$$f_w = \frac{\beta_D}{\beta_{W100}} \quad (27)$$

errechnet und in einem Diagramm aufgetragen (Bild 10.6). Dem eingezeichneten

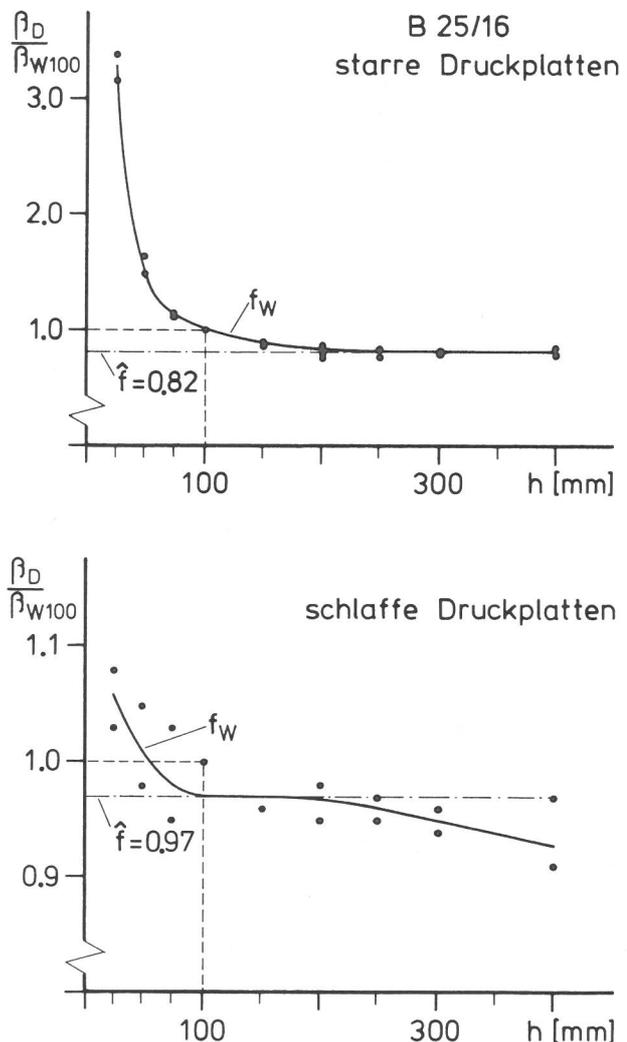


Bild 10.6

Grafische Ermittlung der Stufenwerte \hat{f} des B25/16 aus den auf die Würfelfestigkeit β_{W100} bezogenen Probekörperfestigkeiten β_D der Versuchskörper mit unterschiedlicher Höhe h (im unteren Bildteil 10fach vergrößerter Ordinatenmaßstab)

Kurvenverlauf konnte dann ein Stufenwert \hat{f} entnommen werden, der die Beziehung zwischen der im Versuch ermittelten Würfelfestigkeit und der gesuchten einaxialen Betondruckfestigkeit angibt:

$$\beta_e = \hat{f} \cdot \beta_{W100} \quad (28)$$

Bei einem Wert von $\hat{f} = 1,0$ würde die ermittelte Würfelfestigkeit mit der einaxialen Betondruckfestigkeit übereinstimmen. Wie aus Bild 10.6 ersichtlich, ergab sich im vorliegenden Fall bei schlaffen Druckplatten mit $\hat{f} = 0,97$ nur eine geringfügige Abweichung. Die mit diesem Krafteinleitungssystem ermittelten Würfelfestigkeitswerte sind also bei dem geprüften Beton B25/16 praktisch der einaxialen Betondruckfestigkeit gleichzusetzen. Demgegenüber betrug der einaxiale Festigkeitswert nur 80 % ($\hat{f} = 0,82$) der mit starren Druckplatten erzielten Würfelfestigkeit. Dies entspricht früheren Untersuchungsergebnissen /S12, S13/.

Mit dem Stufenwert \hat{f} nach Bild 10.6 lassen sich nunmehr aus

$$f = \frac{f_W}{\hat{f}} \quad (29)$$

Formfaktoren f berechnen, die - wie sich auch aus den Gleichungen (27) bis (29) ergibt - das Verhältnis der jeweiligen Probekörperfestigkeit β_D zur einaxialen Betondruckfestigkeit β_e angeben:

$$f = \frac{\beta_D}{\beta_e} \quad (30)$$

keit irgend eines anderen Probekörpers bezogen sind.

Anhand der Formfaktoren f läßt sich nun auch die Größe der einaxialen Druckfestigkeit β_e bestimmen. Nach Gleichung (30) ergibt sich zunächst mit

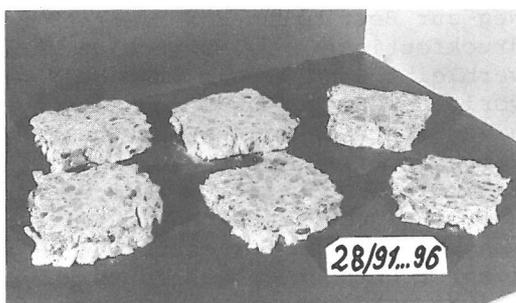
$$\hat{\beta}_e = \frac{\bar{\beta}_D}{f} \quad (31)$$

eine Anzahl von Schätzwerten $\hat{\beta}_e$. Hierbei ist $\bar{\beta}_D$ die aus den Einzelergebnissen einer oder mehrerer Versuchsserien gemittelte Probekörperfestigkeit. Als bester Wert zur Angabe von β_e bietet sich der Mittelwert der $\hat{\beta}_e$ -Werte an (Bild A30). Den Überlegungen im Abschn. 5.2 zufolge müßte dieser Wert unabhängig von den Versuchsbedingungen sein.

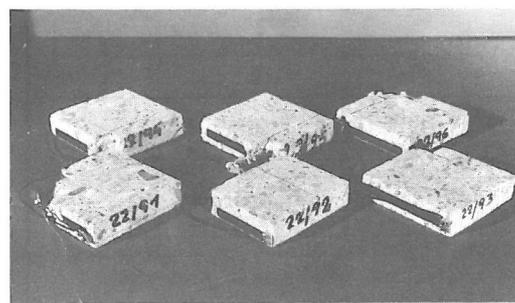
Tatsächlich ergeben sich für jeden der vier Versuchsbetone sowohl aus den Untersuchungen mit der schlaffen Druckplatte als auch aus den hiervon völlig unabhängig durchgeführten Prüfungen mit starren Druckplatten nahezu dieselben β_e -Werte (Bild A31, Spalte "insgesamt"). Dies wird als Beweis für die Richtigkeit der hier vertretenen Auffassung angesehen, wonach der einaxiale Festigkeitswert β_e grundsätzlich mit jeder Versuchstechnik zu ermitteln ist.

Als Maß für die Streuung der Schätzwerte für β_e sind in Bild A31 neben den Mittelwerten auch die zugehörigen Standardabweichungen angegeben. Sie sind erfreulich gering, in der Regel insbesondere dann, wenn die Ausgangswerte zu

Probekörperhöhe $h = 25 \text{ mm}$



Beton B 25/16, starre Druckplatten
 $\beta_D = 112,4 \text{ N/mm}^2$ (3,22 fach β_{W100})



Beton B 35/16, schlafe Druckplatten
 $\beta_D = 37,0 \text{ N/mm}^2$ (1,06 fach β_{W100})

Bild 10.7

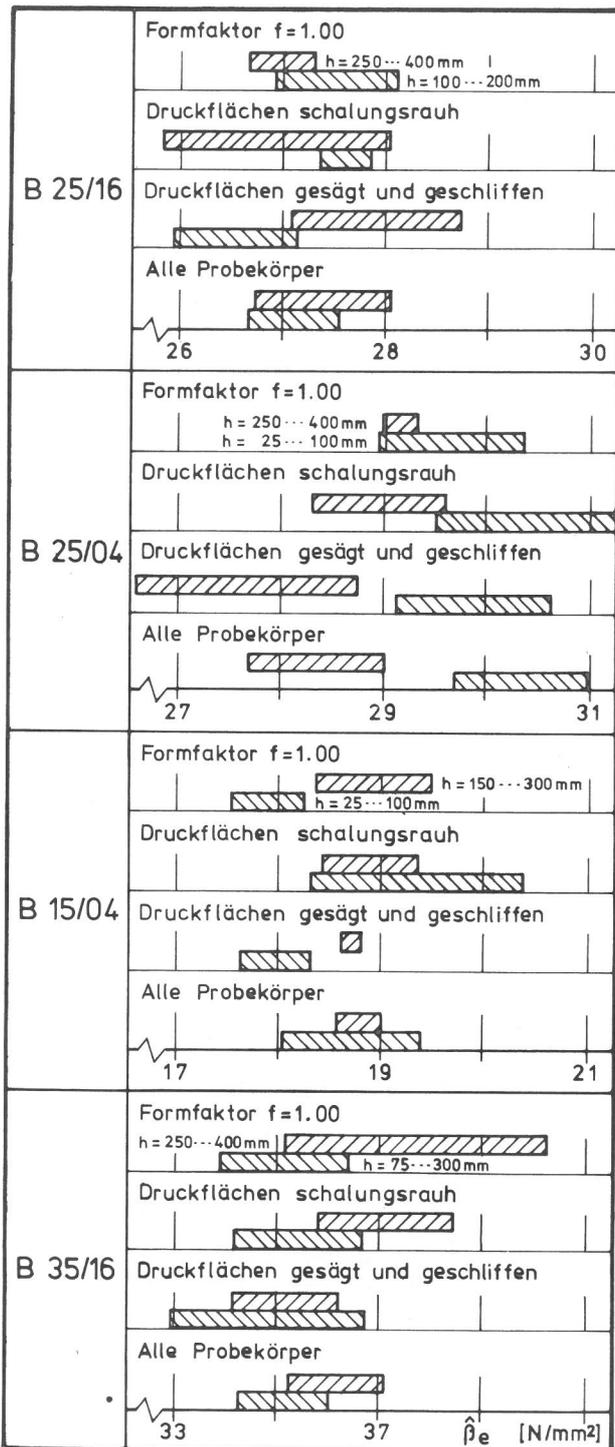
Dünne Probekörper zeigen bei Prüfung mit schlaffen im Gegensatz zu starren Druckplatten nur wenig überhöhte Festigkeitsergebnisse

Dabei ist es ohne Belang, ob zuvor die β_D -Werte - wie hier mit Gleichung (27), vgl. auch Bild 10.7 - auf die Würfelfestigkeit oder aber auf die Druckfestig-

Untergruppen zusammengefaßt werden. So bilden z.B. alle diejenigen Probekörper eine Untergruppe, die schalungsraue Druckflächen aufweisen oder aber deren

Formfaktor $f = 1,0$ ist. Wegen der unterschiedlichen Anzahl an Daten in diesen Untergruppen werden die Schätzwerte $\hat{\beta}_e$ jedoch erst durch Angabe des Vertrauensbereiches der jeweiligen Mittel-

werte vergleichbar. Diese sind in Form von Balken in Bild 10.8 dargestellt. Man erkennt, daß mit den hier angegebenen vier Bestimmungsarten (Unterteilung der Untersuchungsergebnisse in jeweils vier Untergruppen) und bei zugrundegelegter Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % die gesuchte einaxiale Betondruckfestigkeit β_e innerhalb einer Schwankungsbreite von höchstens $\pm 5\%$ um den ermittelten Schätzwert $\hat{\beta}_e$ liegt. Dabei bietet im vorliegenden Fall die Gliederung der Daten in Untergruppen gegenüber der gemeinsamen Betrachtung aller Probekörper keine Vorteile, da je Untergruppe meist zu wenig Werte zur Verfügung stehen.



starre Druckplatten
 schlaffe Druckplatten

Bild 10.8

Vertrauensbereiche (Aussagewahrscheinlichkeit 95%) der Schätzwerte $\hat{\beta}_e$ für die einaxiale Betondruckfestigkeit β_e bei mehrfacher Untergliederung der Versuchsergebnisse

10.1.3 Formfaktoren

Als abschließendes Ergebnis dieser Auswertungen sind in Bild 10.9 die ermittelten Formfaktoren zusammengestellt. Erwartungsgemäß zeigen sich danach besonders bei gedrungenen bis dünnen Probekörpern erhebliche Unterschiede zwischen schlaffen und starren Druckplatten.

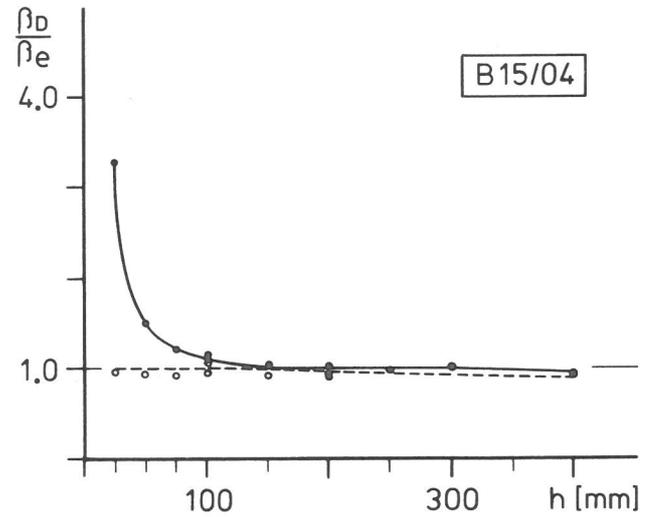
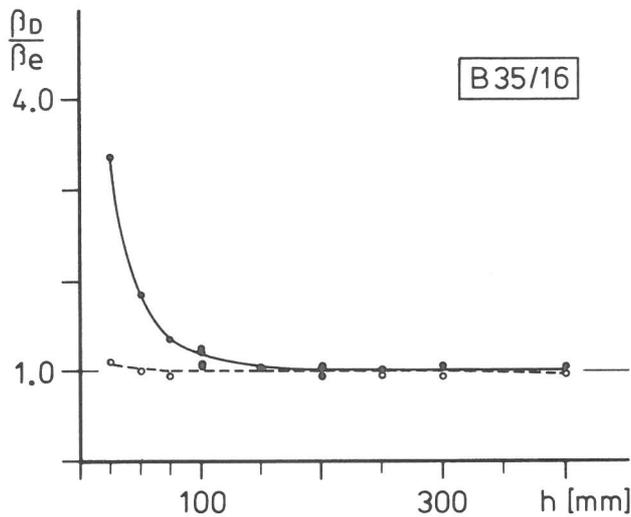
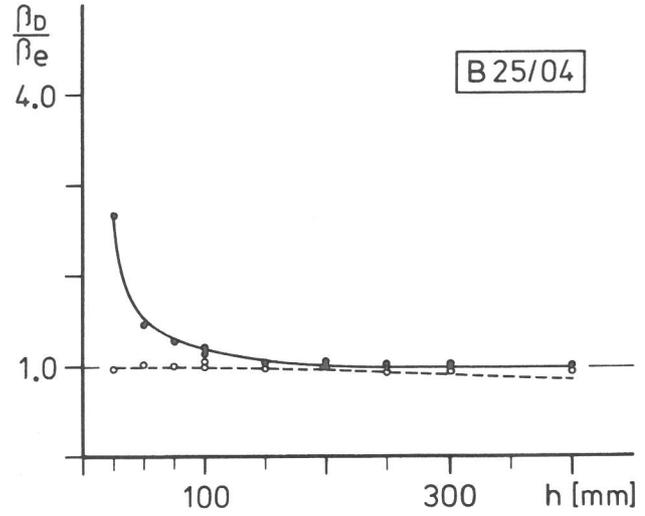
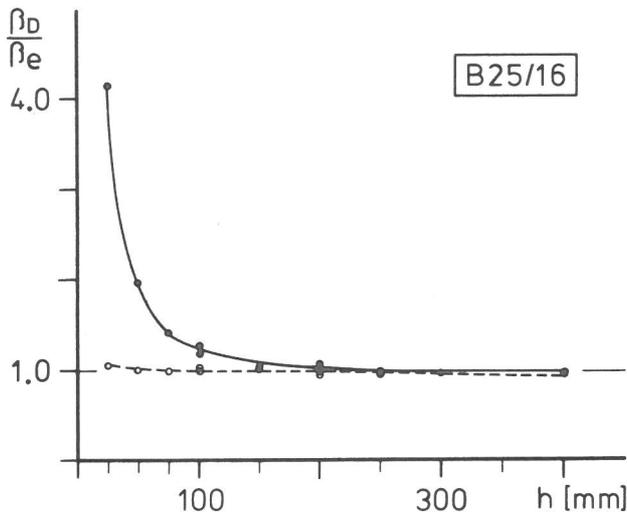
Bei starren Druckplatten ist der Einfluß der Probekörperschlankheit auf die Festigkeitsergebnisse etwa bei $h/b = 2,5$ bis $h/b = 3,0$ am geringsten. Dies stimmt mit den Angaben von S a n g h a und D h i r überein /S3/. Für die schlaffe Druckplatte hingegen ist eine Schlankheit der Probekörper von etwa $h/b = 1,0$ besonders günstig.

10.2 Längsstauchungen

Wenn im vorangegangenen Abschnitt ein Weg zur Bestimmung der "wahren" Betondruckfestigkeit β_e aufgezeigt wurde, so verbleibt nunmehr die Aufgabe, aus den vorliegenden Versuchsergebnissen die unverfälschten Längsstauchungen ϵ_l der Probekörper zu ermitteln. Diese bilden dann die Grundlage für alle weiteren Überlegungen, insbesondere zur Verformungsarbeit und zur Feststellung der kennzeichnenden Schwellen im Ablauf der Gefügeschädigungen beim Betondruckversuch.

10.2.1 Einfluß von Probekörperschlankheit und Krafteinleitung

Nach Bild 4.8 und dem in diesem Zusammenhang genannten Prinzip von S a i n t - V e n a n t werden in mittlerer Höhe ausreichend schlanker Probekörper Verformungen gemessen, die von möglichen Zwängungen an den Endflächen unbeeinflusst sind. 400 mm hohe Prismen müßten



$\beta_D = f \times \beta_e$ ++)			Formfaktor f								
Krafteinleitungssystem	Probekörper +)	Höhe [mm]	25	50	75	100	150	200	250	300	400
		Schlankheit h/b	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00
Starre Druckplatten	Beton	B25/16	4.02	1.95	1.38	1.22	1.10	1.02	1.00	1.00	1.00
		B35/16	3.40	1.91	1.38	1.24	1.08	1.01	1.00	1.00	1.00
	Mörtel	B15/04	3.28	1.52	1.24	1.11	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97
		B25/04	2.82	1.54	1.31	1.20	1.08	1.02	1.00	1.00	1.00
Schlaffe Druckplatten	Beton	B25/16	1.09	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96
		B35/16	1.09	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96
	Mörtel	B15/04	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89
		B25/04	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.87

+) Prismatische Probekörper mit quadratischem Querschnitt von 100 mm Kantenlänge
 ++) β_D = Probekörperdruckfestigkeit, β_e = einaxiale Druckfestigkeit

Bild 10.9

Verhältniszerte, bezeichnet als Formfaktoren f, der an Probekörpern unterschiedlicher Schlankheit ermittelten Druckfestigkeit β_D zur einaxialen Betondruckfestigkeit β_e bei Krafteinleitung über starre und schlaffe Druckplatten

danach bei starren und bei schlaffen Druckplatten etwa gleich große Stauchungswerte zeigen. In Bild A32 findet sich dies bestätigt. Beim schlaffen Krafteinleitungssystem stimmen die Spannungs-Stauchungslinien der 200 mm hohen Probekörper auch noch gut mit denen von 400mm-Prismen überein (Bild 10.10).

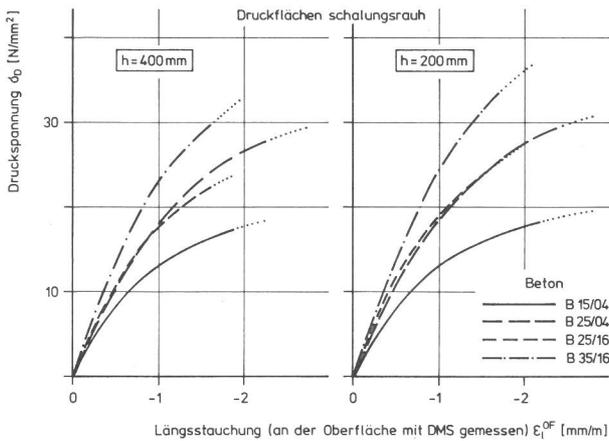


Bild 10.10

Längsstauchung von Prismen der 4 Versuchsbetone, ermittelt in mittlerer Höhe bei Krafteinleitung über schlaffe Druckplatten

Insgesamt gesehen ist aber für alle vier Versuchsbetone festzustellen, daß die gemessenen Stauchungsbeträge desto stärker voneinander abweichen, je geringer die Probekörperschlankheit ist. Dies gilt ebenso für den Vergleich innerhalb eines Druckplattensystems wie für den Vergleich zwischen den beiden hier untersuchten Arten der Krafteinleitung. Die Bilder A32 und A33 können dieses Ergebnis allerdings nur unvollständig belegen. Eine Vielzahl von Spannungs-Stauchungslinien müßte stattdessen jeweils paarweise gegenübergestellt werden.

Das Ergebnis kann jedoch vereinfacht durch die Streubreite der betreffenden Spannungs-Stauchungslinien begründet und veranschaulicht werden. Bild 10.11 zeigt hierzu am Beispiel des Betons B25/16 die Arbeitslinien von zwei Probekörpergruppen, bei denen jeweils der größte Versuchskörper gegenüber dem kleinsten eine viermal so große Höhe aufweist. Bei schlanken bis würfelförmigen Probekörpern und schlaffen Druckplatten liegen die Stauchungswerte enger zusammen als bei starren Druckplatten. In der anderen Gruppe mit überwiegend gedungenen Probekörpern sind demgegenüber die Streubreiten bei beiden Krafteinleitungssystemen etwa gleich groß, aber auch deutlich größer als in der ersten Gruppe.

Außerdem zeigen gedrungene Betonkörper bei starren im Vergleich zu schlaffen Druckplatten bei gleich hoher Druckspannung etwas höhere Stauchungsbeträge.

10.2.2 Einfluß der Meßmethode

In den Versuchsergebnissen zeigen sich Unterschiede, die nicht vom Material herrühren können, sondern versuchsbedingt sind. Zentrische Verformungsmessungen werden danach weniger, Oberflächenmessungen dagegen stark durch die Probekörperschlankheit beeinflusst. Dies führt zu voneinander abweichenden Stauchungslinien, die sogar den Einfluß der Beschaffenheit der Probekörperendflächen

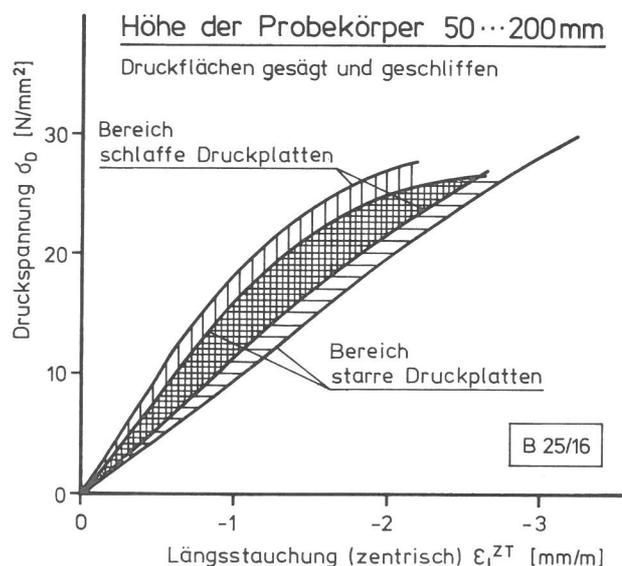
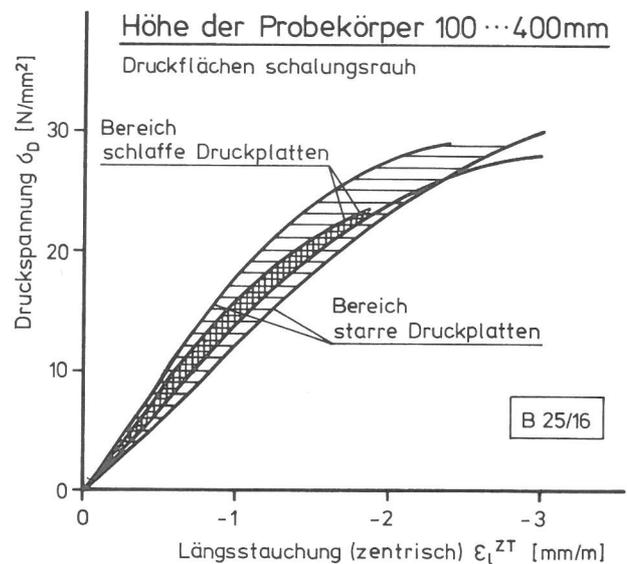


Bild 10.11

Streubreite der Spannungs-Stauchungslinien des Betons B25

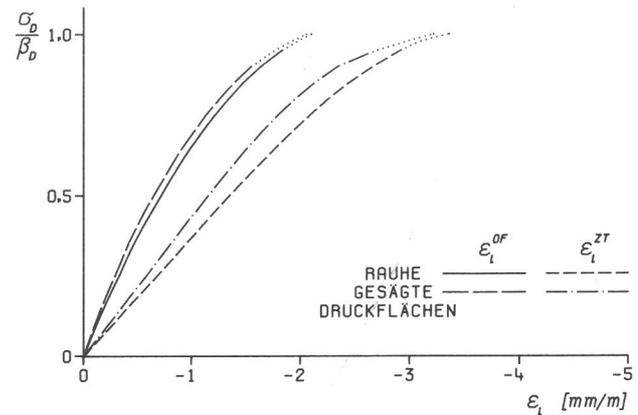
zurücktreten lassen (Bild 10.12). Die schlaaffe Druckplatte verhält sich hierbei nur wenig anders als die starre.

Auf die Problematik der in der vorliegenden Arbeit unvermeidbaren Verformungsmessungen an gedrunenen Probekörpern wurde bereits in Abschn. 5.3 eingegangen, der Lösungsweg mit Bild 5.9 vorbereitet. Wichtig ist die dort gewonnene Erkenntnis, daß die an der Oberfläche der Probekörper gemessene Stauchung ϵ_l^{OF} immer kleiner als der unverfälschte Wert ϵ_l ist und nur bei ausreichender Probekörperschlankheit mit diesem übereinstimmt. Bei zentrischen Messungen ist es hingegen genau umgekehrt. Die schalungsbedingten Feinstmörtelschichten an den Endflächen der Probekörper und ebenso eine möglicherweise über den Querschnitt ungleichmäßige Spannungsverteilung können - wie Bild 10.12 ebenfalls erkennen läßt - zu überhöhten Meßwerten ϵ_l^{ZT} führen /H7/. Der unverfälschte Wert muß somit zwischen beiden Versuchsergebnissen liegen, so daß im Grenzfall die gesuchte Spannungs-Stauchungslinie nahe der einen oder auch der anderen gemessenen Kurve verläuft (Bild 10.13).

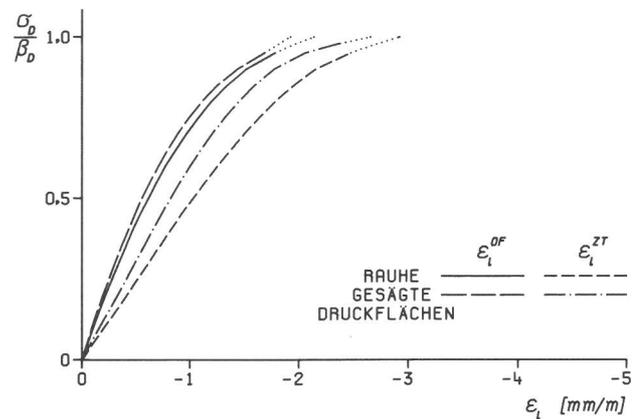
Wo aber zwischen ϵ_l^{OF} und ϵ_l^{ZT} der eigentliche Wert von ϵ_l liegt, bleibt zunächst unbekannt. In der Literatur findet sich zwar eine Bestätigung für die Feststellung $\epsilon_l^{OF} < \epsilon_l^{ZT}$ /N8/, auch im Innern von Prismen mit $h/b = 2$ angebrachte Dehnungsmeßstreifen belegen eindeutig diesen Sachverhalt /R2/. Der unterschiedliche Einfluß der Probekörperschlankheit auf die Oberflächen- im Vergleich zur zentrischen Verformungsmessung ist ferner in den Versuchsergebnissen von S a n g h a und D h i r zu erkennen /S3/.

Ein Auswertverfahren zur zielsicheren Bestimmung von ϵ_l durch einen begründeten Zuschlag zu ϵ_l^{OF} bzw. einen quantifizierbaren Abschlag von ϵ_l^{ZT} ist jedoch noch nicht bekannt. Das Verformungsverhalten der Probekörper ist dazu im einzelnen noch immer zu wenig erforscht. In einschlägigen Prüfrichtlinien wird deshalb das Problem durch die Wahl ausreichend schlanker Probekörper umgangen, bei denen $\Delta\epsilon_l$ (Bild 10.13), wie die Ergebnisse des vorigen Abschnitts bestätigt haben, etwa zu Null wird, und so das gesuchte ϵ_l eingegrenzt und damit bestimmt ist.

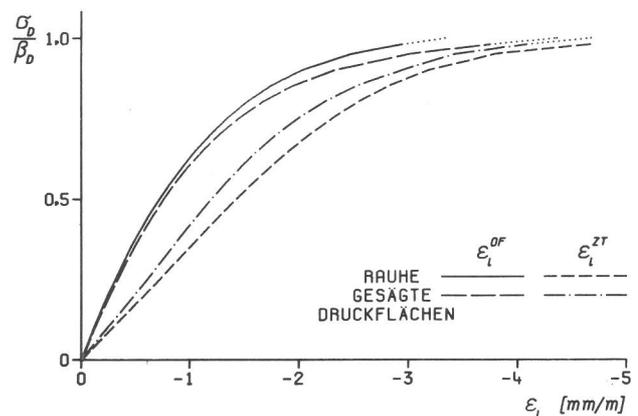
Nicht zutreffend wäre dagegen die verallgemeinernde Ansicht, Oberflächenmessungen im mittleren Drittel der Höhe von genügend schlanken Probekörpern wür-



DRUCKPLATTE + BETON + PROBEKÖRPERHÖHE
SCHLAFF + B35/16 + 100 MM



DRUCKPLATTE + BETON + PROBEKÖRPERHÖHE
STARR + B25/16 + 200 MM



DRUCKPLATTE + BETON + PROBEKÖRPERHÖHE
STARR + B25/16 + 100 MM

Bild 10.12

Unterschiedliche Stauchungslinien bei zentrischer Messung (ZT) über die gesamte Probekörperhöhe im Vergleich zur Oberflächenmessung (OF) in mittlerer Höhe

den das Verformungsverhalten des untersuchten Materials stets richtig wiedergeben. Dem stehen in jedem Fall die Untersuchungsergebnisse von S t ö c k l /S27/ zum unterschiedlichen Verhalten von Kern- und Randzonen entgegen. Dieser Unterschiedsbetrag, hier mit $\text{rand}\epsilon_l$ bezeichnet, ist immer vorhanden und kann allenfalls im Verhältnis zur Größe der Gesamtverformung vernachlässigbar klein werden. Grundsätzlich ist daher nach obigen Angaben und den einführnden Erläuterungen in Abschn. 5.3 der Betrag von $\text{rand}\epsilon_l$ dem Wert der Oberflächenmessung ϵ_l^{OF} hinzuzurechnen. Dies gilt ebenso für den Stauchungsunterschied $\text{stör}\epsilon_l$, der sich bei einer Oberflächenmessung dann ergibt, wenn der betreffende Abschnitt der Probekörperhöhe ganz oder teilweise durch Zusatzspannungen nach Bild 4.8 gestört ist. Für schlanke Probekörper, bei denen die Meßlänge in mittlerer Höhe nicht mehr als $(h - 2b)$ beträgt, ist $\text{stör}\epsilon_l \approx 0$.

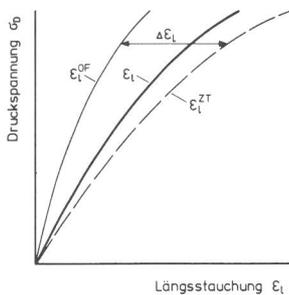


Bild 10.13
Prinzipieller Verlauf der wahren Spannungs-Stauchungslinie zwischen den Kurvenzügen aus Oberflächen- (OF) und zentrischer (ZT) Verformungsmessung (vgl. Bild 5.9)

Wären somit bei Verformungsmessungen an beliebig schlanken Probekörpern die Werte von $\text{rand}\epsilon_l$ und $\text{stör}\epsilon_l$ bekannt, so ließe sich nach Bild 10.14 mit

$$\epsilon_l = \epsilon_l^{\text{OF}} + \text{rand}\epsilon_l + \text{stör}\epsilon_l \quad (32)$$

die Lage der wahren Spannungs-Stauchungslinie aus den an der Oberfläche der Probekörper ermittelten Versuchswerten ϵ_l^{OF} bestimmen. Dabei müßten die Beträge von $\text{rand}\epsilon_l$ und $\text{stör}\epsilon_l$ nicht unbedingt einzeln bekannt sein. Aber auch für die Summe dieser Werte konnte bisher keine physikalisch begründete Beziehung zur Gesamtverformung eines Probekörpers gefunden werden. Für die vorliegende Untersuchung kam noch hinzu, daß bei gedrunenen bis dünnen Versuchskörpern die Probekörperhöhe für Stauchungsmessungen an der Oberfläche zu kurz ist, daher also nur Meßwerte für ϵ_l^{ZT} nicht aber für ϵ_l^{OF} vorliegen.

10.2.3 Unverfälschte Stauchungswerte

Entgegen dem herkömmlichen Vorgehen müs-

sen aus den vorgenannten Gründen die wahren ϵ_l -Werte aus den zentrischen Messungen, also aus der Gesamtverformung der Probekörper, bestimmt werden. Damit aber geht das Verformungsverhalten der Endzonen der Probekörper in das Meßergebnis mit ein. Dieses kann sich durchaus von dem des übrigen Materials unterscheiden. So erweist sich z.B. in Bild 10.15 die Feinstmörtelschicht schalungsrauer Druckflächen als eine Zone mit deutlich größeren Stauchungsbeträgen, als die Probekörper mit gesägten und dann feingeschliffenen Druckflächen zeigen. Dieser Einfluß der Feinstmörtelschicht ist bei beiden Krafteinleitungssystemen nachweisbar. Er ist aber erwartungsgemäß bei schlaffen Druckplatten geringer als bei starren, da hier während des Versuchsablaufs eine über den Querschnitt gleichmäßige Spannungsverteilung vorliegt und keine gleichmäßige Verformungsverteilung mit möglichen Spannungsspitzen erzwungen wird.

Bei gesägten und eben geschliffenen Druckflächen entfällt der Einfluß der Feinstmörtelschicht auf das Meßergebnis. Es bleibt aber offen, ob nicht auch bei Druckflächen ohne Schalungsschicht eine gewisse Schwächezone an den Enden der Probekörper vorliegt. Dies könnte u.U. durch die maschinelle Bearbeitung beim Sägen und Schleifen der Druckflächen verursacht worden sein. Hinweise auf eine derartige Beeinflussung der zentrisch gemessenen Stauchungswerte waren jedoch bei den vorliegenden Untersuchungen nicht zu erkennen. Durch den Start der Versuche von einer ausreichend hohen Grundkraft aus konnten außerdem anfängliche örtliche Unebenheiten - und die sich hieraus ergebenden Anpassungen zwischen Druckplatte und Probekörperendfläche - das Versuchsergebnis nicht beeinflussen. Bei Probekörpern mit gesägten und dann geschliffenen Druckflächen konnten deshalb die Stauchungswerte wie gemessen den weiteren Auswertungen zugrunde gelegt werden. Die in Bild 10.14 eingetragene Stauchungsdifferenz ist in diesen Fällen $\text{zon}\epsilon_l = 0$.

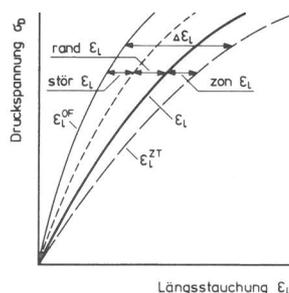


Bild 10.14
Grundsätzliche Aufteilung des Unterschiedes $\Delta \epsilon_l$ in Rand-, Stör- und Zoneneinfluß bei Oberflächen- (OF) und zentrischer (ZT) Verformungsmessung

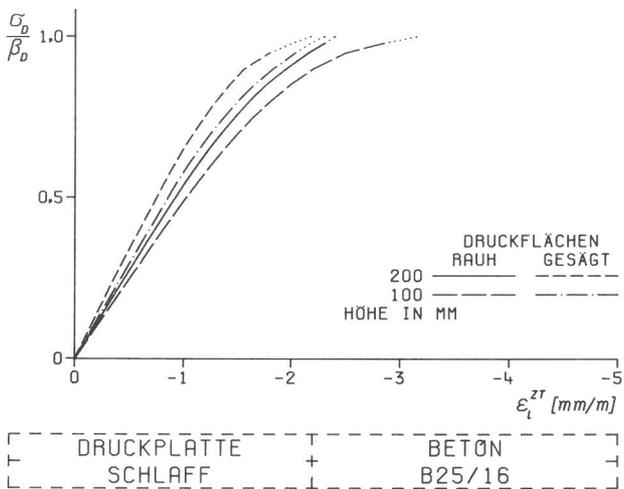
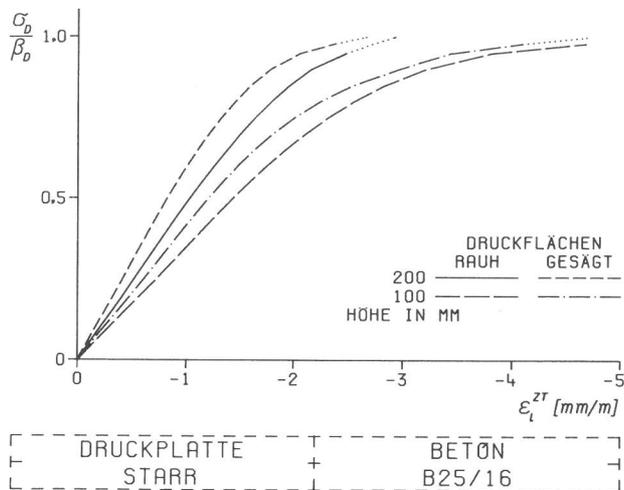


Bild 10.15

Einfluß der Beschaffenheit von Probekörperdruckflächen auf den Verlauf von Stauchungslinien des Betons B25

Zu bestimmen bleibt somit noch die Größe des Endzoneneinflusses bei Probekörpern mit schalungsrauhem Druckflächen. Aus der Beziehung

$$\epsilon_l = \epsilon_l^{ZT} - \text{zon}\epsilon_l \quad (33)$$

läßt sich dann auch für diese Fälle der versuchsmäßig unverfälschte Stauchungswert ϵ_l errechnen.

Im Versuchsprogramm waren hierzu bei allen vier Versuchsbetonen Probekörper vorgesehen, die sich durch die Beschaffenheit der Endflächen unterschieden. Zum einen waren es Prismen mit 200 mm Höhe, zum anderen Würfel mit 100 mm Kantenlänge. Wie eine Überprüfung (Bild A34) ergab, konnten die Druckfestigkeitswer-

te der Probekörper mit schalungsrauhem Druckflächen auf der einen und die der gesägten/geschliffenen auf der anderen als nur zufällig voneinander unterschiedlich angesehen werden. Die Annahme war also begründet, daß auch die zugehörigen Verformungswerte von der Probekörperfestigkeit her unbeeinflusst waren.

Gleichartige Probekörper konnten daraufhin zusammengefaßt und ihre Arbeitslinien gemeinsam ausgewertet werden. Dabei stellte sich heraus, daß die Stauchungsdifferenz

$$\text{zon}\epsilon_l = \epsilon_{l,r}^{ZT} - \epsilon_{l,ss}^{ZT} \quad (34)$$

r = Probekörper-Druckflächen schalungsrauh
ss = Druckflächen gesägt und geschliffen

von der Höhe der Druckspannung σ_D abhängig. Sowohl für die 200mm-Prismen als auch für die 100mm-Würfel ergab sich ein gut gesicherter linearer Zusammenhang. Das Bestimmtheitsmaß der Korrelationsrechnung war in allen Fällen größer als 95 % (Bild A35). Für jedes σ_D ließ sich damit gesondert für jeden der vier Versuchsbetone die Größe der aus den Schwächezonen an den Endflächen der Probekörper herrührenden zusätzlichen Stauchungsbeträge $\text{zon}\epsilon_l$ berechnen. Mit der oben begründeten generellen Annahme

$$\epsilon_l \approx \epsilon_{l,ss}^{ZT} \quad (35)$$

waren damit unter Verwendung von Gleichung (34) auch für Probekörper mit schalungsrauhem Druckflächen die gesuchten Stauchungswerte ϵ_l bekannt. Dabei konnte die aus Bild A35 erkennbare und mit Bild 5.7 bereits erläuterte Abhängigkeit der Differenzbeträge $\text{zon}\epsilon_l$ von der Probekörperhöhe für die 150mm-Prismen durch Interpolation zwischen den 200 mm hohen Prismen und den Würfeln berücksichtigt werden. Weitere schalungsrauhem Druckflächen traten im Versuchsprogramm nur bei Probekörpern mit $h/b > 2$ auf, für die dieser zusätzliche Einfluß ohnehin vernachlässigbar gering wurde.

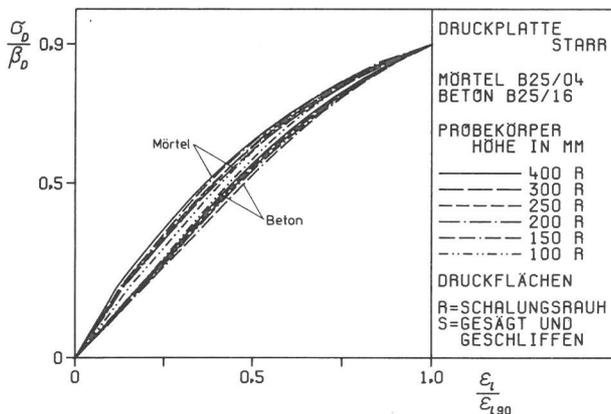
10.2.4 Form der Arbeitslinien

Auf die Wiedergabe der so ermittelten Spannungs-Stauchungslinien wird hier verzichtet. Die Darstellungen würden sich nur wenig von den vorangegangenen Bildern unterscheiden. Aufschlußreich sind aber Gegenüberstellungen in der Art von Bild 9.9d. Bezogen wird in

Bild 10.16 auf einen Spannungs- bzw. Stauchungswert bei 90 % der Probekörperfestigkeit β_D . Unzureichend gesicherte Meßergebnisse, wie sie z.B. durch vorzeitig zerstörte Dehnungsmeßstreifen oder sich ablösende Bruchstücke verursacht sein können (vgl. Bilder 8.16 bis 8.18), sollen damit ausgeschaltet werden.

Die Kurven sind danach bei Beton im Vergleich zu Mörtel etwas weniger gekrümmt. Bei schlaffen Druckplatten liegen sie außerdem vor allem bei geringen Probekörperhöhen meist wesentlich dichter zusammen als bei starren Druckplatten (Bild A36). Bild 10.17 schließlich läßt einen für die beiden Druckplattensysteme charakteristischen Unterschied erkennen: Während bei starren Druckplatten die Kurven desto geradliniger verlaufen, je schlanker die Probekörper sind, ist es bei schlaffen Druckplatten genau umgekehrt.

Zur Erläuterung dieses Phänomens sind in Bild 10.18 nochmals Einzelkurven,



also keine aus mehreren Versuchen gemittelte Linien, aufgetragen. In der Darstellung außen liegen die Stauchungskurven der dünnsten Probekörper; in der Mitte stimmen die Linien für die 400 mm hohen Prismen bei schlaffer und starrer Druckplatte überein.

Die Erklärung für dieses auf den ersten Blick überraschende Ergebnis findet sich bei Betrachtung der hier zugrunde liegenden Vorgänge im Gefüge des Probekörpers. Prismen haben bei gleichem Querschnitt ein größeres Volumen als Platten. Dementsprechend geringer ist die Wahrscheinlichkeit, daß erste Gefügerisse sofort zusammenlaufen und sich in von außen meßbaren Verformungen bemerkbar machen. Eine in der Querdehnung unbehinderte Platte zeigt deshalb bezogen auf den Endwert stets höhere Stauchungswerte als ein schlanker Körper. Je mehr allerdings die Querdehnung - wie bei starren Druckplatten - behindert ist, desto weniger können sich bei niedrigen Druckspannungen Gefügerisse bilden und

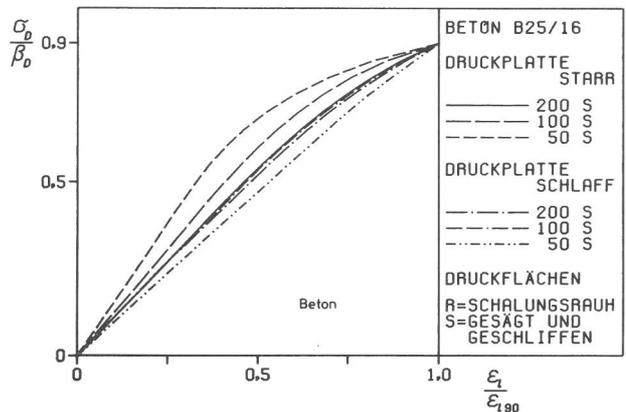
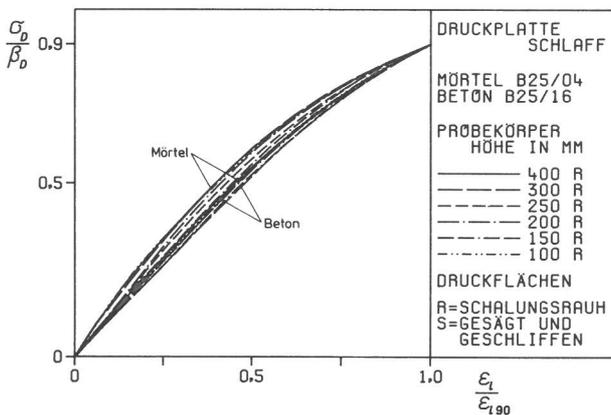
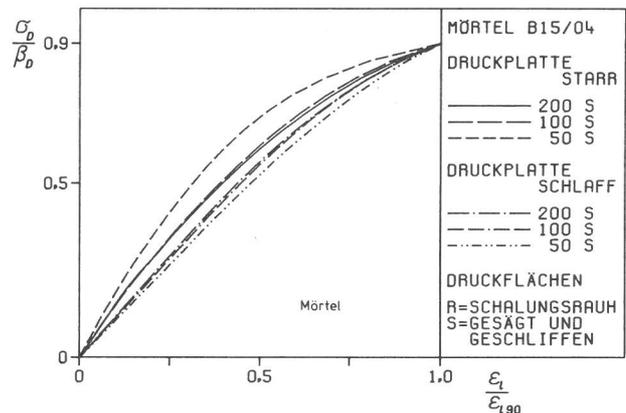
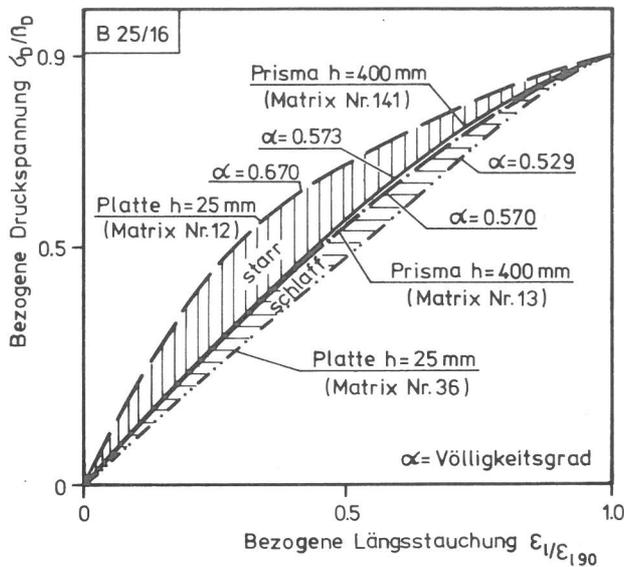


Bild 10.16

Mit starren (oben) und schlaffen Druckplatten ermittelte Spannungs-Stauchungslinien in bezogener Darstellung: $\beta_D \Delta \sigma_D$ bei 100% $\max \sigma_D$, $\epsilon_{l90} \Delta \epsilon_l$ bei 90% $\max \sigma_D$

Bild 10.17

Vergleich von Spannungs-Stauchungslinien gedrungener Probekörper aus Prüfungen mit starren und schlaffen Druckplatten (Bezogene Darstellung: $\beta_D \Delta \sigma_D$ bei 100% $\max \sigma_D$, $\epsilon_{l90} \Delta \epsilon_l$ bei 90% $\max \sigma_D$)



Druckplatten	Längsstauchung ϵ_{190} in 10^{-6} ($\epsilon_{190} \Delta \epsilon_l$ bei 90% max σ_D)	
	h = 400 mm	h = 25 mm
starr	-1384	-34090
schlaff	-1337	-3389

Bild 10.18

Vergleich der Krümmung bezogener Spannungs-Stauchungslinien von schlanken und dünnen Probekörpern aus Beton B25 bei Prüfung mit starren und schlaffen Druckplatten

sich zu einem Netz ergänzen. Relativ zum jeweiligen Endwert verformen sich dünne Probekörper daher erst bei höheren Druckspannungen. Die bezogene Stauchungslinie ist dementsprechend stärker gekrümmt.

Die unterschiedliche Form dieser Kurvenzüge kommt auch deutlich durch den nach Gleichung (16) ermittelten Völligkeitsgrad α zum Ausdruck. Aus der großen Zahl der in Form von Matrizen gespeicherten Versuchsdaten sind für vier Beispiele die errechneten Werte an den Kurven in Bild 10.18 eingetragen und für die übrigen Versuchsergebnisse des Betons B25/16 für eine bestimmte Kraftstufe in Abhängigkeit von der Probekörperhöhe in Bild 10.19 dargestellt. Für den vorliegenden Beton der Festigkeitsklasse B25 ergeben sich danach bei Prüfungen mit starren und schlaffen Druckplatten immer dann gleichgeformte Spannungs-Stauchungslinien, wenn die Schlankheit der Probekörper mindestens $h/b \geq 2$ beträgt. Hieraus zu schließen, daß wenig schlanke Probekörper für Verformungsmessungen grundsätzlich ungeeignet sind, wäre jedoch verfrüht. Zum einen

setzt sich die in Bild 10.19 gezeigte Abhängigkeit bei schlaffen Druckplatten für Prismen bis etwa hin zum Würfel geradlinig fort. Zum anderen ist hier der Völligkeitsgrad zunächst auf die Probekörperfestigkeit β_D , nicht jedoch auf die einaxiale Betondruckfestigkeit β_E bezogen. Hier bietet sich eine weitere Auswertung der Untersuchungsergebnisse an, die jedoch außerhalb der vorliegenden Aufgabenstellung liegt.

10.3 Verformungsarbeit

Die Überlegungen in Abschn. 5.1 zur Dehnungsbehinderung der Probekörper beim Druckversuch führten u.a. zu der in Bild 5.4 dargestellten prinzipiellen Abhängigkeit der Verformungsarbeit W von der Probekörperhöhe h . Die Ähnlichkeit dieser Darstellung mit Bild 10.19 ist offensichtlich. Tatsächlich hängen die Größen Völligkeitsgrad α und Verformungsarbeit W eng zusammen. Beiden liegt die Fläche unterhalb der Spannungs-Stauchungslinie zugrunde (Gleichungen (15) und (16)). Es ist daher davon auszugehen, daß auch eine Analyse der Verformungsarbeit die Unterschiede zwischen starrer und schlaffer Krafteinleitung ähnlich deutlich macht und Ansätze zur Ermittlung kennzeichnender Schwellen bei den Änderungen im Gefüge des Betons erkennen läßt.

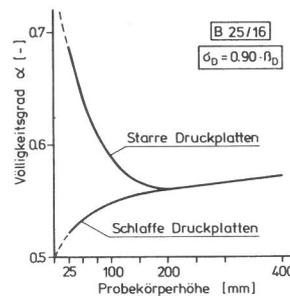


Bild 10.19

Krümmung der Spannungs-Stauchungslinien von unterschiedlich hohen Probekörpern, ausgedrückt durch den Völligkeitsgrad α bei 90% der Höchstkraft

Die aus den Probekörperstauchungen ϵ_l errechneten Werte der spezifischen, also auf das jeweilige Probekörpervolumen bezogenen Verformungsarbeit sind in Bild A37 des Anhangs zusammengestellt. Wäre die Krafteinleitung völlig zwängungsfrei und würde auch der Probekörper das eigentliche Stoffverhalten wiedergeben, so müßte die spezifische Verformungsarbeit ausschließlich von der Höhe der einwirkenden Druckbeanspruchung abhängen. Die Probekörperhöhe dürfte dagegen keinen Einfluß auf das Ergebnis haben.

Als Auszug aus Bild A37 sind hierzu in Bild 10.20 Versuchsergebnisse bei 90 % der Höchstkraft dargestellt. Danach ist

die spezifische Verformungsarbeit bei starrer Krafteinleitung keineswegs unabhängig von der Probekörperhöhe. Sie nimmt statt dessen mit abnehmender Probekörperschlankheit immer stärker zu. Bei schlaffen Druckplatten macht sich dagegen erst bei sehr dünnen Probekörpern ein erhöhter Betrag an Verformungsenergie bemerkbar, der vermutlich durch restliche Zwängungen in der Berührungsfläche mit dem Probekörper verursacht wird.

Insgesamt steigt die aufzubringende spezifische Verformungsarbeit mit zunehmender Betonfestigkeit, was den Angaben von Wischers entspricht /W11/. Außerdem ist zu erkennen, daß die spezifische Verformungsarbeit bei Mörtel größer ist als bei Beton gleicher Festigkeit. Dies fügt sich gut in die eingangs erläuterte Vorstellung, wonach ein

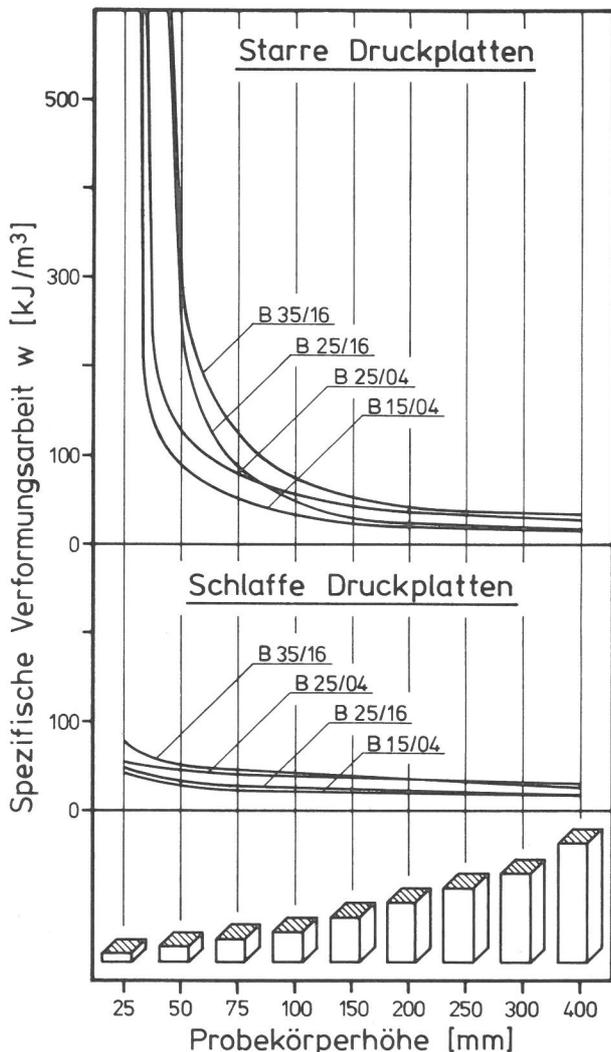


Bild 10.20

Spezifische Verformungsarbeit unterschiedlich schlanker Probekörper bei 90% der Höchstkraft

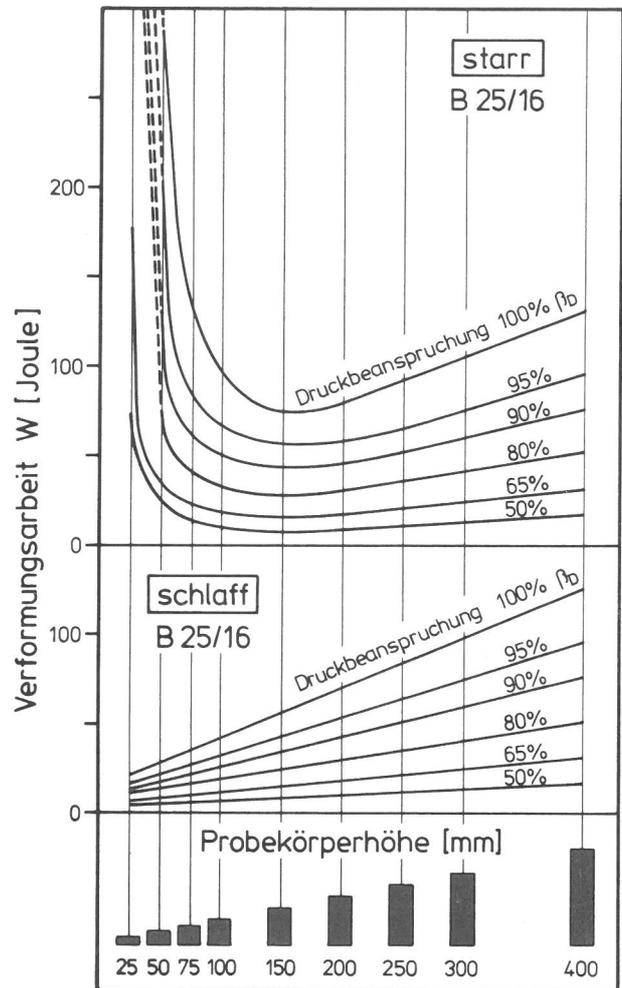


Bild 10.21

Verformungsarbeit unterschiedlich hoher Probekörper des Betons B25 in Abhängigkeit von der Höhe der Druckbeanspruchung und der Art der Krafteinleitung

feinkörniger Zuschlag durch die erheblich größere Zahl an Körnern die Ausbildung von Gefügerissen stärker behindert als ein grober Betonzuschlag. Desto größer ist dann auch der durch innere Zerstörungen aufgebrauchte Energieanteil.

Am Beispiel des Betons B25 zeigt Bild 10.21, daß die zunächst diskutierte Druckbeanspruchung von 90 % der Höchstkraft keinerlei Besonderheiten gegenüber den übrigen Kraftstufen aufweist. Die Erkenntnisse können also auf das Verhalten der Probekörper insgesamt übertragen werden. Dargestellt ist hier die Verformungsarbeit W , die mit der Probekörperhöhe ansteigt. In Bild 10.22 wird schließlich deutlich, daß der Verlauf dieser Linien bei genügend schlanken Probekörpern für starre und schlaffe Druckplatten deckungsgleich ist. Je geringer die Druckbeanspruchung im Ver-

hältnis zur Probekörperfestigkeit ist, desto eher ergeben sich auch noch bei weniger schlanken Probekörpern gleiche Beträge der Verformungsarbeit. Die zwängende Wirkung der starren im Vergleich zur schlaffen Druckplatte bei gedrunge- nen bis dünnen Probekörpern zeigt sich in dieser Darstellung besonders deut- lich. Im übrigen werden die nach Bild 5.4 erwarteten Abhängigkeiten durch die Un- tersuchungsergebnisse voll bestätigt. Lediglich bei Höchstkraft weichen auch bei schlanken Probekörpern die Beträge der Verformungsarbeit bei starrer und schlaffer Krafteinleitung etwas von- einander ab. Dies dürfte jedoch auf die bereits erläuterten Meßunsicherheiten zum Zeitpunkt des Versagens der Probe- körper zurückzuführen sein.

Aus den Bildern 10.21 und 10.22 geht nun hervor, daß bei der Abhängigkeit der Verformungsarbeit W von der Probekörper- höhe h die Steigungen innerhalb der Geradenschar mit anwachsender Druckbean- spruchung immer mehr zunehmen. Für schlafe Druckplatten ist dies oben in Bild 10.23 anhand der für Beton B35 gefundenen Versuchsergebnisse nochmals dargestellt. Die mit steigender Prüf- kraft stärker werdende Zunahme von W ist aber nicht gleichmäßig, sondern setzt sich erst langsam und dann be- schleunigt fort. Im unteren Teil des Bil- des 10.23 ist dies aus dem Verlauf von ΔW ersichtlich. ΔW ist hierbei ein Maß für den Anstieg der einzelnen Lini- en der Geradenschar und kennzeichnet

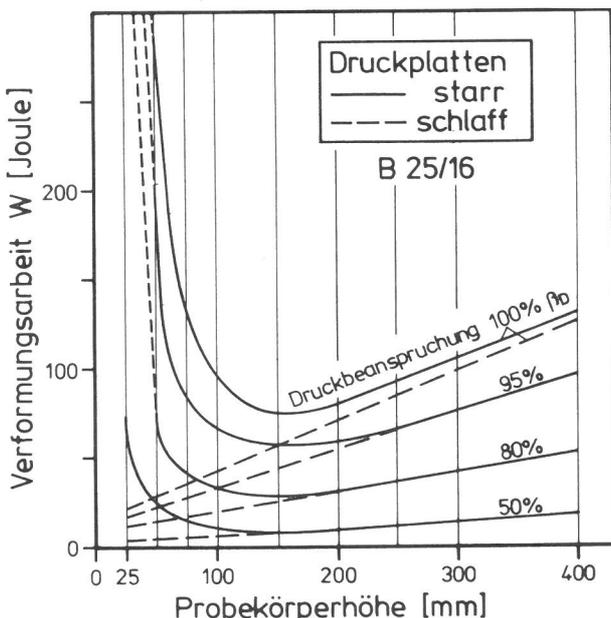


Bild 10.22
Vergleich der Verformungsarbeit von dünnen bis schlanken Probekörpern des Betons B25 bei Prüfung mit starren und schlaffen Druckplatten

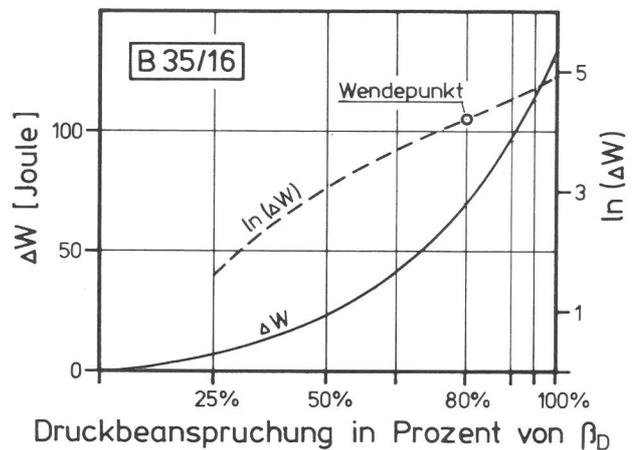
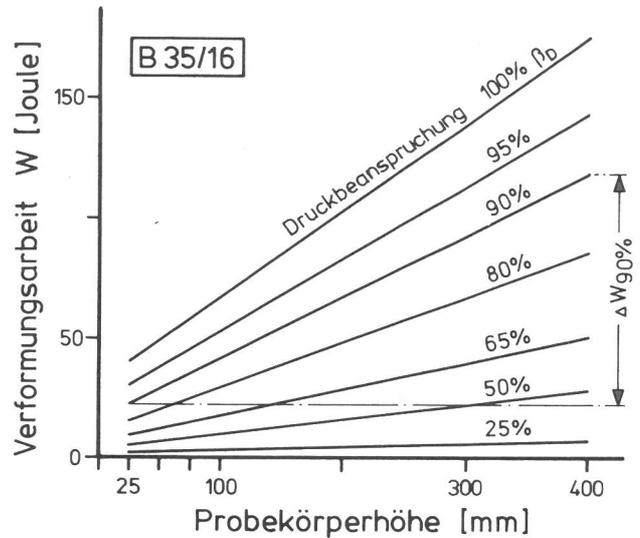


Bild 10.23
Verformungsarbeit W (oben) sowie Differenz ΔW zwischen der Verformungsarbeit des größten und des kleinsten Probekörpers in Abhängigkeit von der Höhe der Druckbeanspruchung bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten

die Differenz zwischen der Verformungs- arbeit des größten ($h = 400$ mm) und des kleinsten ($h = 25$ mm) Probekörpers. Die- se Werte sind unter Berücksichtigung des Probekörpervolumens aus Bild A37 leicht zu ermitteln. Am Verlauf der ΔW -Kurve ist zunächst keine Änderung in der stetig mit der Höhe der Druckbeanspruchung zunehmenden Tendenz zu erkennen. Wird jedoch von den Überlegungen zu Bild 5.11 ausgegangen und $\ln(\Delta W)$ aufgetragen, so zeigt sich ein - hier in der Verkleine- rung kaum erkennbarer - Wendepunkt bei etwa 80 % der Probekörperfestigkeit. Bis zu dieser Kraftstufe nimmt demnach die Verformungsarbeit immer stärker zu, um dann wieder langsamer werdend anzu- steigen. Vermutlich zeigt sich hier der Übergang von der stabilen zur instabilen Phase der Gefügeänderungen im Beton, der in Abschn. 5.4.3 als Mikrorißschwelle

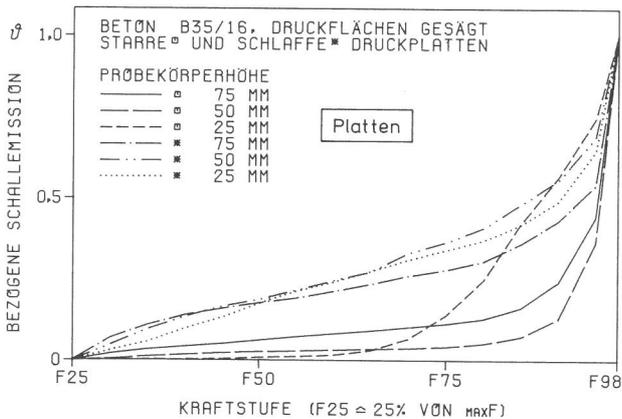
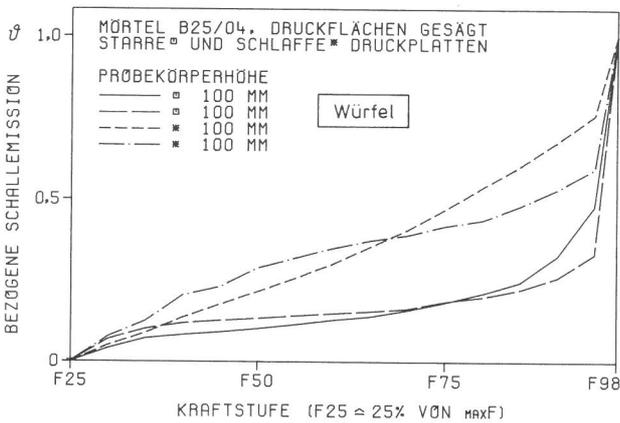
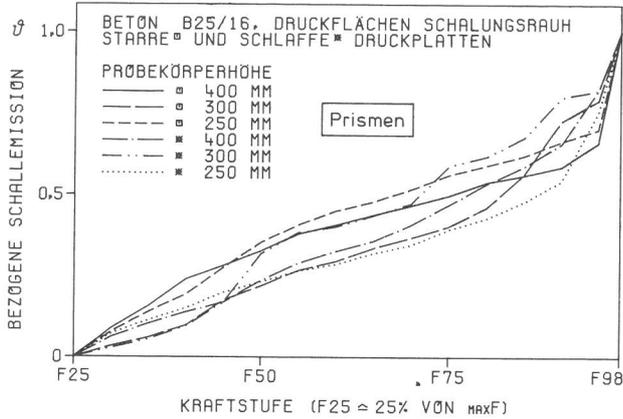


Bild 10.24

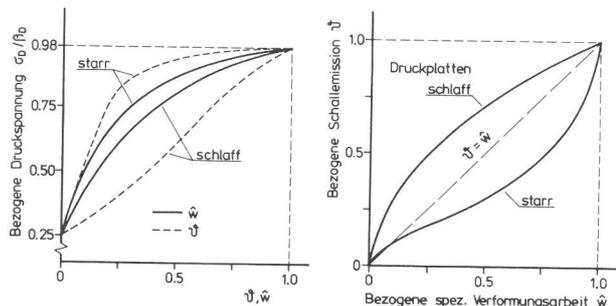
Ganglinien der Schallemissionen von schlanken, gedrungenen und dünnen Probekörpern als Anzeige für unterschiedlich fortschreitende Gefügerisse bei starrer und schlaffer Krafteinleitung

mic_D bezeichnet wurde. Eine Bestimmung dieses Grenzwertes auf die hier beschriebene Art erweist sich aber leider als zu unscharf. Auch in anderen Untersuchungen /S24/ wird festgestellt, daß sich bei Betrachtung der Verformungsarbeit der Probekörper keine ausreichenden Anhaltspunkte zur quantitativen Bestimmung von Gefügeschwellen ergeben.

So bleibt schließlich noch zu untersuchen, ob die sich in der Verformungsarbeit widerspiegelnden Gefügeänderungen des Probekörpers in einem erkennbaren Zusammenhang zu den gleichzeitig registrierten Schallemissionen stehen. Ähnlich wie bei der Verformungsarbeit (Bild 10.22) wurden auch bei der Aufnahme der Eigengeräusche desto größere Unterschiede zwischen einer Prüfung mit starren und schlaffen Druckplatten festgestellt, je geringer die Probekörperschlankheit war (Bild 10.24).

Aus der Gegenüberstellung von Schallemissionen und spezifischer Verformungsarbeit in Bild 10.25 wird jedoch der voneinander stark abweichende Verlauf deutlich. Für den Vergleich sind in dieser Darstellung neben den Schallemissionen auch die Werte der spezifischen Verformungsarbeit in bezogener Form aufgetragen, wobei - wie bereits in Abschn. 8.5.5 erläutert - nur Meßergebnisse der Kraftstufen i zwischen 25 % und 98 % der Höchstkraft berücksichtigt wurden.

Danach bestätigen sich zunächst die bereits zuvor mitgeteilten Untersuchungsergebnisse, wonach bei starren Druckplatten sowohl die Schallemissionen als auch die spezifische Verformungsarbeit erst bei jeweils höherer Druckbeanspruchung als bei schlaffer Krafteinleitung zunimmt (Bild 10.25 links). Aus dem rechten Teilbild geht ergänzend hierzu aber hervor, daß schlaffe Druckplatten während eines Versuchsablaufs frühzeitiger Schallemissionen als Verformungsarbeit verursachen. Bei starren Druckplatten ist es genau umgekehrt. Offenbar zeigen somit die Eigengeräusche Rissebildungen im Betongefüge an, die sich nicht unmittelbar in meßbare Ver-



Würfel 100mm, B 25/16

$$\hat{w}_i = \frac{w_i - w_{25}}{w_{98} - w_{25}}$$

$$\hat{v}_i = \frac{LE_i - LE_{25}}{LE_{98} - LE_{25}}$$

Bild 10.25

Gegensätzlicher Verlauf der Schallemissionen LE und der spezifischen Verformungsarbeit w bei der Prüfung von 100mm-Würfeln mit starren und schlaffen Druckplatten

Höhe des Probekörpers 200 mm, B 25/04, starre Druckplatten

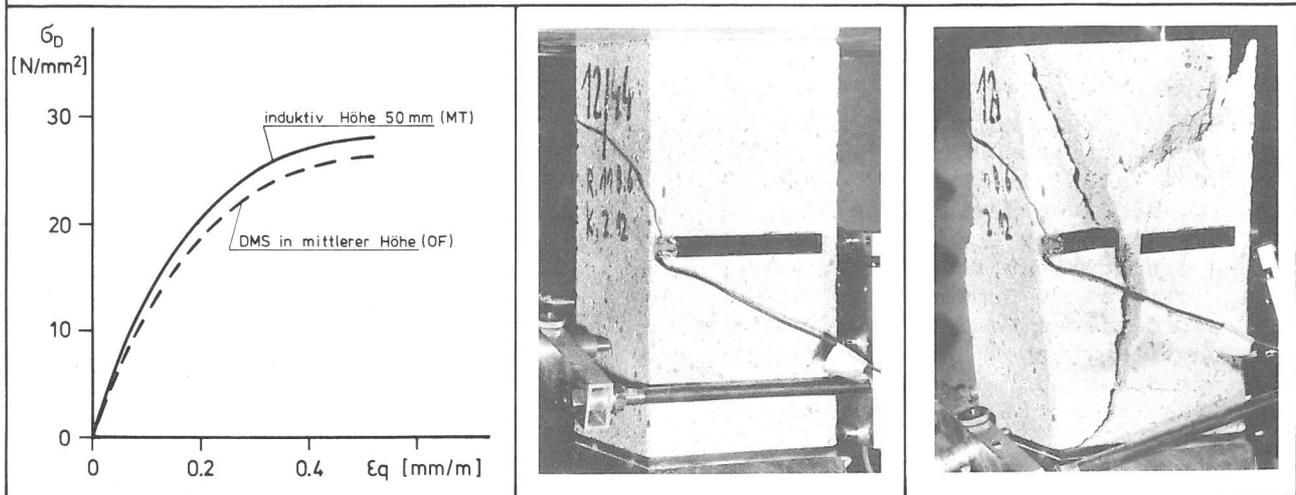


Bild 10.26

Vergleich der Querdehnung eines Prismas in Viertel- und mittlerer Höhe bei Krafteinleitung über starre Druckplatten

formungen umsetzen. Ebenso wenig muß sich eine Verformung immer durch Schallemissionen äußern.

10.4 Querdehnverhalten

Die vorliegenden Versuchsergebnisse aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen an der Oberfläche in mittlerer Probekörperhöhe (OF) und nahe der Endfläche (EF) sowie mit induktivem Wegaufnehmer mittig (MT) 50 mm von der unteren Druckfläche entfernt (Bild 10.26) werden nachfolgend ohne Korrektur vielleicht vorhandener Störeinflüsse diskutiert. Dies erscheint vertretbar, da sich bei Querdehnungen die zuvor mit Bild 10.14 für Längsstauchungen skizzierte Problematik im wesentlichen auf mögliche Verformungsunterschiede zwischen Rand- und Kernzonen reduziert. Diese aber sind wahrscheinlich gering, da im vorliegenden Fall sämtliche Probekörper gesägte Seitenflächen aufweisen, der Einfluß von Feinstmörtelschichten also ausgeschlossen ist.

Tatsächlich zeigen in der Regel die gemessenen Dehnungswerte ϵ_q^{MT} und ϵ_q^{OF} kaum Unterschiede (vgl. z.B. Dehnungskurven der 100mm-Würfel in den Bildern 10.27 und 9.14). Ein Beweis für unverfälschte Querdehnungswerte ist dies allerdings nicht, da beide Meßwerte in gleicher Weise durch Zwängungen bei der Krafteinleitung beeinflusst sein können. Dieser verbleibende Störeinfluß ist aber stets geringer als bei der zugehör-

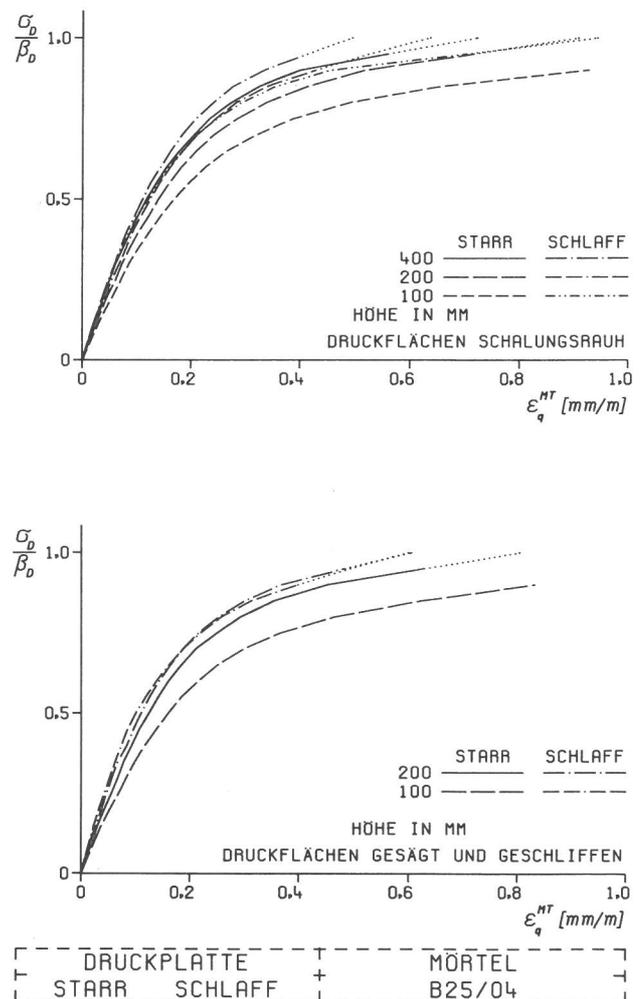


Bild 10.27

Querdehnungen unterschiedlich schlanker Probekörper 50 mm oberhalb der unteren Druckplatte bei starrer und schlaffer Krafteinleitung

rigen Längsstauchung, d.h. es gilt

$$\frac{\text{stör}\epsilon_L}{\epsilon_L} > \frac{\text{stör}\epsilon_q}{\epsilon_q} \quad (36)$$

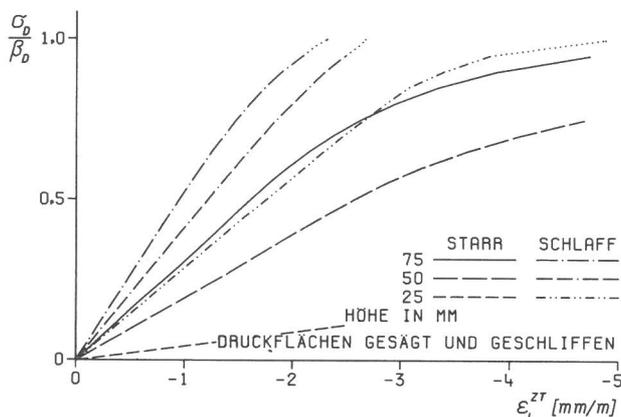
Dies erklärt sich daraus, daß die zur Aufnahme der Querdehnung erforderliche Meßlänge in Teilabschnitten liegt, die wenn, dann alle gleich stark gestört sind, da die Zusatzspannungen nach Bild 4.8 wegen des konstanten Abstandes zu den Druckplatten in allen Punkten gleich groß sind. Demgegenüber erfaßt die erforderliche Meßlänge zur Aufnahme von Längsstauchungen aber übereinander liegende Schichten, reicht also immer in stärker gestörte Abschnitte hinein.

Aus diesen Überlegungen geht somit hervor, daß die anschließenden Betrachtungen mit den zuvor ermittelten Querdehnungswerten vorgenommen werden können. Eine Überarbeitung der Versuchsergebnisse - wie in Abschn. 10.2.2 zum Auffinden unverfälschter Längsstauchungen - wäre auch schwierig und würde zudem nur unwesentliche Änderungen bringen, die die Aussagesicherheit kaum beeinflussen. Bei der Ermittlung der Volumendehnung hat z.B. die Vernachlässigung der unterschiedlichen Querdehnungen längs der Probekörperhöhe einen viel stärkeren Einfluß.

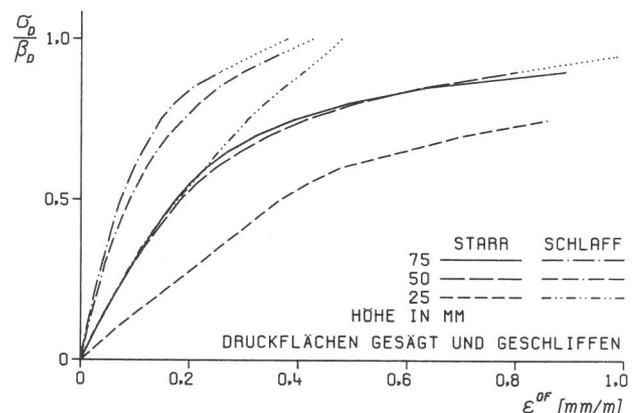
Daß Probekörper sich längs der Höhe unterschiedlich stark querdehnen, zeigt noch einmal das Beispiel in Bild 10.26. Die Volumendehnung ϵ_{vol} eines Probekörpers kann somit nur näherungsweise ermittelt werden, wenn lediglich die Querdehnung in einer bestimmten Höhe bekannt

ist. Bei der Auswertung der Dehnungssumme ϵ_{tot} als Schätzwert für ϵ_{vol} wird dies im nächsten Abschnitt beachtet. Im übrigen sind aber die Querdehnungen aller Probekörper mit $h/b \geq 1$ eines Versuchsbetons in der gewählten Bezugshöhe im Abstand von 50 mm zur unteren Druckplatte nahezu gleich groß. Nur bei starrer Krafteinleitung weichen die Ergebnisse mit geringer werdender Probekörperschlankheit zunehmend voneinander ab (Bild 10.27).

Wie in den vorangegangenen Abschnitten so gilt auch hier das besondere Interesse der Frage, inwieweit die Versuchsergebnisse Gefügeänderungen im Probekörper erkennen lassen, aus denen dann quantitative Angaben zur Lage der kennzeichnenden Schwellenwerte gewonnen werden können. Die Querdehnungskurven zeigen hierzu zumindest bei dünnen Probekörpern offenbar stärker ausgeprägte Änderungen im Krümmungsverlauf als die Stauchungslinien (Bild 10.28). Besonders deutlich sind diese Änderungen im Verformungsverhalten der Probekörper bei direktem Vergleich der Stauchungs- und Dehnungswerte (Bild 10.29). Das Verhältnis dieser Verformungsbeträge - d.h. die Querdehnzahl μ - bleibt danach bis zu einer bestimmten Höhe der Druckbeanspruchung etwa gleich groß und steigt dann erkennbar an. Gravierende Unterschiede, die auf die Methode der Krafteinleitung zurückgeführt werden könnten, lassen sich aus dieser Art der Darstellung nicht erkennen (Bild A38). Die Querdehnzahl ist jedoch bei schlaffen Druckplatten in der Regel etwas geringer als in den vergleichbaren Fällen mit starrer Krafteinleitung.



DRUCKPLATTE + BETON
STARR SCHLAFF + B25/16



DRUCKPLATTE + MÖRTEL
STARR SCHLAFF + B25/04

Bild 10.28

Längsstauchungen (links) und Querdehnungen dünner Probekörper bei Prüfung mit starren im Vergleich zu schlaffen Druckplatten

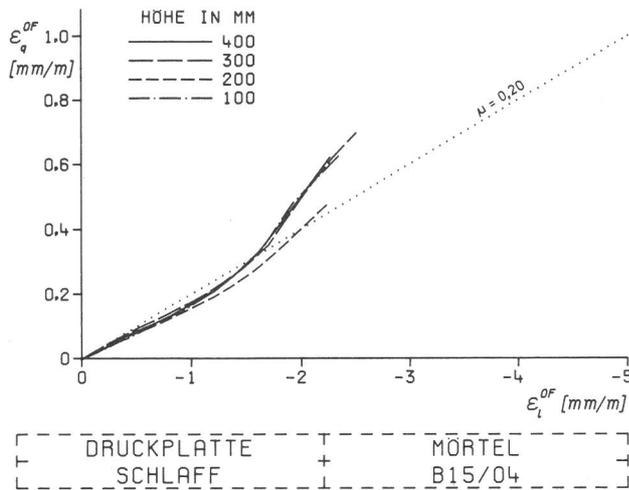


Bild 10.29

Verhältnis von Querdehnung und Längsstauchung bei Probekörpern aus Mörtel der Festigkeitsklasse B15

Wenn durch diese Gegenüberstellungen erkennbar wird, daß für eine anschließende quantitative Bestimmung der kennzeichnenden Schwellenwerte sich in den Längsstauchungen und Querdehnungen der Probekörper ausreichend markante Anzeichen finden lassen, so trifft dies leider für die Querdehnungen an den Endflächen nicht zu. Dem Bild 10.30 ist lediglich die bereits mehrfach bestätigte Tatsache zu entnehmen, daß die Querdehnungsbehinderung bei starren Druckplatten erheblich größer ist als bei schlaffer Krafteinleitung. Es ist stets $\xi_q^{EF} / \xi_q^{OF} < 1$. Bei schlaffen Druckplatten können demgegenüber anfangs an den Endflächen sogar größere Querdehnungen als in mittlerer Probekörperhöhe auftreten. Dies bestätigen die in Bild 9.18 dargestellten, mit Näherungsinstrumenten ermittelten Bauchungsprofile. Anders als bei schlanken, scheinen sich aber bei gedungenen bis dünnen Probekörpern die Querverformungen längs der Probekörperhöhe mit steigender Druckbeanspruchung immer mehr anzugleichen: Mit schlaffen Druckplatten wird häufig $\xi_q^{EF} / \xi_q^{OF} \approx 1$ (Bild A39).

10.5 Kennzeichnende Schwellenwerte

Am Beginn des Kapitels 10 wurden für jeden der vier Versuchsbetone die gefundenen Probekörperfestigkeiten β_D diskutiert, um hieraus die einaxiale Druckfestigkeit β_e zu ermitteln. Der äußerste der kennzeichnenden Schwellenwerte im Tragverhalten eines Probekörpers bzw. des Versuchsmaterials Beton oder Mörtel - nämlich $\max \sigma_D$, die Versagensgrenze - ist damit bekannt.

Als Ergebnis der voranstehenden Überlegungen und Auswertungen zur Verformung der Probekörper liegen nunmehr auch die Stauchungs- und Querdehnungswerte in einer Form vor, welche die Ermittlung der übrigen in Abschn. 5.4 erörterten Schwellenwerte zuläßt. Zu bestimmen sind danach

- die untere Gefügeschwelle $\inf \sigma_D$,
- die Mikrorißschwelle $\text{mic} \sigma_D$,
- die obere Gefügeschwelle $\text{sup} \sigma_D$
- und die Makrorißschwelle $\text{mac} \sigma_D$.

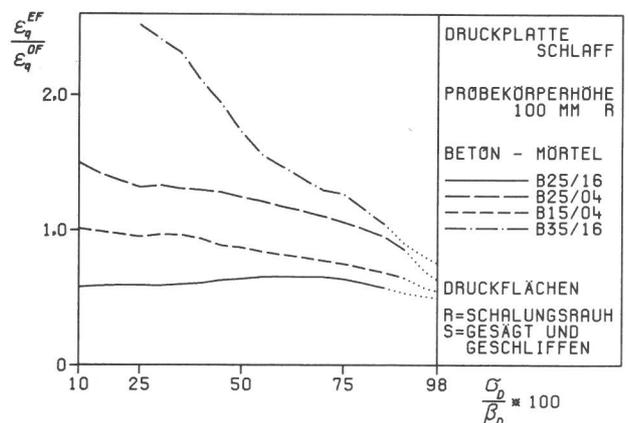
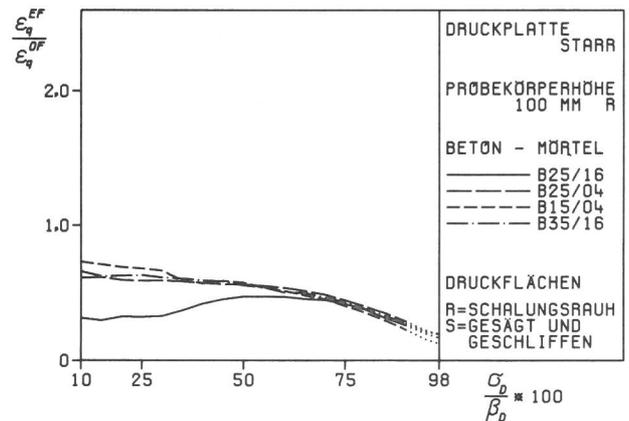
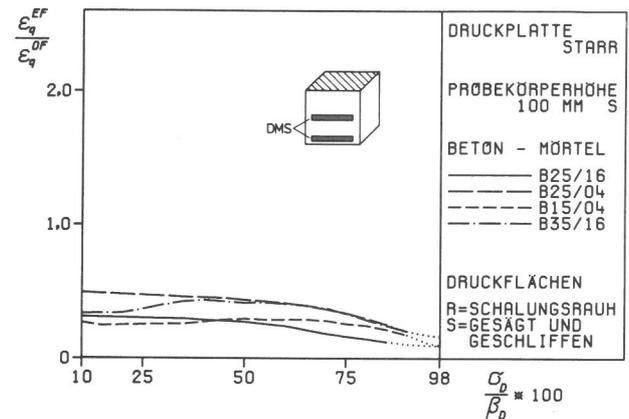


Bild 10.30

Verhältnis von Querdehnung nahe der Endfläche (EF) und in mittlerer Höhe (OF) bei Würfeln verschiedener Festigkeitsklassen und unterschiedlicher Art der Krafteinleitung

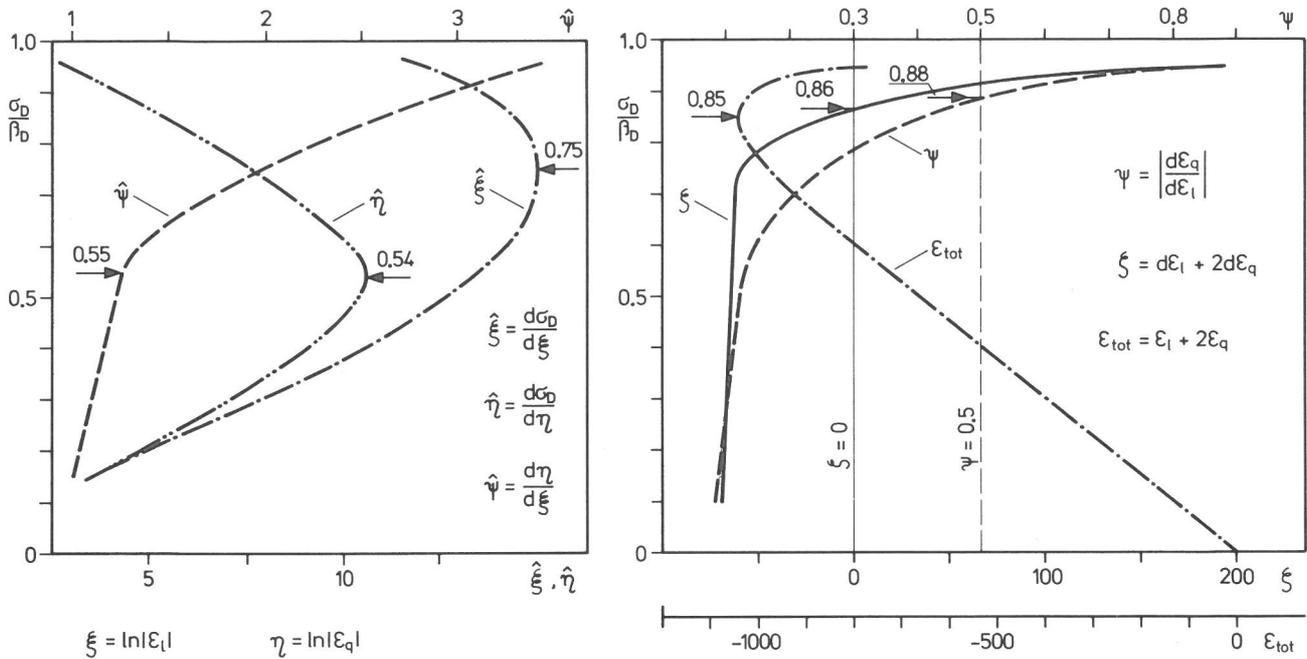


Bild 10.31

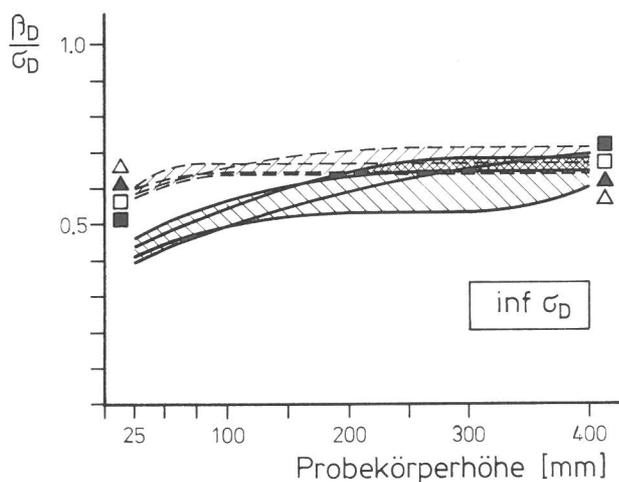
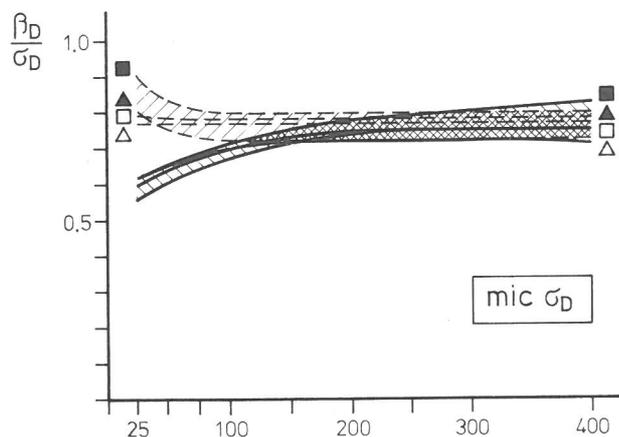
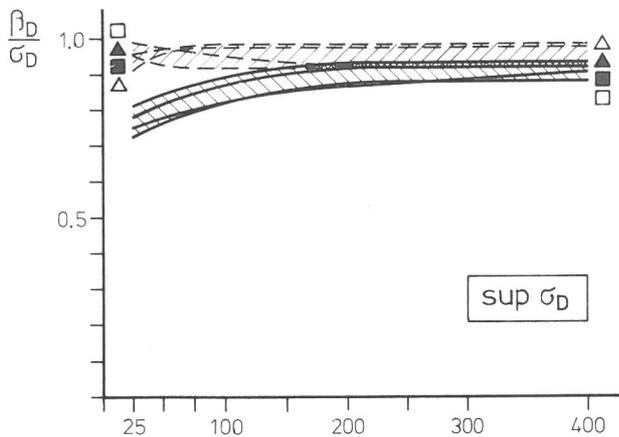
Arbeitsdiagramme nach Bild 5.14 zur Bestimmung kennzeichnender Schwellenwerte im Tragverhalten von Beton bzw. Mörtel (hier Betonprisma 100 mm x 100 mm x 200 mm aus B25/16, Versuchsserie 4, starre Druckplatten)

Welche Bedeutung diese ausgezeichneten Druckspannungswerte für das Betongefüge haben und in welcher Weise sie bestimmbar sind, wurde bereits im Zusammenhang mit den Bildern 5.13 und 5.14 ausführlich erläutert. Bild 10.31 zeigt hierzu als Beispiel Arbeitsdiagramme, wie sie für jede Probekörpergröße und jeden Versuchsbeton gezeichnet wurden. Im linken Teil des Bildes ist der von der Höhe der einwirkenden Druckspannung abhängige Verlauf der Rechengrößen $\hat{\psi}$ und $\hat{\eta}$ (vgl. Gleichungen (7) und (8)) eingetragen. Das Maximum des Linienzuges von $\hat{\eta}$ sowie die Linearitätsgrenze des Kurvenverlaufs von $\hat{\psi}$ sind markante Punkte für die untere Gefügeschwelle. Das Maximum der $\hat{\xi}$ -Kurve nach Gleichung (5) zeigt die auf die Probekörperfestigkeit bezogene Lage von $\text{mic}\sigma_D$ an. Die drei Kurven im rechten Teil des Bildes dienen der Bestimmung von $\text{sup}\sigma_D$. Dem Diagramm sind hierzu die Lage des Minimums der Dehnungssumme ϵ_{tot} sowie die Schnittpunkte der beiden anderen Kurven mit den eingezeichneten Hilfslinien zu entnehmen.

Die auf diese Weise bestimmten und sodann aus parallelen Versuchsserien gemittelten relativen Druckspannungswerte sind in Bild A40 zusammengefaßt und in Bild 10.32 dargestellt. Wie bereits bei allen übrigen Versuchsergebnissen, so ergibt sich bei dünnen Probekörpern auch hier deutlich ein Unterschied zwischen starrer und schlaffer Krafteinlei-

tung. Bei genügend schlanken Probekörpern jedoch ist die Streubreite hinsichtlich der Lage der Gefügeschwellen bei beiden Krafteinleitungssystemen und allen vier Versuchsbetonen sehr gering. Die ermittelten Schwellenwerte stimmen sogar nahezu überein, wenn ausschließlich solche Probekörper betrachtet werden, deren Formfaktor f gemäß Bild 10.9 gleich 1,0 ist, bei denen also im Druckversuch unmittelbar die einaxiale Druckfestigkeit β_e festgestellt wird. Diese Untersuchungsergebnisse sind in Bild A40 stark umrandet. Danach fällt lediglich bei der unteren Gefügeschwelle infolge der mit starren Druckplatten geprüften Mörtel der Festigkeitsklasse B15 etwas heraus. Im übrigen ist aber eine Abhängigkeit der Lage der Gefügeschwellen von der Betonfestigkeitsklasse nicht zu erkennen. So kann angenommen werden, daß die hier ermittelten Schwellenwerte mit einer gewissen Schwankungsbreite je nach Betonzusammensetzung ganz allgemein charakteristisch für das Tragverhalten von Beton sind.

Die untere Gefügeschwelle, welche die Phase des Verdichtens mit einer weitgehenden Rissefreiheit im Betongefüge abschließt, liegt danach zwischen 62 und 70 % der einaxialen Betondruckfestigkeit, im Mittel bei 64 %. In /E2/ wird in Abschn. 1.1.1.9 hiermit übereinstimmend ein Bereich von 50 bis 70 % angegeben. Eine weitere Bestätigung gibt auch die



Druckplatten: starr —, schlaff - - -
 Mörtel: \triangle B15/04, \blacktriangle B25/04
 Beton: \square B25/16, \blacksquare B35/16

Bild 10.32

Kennzeichnende Schwellenwerte des Widerstandsvermögens von Beton und Mörtel beim Druckversuch

bereits anhand von Bild 9.17 diskutierte Deformation der Probekörperdruckflächen, die bei etwa 2/3 der Probekörperfestigkeit auf ein Ende der Gefügeverdichtung schließen läßt (vgl. Abschn. 9.3.4).

Die Lage der Mikrorißschwelle $\text{mic}\sigma_D$ wurde aus den Längsstauchungen unterschiedlich hoher Probekörper zwischen 72 und 81 %, im Mittel zu 77 % von β_e ermittelt. Dabei war für jeden der vier Versuchsbetone die Streuung dieser relativen Druckspannungswerte außerordentlich gering (Bild A40). Hierin wird eine Bestätigung für die Zuverlässigkeit der in dieser Arbeit entwickelten Bestimmungsmethode gesehen. Darüber hinaus bietet sich dadurch die Gefügeschwelle $\text{mic}\sigma_D$ als Bezugspunkt für die übrigen kennzeichnenden Schwellen an.

Bild 10.33 gibt hierfür ein Beispiel. Danach ist das Verhältnis der Schwellenwerte untereinander nur dann gleich, wenn die Probekörperschlankheit im Zusammenwirken mit dem jeweiligen Kräfteinleitungssystem keine versuchstechnische Beeinflussung des Festigkeitsergebnisses erwarten läßt (d.h. Formfaktor $f = 1,0$).

Im Verhältnis der oberen zur unteren Gefügeschwelle (Bild 10.34) zeigte sich deutlich ein Unterschied im Tragverhalten von Mörtel im Vergleich zu Beton: Bei beiden Kräfteinleitungssystemen und ausreichender Probekörperschlankheit von $h/b \geq 2,5$ ergaben sich Verhältniszahlen, die bei Mörtel oberhalb, bei Beton aber unterhalb von $\text{sup}\sigma_D/\text{inf}\sigma_D = 1,45$ lagen.

Hier wird der unterschiedlich verlaufende Vorgang der Gefügezerstörung bei Materialien mit Fein- und Grobzuschlägen erkennbar. Im Mörtel wirken die vielen kleinen Zuschlagkörner wie ein Laby-

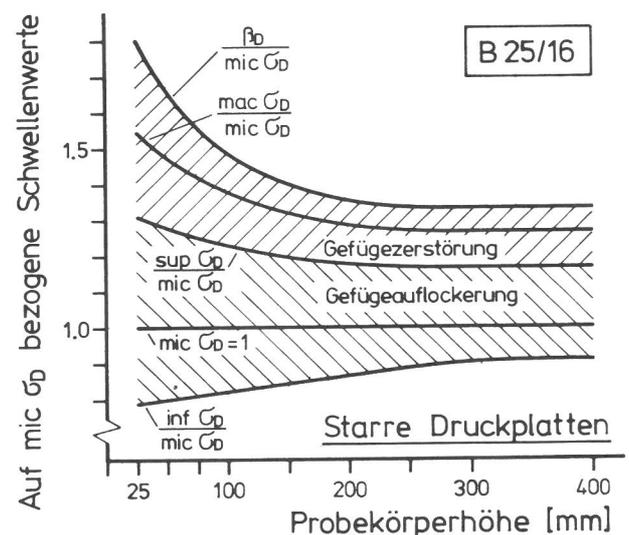
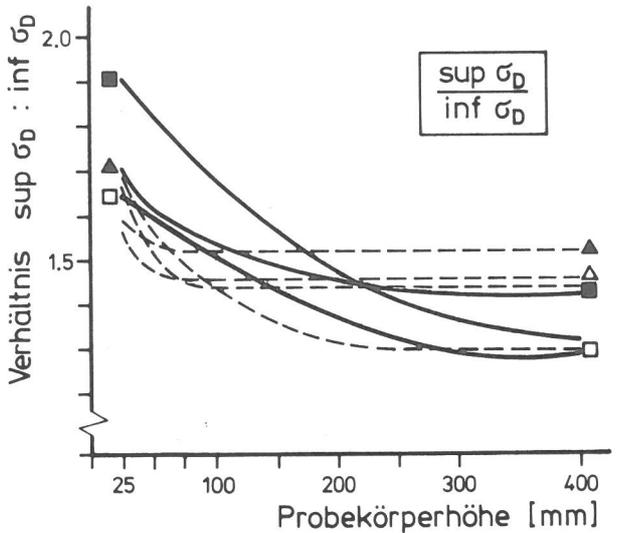


Bild 10.33

Verhältnis kennzeichnender Druckspannungswerte (Schwellenwerte) zur Abgrenzung der Bereiche der Gefügauflockerung und -zerstörung von Beton B25 bei unterschiedlich schlanken, mit starren Druckplatten geprüften Probekörpern



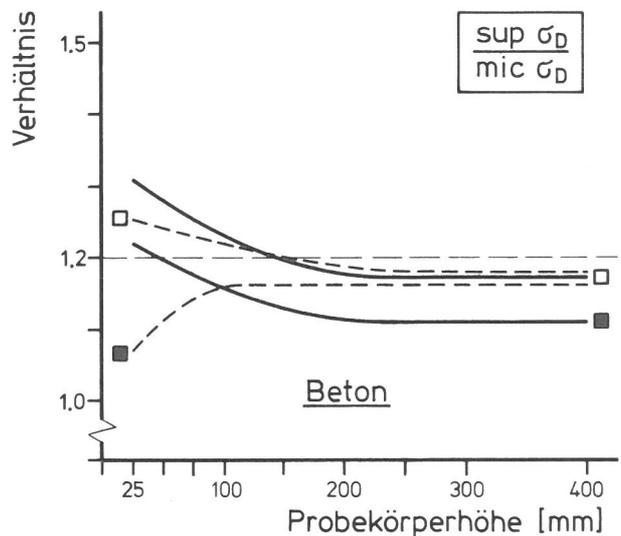
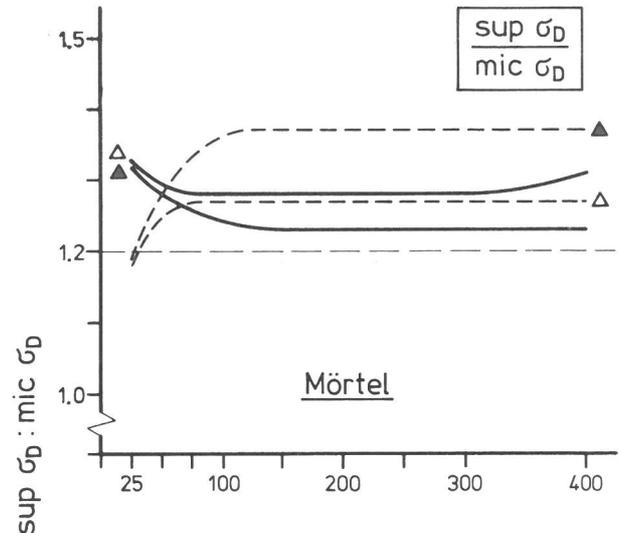
Druckplatten starr — Mörtel Δ B15/04 \square B25/16
 schlaff - - - Beton \blacktriangle B25/04 \blacksquare B35/16

Bild 10.34

Verhältniswerte der oberen zur unteren Gefügeschwelle bei druckbeanspruchten Probekörpern aus Mörtel und Beton

rinh, das ein Zusammenlaufen der bereits vereinzelt vorhandenen Gefügerisse verzögert. Die obere Gefügeschwelle $\text{sup}\sigma_D$ liegt deshalb bei Mörtel im Vergleich zu Beton näher an der Probekörperfestigkeit. Die Untersuchungsergebnisse weisen hierzu für die obere Gefügeschwelle $\text{sup}\sigma_D$ bei Beton Werte zwischen 88 und 94 %, im Mittel 91 % der einaxialen Druckfestigkeit β_e aus (Bild 10.32). Für die entsprechenden Versuchsserien mit Mörtel liegen demgegenüber die Werte zwischen 92 und 98 %, im Mittel bei 95 % von β_e .

Einen noch deutlicheren Einblick in das unterschiedliche Materialverhalten von Mörtel und Beton beim Druckversuch gestattet Bild 10.35 mit einem Vergleich von $\text{sup}\sigma_D$ und $\text{mic}\sigma_D$. Der dort aus den beiden Gefügeschwellen gebildete Verhältniswert liegt nach den vorliegenden Untersuchungen bei ausreichend schlanken Probekörpern aus Beton unterhalb, bei Mörtel jedoch eindeutig oberhalb eines Wertes von 1,2. Offensichtlich geht bei Mörtel die Gefügauflockerung langsamer in eine Zerstörung des Gefüges über als bei Beton. Zementmörtel ist demnach nicht ohne weiteres als "Modellbeton" zu sehen, ist also kein Beton in "verkleinertem Maßstab".



Druckplatten starr — Mörtel Δ B15/04 \square B25/16
 schlaff - - - Beton \blacktriangle B25/04 \blacksquare B35/16

Bild 10.35

Verhältnis der oberen Gefügeschwelle zur Mikrorißschwelle bei druckbeanspruchtem Mörtel im Vergleich zu Beton

11 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Höhe der Beanspruchung ändert sich die Reaktion des Baustoffs Beton auf einwirkende Druckspannungen. Ursache hierfür sind Umwandlungen im Betongefüge in Form von Rissebildungen innerhalb der Zementmatrix und in der Haftzone zwischen Matrix und Betonzuschlag. Diese Gefügeänderungen setzen bei einer bestimmten Höhe der Druckspannung ein und lassen bei zunehmender Beanspruchung des Betonkörpers charakteristische Druckspannungswerte erkennen, die Übergänge im Verhalten des Betons anzeigen.

Derartig ausgezeichnete Druckspannungen werden hier als "kennzeichnende Schwellen" bezeichnet. Es sind Stoffkennwerte, die über das Tragvermögen und die Gebrauchsfähigkeit des betreffenden Betons Auskunft geben.

In der vorliegenden Arbeit werden unterhalb der Versagensgrenze vier kennzeichnende Schwellen nachgewiesen: eine untere und eine obere Gefügeschwelle $\text{inf}\sigma_D$ bzw. $\text{sup}\sigma_D$, die der aus der Literatur bekannten "Diskontinuitätsgrenze" bzw. der "kritischen Druckspannung" entsprechen; außerdem eine Mikrorißschwelle $\text{mic}\sigma_D$ sowie eine - nach bisherigen Erkenntnissen allerdings weniger wichtige Makrorißschwelle $\text{mac}\sigma_D$. Alle diese Gefügeschwellen sind der direkten Beobachtung nicht zugänglich. Um zu allgemeingültigen Aussagen zu kommen, dürfen sie nicht auf die jeweilige Probekörperfestigkeit, sondern müssen auf die einaxiale, d.h. "wahre", Betondruckfestigkeit β_e bezogen werden. Aber auch diese Kenngröße des Baustoffs Beton ist meist nicht unmittelbar feststellbar, da die Geometrie der Probekörper und die Komponenten der Versuchstechnik - vor allem die Art der Krafteinleitung - das Festigkeitsergebnis stark beeinflussen können.

Es werden deshalb zunächst geeignete Bestimmungsmethoden zur Ermittlung von β_e und jede der kennzeichnenden Schwellen erarbeitet. Bei den Festigkeitsbetrachtungen führt dies zur Variation der Probekörperschlankheit von $h/b = 0,25$ bis $h/b = 4,0$. Zur Druckprüfung werden dabei zwei grundverschiedene Krafteinleitungssysteme verwendet: starre und schlafe Druckplatten. Auf diese Weise läßt sich β_e auf getrennten Wegen bestimmen und damit kontrollieren. Zur Feststellung der Schwellenwerte reichen Spannungsermittlungen allein jedoch nicht aus; ergänzend werden Schallemissionsmessungen durchgeführt, vor allem aber müssen Verformungsmessungen an den Probekörpern hinzukommen. Diese bedingen dann Betrachtungen zum Problem der unterschiedlichen Meßergebnisse bei Ermittlung von Probekörperverformungen "zwischen den Druckplatten" und an Teilbereichen der Oberfläche der Versuchskörper. Wie schon bei den Festigkeitsprüfungen, so eröffnen sich durch die Parallelversuche mit starren und schlaffen Druckplatten auch bei der Auswertung der Probekörperverformungen wichtige Vergleichsmöglichkeiten. Jede der Gefügeschwellen kann so schließlich doppelt bestimmt und das Ergebnis dadurch überprüft werden.

Zur quantitativen Ermittlung der kennzeichnenden Schwellen und zur vorausgehenden Lösung der angesprochenen Teilaufgaben werden in der vorliegenden Arbeit prismatische Probekörper mit quadratischem Querschnitt aus zwei Versuchsbetonen und zwei Zementmörteln der Betonfestigkeitsklassen B15, B25 und B35 geprüft. Die Untersuchungsergebnisse aus 33 Versuchsserien mit insgesamt rd. 1000 Probekörpern lassen sich zu folgenden Feststellungen zusammenfassen:

1. Die aus der Literatur bekannte Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Probekörperschlankheit wird für die herkömmliche Art der Prüfung mit starren Druckplatten bestätigt und auf besonders dünne Probekörper erweitert (Bild 11.1).

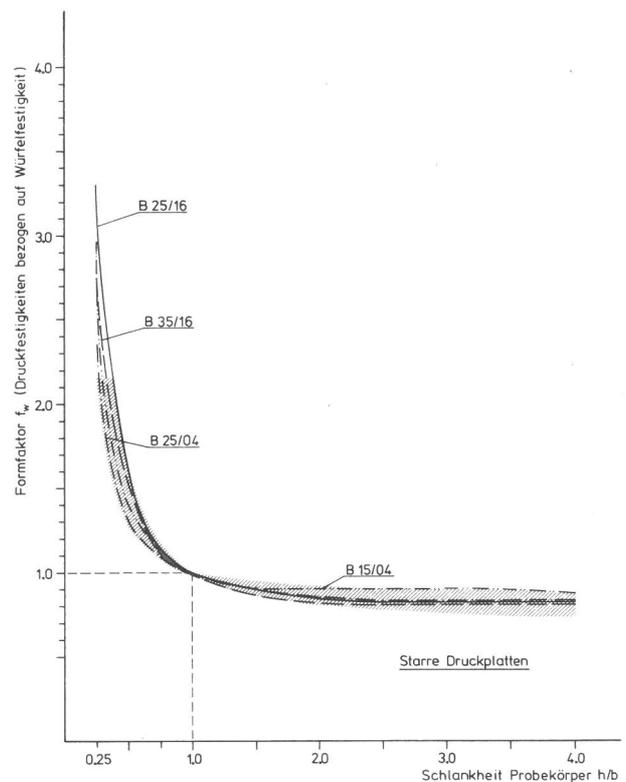


Bild 11.1

Verhältniswerte der Druckfestigkeit von Probekörpern der 4 Versuchsbetone bei Prüfung mit starren Druckplatten im Vergleich zum Streubereich von Angaben in der Literatur (s. Bild 4.4)

2. Beim Betondruckversuch bilden Prüfmaschine, Probekörper, Krafteinleitungssystem usf. eine Einheit. Das Versuchsergebnis ist Ausdruck aller beteiligten Komponenten. Jeder Versuchsbeton anderer Zusammensetzung, anderer Festigkeitsklasse usf. zeigt grundsätzlich eine etwas andere Abhängigkeit der Druckfestigkeitswerte von der Probekörperschlankheit (vgl. Tabelle in Bild 11.2). Bei zusam-

mengefaßten Untersuchungsergebnissen drückt sich dies im Streubereich der Kurvenzüge aus (Bild 11.1). Zwischen den Kennlinien für Mörtel und Beton bestehen deutliche Unterschiede.

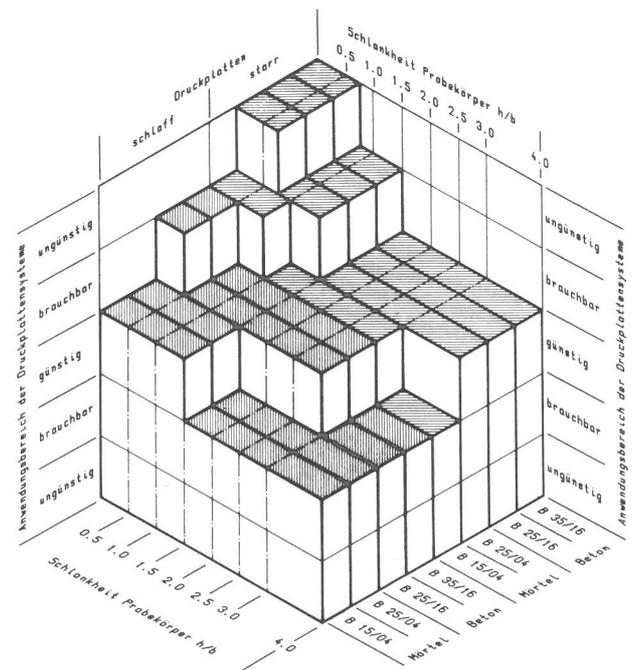
3. Die an Probekörpern mit Schlankheiten von $2,5 \leq h/b \leq 3,0$ mit starren Druckplatten ermittelten Druckfestigkeitswerte ("Prismenfestigkeit") entsprechen der einaxialen Betondruckfestigkeit β_e .

4. Unabhängig von diesen herkömmlichen Prüfungen mit starren Druckplatten haben Parallelversuche mit schlaffen Druckplatten zu denselben β_e -Werten geführt. Dies wird als Beweis für die Richtigkeit der eingangs entwickelten Auffassung angesehen, wonach die einaxiale Betondruckfestigkeit β_e grundsätzlich mit jeder Versuchstechnik durch geeignete Kombination und Variation maßgebender Einflußparameter bestimmt werden kann.

5. In diesem Zusammenhang wird das Prüfsystem "Schlaffe Druckplatte" erstmals ausführlich vorgestellt und unter dem Gesichtspunkt des Problems einer zwängungsarmen Krafteinleitung bzw. des bei Zwängung hervorgerufenen mehraxialen Spannungszustandes im Krafteinleitungsbereich des Probekörpers diskutiert. Eine Behinderung der Querdehnung des Betonkörpers beeinflusst stark das Festigkeitsergebnis und ist letztlich Ursache für die Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Probekörperschlankheit. Starre und schlaffe Druckplatten unterscheiden sich erheblich bezüglich der Querdehnungsbehinderung der Probekörper. Dementsprechend unter-

schiedlich ist der Einfluß der Probekörperschlankheit auf die ermittelten Festigkeitsergebnisse; die sich aus den Verhältniswerten (bezeichnet als Formfaktoren, vgl. Tabelle in Bild 11.2) der Probekörperfestigkeiten zur einaxialen Betondruckfestigkeit ergebenden Kennlinien sind deutlich verschieden.

6. Mit schlaffen Druckplatten der hier verwendeten Bauart wird der einaxiale Festigkeitswert β_e nicht an Prismen, sondern an Würfeln festgestellt. Schlankere Probekörper zeigen etwas geringere Druckfestigkeitswerte. Vor allem aber ist bei gedrunenen Versuchskörpern



$\beta_D = f \times \beta_e$ ++)			Formfaktor f									
Krafteinleitungssystem	Probekörper +)	Höhe [mm]	25	50	75	100	150	200	250	300	400	
		Schlankheit h/b	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	
Starre Druckplatten	Beton	B25/16	4.02	1.95	1.38	1.22	1.10	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00
		B35/16	3.40	1.91	1.38	1.24	1.08	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
	Mörtel	B15/04	3.28	1.52	1.24	1.11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97
		B25/04	2.82	1.54	1.31	1.20	1.08	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00
Schlaffe Druckplatten	Beton	B25/16	1.09	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.96
		B35/16	1.09	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96
	Mörtel	B15/04	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89	0.89
		B25/04	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.87	0.87

+) Prismatische Probekörper mit quadratischem Querschnitt von 100 mm Kantenlänge
 ++) β_D = Probekörperdruckfestigkeit, β_e = einaxiale Druckfestigkeit

Bild 11.2

Zweckmäßige Verwendung starrer und schlaffer Druckplatten je nach Versuchsmaterial und Schlankheit der Probekörper im Hinblick auf einen möglichst geringen Einfluß der Probekörperform auf das Festigkeitsergebnis

der Einfluß der Probekörperschlankheit erheblich geringer, als bei einer Prüfung mit starren Druckplatten. Dünne Probekörper aus Mörtel gestatten sogar den direkten Bezug zur einaxialen Druckfestigkeit (Formfaktor $f = 1,0$).

7. Wird der Einfluß der Betonzusammensetzung vernachlässigt, so können die in Bild 11.2 zusammengestellten Formfaktoren auch für andere Betone bzw. Mörtel der angegebenen Festigkeitsklassen verwendet werden. Der mögliche Fehler ist umso geringer, je weniger der Formfaktor von $f = 1,0$ abweicht. Hieraus ergeben sich bevorzugte Anwendungsbereiche der beiden untersuchten Krafteinleitungssysteme (Bild 11.2). Im günstigen Bereich kann der Formfaktor vernachlässigt werden; er liegt zwischen 0,98 und 1,02. Als ungünstig ist demgegenüber die Verwendung eines Krafteinleitungssystems zu bezeichnen, wenn $f \geq 1,26$ oder aber $f \leq 0,79$ ist. Die dazwischen liegenden Formfaktoren $0,80 \leq f \leq 1,25$ grenzen dann den brauchbaren Anwendungsbereich ab.

8. Die schlaaffe Druckplatte ist demzufolge vor allem für die Prüfung von dünnen bis gedrunenen Probekörpern geeignet. Sie eröffnet bisher nicht gegebene Prüfmöglichkeiten insbesondere bei Nachprüfungen an Proben aus dem fertigen Bauwerk, wo häufig Beton bzw. Mörtel in dünnen Schichten anzutreffen ist: Ortbeton über Decken aus Fertigteilen, Druckbeton von Kassettendecken und dünnen Schalen, Ausgleichsschichten, Flick-, Unterstopf- und Vergußmörtel, Estriche usw.

9. Durch die fortlaufende Beobachtung der Relativbewegungen der einzelnen Stempel der schlaffen Druckplatte werden erstmals auch Angaben über die Deformation der Druckflächen der Probekörper während des Versuchsablaufs möglich. Erwartungsgemäß senken sich die Zentren der Endflächen etwas stärker ein als die Kantenbereiche; die Druckflächen sind konkav gekrümmt.

10. Neben dieser neuartigen Meßaufgabe wird ausführlich auch das Problem einer verlässlichen Messung der Längsstauchungen der Probekörper behandelt. Danach zeigen Ergebnisse aus Verformungsmessungen "zentrisch zwischen den Druckplatten (ZT)" gegenüber "Oberflächenmessungen in mittleren Teilbereichen (OF)" desto größere Unterschiede, je gedrunener die Probekörper sind. Hierfür sind drei Einflüsse maßgebend (vgl. Bild 10.14): Ein Störeinfluß, der bei einer OF-Messung dann gegeben ist, wenn die Meß-

strecke Abschnitte mit Zusatzspannungen aus ungleichförmiger Krafteinleitung erfaßt; ferner ein Randeinfluß, der auf die abweichende Betonstruktur in oberflächennahen Schichten gegenüber dem Kernbereich zurückzuführen ist; und schließlich ein Einfluß der an den Druckplatten anliegenden Endzonen der Versuchskörper, der ähnliche Ursachen wie der Randzoneneinfluß hat, sich aber nicht auf die OF-, sondern auf die ZT-Messung auswirkt.

Stör- und Randeinfluß führen in aller Regel zu verminderten, der Endzoneneinfluß hingegen zu überhöhten Meßergebnissen. Bei ausreichend schlanken Probekörpern ist der Störeinfluß Null und der Endzoneneinfluß vernachlässigbar klein. Haben die Probekörper gesägte und nicht schalungsrauhe Seitenflächen, so ist erfahrungsgemäß auch der Randeinfluß gering, so daß bei Prismen i.a. OF- und ZT-Messungen annähernd übereinstimmen. Bei gedrunenen Probekörpern ist demgegenüber aber davon auszugehen, daß sich bei Verformungsmessungen "zwischen den Druckplatten" im Zweifelsfall zu große, bei Messungen "in mittleren Teilbereichen an der Oberfläche" jedoch immer zu geringe Stauchungsbeträge ergeben.

Die Größe dieser Einflüsse kann von der Höhe der einwirkenden Druckspannungen abhängen. Hinsichtlich des Endzoneneinflusses werden für die verschiedenen Versuchsbetone lineare Regressionsbeziehungen nachgewiesen, die bei gedrunenen Versuchskörpern dann Rückschlüsse von den gemessenen ZT-Werten auf die "wahren" Stauchungsbeträge ermöglichen.

11. Die Reaktion der Versuchskörper auf eine Krafteinleitung mit starren im Vergleich zu schlaffen Druckplatten ist umso unterschiedlicher, je geringer die Probekörperschlankheit ist. Außer in den Probekörperfestigkeiten zeigt sich dies u.a. im Verlauf bzw. in der Krümmung der Verformungskurven, in der Größe der Verformungsarbeit und bei den Ganglinien der Schallemissionen.

Bei zwängungsarmer Krafteinleitung mit schlaffen Druckplatten ist die spezifische Verformungsarbeit der Versuchskörper nahezu unabhängig von der Probekörperschlankheit; bei starren Druckplatten hingegen gilt dies erst für Probekörper mit $h/b \geq 2$. Prismen zeigen bei beiden Druckplattensystemen übereinstimmende Spannungs-Stauchungslinien bei geringerer Schlankheit der Versuchskörper sind die Arbeitslinien aber bei starren Druckplatten stärker, bei schlaf-

fen jedoch weniger stark gekrümmt. Auch die Ganglinien der Schallemissionen unterscheiden sich bei starrer Krafteinleitung umso mehr vom Prismenversuch, je gedrungenere die Probekörper sind; bei schlaffen Druckplatten sind die entsprechenden Unterschiede wesentlich geringer.

12. Schallemissionsmessungen erlauben Rückschlüsse auf die Querdehnungsbehinderung der Versuchskörper. Sie nehmen beim Druckversuch desto gleichmäßiger bis zur Versagensgrenze zu, je weniger die Querdehnung des Probekörpers behindert ist. Bei merklicher Querdehnungsbehinderung sind zunächst nur geringe und erst bei hoher Druckbeanspruchung stark zunehmende Schallemissionen festzustellen.

13. Ein Zusammenhang zwischen spezifischer Verformungsarbeit und der Summenhäufigkeit der Eigengeräusche ist nicht gegeben. Werden z.B. Betonwürfel mit schlaffen Druckplatten geprüft, so steigen die Schallemissionen stärker an, als die spezifische Verformungsarbeit zunimmt; bei Versuchen mit starren Druckplatten ist es umgekehrt (vgl. Bild 10.25).

14. Obwohl beide Krafteinleitungssysteme im Aufbau und in der Wirkungsweise grundlegend verschieden sind und bei den Probekörpern - wie angegeben - teilweise stark unterschiedliche Reaktionen hervorrufen, haben dennoch die Parallelversuche mit starren und schlaffen Druckplatten bei der Bestimmung der kennzeichnenden Schwellen zu übereinstimmenden Ergebnissen geführt. Durch die angegebene Verfahrensweise ist es gelungen, den Einfluß der Prüftechnik auf das Versuchsergebnis praktisch auszuschalten. Die ermittelten Gefügeschwellen (Bild 11.3) sind somit nach der hier (vgl. Abschnitt 3.1) betonten begrifflichen Unterscheidung zwischen Stoff- und Materialverhalten stoffspezifische Kennwerte. Anders als bei lediglich vereinbarten Kennwerten - wie z.B. der $\sigma_{0,2\%}$ -Grenze bei Stahl - wird ihre Größe physikalisch, d.h. durch reale Vorgänge im Betongefüge bestimmt.

15. Zur quantitativen Ermittlung der kennzeichnenden Schwellen werden Auswertmethoden angegeben, die in der Regel von infinitesimalen Änderungen der Verformungsgrößen ausgehen. Soweit möglich wird jede Gefügeschwelle auf mehr als nur einem Wege bestimmt, indem z.B. die Volumenänderung der Probekörper und ergänzend die Änderung der Querdehnzahl ausgewertet wird (vgl. Bilder 5.14 und 10.31).

16. Die neu eingeführte Mikrorißgrenze $\text{mic}\sigma_D$ ergibt sich aus der Lage des Wendepunktes der Spannungs-Stauchungsline bei halblogarithmischer Darstellung. Im Gegensatz zum Scheitelpunkt der Arbeitslinie ist dieser Wendepunkt als Kennwert für das Verhalten von Beton bei Druckbeanspruchung geeignet, da er unabhängig vom Achsenmaßstab des Spannungs-Stauchungsdiagramms ist und sich unmittelbar und eindeutig bestimmen läßt (vgl. Bild 5.11).

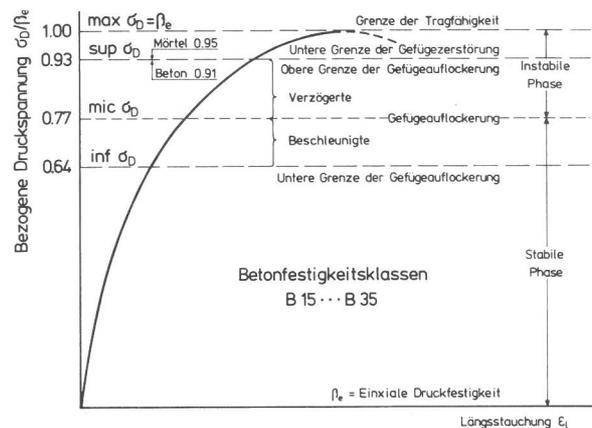


Bild 11.3

Kennzeichnende Schwellen im Widerstandsvermögen der Versuchsbetone gegenüber Druckbeanspruchung

17. Die Mikrorißgrenze liegt bei rd. 3/4 der einaxialen Betondruckfestigkeit β_e . Hinsichtlich der Rissebildungen im Betongefüge trennt sie die stabile von der instabilen Phase. Vorteilhaft ist, daß zur Bestimmung dieser kennzeichnenden Schwelle bereits Messungen der Längsverformungen ausreichen. Es bietet sich an, in weiteren Arbeiten zu untersuchen, welcher Zusammenhang zwischen dieser Schwelle des Kurzzeitversuchs und der Dauerfestigkeit von Beton besteht.

18. Die untere Gefügeschwelle $\text{inf}\sigma_D$ liegt bei rd. 2/3 der einaxialen Betondruckfestigkeit β_e . Sie zeigt beim Druckversuch die obere Grenze des anfänglichen Zustands des Verdichtens an. Unterhalb dieses Schwellenwertes sind praktisch keine schädlichen Rissebildungen im Betongefüge zu erwarten, u.U. zuvor vorhandene Risse - infolge Schwindens o.ä. - sind überdrückt.

19. Die obere Gefügeschwelle $\text{sup}\sigma_D$ liegt im Mittel bei 93 % der einaxialen Betondruckfestigkeit β_e . Bei grobem, stabilem Korngerüst (Kiessand als Zuschlag) liegt dieser Schwellenwert etwas nie-

driger, bei feinem Kornaufbau (wie bei Mörtel) etwas höher. Oberhalb dieser Gefügeschwelle führt ein Zusammenlaufen der vorhandenen Rissebildungen zu einer schnellen Zerstörung des Probekörpers.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, wie der Baustoff Beton in seinem Verhalten bei Druckbeanspruchung nicht nur durch die Angabe des Festigkeitswertes, sondern zusätzlich durch kennzeichnende Schwellenwerte beurteilt werden kann. Wesentlich ist dabei der Bezug auf die "wahre", wie hier vorgeschlagen besser als "einaxial" bezeichnete Betondruckfestigkeit β_e , die unbeeinflusst von den jeweiligen Randbedingungen der Materialprüfung ist und weitgehend den im Bauwerk gegebenen Verhältnissen entspricht. Inwieweit sich die für die vier Versuchsbetone gefundenen Schwellenwerte bei abweichender Betonzusammensetzung in ihrer Größe und relativ zueinander ändern, müssen weitere Untersuchungen zeigen. Diese können mit den erarbeiteten Bestimmungsmethoden zielsicher durchgeführt werden und lassen u.a. neue Erkenntnisse hinsichtlich einer verbesserten Dauerhaftigkeit des Betons durch Anheben der Mikrorißschwelle erwarten. Im Hinblick auf die ständig zunehmende chemische und physikalische Beanspruchung durch Umwelteinflüsse ist dies langfristig für die Gebrauchstauglichkeit von Betonbauten von erheblicher Bedeu-

tung und sollte umfassend erforscht werden.

Auch für mehraxiale Festigkeitsuntersuchungen wird es vorteilhaft sein, den mit der Bestimmung von Gefügeschwellen aufgezeichneten Weg weiter zu führen, um die von Beton ohne Schädigung ertragbaren zwei- und dreiaxialen Druck- und kombinierten Druck-/Zugbeanspruchungen festzustellen. Die Grenzlinien der Tragfähigkeit von Beton bilden dann im Spannungsraum nicht mehr eine Spannungsglocke, die zu hohen Druckspannungen hin offen ist (vgl. Bild 5.2), sondern eine räumlich geschlossene - und für die Baupraxis aussagekräftigere - Spannungsbirne, welche alle für den Zusammenhalt des Betongefüges unschädlichen Kombinationen der drei Hauptspannungen einschließt.

Die kennzeichnenden Schwellen stellen schließlich aber auch Grundlagen dar, mit denen bisherige Erfahrungswerte in den einschlägigen Richtlinien für Betonbauten - wie z.B. die Rechenfestigkeit β_R in DIN 1045 - physikalisch zu begründen sind. Hier bietet sich eine Fortführung der Arbeit über den gesamten Bereich üblicher Betonzusammensetzung an, um z.B. - nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gründen - die bisher den β_R -Werten zugrundeliegenden pauschalen Annahmen zum Zusammenhang zwischen der Widerstandsfähigkeit von Beton im Bauwerk einerseits und bei Probekörpern andererseits zu überprüfen.

Schrifttum

- /A1/ Al-Abidien, H.: Dynamische und statische Querdehnungszahl des Betons in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußfaktoren; Literaturoberwertung und Entwicklung von Modellvorstellungen über Möglichkeiten ihrer Beschreibung und Berechnung im Zweistoffsystem Beton. Dissertation TH Aachen, 1975
- /A2/ Albrecht, W.: Einfluß des Verhältnisses von Probendicke zu Größtkorndurchmesser und Einfluß der Probengröße auf die Betondruckfestigkeit (Literaturoberwertung). beton 17 (1967)5, S.173 - 178
- /A3/ Amthor, D.: Krümmungsverlauf von Funktionen. Referat "Rechentechnik und Datenverarbeitung", Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, 1978 (persönliche Mitteilung)
- /A4/ Atkinson, R. und H. Ko: A multiaxial device for testing rock materials. RILEM-Symposium 1972 "The deformation and the rupture of solids subjected to multiaxial stresses", Cannes, Okt. 1972, Band III, S.33 - 45
- /A5/ Aurich, H.: Beitrag zum Verhältnis der Zylinderdruckfestigkeit zur Würfel Festigkeit von Beton. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 2 (1965), Dyckerhoff Zementwerke AG, Wiesbaden-Amöneburg
- /B1/ Betonstraßen, TV Beton: Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton. Forschungsgesellschaft für den Straßenbau e.V., Ausgabe 11 - 1972
- /B2/ BS1881, Part 4: Methods of testing concrete for strength. British Standards Institution, London, Ausgabe 1970
- /B3/ Béres, L.: Investigation on structural loosening of compressed concrete. Matériaux et Constructions 36 (1967)Sept., S.185 - 190
- /B4/ Béres, L.: Relationship of deformational processes and structure changes in concrete. Conference "Structure, Solid Mechanics and Engineering Design", Southampton 1969. Wiley-Interscience, London 1971, S.643 - 651
- /B5/ Berg, O.: Die Hauptentwicklungsrichtungen der Theorie der Festigkeit und Verformung des Betons. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Dresden, 17 (1968)6, S.1489 - 1496
- /B6/ Berndt, O. und E. Preuss: Versuche zum Vergleich der Würfel Festigkeit des Betons zu der im Bauwerk erzielten Festigkeit. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, Heft 36, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1915
- /B7/ Bertacchi, P. und R. Bellotti: Experimental research on deformation and failure of concrete under triaxial loads. RILEM-Symposium 1972 "La déformation et la rupture des solides soumis à des sollicitations pluriaxiales", Cannes, Okt. 1972, Band I, S.37 - 52
- /B8/ Binns, R. und H. Mygind: The use of electrical resistance strain gauges, and the effect of aggregate size on gauge length in connexion with the testing of concrete. Magazine of Concrete Research 1 (1949)1 Jan., S.35 - 39
- /B9/ Böhm, J. (Übersetzer): Bericht aus der UdSSR zu den physikalischen Grundlagen der Festigkeit keramischer Baustoffe. Die Ziegelindustrie 23 (1970)23/24, S.534 - 536
- /B10/ Bonzel, J.: Zur Gestaltsabhängigkeit der Betondruckfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 54 (1959)9, S.223 - 228 und 10, S.247 - 248
- /B11/ Bonzel, J.: Ein Beitrag zur Verformung des Betons. beton 21 (1971)2, S.57 - 60 und 3, S.105 - 109
- /B12/ Bonzel, J., H. Bub und P. Funk: Erläuterungen zu den Stahlbetonbestimmungen, Band I: DIN 1045 und zugehörige Normen. 7. Auflage, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1972
- /B13/ Brandtzaeg, A.: Failure of a material composed of non-isotropic elements. Trondhjem, I Kommission Hos F. Bruns Bokhandel 1927
- /B14/ Bremer, F.: Festigkeits- und Verformungsverhalten des Betons bei mehrachsiger Beanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau 66 (1971)1, S. 17 - 22
- /B15/ Buchhardt, F.: Zur Anwendung der Relaxationstechnik mit Hilfe finiter Stabelemente bei der Ermittlung des dreiaxialen Spannungszustandes in der Einleitungszone von Spannkräften. Dissertation TU Berlin, 1976
- /B16/ Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Berlin, Fachgruppe 2.1: Mittlere Erfahrungswerte zur Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Probekörper schlankheit
- /C1/ Cordes, R.: Untersuchung zur analytischen Darstellung der Kriechverformung von Baustoffen - insbesondere Beton. Dissertation TH Hannover, 1974
- /D1/ DIN 106 Teil 1: Kalksandsteine; Vollsteine, Lochsteine, Blocksteine. Druckmanuskript Dez. 1978
- /D2/ DIN 1045: Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung. Ausgabe Dez. 1978
- /D3/ DIN 1048 Teil 1: Prüfverfahren für Beton; Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper. Ausgabe Dez. 1978
- /D4/ DIN 18 158: Bodenklinkerplatten. Entwurf Dez. 1976
- /D5/ DIN 51 229V: Formen für würfelförmige und zylindrische Probekörper aus Beton. Ausgabe Nov. 1968
- /D6/ DIN 55 302 Teil 1: Statistische Auswertungsverfahren; Häufigkeitsverteilung, Mittelwert und Streuung; Grundbegriffe und allgemeine Rechenverfahren. Ausgabe Nov. 1970
- /D7/ DIN 66 141: Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen, Grundlagen. Ausgabe Febr. 1974
- /D8/ Danßmann, J.: Entwicklung einer Mosaikdruckplatte zur zwangungsfreien Krafteinleitung. Mitteilung aus der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), (in Vorbereitung)

- /D9/ Dhir, R. und C. Sangha: A study of the relationships between time, strength deformation and fracture of plain concrete. Magazine of Concrete Research 24(1972)81 Dez., S.197 - 208
- /D10/ Dokumentationsstelle für Bautechnik der Fraunhofer-Gesellschaft e.V., Stuttgart, Verzeichnisse N732, N891 und N1865: Einflüsse der Größe und Gestalt der Prüfkörper auf die Druckfestigkeit von Beton und Mörtel (Literaturquellen aus den Jahren 1903 bis 1971)
- /D11/ Dokumentationsstelle für Bautechnik der Fraunhofer-Gesellschaft e.V., Stuttgart, Kurzbericht Nr. 10/76 - 115: Die Beziehung zwischen der Betonfestigkeit des Bauwerks und der an unterschiedlichen, getrennt vom Bauwerk hergestellten Probekörpern ermittelten Festigkeit (Bericht TU München, März 1976)
- /D12/ Dornauer, H. und R. Lewandowski: Nachweis der Betondruckfestigkeit an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge. beton 25(1975)6, S.205 - 208
- /E1/ Edmond, J. und M. Paterson: Volume changes during the deformation of rocks at high pressures. International Journal of Rock Mechanics 9(1972), S.161 - 182
- /E2/ Eibl, J. und G. Iványi: Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton. Teil A: Verhalten der einzelnen Komponenten. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 260, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1976
- /F1/ Făcăoaru, I., M. Tannenbaum und G. Stănculescu: Studies on the deformation and cracking of concrete under uniaxial stress fields. Conference "Structure, Solid Mechanics and Engineering Design", Southampton 1969. Wiley-Interscience, London 1971, S.653 - 666
- /F2/ Föppl, A.: Die Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Art des Spannungszustandes. Mitteilungen aus dem Mechanisch-Technischen Laboratorium der TH München, Heft 27, München 1900, §§ 1 - 10
- /F3/ Freudenthal, A.: Inelastisches Verhalten von Werkstoffen. VEB Verlag Technik, Berlin 1955
- /F4/ Fujii, M.: Bearing capacity of concrete block loaded through flexible plate. RILEM-Symposium "The Deformation and the rupture of solids subjected to multi-axial stresses", Cannes, Okt. 1972, Band III, S.63 - 78
- /G1/ Gaede, K.: Haben größere Betonkörper eine geringere Festigkeit als kleinere? Beton- und Stahlbetonbau 46(1951)3, S.51 - 53
- /G2/ Gaede, K.: Über den Einfluß der Größe der Proben auf die Würfeldruckfestigkeit von Beton. Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 144, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1962
- /G3/ Galan, A.: Die Bildung und Verbreitung von Mikrorissen im Beton bei mittlerer Druck- und Zugbeanspruchung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 17(1968)6, S.1526 - 1528
- /G4/ Gerstle, K., D. Linse, G. Schickert et al.: Strength of concrete under multiaxial stress states. Douglas McHenry International Symposium on concrete and concrete structures, SP - 55 American Concrete Institute, Detroit 1978, S.103 - 131
- /G5/ Gerstle, K., H. Aschl, G. Schickert et al.: Behaviour of concrete under multiaxial stress states. ASCE Annual Convention Okt. 1978, Chicago, Illinois
- /G6/ Glomb, J. und P. Patas: Experimental analysis of the determination of a test specimen as a method of verifying the compressing conditions while testing concrete in multi-way stress conditions. RILEM-Symposium 1972 "La déformation et la rupture des solides soumis à des sollicitations pluri-axiales", Cannes, Okt. 1972, Band III, S.79 - 91
- /G7/ Glücklich, J. und L. Cohen: Size as a factor in the brittle-ductile transition and the strength of some materials. International Journal of Fracture Mechanics 3(1967) Dez., S.278 - 289
- /G8/ Glücklich, J. und L. Cohen: Strain-energy and size effects in a brittle material. Materials Research & Standards 8(1968) Okt., S.17 - 22
- /G9/ Glücklich, J.: The effect of micro-cracking on time dependent deformations and the longterm strength of concrete. Proceedings of the International Conference on the Structure of Concrete, London Sept. 1965. Cement and Concrete Association, London 1968, S.176 - 189
- /G10/ Graf, O.: Über einige Aufgaben der Eisenbetonforschung aus älterer und neuerer Zeit. Beton und Eisen 33(1934)11, S.165 - 173
- /G11/ Graf, U. und H.-J. Henning: Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik. Springer-Verlag, Berlin 1958
- /G12/ Graf, U., H.-J. Henning und P.-T. Wilrich: Methoden bei textilen Untersuchungen. Zweite Auflage, Springer Verlag, Berlin 1974
- /G13/ Gugelmann, B.: Dehnungsmessungen an druckbeanspruchten Mörtel- und Betonzylindern. Material und Technik 5(1977)4, S.182 - 189
- /H1/ Hansen, H., S. Thaulow et al.: Compressive strength of concrete - cube or cylinder? RILEM Bulletin 17(1962) Dez., S.23 - 30
- /H2/ Hawkes, I. und M. Mellor: Uniaxial testing in rock mechanics laboratories. Engineering Geology 4(1970)3, S.177 - 285
- /H3/ Hawkins, N. M.: The bearing strength of concrete loaded through rigid plates. Magazine of Concrete Research 20(1968)62 März, S.31 - 40
- /H4/ Hawkins, N. M.: The bearing strength of concrete loaded through flexible plates. Magazine of Concrete Research 20(1968)63 Juni, S.95 - 102
- /H5/ Hawkins, N. M.: The bearing strength of concrete for strip loadings. Magazine of Concrete Research 22(1970)71 Juni, S.87 - 98
- /H6/ Henzel, J., J. Spitzner und W. Freitag: Einflüsse auf die Ergebnisse bei Druck-

- festigkeitsprüfungen. Mitteilungen aus dem Institut für Massivbau, Heft 12, TH Darmstadt, 1966
- /H7/ Hermann, V.: Spannungs-Dehnungs-Linien von Leichtbeton. Dissertation TH Aachen, 1977
- /H8/ L'Hermite, R.: Idées actuelles sur la technologie du béton; la rupture du béton. RILEM Bulletin (1954)18, S.27 - 39
- /H9/ Hillemeier, B.: Bruchmechanische Untersuchungen des Rißfortschritts in zementgebundenen Werkstoffen. Dissertation TH Karlsruhe, 1976
- /H10/ Hilsdorf, H.: Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit des Betons. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 173, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1965
- /H11/ Hobbs, D.: Strength and deformation of concrete under short-term loading. Dissertation University of Surrey, 1973
- /H12/ Hodgson, K. und G. Cook: The effects of size and stress gradient on the strength of rock. Proceedings of the Second Congress of the International Society of Rock Mechanics, Beograd, 21 - 26 Sept., 1970; Volume II, Theme 3, S.31 - 34
- /H13/ Holliday, L. (Herausgeber): Composite Materials, Chapter VIII "Concrete Systems". Elsevier Publishing Company, Amsterdam 1966
- /H14/ Hughes, B. und B. Bahramian: Cube tests and the uniaxial compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research 17(1965)53 Dez., S.177 - 182
- /H15/ Hughes, B. und B. Bahramian: Some factors affecting the compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research 19(1967)60 Sept., S.165 - 172
- /H16/ Hsu, T., F. Slate, G. Sturman und G. Winter: Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain diagram. ACI Journal 60(1963)2, S.209 - 224
- /H17/ Hütter, A. und F. Paul: Konstruktion und Arbeitsweise einer 4905 kN-(500Mp-)Dreiaxialprüfmaschine. die Technik 32(1977)1, S.35 - 38
- /I1/ ISO 1920: Concrete tests; dimensions, tolerances and applicability of test specimens. Ausgabe 1976
- /I2/ ISO 3893: Concrete, classification by compressive strength. Ausgabe 1977-07-01
- /I3/ Institut für Bautechnik: Muster für einen Ergänzungserlaß zu DIN 1045 - Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung - . Mitteilungen IfBt 4/1978, S.99
- /I4/ Iványi, G.: Zugfestigkeit von Beton in örtlich veränderlichen Beanspruchungszuständen. Intitut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau, TU Braunschweig, 1976
- /J1/ Jordaan, I. und J. Illston: A creep rig for testing concrete under multiaxial compressive stress. Magazine of Concrete Research 20(1968)65 Dez., S.235 - 239
- /K1/ Kaplan, M.: The application of fracture mechanics for concrete. Proceedings of the International Conference on the Structure of Concrete, London Sept. 1965. Cement and Concrete Association, London 1968, S.169 - 175
- /K2/ Kesler, C.: Effect of length to diameter ratio on compressive strength. Proceedings ASTM 59(1959), S.1216 - 1229
- /K3/ Klink, S.: Axial strain variations in concrete under uniform uniaxial compressive stress. Cement and Concrete Research 5(1975)5, S.405 - 418
- /K4/ Ko, H. und R. Scott: A new soil testing apparatus. Géotechnique 17(1967)1, S.40 - 57
- /K5/ Krause, K.: Über den Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf den Elastizitätsmodul des Mörtels und Betons. Dissertation TH Aachen, 1973
- /K6/ Kreiskorte, H. und W. Funk: Die Simulation einer "harten" Werkstoffprüfmaschine zur Lösung einiger Probleme bei Festigkeitsuntersuchungen. Materialprüfung 12(1970)1, S.1 - 6
- /K7/ Kuczynski, W.: La résistance du béton étudiée sur des éprouvettes de différentes formes et de diverses dimensions. RILEM Bulletin (1960)8, S.77 - 92
- /K8/ Kupfer, H.: Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 229, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1973
- /L1/ Launay, P., H. Gachon und P. Poitevin: Déformation et résistance ultime du béton sous étreinte triaxiale. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 23(1970)269, S.21 - 48
- /L2/ Lewandowski, R.: Beziehungen zwischen Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit des Betons. Betonstein-Zeitung 37(1971)9, S.562 - 566
- /L3/ Lewicki, B.: Die Beziehungen zwischen der Festigkeit des Betons im Bauwerk, der Rechenfestigkeit und der Probekörperfestigkeit unter Berücksichtigung der Streuung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 17(1968)6, S.1497 - 1507
- /L4/ Lindner, A.: Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure, Vierte Auflage, Birkhäuser Verlag, Basel 1964, S.106 - 111
- /L5/ Linse, D.: Lösung versuchstechnischer Fragen bei der Ermittlung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Beton unter dreiachsiger Beanspruchung. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 292, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1978
- /L6/ Lusche, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 39, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1972
- /M1/ Mängel, S.: Beitrag zur Prüfung von Betonwürfeln. Betonstein-Zeitung 34(1968)4, S.197 - 200
- /M2/ Manns, W.: Elastizitätsmodul von Zement-

- stein und Beton. beton 20(1970)9, S.401 - 405 und 10, S.455 - 460
- /M3/ Müller, K.: Der Einfluß der Meßlänge auf die Ergebnisse bei Dehnmessungen an Beton. beton 14(1964)5, S.205 - 208
- /M4/ Müller-Rochholz, J.: Influence of coupling, path length and surface condition on ultrasonic pulse velocity measurements. Proceedings of the 2nd International RILEM-Symposium on "New developments in non-destructive testing of non-metallic materials", Constanța, Rumania Sept. 1974, Band II, S.83 - 90
- /M5/ Murdock, J. und C. Kesler: Effect of length to diameter ratio of specimen on the apparent strength of concrete. ASTM Bulletin (1957)221, S.68 - 73 (TP76 - TP81)
- /N1/ NBN, B 15-220: Proeven op Beton, Drukproef. Belgische Norm, Ausgabe Febr. 1970
- /N2/ NEN 2489: Metselbaksteen. Nederlandse Norm, Ausgabe Okt. 1976
- /N3/ Nakagawa, K., S. Kobayashi und Y. Niwa: Study of progressive failure of concrete specimen in uniaxial compression. Proceedings International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, Kyoto 1971. Society of Materials Science (1972)IV, S.32 - 42
- /N4/ Natau, O.: Grundlagenuntersuchungen über die Anwendbarkeit der Kompensationsmethode im Bohrloch mit Hilfe von zweiachsig beanspruchten Prüfkörperplatten. Dissertation TH Clausthal, 1967
- /N5/ Naus, D.: An overview of experimental results obtained under the prestressed concrete nuclear pressure vessel development program at the Oak Ridge National Laboratory. IAEA specialists meeting on vessel concepts for gas cooled reactors. Lausanne, Okt. 1978
- /N6/ Neville, A.: The influence of size of concrete test cubes on mean strength and standard deviation. Magazine of Concrete Research 8(1956) Aug., S.101 - 110
- /N7/ Neville, A.: A general relation for strengths of concrete specimens of different shapes and sizes. Journal of the American Concrete Institute 63(1966)10, S.1095 - 1109
- /N8/ Newman, K., L. Lachance und R. Loveday: Strain measurements on saturated concrete specimens. Magazine of Concrete Research 15(1963)45 Nov., S.143 - 150
- /N9/ Newman, K. und L. Lachance: The testing of brittle materials under uniform uniaxial compressive stress. Proceedings of the American Society for Testing and Materials (1964), S.1044 - 1067
- /N10/ Newman, K.: Concrete control tests as measures of the properties of concrete. Symposium on concrete quality, Session 6, London 1964, Cement and Concrete Ass. London 1966, S.120 - 138
- /N11/ Newman, K. und O. Sigvaldason: Testing machine and specimen characteristics and their effect on the mode of deformation, failure and strength of materials. Proceedings of the International Conference on the Structure of Concrete, London Sept. 1965. Institut Mech. Eng. 180(1966) Part 3 A, S.399 - 410
- /N12/ Newman, K. und J. Newman: Failure theories and design criteria for plain concrete. Conference "Structure, Solid Mechanics and Engineering Design", Southampton 1969. Wiley-Interscience, London 1971, S.963 - 995
- /P1/ Petersons, N.: Recommendations for estimation of quality of concrete in finished structures (Ergebnisse eines joint committee CEB-CIB-FIP-RILEM, Leitung H. Rüschi). Matériaux et Constructions 4(1971)24, S.379 - 397
- /P2/ Pilny, F.: Die Kraftwirkungslinie beim Druckversuch. Die Bautechnik 36(1959)1, S.7 - 11
- /P3/ Pilny, F.: Betondehnung durch Feuchtigkeit. Zement und Beton 9(1964)30 Dez., 9 Seiten
- /P4/ Pilny, F.: Die Wechselwirkung zwischen Normung und Entwicklung bei Prüfmaschinen. RILEM-Symposium "Die Entwicklung der Prüfmaschinen für die Werkstoffprüfung im Bauwesen", Stuttgart 1968, Schlußbericht Band 1, 20 Seiten
- /P5/ Pilny, F.: Der Einsatz von mechanischen und elektrischen Dehnungsmeßgeräten bei Ingenieurbauwerken. Stahlbau und Baustatik (Herausgeber K. Sattler), Springer-Verlag, Wien 1965, S.169 - 185
- /P6/ Popovics, S.: Relations between various strengths of concrete. Highway Research Board Washington D.C., (1967)210, S.67 - 94
- /R1/ Rasch, C.: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons und Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei konstanter Dehngeschwindigkeit. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 154, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1962
- /R2/ Read, J.: Discussion on article by Newman and Lachance "Strain measurements on saturated concrete specimens". Magazine of Concrete Research 16(1964)49 Dez., S.243 - 244
- /R3/ Renner, E.: Mathematisch-statistische Methoden in der praktischen Anwendung. Verlag Paul Parey, Berlin 1970
- /R4/ Richart, F., A. Brandtzaeg und R. Brown: The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression. University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin Nr. 190, 1929
- /R5/ Riedel, F.: Über die Grundlagen zur Ermittlung des Arbeitsbedarfes beim Schmieden unter der Presse. Zeitschrift Verein deutscher Ingenieure, 22(1913)57, S.845 - 851
- /R6/ Riedler, W.: Bestimmung der Stoffkonstanten eines stark flexibilisierten isotropen, inkompressiblen, viskoelastischen Kunststoffes bei besonderer Berücksichtigung endlich großer Verformungen. Schriftenreihe der Amtlichen Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bau-

- wesen, Universität Stuttgart, Heft 60, Stuttgart 1973
- /R7/ RILEM commission for concrete: Coefficients de correspondance entre les resistances de differents types d'éprouvettes. Bulletin RILEM No 39(1957), S.81 - 105 und neue Serie No 12(1961), S.155 - 156
- /R8/ Röbert, S.: Zur Unterscheidung elementarer Arten der Betonfestigkeit. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 17(1970)1, S.1 - 3
- /R9/ Rohrbach, Chr.: Spannungs- und Dehnungsmessungen an Beton. Archiv für Technisches Messen, Lieferung 318(1962), Verlag R. Oldenbourg, München, S.159 - 160
- /R10/ Roš, M. und A. Eichinger: Die Bruchgefahr fester Körper. Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, Zürich 1949
- /R11/ Rüschi, H.: Specimen size and apparent compressive strength. ACI Journal 50(1954)5, S.803 - 804
- /R12/ Rüschi, H.: Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone. Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 120, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1955
- /R13/ Rüschi, H.: Betrachtungen zur Prüfung der Betonfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 51(1956)6, S.135 - 138
- /R14/ Rüschi, H.: Physikalische Fragen der Betonprüfung. Zement-Kalk-Gips 12(1959)1, S.1 - 9
- /R15/ Rüschi, H.: Der Einfluß der Deformationseigenschaften des Betons auf den Spannungsverlauf. Schweizerische Bauzeitung 77(1959)9, S.119 - 126
- /S1/ Sachs, L.: Angewandte Statistik; Vierte Auflage. Springer-Verlag, Berlin 1974, S.209 - 214
- /S2/ Sabnis, G. und S. Aroni: Size effects in material systems, the state of the art. Conference "Structure, Solid mechanics and Engineering Design", Southampton 1969. Wiley-Interscience, London 1971, S.131 - 142
- /S3/ Sangha, C. und R. Dhir: Strength and complete stress-strain relationship for concrete tested in uniaxial compression under different test conditions. Matériaux et constructions 5(1972)30, S.361 - 370
- /S4/ Starovisky, P.: Response of concrete to multiaxial compression. Thesis University of Colorado, 1976
- /S5/ Sasse, R.: Zum Problem des Bruchverhaltens betonähnlicher Zweistoffsysteme. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2192. Westdeutscher Verlag, Opladen 1971
- /S6/ Schickert, G.: On the influence of different load application techniques on the lateral strain and fracture of concrete specimens. Cement and Concrete Research 3(1973)4, S.487 - 494. Auch: Dritte Internationale Tagung über den Bruch, München, April 1973, Tagungsbericht Teil X Nr. 242
- /S7/ Schickert, G. und D. Weber: Ermittlung der Druckfestigkeit dünner Betonproben. Wissenschaftliche Berichte aus der Arbeit der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 1973.
- /S8/ Schickert, G.: Acoustic emission technique applied to tests with concrete cubes. Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium on "New developments in non-destructive testing of non-metallic materials", Constanța, Rumania Sept. 1974, Band II, S.5 - 11
- /S9/ Schickert, G.: Verformungsverhalten von Betonproben für Spannbeton-Reaktordruckbehälter: Abzielen der Lasteintragung auf gleichmäßige Spannungsverteilung oder auf gleichmäßige Dehnungsverteilung? Preprints of the 2nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, Germany, 10. bis 14. September, 1973, Suppl. Vol. 6A, H.1/5, 11 Seiten
- /S10/ Schickert, G. und H. Winkler: Vergleichende Untersuchungen mit Systemen zur zwängungsfreien Krafteinleitung in Betonproben. Kolloquium Arbeitskreis Spannbeton-Reaktordruckbehälter, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Düsseldorf, Febr. 1974
- /S11/ Schickert, G.: Zur Frage der Verlässlichkeit der Ergebnisse von Betonprüfungen. Amts- und Mitteilungsblatt BAM 4(1974)3, S.106 - 111
- /S12/ Schickert, G. und H. Winkler: Untersuchungsergebnisse zum mehraxialen Bruch- und Verformungsverhalten von Betonwürfeln. Berichterstattung über das vom Bundesminister für Forschung und Technologie geförderte Projekt "Forschung und Entwicklung für Spannbeton-Reaktordruckbehälter", Berlin Oktober 1975, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Vortragsband Nr. 3, 24 Seiten
- /S13/ Schickert, G. und H. Winkler: Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 277, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1977
- /S14/ Schickert, G. und R. Rackwitz: Statistische Untersuchungen zum Qualitätsangebot bei Beton für vorwiegend kleine und mittelgroße Baustellen. beton 27(1977)7, S.277 - 281
- /S15/ Schlee, W.: Theorie und Praxis bei der Druckfestigkeitsprüfung. beton 25(1975)4, S.132 - 138
- /S16/ Schlee, W.: Die Spannungszustände in den Versuchskörpern zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 70(1975)8, S.194 - 201
- /S17/ Shah, S. und S. Chandra: Critical stress, volume change and microcracking of concrete. ACI Journal 65(1968)9, S.770 - 781
- /S18/ Shah, S.: Micromechanics of concrete and fibre reinforced concrete. Conference "Structure, Solid Mechanics and Engineer-

- ing Design", Southampton 1969. Wiley-Interscience, London 1971, S.367 - 376
- /S19/ Sigvaldason, O.: The influence of testing machine characteristics upon the cube and cylinder strength of concrete. Magazine of Concrete Research 18(1966)57 Dez., S.197 - 206
- /S20/ Sparks, P. und J. Menzies: The effect of rate of loading upon the static and fatigue strength of plain concrete in compression. Magazine of Concrete Research 25(1973)83 Juni, S.73 - 80
- /S21/ Špetla, Z. und V. Kadleček: Einfluß der Schlankheit, Größe und Gestalt der Probekörper auf die Zugfestigkeit des Betons. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Dresden 17(1968)6, S.1552 - 1554
- /S22/ Spooner, D.: The stress-strain relationship for hardened cement pastes in compression. Magazine of Concrete Research 24(1972)79 Juni, S.85 - 92
- /S23/ Spooner, D.: A dilatometer for measuring the volume changes of concrete under load. Magazine of Concrete Research 25(1973)84 Sept., S.173 - 176
- /S24/ Spooner, D. und J. Dougill: A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading. Magazine of Concrete Research 27(1975)92 Sept., S.151 - 160
- /S25/ Stahlberg, R.: Untersuchungen von Bruchmechanismen an Eis und Holz. Materialprüfung 20(1978)3, S.126 - 130
- /S26/ Stein, S.: An improved multiaxial cubical cell and its application to the testing of anisotrope materials. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Colorado, Boulder, Colorado, U.S.A.
- /S27/ Stöckl, S.: Das unterschiedliche Verformungsverhalten der Rand- und Kernzonen von Beton. Schriftenreihe Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Heft 185, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1966
- /S28/ Symons, I.: The effect of size and shape of specimen upon the unconfined compressive strength of cement-stabilized materials. Magazine of Concrete Research 22(1970)70 März, S.45 - 50
- /T1/ Taylor, M. und B. Patel: The influence of path dependency and moisture conditions on the biaxial compression envelope for normal weight concrete. Title No.71 - 44, ACI Journal 71(1974)12, S.627 - 633
- /T2/ TBE-Arbeitsgemeinschaft: Empfehlungen für die Bemessung und Ausführung von Mauerwerk. Schriftenreihe Ziegel, Heft 85, Forschungsstelle des Bundesverbandes der Deutschen Ziegelindustrie e.V., Bonn 1977
- /T3/ Thaulow, S.: Apparent compressive strength of concrete as affected by height of test specimen and friction between loading surfaces. RILEM Bulletin (1962)17 Dez., S.31 - 33
- /T4/ Torrent, R.: The log-normal distribution: A better fitness for the results of mechanical testing of materials. Matériaux et Constructions 11(1978)64, S.235 - 245
- /U1/ Uppal, J. und K. Kemp: An instability theory of failure for concrete. Magazine of Concrete Research 25(1973)83 März, S.21 - 30
- /W1/ Walz, K.: Gestaltfestigkeit von Betonkörpern. Schriftenreihe Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Heft 122, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1957
- /W2/ Walz, K.: Beton- und Zementdruckfestigkeiten in den USA und ihre Umrechnung auf deutsche Prüfwerte. beton 12(1962)10, S.463 - 466
- /W3/ Walz, K., J. Bonzel und G. Baum: Versuche mit Leichtbeton hoher Festigkeit. beton 15(1965)2, S.59 - 65 und 3, S.107 - 114
- /W4/ Wang, P., S. Shah und A. Naaman: Stress-strain curves of normal and lightweight concrete in compression. Title No.75 - 62, ACI Journal 75(1978)11, S.603 - 611
- /W5/ Weber, D. und E. Porzig: Untersuchungen zur Druckfestigkeit zementverfestigter Sande. Bericht aus der Arbeit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), (in Vorbereitung)
- /W6/ Weibull, W.: A statistical theory of the strength of materials. Ingeniörs Vetenskaps Akademien, Handlingar (Proceedings) Nr. 151(1939), S.1 - 45
- /W7/ Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Band 2: Nichtmetallisch-anorganische Stoffe, Beton, Mauerwerk. Bauverlag GmbH, Berlin 1974
- /W8/ Winkler, H.: Einfluß der Prüfeinrichtung bei mehraxialen Untersuchungen, (in Vorbereitung)
- /W9/ Wischers, G. und M. Lusche: Einfluß der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton. beton 22(1972)8, S.343 - 347 und 9, S.397 - 403
- /W10/ Wischers, G. und J. Dahms: Festigkeitsentwicklung des Betons. Zement-Taschenbuch 1974/75, Verein Deutscher Zementwerke, Bauverlag GmbH, Berlin, S.285 - 312
- /W11/ Wischers, G.: Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchungen auf Beton. beton 28(1978)2, S.63 - 67 und 3, S.93 - 103
- /Z1/ Zein, M.: Studie über das Bruchverhalten des Betons unter Zug- und Druckbeanspruchungen. Dissertation TH Zürich, 1974 (Bericht Nr. 200 der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA), Dübendorf 1974)
- /Z2/ Zelger, C.: Normung der Druckplatten für die Würfelprüfung. RILEM-Symposium "Die Entwicklung der Prüfmaschinen für die Werkstoffprüfung im Bauwesen", Stuttgart März 1968, Schlußbericht Band II, Topic IV, C1 - C14

Schlankeit h/b des Probe- körpers	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
	Verhältnismerte der Betondruckfestigkeit (Formfaktoren) bezogen auf die Druckfestigkeit eines Probekörpers der Schlankeit h/b=1								
	Vorschlag Bonzel		BS 1881 (1970)	TV Beton (11-1972)	NBN B 15-220 (2-1970)	NEN 2489 (10-1976)	BAM		
	Beton weniger fest	Beton hochfest					Mittlere Erfahrungs- werte	Untersuchungen Bodenvermörtelungen	
						Sand fein		Sand grob	
0.25					2.150				
0.35					1.704	1.913			
0.50	1.667	1.273			1.375	1.580	1.560		
0.67	1.250	1.118		1.120	1.183	1.320	1.220		
0.75	1.160	1.075		1.085	1.123	1.225	1.140	1.140	1.215
0.80	1.120	1.058		1.070	1.092	1.172	1.100	1.095	1.160
0.90	1.050	1.022		1.030	1.041	1.079	1.033	1.038	1.061
1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.15	0.950	0.970	0.987	0.958	0.952		0.955	0.958	0.959
1.25	0.925	0.955	0.979	0.933	0.927		0.930	0.940	0.940
1.35	0.905	0.941	0.970	0.910	0.905		0.915		
1.50	0.883	0.927	0.958	0.880	0.879		0.900		
2.00	0.833	0.909	0.920	0.850	0.819		0.858		
2.50	0.805	0.900			0.784		0.837		
3.00	0.783	0.891			0.760		0.830		
3.50	0.765	0.883			0.744		0.830		
4.00	0.742	0.855			0.732		0.830		

Bild A1

Verhältnismerte von Betondruckfestigkeiten unterschiedlich schlanker Probekörper
(Literaturquellen ① bis ⑨ siehe Bild 4.4 im Hauptteil)

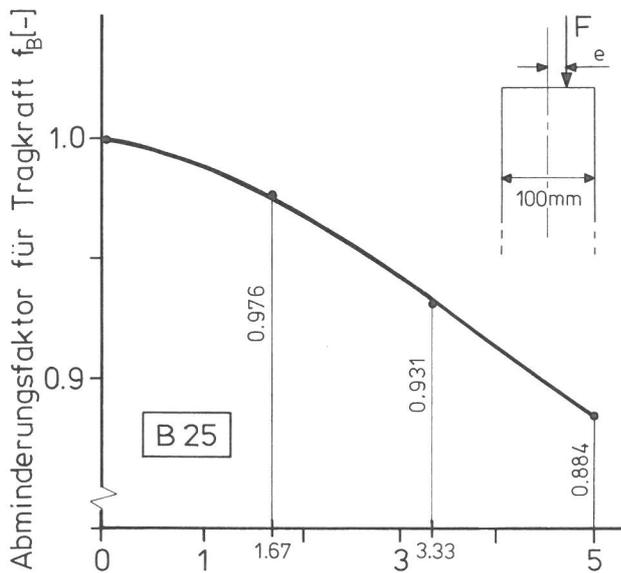


Bild A2

Einfluß exzentrischer
Kraftwirkung auf die er-
mittelte Betondruck-
festigkeit
(Auszug aus Bild 42 in
/R12/)

Einseitige Exzentrizität e der Kraft-
wirkungslinie [mm]

Beton bzw. Mörtel				Versuchsserie		Anzahl 200 mm- Würfel (Güte- prüfung)	Probekörper für Versuchsprogramm			Verwendung der Versuchsserie bzw. Zielgrößen		
Nr. der Rezeptur	Beton- festig- keits- klasse	Zuschlag- Größtkorn	Kurzbe- zeichnung	Nr.	hergestellt am		Anzahl	Höhen [mm] +)	Krafteinleitung über starre schlaffe Druckplatten			
1	B25	16mm	B25/16	1	8.10.74	3	18	100...400	•	Vorversuche		
				2	10.10.74	3	36	25...200	•			
				3	15.10.74	3	18	100...400	•		β_D, ϵ_1, L_E	
				4	17.10.74	3	36	25...200	•		$\beta_D, \epsilon_1, \epsilon_q, V_S, V_D$	
				5	22.10.74	3	18	100...400			o	β_D, ϵ_1, L_E
				6	24.10.74	3	36	25...200			o	β_D, ϵ_1, L_E
				7	12.11.74	3	18	100...400			o	$\beta_D, \epsilon_1, \epsilon_q, V_S, V_D$
				8	14.11.74	3	36	25...200			o	β_D, ϵ_1, L_E
2	B25	4mm	B25/04	9	18.11.74	3	18	100...400	•	β_D, ϵ_1, L_E		
				10	21.11.74	3	36	25...200	•			
				11	3.12.74	3	18	100...400	•		$\beta_D, \epsilon_1, \epsilon_q, V_S, V_D$	
				12	5.12.74	3	36	25...200	•		β_D, ϵ_1, L_E	
				13	10.12.74	3	18	100...400			o	$\beta_D, \epsilon_1, \epsilon_q, V_S, V_D$
				14	12.12.74	3	36	25...200			o	β_D, ϵ_1, L_E
				15	17.12.74	3	18	100...400			o	$\beta_D, \epsilon_1, \epsilon_q, V_S, V_D$
				16	19.12.74	3	36	25...200			o	β_D, ϵ_1, L_E
1	B25	16mm	B25/16	17	7.01.75	3	30	100	•	Einfluß Verdichten des Frischbetons		
				18	9.01.75	3	30	100	•			
4	B35	16mm	B35/16	19	14.01.75	3	18	100...400	•	Druckfestigkeit β_D Längsstauchung ϵ_1 Querdehnung ϵ_q Bauchung V_S Deformation V_D Schallemission L_E		
				20	16.01.75	3	36	25...200	•			
				21	21.01.75	3	18	100...400			o	
				22	28.01.75	3	36	25...200			o	
3	B15	4mm	B15/04	23	11.02.75	3	18	100...400		o		
				24	18.02.75	3	36	25...200		o		
				25	25.02.75	3	18	100...400	•			
				26	4.03.75	3	36	25...200	•			
1	B25	16mm	B25/16	27	10.03.75	3	18	100...400	•	β_D, ϵ_1, L_E		
				28	18.03.75	3	36	25...200	•			
				29	25.03.75	3	48	25...100	•		o	Einfluß der Kraftregelung
				z1	18.11.74	6	21	100	•			
2	B25	4mm	B25/04	z2	21.11.74	6	21	100	•	Festigkeitsentwicklung mit dem Alter		
3	B15	4mm	B15/04	z3	11.02.75	6	21	100	•			
4	B35	16mm	B35/16	z4	13.02.75	6	21	100	•			

+) Querschnitt in allen Fällen 100mm x 100mm

Bild A3

Übersicht über Anzahl Probekörper sowie Herstellung und Verwendung der 33 Serien des Versuchsprogramms

Versuchsmaterial:	50kg Zement PZ 450 F "Dyckerhoff Mark II"		
	Repräsentative Probe entnommen aus 5 Lagerbehältern, anschließend in geschlossenem Gefäß durch rollen homogenisiert.		
Chemische Analyse			
Bestandteile		Masseanteile in %	
		Analyse	glühverlustfrei
Magnetisierbare Bestandteile		fehlen	
Glühverlust (1000°C) darin enthalten Kohlendioxid		1.23	
	CO ₂	0.61	
Unlöslicher Rückstand		0.46	0.47
Siliciumdioxid	SiO ₂	20.23	20.48
Eisenoxid	Fe ₂ O ₃	2.09	2.12
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	5.46	5.53
Titandioxid	TiO ₂	0.08	0.08
Manganoxid	Mn ₂ O ₃	0.08	0.08
Calciumoxid	CaO	64.50	65.30
Magnesiumoxid	MgO	1.32	1.34
Kaliumoxid	K ₂ O	0.94	0.95
Natriumoxid	Na ₂ O	0.13	0.13
Sulfat	SO ₃	3.02	3.06
entsprechend Calciumsulfat	CaSO ₄	5.13	5.20
Sulfid	S	-	-
Chlorid	Cl ⁻	<0.01	<0.01
Rest (nicht bestimmt)		0.46	0.47
Potentielle Phasenzusammensetzung		C ₃ S	61.3
		C ₂ S	12.5
		C ₃ A	11.1
		C ₄ AF	6.5
Silikatmodul = $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = 2.7$			
Tonerdemodul = $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 2.6$			
Kalkstandard = $\frac{100(\text{CaO} - 0.70 \text{SO}_3)}{2.80 \text{SiO}_2 + 1.18 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{Fe}_2\text{O}_3} = 96.8$			

Bild A4

Zusammensetzung des verwendeten Portlandzements

Versuchsmaterial:		50kg Zement PZ 450 F "Dyckerhoff Mark II" Repräsentative Probe entnommen aus 5 Lagerbehältern, anschließend in geschlossenem Gefäß durch rollen homogenisiert.									
Technologische Prüfungen											
Eigenschaft		Prüfverfahren nach DIN 1164 bzw. Art des Prüfgerätes		Prüfungsergebnis							
Mahlfeinheit	Dichte	Luft-Pyknometer		3.09 g/cm ³							
	Sieb- rückstand	Prüfsiebgewebe 0.2mm DIN 4188		0.13% bezogen auf die Masse							
	Spezifische Oberfläche	Luftdurchlässigkeits- verfahren (Blaine)		3650 cm ² /g							
Sieblinie (Rückstände R in % bezogen auf die Masse)		Fliehkraft- Windsichter		d [µm]	2.5	5	10	20	30	50	65
				R in %	86.4	82.6	69.0	45.5	31.4	15.4	7.6
		Auswertungen im Körnungsnetz		Gleichmäßigkeitskoeffizient n=1.04 Korngrößenkennwert d'=26µm							
Abbindezeiten		Nadelgerät		Erstarrungsbeginn: 124 min Erstarrungsende: 178 min							
Raumbeständigkeit		Kochversuch		Probekörper: eben, scharfkantig, rissefrei							
		Kaltwasserlagerung		Nach 28 Tagen keine negativen Veränderungen							
Ausbreitmaß		Mörtelmischung		175mm							
Rohdichte, Biegezug- und Druckfestigkeit (ρ_R, β_B und β_D)		Mörtelprismen 40mm×40mm×160mm (je Altersstufe 9 Probekörper)		Prüfalter in Tagen							
				-	2	7	28	56	70	90	
				ρ_R [kg/dm ³]	2.30	2.32	2.32	2.32	2.34	2.33	
				β_B [N/mm ²]	6.5	8.5	9.3	9.3	9.4	9.4	
				β_D [N/mm ²]	32.7	47.4	56.7	61.1	62.8	65.5	

Bild A5
Eigenschaften des verwendeten Portlandzements

Betonmischung		Zuschlag- Größtkorn [mm]	Korn- Rohdichte [kg/dm ³]	Siebdurchgang in Prozent bezogen auf die Masse						Körnungs- ziffer k
Rezeptur Nr.	Beton- festigkeits- klasse			Maschen-bzw. Lochweite in mm						
		0.25	1	2	4	8	16			
1	B25	16	2.62	6.0	32.2	42.2	55.8	75.8	100.0	3.69
2	B25	4		15.0	60.0	80.0	100.0	100.0	100.0	1.83
3	B15	4		15.0	60.0	80.0	100.0	100.0	100.0	1.83
4	B35	16		6.0	32.0	42.0	56.0	76.0	100.0	3.69
Betonzusatzstoff (Quarzmehl "Silicit")				Korngröße in µm						-
				-	-	50	100	250	500	
				-	-	31.8	58.8	91.2	100.0	

Bild A6
Sieblinien des zur Herstellung der Mörtel- und Betonmischungen verwendeten Kies- (Sand-) Zuschlags

Serie Nr.	Beton- festig- keits- klasse	Zuschlag- Größtkorn [mm]	Verdichtungs- maß nach Walz	Frischbeton-Rohdichte [kg/dm³]					
				Würfel 200mm +)	Blockform				
				A	B	C	D	E	
1	B25	16	1.07	2.32	2.30	2.30	2.29	2.29	2.29
2			1.09	2.35	2.32	2.30	2.29	2.29	2.30
3			1.06	2.30	2.28	2.29	2.28	2.27	2.30
4			1.07	2.31	2.29	2.28	2.27	2.26	2.26
5			1.07	2.32	2.26	2.27	2.26	2.26	2.27
6			1.06	2.33	2.26	2.27	2.25	2.23	2.27
7			1.07	2.32	2.29	2.29	2.28	2.26	2.29
8			1.07	2.30	2.29	2.30	2.30	2.27	2.29
9	B25	4	1.03	2.24	2.18	2.18	2.18	2.17	2.18
10			1.03	2.21	2.15	2.17	2.17	2.15	2.18
11			1.03	2.21	2.15	2.17	2.15	2.16	2.18
12			1.03	2.25	2.17	2.19	2.17	2.18	2.21
13			1.03	2.22	2.18	2.18	2.17	2.18	2.18
14			1.03	2.22	2.18	2.19	2.18	2.16	2.19
15			1.03	2.21	2.15	2.13	2.13	2.15	2.20
16			1.03	2.23	2.17	2.17	2.15	2.16	2.19
17	1.03	2.24	2.18	2.18	2.18	2.17	2.18		
18	B25	16	1.08	2.30	2.27	2.27	2.27	2.25	2.30
19	B35	16	1.04	2.35	2.30	2.31	2.31	2.32	2.30
20			1.06	2.33	2.29	2.29	2.30	2.28	2.30
21			1.04	2.30	2.29	2.29	2.28	2.26	2.29
22	B15	4	1.05	2.33	2.28	2.30	2.29	2.29	2.29
23			1.04	2.21	2.15	2.15	2.15	2.13	2.16
24			1.04	2.24	2.18	2.17	2.17	2.17	2.18
25			1.04	2.20	2.17	2.17	2.16	2.15	2.17
26	B25	16	1.05	2.20	2.15	2.15	2.15	2.14	2.17
27			1.11	2.32	2.29	2.30	2.29	2.26	2.27
28			1.08	2.32	2.28	2.29	2.29	2.28	2.29

+) Mittelwert aus 3 Messungen

Bild A7

Ergebnisse der Frischbetonprüfungen (Betonierzeitraum 8.10.1974 bis 18.3.1975)

Serie Nr.	Beton- festig- keits- klasse	Zuschlag- Größtkorn [mm]	Festbeton-Rohdichte [kg/dm³]				Druckfestigkeit [N/mm²]			
			ρ_{R28}		ρ_{Rm}	β_{W28}		β_{Wm}		
1	B25	16	2.25	2.25	2.26	2.25	31.6	31.2	30.9	31.2
2			2.28	2.28	2.28	2.28	34.4	32.4	32.2	33.0
3			2.28	2.28	2.28	2.28	29.9	30.2	31.6	30.6
4			2.25	2.25	2.25	2.25	27.5	28.5	27.8	27.9
5			2.26	2.26	2.25	2.26	27.9	28.3	27.4	27.9
6			2.25	2.25	2.25	2.25	29.2	28.6	29.2	29.0
7			2.25	2.28	2.25	2.26	30.1	29.6	30.0	29.9
8			2.25	2.25	2.26	2.25	31.6	30.3	32.3	31.4
9	B25	4	2.17	2.15	2.15	2.16	33.1	32.8	32.4	32.8
10			2.14	2.14	2.16	2.15	32.0	31.1	32.3	31.8
11			2.16	2.16	2.16	2.16	31.1	30.4	30.5	30.7
12			2.17	2.19	2.19	2.18	32.7	33.9	33.5	33.4
13			2.16	2.18	2.16	2.17	33.1	32.9	31.8	32.6
14			2.15	2.18	2.16	2.16	31.2	31.7	32.0	31.6
15			2.15	2.15	2.18	2.16	31.4	31.8	32.1	31.8
16			2.18	2.17	2.17	2.17	32.8	32.5	33.1	32.8
17	2.18	2.16	2.16	2.17	32.1	31.1	31.6	31.6		
18	B25	16	2.25	2.26	2.26	2.26	31.9	31.4	30.8	31.4
19	B35	16	2.28	2.28	2.30	2.29	40.6	40.9	41.9	41.1
20			2.28	2.29	2.28	2.28	41.3	40.7	40.7	40.9
21			2.25	2.26	2.26	2.26	40.1	40.4	39.7	40.1
22	B15	4	2.28	2.28	2.28	2.28	41.3	38.6	40.5	40.1
23			2.11	2.13	2.10	2.11	19.8	19.3	19.3	19.5
24			2.14	2.14	2.15	2.14	20.2	19.6	20.5	20.1
25			2.11	2.10	2.11	2.11	17.7	16.6	16.2	16.8
26	B25	16	2.11	2.11	2.10	2.11	17.6	17.7	17.4	17.6
27			2.25	2.26	2.26	2.26	31.1	31.3	32.2	31.5
28			2.24	2.25	2.24	2.24	31.5	31.4	31.7	31.5
29			2.26	2.25	2.26	2.26	30.8	31.7	30.8	31.1

Bild A8

Güteprüfung von 200mm-Würfeln im Alter von 28 Tagen nach DIN 1048 Teil 1

Versuchsserien			Je Versuchsserie m=3 Druckfestigkeitswerte β_{W28} (vgl. Bild A8)					Prüfung der Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit α zur Gleichheit der Varianzen	
Kurzbezeichnung	Anzahl k	Nr.	Standardabweichung s	Varianz s^2	$\Sigma\beta_W$	$(\Sigma\beta_W)^2$	$\Sigma(\beta_W)^2$	Varianzen	Mittelwerte
B25/16	8	3	0.907	0.823	91.7	8408.9	2804.6	$\hat{G}=0.3583$ $G(2;8;0.05)=0.5157$	$\hat{F}=20.47$ $F(7;16;0.05)=2.66$
		4	0.513	0.263	83.8	7022.4	2341.3		
		5	0.451	0.203	83.6	6989.0	2330.1		
		6	0.346	0.120	87.0	7569.0	2523.2		
		7	0.265	0.070	89.7	8046.1	2682.2		
		8	1.015	1.030	94.2	8873.6	2959.9		
		27	0.586	0.343	94.6	8949.2	2983.7		
		28	0.153	0.023	94.6	8949.2	2983.1		
		Summe	-	2.875	S1=719.2	S2=64807.4	S3=21608.1	Nullhypothese wird akzeptiert	Nullhypothese wird abgelehnt
B25/04	8	9	0.351	0.123	98.3	9662.9	3221.2	$\hat{G}=0.2586$ $G(2;8;0.05)=0.5157$	$\hat{F}=9.42$ $F(7;16;0.05)=2.66$
		10	0.624	0.390	95.4	9101.2	3034.5		
		11	0.379	0.143	92.0	8464.0	2821.6		
		12	0.611	0.373	100.1	10020.0	3340.8		
		13	0.700	0.490	97.8	9564.8	3189.3		
		14	0.404	0.163	94.9	9006.0	3002.3		
		15	0.351	0.123	95.3	9082.1	3027.6		
		16	0.300	0.090	98.4	9682.6	3227.7		
		Summe	-	1.895	S1=772.2	S2=74583.6	S3=24865.0	Nullhypothese wird akzeptiert	Nullhypothese wird abgelehnt
B35/16	4	19	0.681	0.463	123.4	15227.6	5076.8	$\hat{G}=0.7315$ $G(2;4;0.05)=0.7679$	$\hat{F}=1.31$ $F(3;8;0.05)=4.07$
		20	0.346	0.120	122.7	15055.3	5018.7		
		21	0.351	0.123	120.2	14448.0	4816.3		
		22	1.387	1.923	120.4	14496.2	4835.9		
				Summe	-	2.628	S1=486.7		
B15/04	4	23	0.289	0.083	58.4	3410.6	1137.0	$\hat{G}=0.6562$ $G(2;4;0.05)=0.7679$	$\hat{F}=31.22$ $F(3;8;0.05)=4.07$
		24	0.458	0.210	60.3	3636.1	1212.5		
		25	0.777	0.603	50.5	2550.3	851.3		
		26	0.153	0.023	52.7	2777.3	925.8		
				Summe	-	0.918	S1=221.9		

Prüfung auf Gleichheit von Varianzen (Test nach Cochran, vgl. Abschn. 722 in /S1/)

s^2 Varianz der Druckfestigkeit β_W
k Anzahl Versuchsserien mit je m Ergebnissen
(m-1) Freiheitsgrad
(1- α) Aussagewahrscheinlichkeit
 $G_{(m-1;k;\alpha)}$ Signifikanzschranke nach Tabelle 152 in /S1/

$$\hat{G} = \frac{\max s^2}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_k^2}$$

Die Nullhypothese "die Varianzen aller Serien sind gleich groß" wird abgelehnt, wenn $\hat{G} > G_{(m-1;k;\alpha)}$

Prüfung auf Gleichheit von Mittelwerten (Einfache Varianzanalyse, vgl. Abschn. 73 in /S1/ und Abschn. 5.1 in /R3/)

$$\hat{F} = \frac{DQ_{\text{zwischen}}}{DQ_{\text{innerhalb}}} = \frac{\frac{1}{k-1} \left\{ \frac{1}{m} \sum_k (\Sigma\beta_W)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_k (\Sigma\beta_W) \right)^2 \right\}}{\frac{1}{n-k} \left\{ \sum_k (\Sigma\beta_W)^2 - \frac{1}{m} \sum_k (\Sigma\beta_W)^2 \right\}}$$

$$\hat{F} = \frac{\frac{1}{k-1} \left(\frac{1}{m} \cdot S2 - \frac{1}{n} (S1)^2 \right)}{\frac{1}{n-k} \left(S3 - \frac{1}{m} \cdot S2 \right)}$$

DQ Durchschnittsquatrat (Abweichungsquatrat)
k Anzahl Versuchsserien mit je m Ergebnissen
n = k · m Anzahl aller Versuchsergebnisse
(k-1) Freiheitsgrad des Zählers
(n-k) Freiheitsgrad des Nenners
(1- α) Aussagewahrscheinlichkeit
 $F_{(k-1;n-k;\alpha)}$ Signifikanzschranke der F-Verteilung nach Tabelle 30 in /S1/

Die Nullhypothese "die Mittelwerte aller Serien sind gleich groß" wird abgelehnt, wenn $\hat{F} > F_{(k-1;n-k;\alpha)}$

Bild A9

Varianzanalytische Untersuchungen zu den Druckfestigkeitswerten β_{W28} der Güteprüfungen aus Bild A8

Rezeptur Nr.		1				2				3				4			
Betonfestigkeitsklasse		B25				B25				B15				B35			
Größtkorn		16mm				4mm				4mm				16mm			
Hergestellt am		18.11.74				21.11.74				11.2.75				13.2.75			
Würfelgröße [mm]	Prüfalter in Tagen	Bezeichnung der Zusatzserien															
		Z1				Z2				Z3				Z4			
		Festbeton-Rohdichte [kg/dm³]		Druckfestigkeit [N/mm²]		Festbeton-Rohdichte [kg/dm³]		Druckfestigkeit [N/mm²]		Festbeton-Rohdichte [kg/dm³]		Druckfestigkeit [N/mm²]		Festbeton-Rohdichte [kg/dm³]		Druckfestigkeit [N/mm²]	
200	28	2.28		30.5		2.15		32.3		2.14		22.1		2.28		43.5	
		2.26	2.26	32.2	31.4	2.15	2.15	32.8	32.4	2.11	2.12	19.4	20.4	2.26	2.27	41.3	42.1
		2.25		31.5		2.15		32.1		2.11		19.7		2.28		41.6	
	56	2.26		34.3		2.14		35.8		2.11		23.1		2.26		45.4	
		2.26	2.26	35.8	34.9	2.14	2.14	35.1	35.5	2.09	2.10	21.2	21.9	2.26	2.26	45.0	45.3
		2.25		34.6		2.14		35.7		2.09		21.5		2.25		45.4	
100	7	2.30		18.8		2.23		26.9		2.21		16.3		2.30		32.8	
		2.30	2.30	23.1	21.4	2.21	2.22	26.7	27.0	2.22	2.21	15.9	16.0	2.30	2.30	32.7	33.1
		2.29		22.4		2.23		27.5		2.21		15.9		2.30		33.8	
	14	2.25		30.8		2.16		33.3		2.12		20.4		2.26		41.0	
		2.27	2.26	31.7	31.1	2.16	2.17	32.8	34.1	2.14	2.14	20.8	20.7	2.26	2.26	41.2	41.5
		2.26		30.8		2.18		36.1		2.16		21.0		2.26		42.3	
	28	2.22		32.4		2.14		42.8		2.12		25.6		2.24		42.4	
		2.23	2.22	32.3	32.5	2.16	2.15	34.7	38.2	2.12	2.13	25.3	25.5	2.24	2.25	46.7	46.0
		2.22		32.8		2.16		37.0		2.14		25.5		2.26		48.9	
	42	2.26		35.3		2.16		37.3		2.10		27.2		2.23		44.6	
		2.25	2.25	35.8	36.2	2.16	2.16	38.8	38.2	2.09	2.09	27.2	26.9	2.23	2.23	43.8	45.3
		2.25		37.6		2.16		38.6		2.08		26.4		2.24		47.4	
		2.22		36.0		2.11		38.6		2.06		25.5		2.26		51.4	
		2.23	2.23	-	36.1	2.08	2.09	36.4	37.9	2.04	2.05	25.0	25.9	2.25	2.26	50.6	50.0
		2.23		36.2		2.08		38.8		2.06		27.1		2.26		48.0	
	70	2.22		38.3		2.12		42.7		2.07		25.8		2.24		47.4	
		2.22	2.22	35.2	36.8	2.14	2.13	37.3	40.4	2.05	2.07	25.0	25.5	2.25	2.24	46.7	47.0
		2.22		36.8		2.14		41.1		2.09		25.8		2.24		47.0	
	90	2.22		37.3		2.09		37.5		2.06		27.0		2.24		49.5	
		2.23	2.23	37.5	37.8	2.08	2.08	38.5	37.9	2.06	2.05	26.8	26.7	2.23	2.24	48.8	49.1
		2.23		38.7		2.08		37.6		2.04		26.4		2.25		49.1	

Bild A10

Festigkeitsentwicklung der 4 Versuchsmischungen

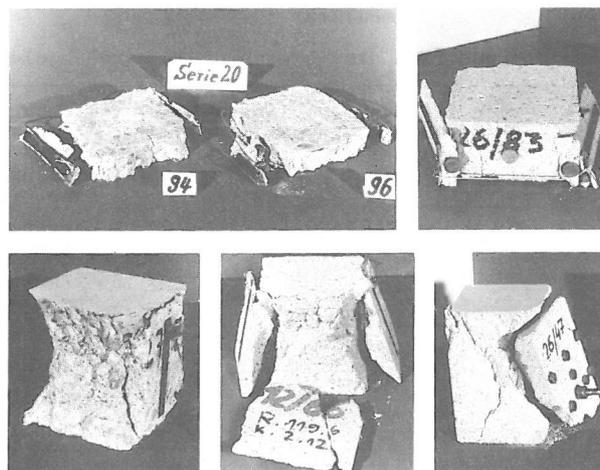


Bild A11

Abgelöste Bruchstücke mit Meßwertaufnehmern (Prüfung mit starren Druckplatten)

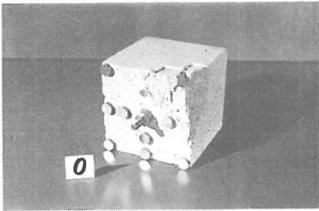
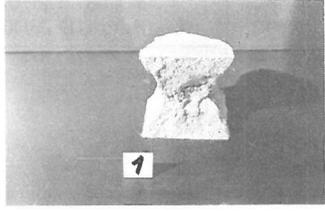
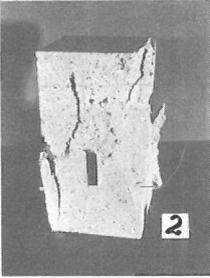
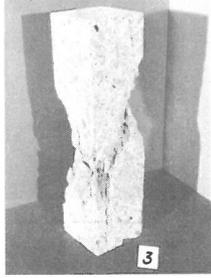
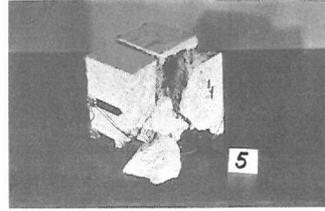
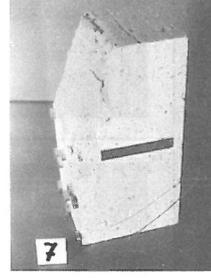
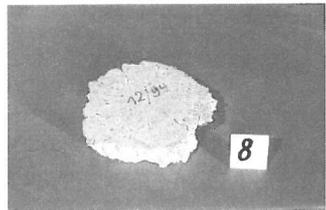
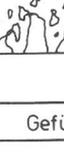
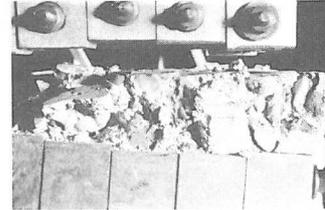
0	In der Regel Versagen von örtlichen Fehlstellen		1		
	Kein kennzeichnendes Bruchbild			Voll ausgebildete Doppelpyramide	
2			3		
	Risse und Bruchstücke wie Doppelpyramide			Doppelpyramide mit Schubbruch	
4			5		
	Überwiegend Schubbruch			Überwiegend säulenförmige Bruchstücke	
6		Bruchbild dieser Art sehr selten (meist nicht nur Rissebildungen sondern auch einige Bruchstücke)	7		
	Rissebildungen in Krafrichtung			Abgetrenntes Kantenstück	
8			9		
	Gefüge zerquetscht			Gefüge nahezu vollständig zerstört	

Bild A12

Charakteristische Bruchbilder mit Kennziffern

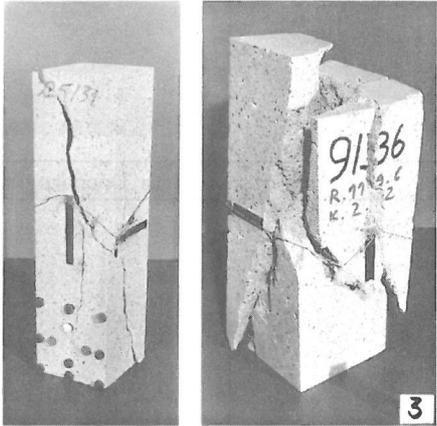
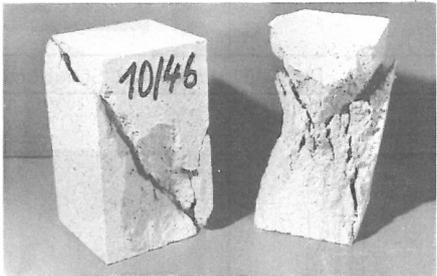
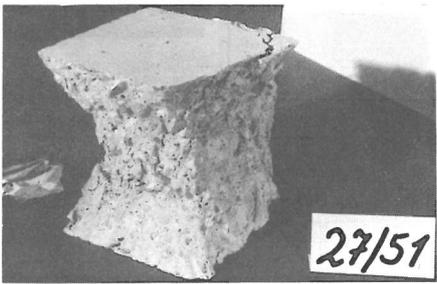
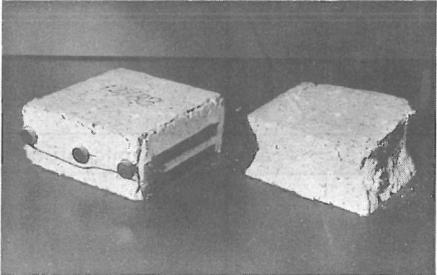
Höhe [mm]	Mörtel B 15/04 , B 25/04 Beton B 25/16
400 300	
200	
100	
50	

Bild A13
Bruchbilder nach Prüfung mit starren Druckplatten

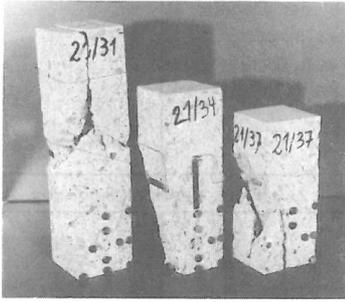
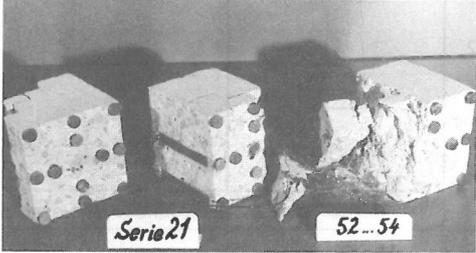
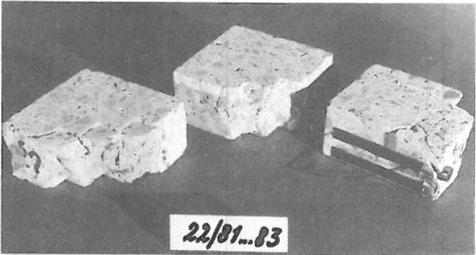
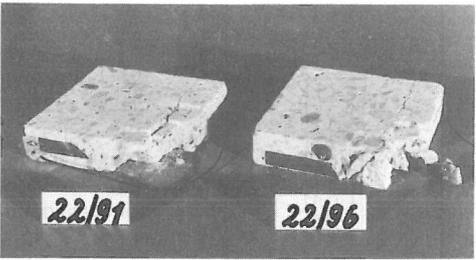
Höhe [mm]	Beton B 35/16
400 300 250	
100	
50	
25	

Bild A14
Bruchbilder nach Prüfung mit schlaffen
Druckplatten

Beton: B25/16															
Krafteinleitung: Starre Druckplatten															
Druckflächen schalungsrauh							Druckflächen gesägt und geschliffen								
Probekörper			Druckfestigkeit				Probekörper			Druckfestigkeit					
			β_D [N/mm ²]							β_D [N/mm ²]					
Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.				Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.					
			3	4	27	28				3	4	27	28		
1	400	1	25.10		29.00		5	200	1		26.40		27.60		
		2	24.90		27.50				2		25.10		27.10		
		3	26.90		31.00				3		27.90		32.80		
		$\bar{\beta}_D$	25.62		29.17				$\bar{\beta}_D$		26.47		29.17		
		s	1.080		1.756				s		1.424		3.130		
		VB95	22.94		24.81			VB95	22.93		21.40		36.94		
			28.30		33.53				30.00		36.94				
2	300	1	27.70		28.20		8	100	1		28.10		34.80		
		2	26.30		26.70				2		29.70		32.60		
		3	24.70		31.00				3		29.70		33.10		
		$\bar{\beta}_D$	26.24		28.63				4		30.20		32.80		
		s	1.520		2.183				5		32.00		36.40		
		VB95	22.47		23.22			VB95	32.30		39.40				
			30.01		34.05			$\bar{\beta}_D$	30.35		34.85				
								s	1.581		2.662				
3	250	1	29.80		29.30		9	75	1		33.70		38.30		
		2	26.30		27.00				2		32.80		38.80		
		3	25.70		33.70				3		35.00		38.00		
		$\bar{\beta}_D$	27.25		30.00				4		36.60		38.90		
		s	2.227		3.404				5		31.50		41.90		
		VB95	21.72		21.55			VB95	32.01		37.64				
			32.78		38.45			36.00		45.10					
4	200	1	29.00		29.00		10	50	1		50.00		51.00		
		2	29.80		30.00				2		47.70		50.60		
		3	32.40		33.70				3		47.80		47.80		
		$\bar{\beta}_D$	30.42		30.90				4		47.50		48.30		
		s	1.789		2.476				5		50.60		56.80		
		VB95	25.96		24.75			VB95	52.30		60.20				
			34.89		37.05			$\bar{\beta}_D$	49.64		52.45				
								s	2.022		4.967				
6	150	1		28.60		28.30	11	25	1		97.70		111.00		
		2		25.60		27.10			2		108.10		102.50		
		3		26.50		32.50			3		97.10		122.50		
		$\bar{\beta}_D$		26.89		29.34			4		106.90		109.90		
		s		1.563		2.845			5		116.10		118.40		
		VB95	23.01		22.27			VB95	103.60		109.90				
			30.77		36.40			$\bar{\beta}_D$	104.93		112.37				
								s	7.110		7.078				
7	100	1	+	29.60	34.00	33.00	11	25	1		97.70		111.00		
		2	35.70	30.30	32.50	35.80			2		108.10		102.50		
		3	34.10	29.90	33.30	30.10			3		97.10		122.50		
		4	33.50	29.70	32.70	32.80			4		106.90		109.90		
		5	36.90	32.10	36.60	40.30			5		116.10		118.40		
		6	37.30	30.90	38.40	37.10			6		103.60		109.90		
		$\bar{\beta}_D$	35.48	30.41	34.58	34.58			$\bar{\beta}_D$		104.93		112.37		
		s	1.643	0.933	2.388	3.629			s		7.110		7.078		
				VB95	33.44	29.43			32.08	31.04		VB95	97.47		104.94
					37.53	31.38			37.09	38.66			112.39		119.79

$\bar{\beta}_D$ Arithmetischer Mittelwert der Druckfestigkeit in N/mm²

s Standardabweichung zur mittleren Druckfestigkeit in N/mm²

VB95 Untere und obere Grenze des Vertrauensbereiches des Mittelwertes in N/mm² bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95%

+) Probekörper nicht prüffähig

Bild A15

Probekörperfestigkeiten Beton B25, Prüfung mit starren Druckplatten

Beton: B25/16														
Krafteinleitung: Schlawfe Druckplatten														
Druckflächen schalungsrauh						Druckflächen gesägt und geschliffen								
Probekörper			Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]				Probekörper			Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]				
Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.				Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.				
			5	6	7	8				5	6	7	8	
1	400	1	22.50		26.80		5	200	1		25.60		28.40	
		2	22.30		24.70				2		24.30		27.70	
		3	24.40		27.40				3		27.70		27.30	
		$\bar{\beta}_D$	23.07		26.30				$\bar{\beta}_D$		25.88		27.81	
		s	1.170		1.428				s		1.734		0.591	
		VB95	20.17 25.97		22.76 29.85			VB95	21.57 30.19		26.34 29.27			
2	300	1	24.70		25.10		8	100	1		26.70		25.30	
		2	23.90		25.60				2		22.30		26.00	
		3	24.00		26.90				3		23.10		29.20	
		$\bar{\beta}_D$	24.21		25.86				4		23.10 +)		30.90	
		s	0.427		0.926				5		26.50		26.50	
		VB95	23.15 25.27		23.56 28.16			6	25.10		25.20			
								$\bar{\beta}_D$		24.72		27.17		
								s		1.973		2.336		
								VB95		22.27 27.18		24.72 29.62		
3	250	1	24.00		25.40 +)		9	75	1		23.70 +)		29.00	
		2	24.30		25.40				2		23.60 +)		29.10	
		3	26.10		27.40				3		23.70		27.60	
		$\bar{\beta}_D$	24.80		26.37				4		23.60		30.70	
		s	1.113		1.386				5		27.10		25.90	
		VB95	22.04 27.57				6	25.00		28.10				
								$\bar{\beta}_D$		24.85		28.41		
								s		1.598		1.618		
								VB95		22.31 27.39		26.71 30.11		
4	200	1	26.00		27.00		10	50	1		27.40		26.00	
		2	27.70		27.50				2		25.90		26.10	
		3	26.20		28.60				3		27.80		28.60	
		$\bar{\beta}_D$	26.63		27.71				4		26.60		26.10	
		s	0.967		0.845				5		26.50		29.80	
		VB95	24.23 29.03		25.61 29.81			6	26.50 +)		25.90			
								$\bar{\beta}_D$		26.82		27.07		
								s		0.774		1.701		
								VB95		25.86 27.78		25.29 28.86		
6	150	1		26.00		29.50	11	25	1		31.00		28.90	
		2		27.20		29.30 +)				2		23.00		31.10
		3		26.30		29.30				3		28.40		27.30
		$\bar{\beta}_D$		26.47		29.41				4		27.00		23.80
		s		0.612		0.139				5		26.00		35.70
		VB95		24.95 27.99				6	27.80		23.50			
								$\bar{\beta}_D$		27.20		28.37		
								s		2.648		4.627		
								VB95		24.42 29.98		23.52 33.22		
7	100	1	26.90	25.90	29.50	29.50	11	25	1		31.00		28.90	
		2	27.00	28.10	28.00	28.10			2		23.00		31.10	
		3	26.00	28.80	29.40	30.00			3		28.40		27.30	
		4	28.40	27.40	27.80	27.20			4		27.00		23.80	
		5	29.20	30.30	28.90 +)	28.90			5		26.00		35.70	
6	30.10	30.20	30.70	29.20	6		27.80		23.50					
		$\bar{\beta}_D$	27.92	28.44	29.10	28.82		$\bar{\beta}_D$		27.20		28.37		
		s	1.580	1.702	1.171	1.026		s		2.648		4.627		
		VB95	26.26 29.58	26.66 30.23	27.64 30.55	27.74 29.90		VB95		24.42 29.98		23.52 33.22		

$\bar{\beta}_D$ Arithmetischer Mittelwert der Druckfestigkeit in N/mm²

s Standardabweichung zur mittleren Druckfestigkeit in N/mm²

VB95 Untere und obere Grenze des Vertrauensbereiches des Mittelwertes in N/mm² bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95%

+) Probekörper nicht prüffähig

Bild A16

Probekörperfestigkeiten Beton B25, Prüfung mit schlaffen Druckplatten

Beton: B25/04

Krafteinleitung: Starre Druckplatten

Druckflächen schalungsrauh													Druckflächen gesägt und geschliffen			
Probekörper			Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]				Probekörper			Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]						
Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.				Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.						
			9	10	11	12				9	10	11	12			
1	400	1	27.80		27.20		5	200	1		29.20		28.60			
		2	27.70		26.10				2		28.50		28.00			
		3	30.80		28.10				3		32.90		32.20			
		$\bar{\beta}_D$	28.79		27.12				$\bar{\beta}_D$		30.23		29.60			
		s	1.727		1.030				s		2.374		2.227			
		VB95	24.50		24.57			VB95	24.33		24.08					
			33.08		29.68				36.12		35.13					
2	300	1	28.50		27.20		8	100	1		31.80		33.60			
		2	27.60		27.10				2		31.00		31.80			
		3	29.70		31.10				3		30.50		30.60			
		4							4		30.60		31.90			
		5							5		36.40		32.10			
$\bar{\beta}_D$	28.62		28.43		6		35.20		33.50							
		s	1.033		2.293			$\bar{\beta}_D$		32.56		32.24				
		VB95	26.06		22.74			s		2.560		1.159				
			31.19		34.12			VB95		29.88		31.02				
										35.25		33.45				
3	250	1	28.50		+		9	75	1		35.50		+			
		2	28.10		+				2		34.10		36.60			
		3	32.30		+				3		33.40		34.30			
		$\bar{\beta}_D$	29.67						4		33.80		35.00			
		s	2.329						5		38.80		40.90			
		VB95	23.89					VB95		37.50		40.40				
			35.45					$\bar{\beta}_D$		35.54		37.43				
4	200	1	29.40		28.30		10	50	1		40.30		42.30			
		2	31.10		30.00				2		38.30		42.70			
		3	30.30		32.40				3		37.90		42.20			
		$\bar{\beta}_D$	30.26		30.26				4		39.60		39.50			
		s	0.834		2.071				5		43.60		41.70			
		VB95	28.19		25.12			41.10		44.60						
			32.33		35.40			$\bar{\beta}_D$		40.14		42.15				
								s		2.071		1.650				
6	150	1		29.90		30.90	11	25	1		71.90		63.80			
		2		29.10		34.20			2		72.70		77.90			
		3		31.90		29.50			3		76.90		69.30			
		$\bar{\beta}_D$		30.29		31.53			4		72.20		91.60			
		s		1.414		2.420			5		75.90		81.00			
		VB95		26.78		25.53		VB95		149.80')		90.00				
				33.80		37.54		$\bar{\beta}_D$		73.92		78.93				
								s		2.284		11.027				
7	100	1	36.00	34.30	34.70	34.80	11	25	1		71.90		63.80			
		2	35.50	34.50	34.30	34.70			2		72.70		77.90			
		3	34.10	34.40	33.80	35.20			3		76.90		69.30			
		4	33.60	32.90	33.80	34.20			4		72.20		91.60			
		5	36.10	35.10	35.90	37.30			5		75.90		81.00			
6	37.30	37.60	37.10	36.60	6		149.80')		90.00							
$\bar{\beta}_D$	35.44	34.82	34.93	35.47			$\bar{\beta}_D$		73.92		78.93					
		s	1.371	1.557	1.290	1.219		s		2.284		11.027				
		VB95	34.00	33.18	33.58	34.19		VB95		71.08		67.36				
			36.88	36.45	36.28	36.75				76.76		90.50				

$\bar{\beta}_D$ Arithmetischer Mittelwert der Druckfestigkeit in N/mm²

s Standardabweichung zur mittleren Druckfestigkeit in N/mm²

VB95 Untere und obere Grenze des Vertrauensbereiches des Mittelwertes in N/mm² bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95%

+) Probekörper nicht prüffähig ') nicht gewertet

Bild A17

Probekörperfestigkeiten Mörtel B25, Prüfung mit starren Druckplatten

Beton: B25/04													
Krafteinleitung: Schläffe Druckplatten													
Druckflächen schalungsrauh							Druckflächen gesägt und geschliffen						
Probekörper			Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]				Probekörper			Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]			
Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.				Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.			
			13	14	15	16				13	14	15	16
1	400	1	28.10		28.90		5	200	1		29.70		28.00
		2	27.60		27.40				2		28.90		28.20
		3	30.10		25.50				3		33.10		30.00
		$\bar{\beta}_D$	28.62		27.25				$\bar{\beta}_D$		30.59		28.76
		s	1.297		1.718				s		2.242		1.080
		VB95	25.41		22.99			VB95	25.02		26.07		
			31.84		31.52				36.15		31.44		
2	300	1	29.40		26.80		8	100	1		30.50		28.80
		2	29.10		25.90				2		29.00		28.50
		3	31.50		27.00				3		28.20		28.40
		$\bar{\beta}_D$	30.00		26.53				4		28.20		28.30
		s	1.282		0.574				5		28.70		27.80
		VB95	26.81		25.11			VB95	31.10		27.30		
			33.18		27.96			$\bar{\beta}_D$	29.29		28.20		
3	250	1	+		27.90		9	75	1		30.80		30.80
		2	+		27.70				2		30.50		29.80
		3	+		27.00				3		29.10		29.70
		$\bar{\beta}_D$			27.55				4		28.80		28.90
		s			0.519				5		31.50		29.70
		VB95			28.83			VB95	30.56		28.79		
					28.83			$\bar{\beta}_D$	30.19		29.88		
4	200	1	30.60		30.20		10	50	1		30.90		24.70
		2	30.10		29.20				2		32.20		27.90
		3	30.90		29.90				3		30.90		29.50
		$\bar{\beta}_D$	30.52		29.77				4		31.10		28.70
		s	0.396		0.503				5		29.60		29.30
		VB95	29.54		28.52			VB95	29.00		29.20		
			31.50		31.02			$\bar{\beta}_D$	30.60		28.23		
					29.20			s	1.122		1.818		
					32.10			VB95	29.42		26.32		
					33.40				31.78		30.14		
					26.23								
					36.90								
					24.85								
					31.94								
6	150	1		29.20		29.00	11	25	1		32.30		25.30
		2		32.10		29.40			2		32.90		28.00
		3		33.40		26.80			3		28.80		22.40
		$\bar{\beta}_D$		31.57		28.40			4		27.10		29.20
		s		2.150		1.428			5		28.30		29.90
		VB95	26.23		24.85			VB95	29.90		27.94		
			36.90		31.94			$\bar{\beta}_D$	29.90		27.94		
					32.90			s	2.321		3.680		
					31.40			VB95	27.46		24.08		
					34.20				32.33		31.80		
					32.30								
					33.50								
					31.70								
					33.90								
					32.50								
					32.00								
					33.23								
					32.00								
					2.100								
					29.39								
					34.61								

$\bar{\beta}_D$ Arithmetischer Mittelwert der Druckfestigkeit in N/mm²

s Standardabweichung zur mittleren Druckfestigkeit in N/mm²

VB95 Untere und obere Grenze des Vertrauensbereiches des Mittelwertes in N/mm² bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95%

+) Probekörper nicht prüffähig

Bild A18

Probekörperfestigkeiten Mörtel B25, Prüfung mit schlaffen Druckplatten

Beton: B15/04										Beton: 15/04									
Krafteinleitung: Starre Druckplatten										Krafteinleitung: Schlabbe Druckplatten									
Druckflächen schalungsrauh					gesägt u. geschliffen					Druckflächen schalungsrauh					gesägt u. geschliffen				
Probekörper		Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]			Probekörper		Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]			Probekörper		Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]			Probekörper		Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]		
Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.		Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.		Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.		Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.	
			25	26				25	26				23	24				23	24
1	400	1	+)		5	200	1	17.40		1	400	1	18.10		5	200	1	18.60	
		2	15.20				2	17.80				2	18.20				2	18.50	
		3	16.00				3	17.70				3	17.50				3	19.90	
		$\bar{\beta}_D$	15.60				$\bar{\beta}_D$	17.63				$\bar{\beta}_D$	17.93				$\bar{\beta}_D$	19.00	
		s	0.566				s	0.208				s	0.379				s	0.781	
		VB95					VB95	17.12 18.15				VB95	16.99 18.87				VB95	17.06 20.94	
2	300	1	17.30		8	100	1	19.10		2	300	1	20.40		8	100	1	18.30	
		2	16.30				2	18.80				2	19.60				2	18.40	
		3	17.10				3	19.20				3	19.60				3	18.40	
		$\bar{\beta}_D$	16.90				4	19.40				$\bar{\beta}_D$	19.87				4	19.10	
		s	0.529				5	20.10				s	0.462				5	18.30	
		VB95	15.59 18.21				6	18.70				VB95	18.72 21.01				6	18.40	
3	250	1	16.60		9	75	1	22.10		3	250	1	19.90		9	75	1	18.50	
		2	16.50				2	21.50				2	19.00				2	19.30	
		3	17.00				3	21.80				3	19.10				3	19.30	
		$\bar{\beta}_D$	16.70				4	21.30				$\bar{\beta}_D$	19.33				4	20.50	
		s	0.265				5	22.90				s	0.493				5	17.60	
		VB95	16.04 17.36				6	21.70				VB95	18.11 20.56				6	18.60	
4	200	1	18.30		9	75	1	25.00		4	200	1	18.90		9	75	1	20.70	
		2	17.80				2	27.20				2	19.20				2	17.30	
		3	16.80				3	25.90				3	18.90				3	18.00	
		$\bar{\beta}_D$	17.63				4	25.60				$\bar{\beta}_D$	19.00				4	18.10	
		s	0.764				5	26.80				s	0.173				5	19.40	
		VB95	15.74 19.53		6	27.00		VB95	18.57 19.43		6	19.20							
6	150	1	18.60		10	50	1	25.00		6	150	1	20.20		10	50	1	20.70	
		2	18.70				2	27.20				2	17.80				2	17.30	
		3	18.80				3	25.90				3	20.10				3	18.00	
		$\bar{\beta}_D$	18.70				4	25.60				$\bar{\beta}_D$	19.37				4	18.10	
		s	0.100				5	26.80				s	1.358				5	19.40	
		VB95	18.45 18.95		6	27.00		VB95	16.00 22.74		6	19.20							
7	100	1	19.00		11	25	1	57.70		7	100	1	21.30		11	25	1	21.20	
		2	21.60				2	50.90				2	20.60				2	18.60	
		3	21.40				3	64.60				3	20.50				3	18.60	
		4	21.10				4	52.90				4	21.10				4	17.80	
		5	21.10				5	60.70				5	22.50				5	21.00	
		6	21.00				6	62.10				6	21.30				6	20.00	
		$\bar{\beta}_D$	21.18				$\bar{\beta}_D$	58.15				$\bar{\beta}_D$	21.34				$\bar{\beta}_D$	21.30	
s	0.280		s	5.367		s	0.727		s	0.881		s	1.407						
		VB95	18.84 20.91 21.46		VB95	52.52 63.78		VB95	20.44 22.24		VB95	20.38 22.22		VB95	18.06 21.01				

$\bar{\beta}_D$ Arithmetischer Mittelwert der Druckfestigkeit in N/mm²

s Standardabweichung zur mittleren Druckfestigkeit in N/mm²

VB95 Untere und obere Grenze des Vertrauensbereiches des Mittelwertes in N/mm² bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95%

+) Probekörper nicht prüffähig ++) Meßanzeige ausgefallen

Bild A19

Probekörperfestigkeiten Mörtel B15, Prüfung mit starren und schlaffen Druckplatten

Beton: B35/16										Beton: B35/16										
Krafteinleitung: Starre Druckplatten										Krafteinleitung: Schlawfe Druckplatten										
Druckflächen schalungsrauh					Druckflächen gesägt u. geschliffen					Druckflächen schalungsrauh					Druckflächen gesägt u. geschliffen					
Probekörper		Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]			Probekörper		Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]			Probekörper		Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]			Probekörper		Druckfestigkeit β_D [N/mm ²]			
Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.		Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.		Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.		Gruppe	Höhe	lfd Nr.	Serie Nr.		
			19	20				19	20				21	22				21	22	
1	400	1	34.20		5	200	1	36.60		1	400	1	31.70		5	200	1	35.30		
		2	36.80				2	34.30				2	33.50				2	35.10	32.70	
		3	39.00				3	35.50				3	31.80				3	33.90		
		$\bar{\beta}_D$	36.66				$\bar{\beta}_D$	35.45				$\bar{\beta}_D$	32.31				$\bar{\beta}_D$	33.99		
		s	2.429				s	1.128				s	1.035				s	1.857		
		VB95	30.63				VB95	32.65					VB95	29.74				VB95	34.88	
			42.69					38.25												
2	300	1	36.00		8	100	1	44.20		2	300	1	32.70		8	100	1	35.30		
		2	36.00				2	42.50				2	32.50				2	35.10		
		3	40.80				3	43.00				3	31.80				3	33.90		
		4	42.80				4	48.50				4	32.34				4	34.80		
		5	48.50				5	47.10				5	0.452				5	34.20		
$\bar{\beta}_D$	37.61		$\bar{\beta}_D$	44.68		$\bar{\beta}_D$	32.34		$\bar{\beta}_D$	34.80										
s	2.760		s	2.544		s	0.452		s	0.667										
		VB95	30.76				VB95	42.01					VB95	31.22				VB95	33.46	
			44.46					47.35											VB95	35.50
3	250	1	36.60		9	75	1	47.00		3	250	1	34.50		9	75	1	35.30		
		2	35.60				2	47.90				2	33.70				2	35.10		
		3	39.00				3	47.40				3	36.00				3	36.10		
		4	41.44				4	44.30				4	34.71				4	32.50		
		5	50.40				5	50.40				5	31.82				5	29.90		
$\bar{\beta}_D$	37.06		$\bar{\beta}_D$	47.00		$\bar{\beta}_D$	34.71		$\bar{\beta}_D$	32.50										
s	1.767		s	1.972		s	1.166		s	2.667										
		VB95	32.67				VB95	45.25					VB95	31.82				VB95	37.60	
			41.44					49.39											VB95	32.50
4	200	1	41.90		9	75	1	61.20		4	200	1	36.90		9	75	1	33.60		
		2	40.50				2	66.50				2	35.70				2	29.40		
		3	39.80				3	64.90				3	35.50				3	36.10		
		4	40.73				4	59.20				4	36.03				4	32.50		
		5	43.39				5	66.30				5	0.722				5	29.90		
$\bar{\beta}_D$	40.73		$\bar{\beta}_D$	64.05		$\bar{\beta}_D$	36.03		$\bar{\beta}_D$	32.08										
s	1.069		s	3.102		s	0.722		s	2.667										
		VB95	38.08				VB95	60.79					VB95	34.24				VB95	37.82	
			43.39					67.30											VB95	35.40
6	150	1	37.90		10	50	1	114.30		6	150	1	36.20		10	50	1	33.60		
		2	38.90				2	136.30				2	36.00				2	26.40		
		3	38.90				3	114.10				3	36.12				3	33.50		
		4	38.59				4	110.40				4	36.12				4	34.50		
		5	40.00				5	121.10				5	0.113				5	36.30		
$\bar{\beta}_D$	38.59		$\bar{\beta}_D$	118.76		$\bar{\beta}_D$	36.12		$\bar{\beta}_D$	33.27										
s	0.566		s	9.293		s	0.113		s	3.524										
		VB95	37.19				VB95	60.79					VB95	34.24				VB95	37.82	
			40.00					67.30											VB95	35.40
7	100	1	47.70	47.60	11	25	1	114.30		7	100	1	38.20	36.90	11	25	1	40.80		
		2	45.60	45.40			2	136.30				2	38.90	39.40			2	38.30		
		3	46.70	47.30			3	114.10				3	39.10	34.30			3	32.50		
		4	47.20	48.10			4	110.40				4	39.60	39.40			4	36.50		
		5	48.20	45.50			5	121.10				5	33.70	39.00			5	36.10		
6	48.50	44.90	6	116.40		6	38.80	37.00	6	38.10										
$\bar{\beta}_D$	47.32	46.47	$\bar{\beta}_D$	118.76		$\bar{\beta}_D$	38.05	37.67	$\bar{\beta}_D$	37.05										
s	1.065	1.348	s	9.293		s	2.196	2.009	s	2.780										
		VB95	46.20	45.06			VB95	35.75	35.56				VB95	34.13				VB95	39.97	
			48.43	47.89				109.01											VB95	39.97
								128.51												

$\bar{\beta}_D$ Arithmetischer Mittelwert der Druckfestigkeit in N/mm²

s Standardabweichung zur mittleren Druckfestigkeit in N/mm²

VB95 Untere und obere Grenze des Vertrauensbereiches des Mittelwertes in N/mm² bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95%

+) Probekörper nicht prüffähig

Bild A20

Probekörperfestigkeiten Beton B35, Prüfung mit starren und schlaffen Druckplatten

Versuchsmaterial	Blockform	Druckfestigkeit in N/mm ²		$\frac{\beta_{Wm}}{\bar{\beta}_W}$	Standardabweichung s_j [N/mm ²]	Varianz s_j^2	Anzahl Würfel n_j	Rechenwerte für Bartlett-Test		Prüftests (Aussagewahrscheinlichkeit 95%)
		Prüfalter 56 Tage						$(n_j-1) \cdot s_j^2$	$(n_j-1) \cdot \lg s_j^2$	
		Druckflächen geschliffen Prüfung mit starren Druckplatten								
		β_{W100}	β_{Wm}							
Serie 17 Mörtel B25/04	A	32.84 32.74 33.53 31.27 31.47 32.94 34.70 34.51 33.92	33.10	1.025	1.21	1.464	9	11.713 1.3246	Gleichheit der Varianzen (n=27): $\hat{\chi}^2=1.62$ $\chi^2(3;0.05)=7.81$ Nullhypothese wird akzeptiert Gleichheit der Mittelwerte (n=30): $\hat{F}=2.00$ $F(4;25;0.05)=2.76$ Nullhypothese wird akzeptiert	
	B	33.33 33.04 32.55 33.47 35.29 34.41	33.68	1.007	0.998	0.996	6	4.9780 -0.0096		
	C	33.82 34.26 32.84 33.33 33.92 34.90	33.84	1.003	0.72	0.518	6	2.592 -1.4267		
	D	35.19 34.80 33.82	34.60	0.980	0.71	0.504	3	**)		
	E	35.29 35.88 33.43 32.55 34.70 34.80	34.44	0.985	1.23	1.513	6	7.565 0.8991		
	insgesamt		$\bar{\beta}_W=33.93$				30	26.847 0.7874		
Serie 18 Beton B25/16	A	32.35 32.45 31.86 33.04 31.37 32.84 33.33 31.17 34.70	32.57	1.052	1.08	1.166	9	9.331 0.5348	Gleichheit der Varianzen (n=26): $\hat{\chi}^2=5.03$ $\chi^2(3;0.05)=7.81$ Nullhypothese wird akzeptiert Gleichheit der Mittelwerte (n=28): $\hat{F}=7.77$ $F(4;23;0.05)=2.80$ Nullhypothese wird abgelehnt	
	B	32.55 34.41 32.06 32.43 33.92 *)	33.08	1.036	1.02	1.040	5	4.162 0.1720		
	C	34.21 33.92 34.31 34.51 38.82 35.78	35.26	0.972	1.86	3.460	6	17.298 2.6951		
	D	33.04 *) 36.40	34.72	0.987	2.38	5.664	2	**)		
	E	36.07 35.98 35.88 36.66 34.90 35.19	35.78	0.958	0.64	0.410	6	2.048 -1.9382		
	insgesamt		$\bar{\beta}_W=34.28$				28	32.839 1.4637		

*) Nicht prüffähig **) Bartlett-Test nur für Gruppen mit mindestens 5 Versuchsergebnissen

Prüfung auf Gleichheit von Varianzen (Test nach Bartlett, vgl. Abschn. 723 in /S1/)

$$\hat{\chi}^2 = \frac{1}{c} \left\{ 2.3026 \left[(n-k) \cdot \lg \bar{s}^2 - \sum_{j=1}^k (n_j-1) \cdot \lg s_j^2 \right] \right\} \quad \bar{s}^2 = \frac{1}{(n-k)} \sum_{j=1}^k (n_j-1) \cdot s_j^2$$

Die Nullhypothese "die Varianzen sind für alle Blockformen gleich groß" wird abgelehnt, wenn $\hat{\chi}^2 \geq \chi^2_{(k-1; \alpha)}$

k Anzahl betrachtete Gruppen, hier k=4 (d.h. ohne Blockform D)
(1- α) Aussagewahrscheinlichkeit

$$c = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left\{ \sum_{j=1}^k \frac{1}{(n_j-1)} - \frac{1}{(n-k)} \right\}$$

$\chi^2_{(k-1; \alpha)}$ Signifikanzschranke nach Tabelle 28a in /S1/

Prüfung auf Gleichheit von Mittelwerten (Einfache Varianzanalyse, siehe Angaben im Bild A9)

Die Nullhypothese "die mittleren Druckfestigkeitswerte der Blockformen A...E sind gleich groß" wird abgelehnt, wenn $\hat{F} \geq F_{(k-1, n-k, \alpha)}$

Vergleich zweier Mittelwerte (Zweistichproben-t-Test, vgl. Abschn. 36 in /S1/ und Abschn. III in /G11/)

Durchschnittliche Varianz: $s_d^2 = \frac{s_1^2(n_1-1) + s_2^2(n_2-1)}{n_1+n_2-2}$

Prüfgröße: $t_{\text{vorh}} = \hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}}$ hier mit $\bar{x}_j = \beta_{Wm, j}$

Die Nullhypothese "die beiden Mittelwerte sind gleich groß" wird abgelehnt, wenn $\hat{t} \geq t_{(n_1+n_2-2; \alpha)}$

n_1, n_2 Anzahl Versuchsergebnisse der beiden Gruppen

$t_{(n_1+n_2-2; \alpha)}$ Signifikanzschranke nach Tabelle III in /G11/

	Mörtel Serie 17	obere Zeile: \hat{t} untere Zeile: $t_{(n_1+n_2-2; 0.05)}$				
		Blockform				
Beton Serie 18		A	B	C	D	E
A			0.96 2.16	1.34 2.16	2.00 2.23	2.08 2.16
B		0.86 2.18		0.31 2.23	1.41 2.37	1.18 2.23
C		3.57 2.16	2.31 2.26		1.51 2.37	1.04 2.23
D		2.12 2.26	1.39 2.57	0.33 2.45		0.20 2.37
E		6.52 2.16	5.33 2.23	0.64 2.23	1.13 2.45	

In den durch Umrandung hervorgehobenen Fällen wird die Nullhypothese auf dem 5%-Niveau abgelehnt

Bild A21

Mathematisch-statistische Auswertung der Druckfestigkeit von 100mm-Würfeln zur Überprüfung der Abhängigkeit der Festigkeitsergebnisse von der Herkunft der Probekörper aus den Blockformen A...E

Beton: B25/16		Krafteinleitung: Starre Druckplatten																																																																																																																																																																																																										
Probekörper- höhe [mm]	Serie Nr.	Gruppe Nr. (+)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	s_d [N/mm ²]	t_{vorh}	t_{95} ++)	Unterschied statistisch gesichert ? +++)																																																																																																																																																																																																			
400	3	1	3	26.45	1.115	1.42200	1.2	2.78	nein																																																																																																																																																																																																			
	27	1	3	27.81	1.674					300	3	2	3	26.65	1.544	1.83341	1.6	2.78	nein	27	2	3	27.32	2.083	250	3	3	3	25.97	2.122	2.68681	0.8	2.78	nein	27	3	3	27.77	3.152	200	3	4	3	29.44	1.740	2.05457	0.2	2.78	nein	27	4	3	29.05	2.327	4	5	3	27.66	1.488	150	4	6	3	27.01	2.897	2.30290	0.3	2.78	nein	28	5	3	27.01	2.897	4	6	3	28.54	1.659	100	28	6	3	27.57	2.674	2.22514	0.5	2.78	nein	3	7	5	33.33	1.543	4	7	6	31.32	0.961	3	7	5	33.33	1.543	27	7	6	32.87	2.270	3	7	5	33.33	1.543	28	7	6	31.80	3.311	4	7	6	31.32	0.961	27	7	6	32.87	2.270	4	7	6	31.32	0.961	28	7	6	31.80	3.311	27	7	6	32.87	2.270	4	7	6	31.32	0.961	28	7	6	31.80	3.311	4	8	6	34.33	1.788	28	8	6	34.92	2.667	75	4	9	6	38.17	2.166	2.48362	1.0	2.23	nein	28	9	6	39.64	2.765	50	4	10	5	56.15	2.287	4.01073	1.5	2.26	nein	28	10	6	52.55	4.977	25	4	11	6	116.89	7.920	7.46621	1.4	2.23	nein
300	3	2	3	26.65	1.544	1.83341	1.6	2.78	nein																																																																																																																																																																																																			
	27	2	3	27.32	2.083					250	3	3	3	25.97	2.122	2.68681	0.8	2.78	nein	27	3	3	27.77	3.152	200	3	4	3	29.44	1.740	2.05457	0.2	2.78	nein	27	4	3	29.05	2.327		4	5	3	27.66	1.488					150	4	6	3	27.01	2.897	2.30290	0.3	2.78	nein		28	5	3	27.01	2.897					4	6	3	28.54	1.659	100	28	6	3	27.57		2.674	2.22514	0.5	2.78	nein					3	7	5	33.33	1.543	4	7	6	31.32	0.961	3	7	5	33.33	1.543	27	7	6	32.87	2.270	3	7	5	33.33	1.543	28	7	6	31.80	3.311	4	7	6	31.32	0.961	27	7	6	32.87	2.270	4	7	6	31.32	0.961	28	7	6	31.80	3.311	27	7	6	32.87	2.270	4	7	6	31.32	0.961	28	7	6	31.80	3.311	4	8	6	34.33	1.788	28	8	6	34.92	2.667	75	4	9	6	38.17	2.166	2.48362	1.0	2.23	nein	28	9	6	39.64	2.765	50	4	10	5	56.15	2.287	4.01073	1.5	2.26	nein	28	10	6	52.55	4.977	25	4	11	6	116.89	7.920	7.46621	1.4	2.23	nein
250	3	3	3	25.97	2.122	2.68681	0.8	2.78	nein																																																																																																																																																																																																			
	27	3	3	27.77	3.152					200	3	4	3	29.44	1.740	2.05457	0.2	2.78	nein	27	4	3	29.05	2.327		4	5	3	27.66	1.488					150	4	6	3	27.01	2.897	2.30290	0.3	2.78	nein	28	5	3	27.01	2.897		4	6	3	28.54	1.659					100	28	6	3	27.57	2.674	2.22514	0.5	2.78	nein	3	7	5	33.33	1.543		4	7	6	31.32		0.961									3	7	5	33.33	1.543	27	7	6	32.87	2.270	3	7	5	33.33	1.543	28	7	6	31.80	3.311	4	7	6	31.32	0.961	27	7	6	32.87	2.270	4	7	6	31.32	0.961	28	7	6	31.80	3.311	27	7	6	32.87	2.270	4	7	6	31.32	0.961	28	7	6	31.80	3.311	4	8	6	34.33	1.788	28	8	6	34.92	2.667	75	4	9	6	38.17	2.166	2.48362	1.0	2.23	nein	28	9	6	39.64	2.765	50	4	10	5	56.15	2.287	4.01073	1.5	2.26	nein	28	10	6	52.55	4.977	25	4	11	6	116.89	7.920	7.46621	1.4	2.23	nein	28	11	6	110.87	6.983					
200	3	4	3	29.44	1.740	2.05457	0.2	2.78	nein																																																																																																																																																																																																			
	27	4	3	29.05	2.327																																																																																																																																																																																																							
	4	5	3	27.66	1.488																																																																																																																																																																																																							
150	4	6	3	27.01	2.897	2.30290	0.3	2.78	nein																																																																																																																																																																																																			
	28	5	3	27.01	2.897																																																																																																																																																																																																							
	4	6	3	28.54	1.659																																																																																																																																																																																																							
100	28	6	3	27.57	2.674	2.22514	0.5	2.78	nein																																																																																																																																																																																																			
	3	7	5	33.33	1.543																																																																																																																																																																																																							
	4	7	6	31.32	0.961																																																																																																																																																																																																							
	3	7	5	33.33	1.543																																																																																																																																																																																																							
	27	7	6	32.87	2.270																																																																																																																																																																																																							
	3	7	5	33.33	1.543																																																																																																																																																																																																							
	28	7	6	31.80	3.311																																																																																																																																																																																																							
	4	7	6	31.32	0.961																																																																																																																																																																																																							
	27	7	6	32.87	2.270																																																																																																																																																																																																							
	4	7	6	31.32	0.961																																																																																																																																																																																																							
	28	7	6	31.80	3.311																																																																																																																																																																																																							
	27	7	6	32.87	2.270																																																																																																																																																																																																							
	4	7	6	31.32	0.961																																																																																																																																																																																																							
	28	7	6	31.80	3.311																																																																																																																																																																																																							
	4	8	6	34.33	1.788																																																																																																																																																																																																							
28	8	6	34.92	2.667																																																																																																																																																																																																								
75	4	9	6	38.17	2.166	2.48362	1.0	2.23	nein																																																																																																																																																																																																			
	28	9	6	39.64	2.765																																																																																																																																																																																																							
50	4	10	5	56.15	2.287	4.01073	1.5	2.26	nein																																																																																																																																																																																																			
	28	10	6	52.55	4.977																																																																																																																																																																																																							
25	4	11	6	116.89	7.920	7.46621	1.4	2.23	nein																																																																																																																																																																																																			
	28	11	6	110.87	6.983																																																																																																																																																																																																							

Beton: B25/16		Krafteinleitung: Schläffe Druckplatten							
Probekörper- höhe [mm]	Serie Nr.	Gruppe Nr. (+)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	s_d [N/mm ²]	t_{vorh}	t_{95} ++)	Unterschied statistisch gesichert ? +++)
400	5	1	3	26.12	1.324	1.40048	0.9	2.78	nein
	7	1	3	27.13	1.473				
300	5	2	3	26.97	0.476	0.75958	0.1	2.78	nein
	7	2	3	26.88	0.963				
250	5	3	3	27.23	1.222	1.29394	0.1	3.18	nein
	7	3	2	27.15	1.427				
200	5	4	3	28.26	1.026	0.93628	0.1	2.78	nein
	7	4	3	27.44	0.837				
	6	5	3	26.02	1.744				
150	8	5	3	25.82	0.549	1.29285	0.2	2.78	nein
	6	6	3	27.02	0.625				
	8	6	2	27.73	0.131				
100	5	7	6	28.76	1.628	1.65776	0.6	2.23	nein
	6	7	6	28.19	1.687				
	5	7	6	28.76	1.628				
	7	7	5	27.97	1.126				
	5	7	6	28.76	1.628				
	8	7	6	26.38	0.939				
	6	7	6	28.19	1.687				
	7	7	5	27.97	1.126				
	6	7	6	28.19	1.687				
	8	7	6	26.38	0.939				
	7	7	5	27.97	1.126				
75	8	8	6	26.38	0.939	1.36522	2.3	2.23	u.U.
	6	8	5	26.91	2.147				
	8	8	6	27.31	2.348				
50	6	9	4	25.68	1.651	1.62054	2.3	2.31	nein
	8	9	6	28.12	1.602				
25	6	10	5	28.38	0.819	1.36742	1.9	2.26	nein
	8	10	6	26.77	1.682				
25	6	11	6	29.15	2.838	3.80989	0.5	2.23	nein
	8	11	6	28.08	4.580				

+) Die Probekörper-Druckflächen der Gruppen 1,2,3,4,6 und 7 sind schalungsrauh, die der Gruppen 5,8,9,10 und 11 gesägt und geschliffen.

++) Aussagewahrscheinlichkeit 95%, Freiheitsgrad (n_1+n_2-2)

+++) u.U. (unter Umständen) weil $t_{95} < t_{vorh} \leq t_{99}$

Bild A22

Mittlere Druckfestigkeiten der Probekörper des Betons B25 nach Korrektur des Einflusses der Herstellbedingungen, mathematisch-statistische Prüfung des Unterschieds der Mittelwerte zwischen je 2 zusammengehörigen Versuchsserien

Beton: B25/04		Krafteinleitung: Starre Druckplatten							
Probekörper- höhe [mm]	Serie Nr.	Gruppe Nr. (+)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	s_d [N/mm ²]	t_{vorh}	t_{95} ++)	Unterschied statistisch gesichert ? +++)
400	9	1	3	28.97	1.738	1.45706	0.2	2.78	nein
	11	1	3	29.16	1.107				
300	9	2	3	28.30	1.021	1.85856	1.1	2.78	nein
	11	2	3	30.03	2.422				
250	9	3	3	29.21	2.293				
	11	3	3						
200	9	4	3	29.11	0.802	1.60870	1.5	2.78	nein
	11	4	3	31.10	2.129				
	10	5	3	30.70	2.411				
	12	5	3	28.63	2.153				
150	10	6	3	30.06	1.403	1.89660	0.2	2.78	nein
	12	6	3	29.79	2.286				
100	9	7	6	34.27	1.325	1.44350	0.6	2.23	nein
	10	7	6	34.73	1.553				
	9	7	6	34.27	1.325	1.32850	2.4	2.23	u.U.
	11	7	6	36.09	1.332				
	9	7	6	34.27	1.325	1.24383	0.8	2.23	nein
	12	7	6	33.68	1.157				
	10	7	6	34.73	1.553	1.44672	1.6	2.23	nein
	11	7	6	36.09	1.332				
	10	7	6	34.73	1.553	1.36939	1.3	2.23	nein
	12	7	6	33.68	1.157				
	11	7	6	36.09	1.332	1.24757	3.3	2.23	nein
	12	7	6	33.68	1.157				
	10	8	6	33.80	2.657	2.04580	1.7	2.23	nein
	12	8	6	31.85	1.145				
75	10	9	6	36.23	2.245	2.58423	0.1	2.26	nein
	12	9	5	36.34	2.954				
50	10	10	6	41.66	2.149	1.90723	0.0	2.23	nein
	12	10	6	41.65	1.630				
25	10	11	5	75.37	2.329	8.12943	0.3	2.26	nein
	12	11	6	76.63	10.706				

Beton: B25/04		Krafteinleitung: Schläffe Druckplatten											
Probekörper- höhe [mm]	Serie Nr.	Gruppe Nr. (+)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	s_d [N/mm ²]	t_{vorh}	t_{95} ++)	Unterschied statistisch gesichert ? +++)				
400	13	1	3	28.98	1.313	1.54305	1.1	2.78	nein				
	15	1	3	27.65	1.743								
300	13	2	3	29.84	1.275	0.99222	3.4	2.78	u.U.				
	15	2	3	27.06	0.586								
250	13	3											
	15	3											
200	13	4	3	29.54	0.383	0.44479	0.0	2.78	nein				
	15	4	3	29.54	0.499								
	14	5	3	31.26	2.291					1.78586	2.0	2.78	nein
	16	5	3	28.31	1.063								
150	14	6	3	31.52	2.147	1.80242	2.9	2.78	u.U.				
	16	6	3	27.32	1.374								
100	13	7	6	31.71	1.399	1.32095	0.9	2.23	nein				
	14	7	6	32.37	1.238								
	13	7	6	31.71	1.399	1.19855	0.1	2.23	nein				
	15	7	6	31.80	0.957								
	13	7	6	31.71	1.399	1.65926	2.2	2.26	nein				
	16	7	5	29.50	1.936								
	14	7	6	32.37	1.238	1.10645	0.9	2.23	nein				
	15	7	6	31.80	0.957								
	14	7	6	32.37	1.238	1.58659	3.0	2.26	u.U.				
	16	7	5	29.50	1.936								
	15	7	6	31.80	0.957	1.47466	2.6	2.26	u.U.				
	16	7	5	29.50	1.936								
	14	8	6	30.60	1.258	0.97571	3.9	2.23	ja				
	16	8	6	28.38	0.567								
75	14	9	6	30.12	1.016	0.84719	1.2	2.23	nein				
	16	9	6	29.54	0.635								
50	14	10	6	31.96	1.172	1.53663	4.0	2.23	ja				
	16	10	6	28.41	1.830								
25	14	11	6	30.68	2.382	3.07481	1.7	2.23	nein				
	16	11	6	27.62	3.638								

+) Die Probekörper-Druckflächen der Gruppen 1,2,3,4,6 und 7 sind schalungsrauh, die der Gruppen 5,8,9,10 und 11 gesägt und geschliffen.

++) Aussagewahrscheinlichkeit 95%, Freiheitsgrad ($n_1 + n_2 - 2$)

+++ u.U. (unter Umständen) weil $t_{95} < t_{vorh} \leq t_{99}$

Bild A23

Mittlere Druckfestigkeiten der Probekörper des Mörtels B25 nach Korrektur des Einflusses der Herstellbedingungen, mathematisch-statistische Prüfung des Unterschieds der Mittelwerte zwischen je 2 zusammengehörigen Versuchsserien

Mörtel	Probe- körper- höhe [mm]	Krafteinleitung: Starre Druckplatten									
		Serie Nr.	Druck- fläche)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Parallele Serien zusammengefaßt				
							Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Vertrauensbereich VB95 untere obere Grenze	
B25/04	400	9	r	3	28.97	1.738	6	29.07	1.367	27.70	30.57
		11	r	3	29.16	1.107					
	300	9	r	3	28.30	1.021	6	29.17	1.915	27.16	31.18
		11	r	3	30.03	2.422					
	250	9	r	3	29.21	2.293	3	29.21	2.293	23.52	34.91
		11	r								
	200	9	r	3	29.11	0.802	12	29.89	2.008	28.62	31.17
		11	r	3	31.10	2.129					
		10	ss	3	30.70	2.411					
		12	ss	3	28.63	2.153					
	150	10	r	3	30.06	1.403	6	29.93	1.703	28.14	31.72
		12	r	3	29.79	2.286					
	100	9	r	6	34.27	1.325	36	34.07	1.975	33.40	34.74
		11	r	6	36.09	1.332					
		10	r	6	34.73	1.553					
		12	r	6	33.68	1.157					
		10	ss	6	33.80	2.657					
		12	ss	6	31.85	1.145					
	75	10	ss	6	36.23	2.245	11	36.26	2.489	34.59	37.93
		12	ss	5	36.34	2.954					
10		ss	6	41.66	2.149						
50	12	ss	6	41.65	1.630	12	41.66	1.817	40.51	42.81	
	10	ss	5	75.37	2.329						
25	10	ss	5	75.37	2.329	11	76.06	7.737	70.86	81.26	
	12	ss	6	76.63	10.706						
Krafteinleitung: Schläffe Druckplatten											
B25/04	400	13	r	3	28.98	1.313	6	28.30	1.571	26.65	29.95
		15	r	3	27.65	1.743					
	300	13	r	3	29.84	1.257	6	28.46	1.762	26.61	30.31
		15	r	3	27.06	0.586					
	250	13	r				3	27.98	0.527	26.67	29.28
		15	r	3	27.98	0.527					
	200	13	r	3	29.54	0.383	12	29.73	1.555	28.74	30.72
		15	r	3	29.54	0.499					
		14	ss	3	31.26	2.291					
		16	ss	3	28.31	1.063					
	150	14	r	3	31.52	2.147	6	29.43	2.809	26.48	32.38
		16	r	3	27.32	1.374					
	100	13	r	6	31.71	1.399	35	30.80	1.964	30.13	31.48
		15	r	6	31.80	0.957					
		14	r	6	32.37	1.238					
		16	r	5	29.50	1.936					
		14	ss	6	30.60	1.258					
		16	ss	6	28.38	0.567					
	75	14	ss	6	30.12	1.016	12	29.84	0.862	29.29	30.39
		16	ss	6	29.54	0.635					
50	14	ss	6	31.96	1.172	12	30.19	2.362	28.69	33.19	
	16	ss	6	28.41	1.830						
25	14	ss	6	30.68	2.382	12	29.15	3.338	27.03	31.27	
	16	ss	6	27.62	3.638						

+) r=schalungsrauh ss=gesägt und geschliffen

Bild A24

Druckfestigkeitsergebnisse der Probekörper des Mörtels B25, zusammengefaßt in Abhängigkeit von der Probekörperschlankheit und der Art der Krafteinleitung

Mörtel	Probe- körper- höhe [mm]	Krafteinleitung: Starre Druckplatten									
		Serie Nr.	Druck- fläche)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Parallele Serien zusammengefaßt				
							Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Vertrauensbereich VB95 untere obere Grenze	
B15/04	400	25	r	2	17.67	0.641	2	17.67	0.641		
	300	25	r	3	18.80	0.589	3	18.80	0.589	17.34	20.26
	250	25	r	3	18.50	0.293	3	18.50	0.293	17.78	19.23
	200	25	r	3	19.09	0.827	6	18.88	0.594	18.26	19.50
		26	ss	3	18.65	0.220					
	150	26	r	3	19.33	0.103	3	19.33	0.103	19.07	19.58
		25	r	6	20.82	0.305					
	100	26	r	6	22.00	0.274	18	21.21	0.695	20.86	21.55
		26	ss	6	20.77	0.544					
		26	ss	6	23.24	0.602					
	75	26	ss	6	23.24	0.602	3	23.24	0.602	22.61	23.87
	50	26	ss	6	28.37	0.952	6	28.37	0.952	27.38	29.37
	25	26	ss	6	61.75	5.700	6	61.75	5.700	55.77	67.73
	Krafteinleitung: Schlanke Druckplatten										
B15/04	400	23	r	3	17.50	0.369	3	17.50	0.369	16.58	18.41
	300	23	r	3	19.04	0.443	3	19.04	0.443	17.94	20.14
	250	23	r	3	18.45	0.471	3	18.45	0.471	17.30	19.62
	200	23	r	3	17.72	0.162	6	17.67	0.472	15.45	19.89
		24	ss	3	17.60	0.723					
	150	24	r	3	17.53	1.229	3	17.53	1.229	14.48	20.68
	100	23	r	5	20.01	0.681	17	19.12	1.097	18.56	19.68
		24	r	6	19.37	0.801					
		24	ss	6	17.94	0.298					
	75	24	ss	6	17.64	0.910	6	17.64	0.910	16.68	18.59
	50	24	ss	6	17.78	1.160	6	17.78	1.160	16.56	18.99
	25	24	ss	6	18.16	1.308	6	18.16	1.308	16.79	19.54

+) r=schalungsrauh ss=gesägt und geschliffen

Bild A25

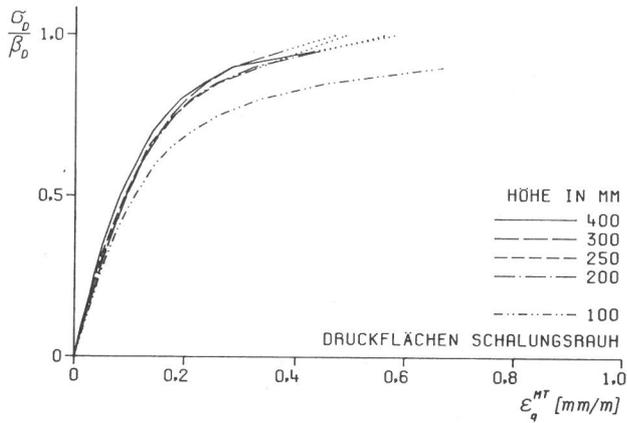
Druckfestigkeitsergebnisse der Probekörper des Mörtels B15, zusammengefaßt in Abhängigkeit von der Probekörperschlankheit und der Art der Krafteinleitung

Beton	Probekörperhöhe [mm]	Krafteinleitung: Starre Druckplatten									
		Serie Nr.	Druckfläche)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Parallele Serien zusammengefaßt				
							Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	Vertrauensbereich VB95 untere obere Grenze	
B35/16	400	19	r	3	38.13	2.527	3	38.13	2.527	31.86	44.40
	300	19	r	3	38.49	2.824	3	38.49	2.824	31.48	45.51
	250	19	r	3	36.53	1.742	3	36.53	1.724	32.21	40.86
	200	19	r	3	37.78	0.992	6	36.01	2.163	33.74	38.28
		20	ss	3	34.21	1.088					
	150	20	r	3	37.81	0.555	3	37.81	0.555	36.43	39.19
	100	19	r	6	46.65	1.050	18	45.09	1.999	44.10	46.08
		20	r	6	44.20	1.282					
		20	ss	6	44.39	2.528					
	75	20	ss	6	48.66	2.028	6	48.66	2.028	46.54	50.79
	50	20	ss	6	66.88	3.239	6	66.88	3.239	63.49	70.28
	25	20	ss	6	122.14	9.557	6	122.14	9.557	112.11	132.16
	Krafteinleitung: Schlappe Druckplatten										
B35/16	400	21	r	3	34.45	1.104	3	34.45	1.104	31.71	37.19
	300	21	r	3	33.92	0.474	3	33.92	0.474	32.75	35.10
	250	21	r	3	34.16	1.147	3	34.16	1.147	31.31	37.01
	200	21	r	3	36.00	0.722	5	34.96	1.748	32.79	37.13
		22	ss	2	33.45	1.828					
	150	22	r	2	36.09	0.113	2	36.09	0.113		
	100	21	r	6	36.91	2.130	18	36.87	1.684	36.03	37.71
		22	r	6	36.54	1.949					
		22	ss	6	37.07	0.710					
	75	22	ss	5	33.65	2.797	5	33.65	2.797	30.17	37.13
	50	22	ss	6	35.43	3.753	6	35.43	3.753	31.49	39.37
	25	22	ss	6	38.86	9.916	6	38.86	2.916	35.80	41.92

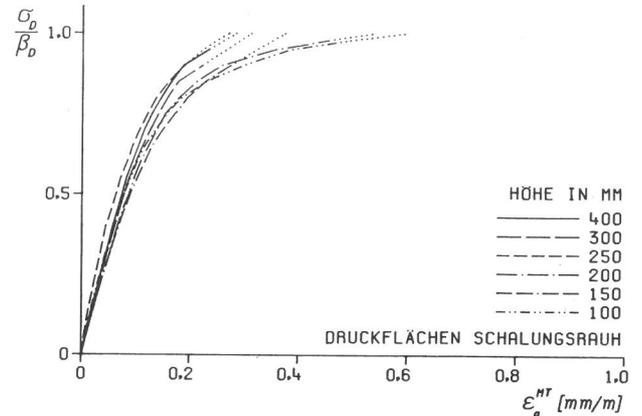
+) r=schalungsrauh ss=gesägt und geschliffen

Bild A26

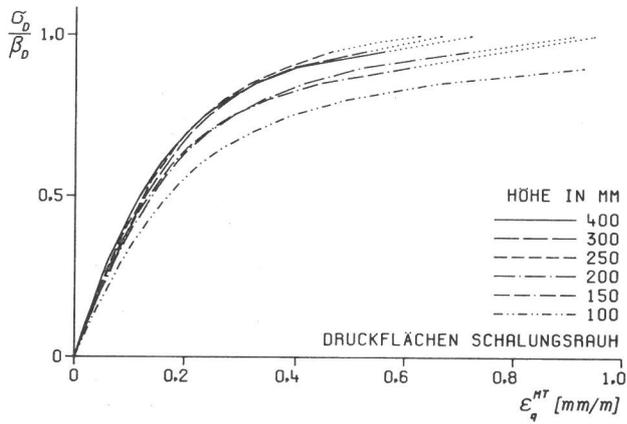
Druckfestigkeitsergebnisse der Probekörper des Betons B35, zusammengefaßt in Abhängigkeit von der Probekörperschlankheit und der Art der Krafteinleitung



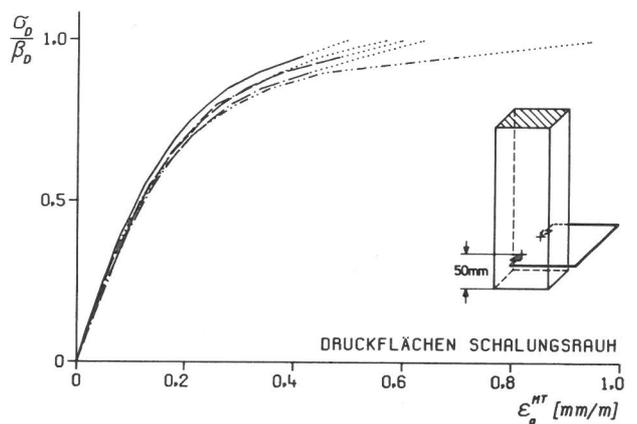
DRUCKPLATTE STARR + BETON B25/16



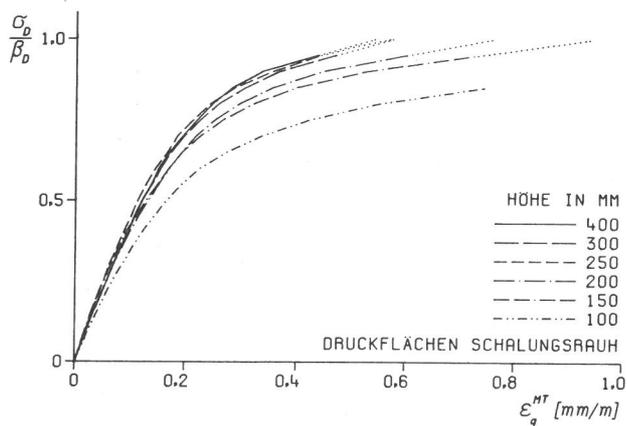
DRUCKPLATTE SCHLAFF + BETON B25/16



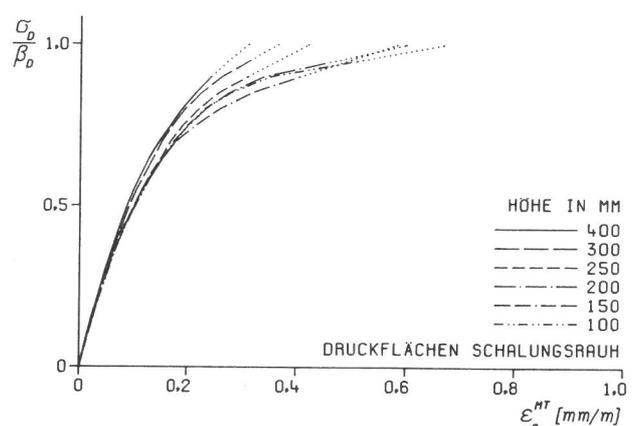
DRUCKPLATTE STARR + MÖRTEL B25/04



DRUCKPLATTE SCHLAFF + MÖRTEL B25/04



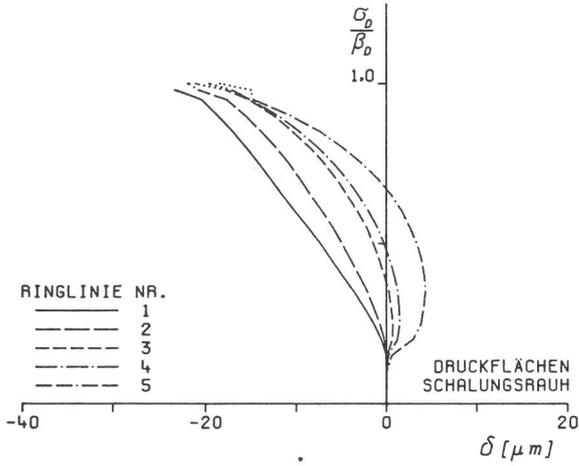
DRUCKPLATTE STARR + BETON B35/16



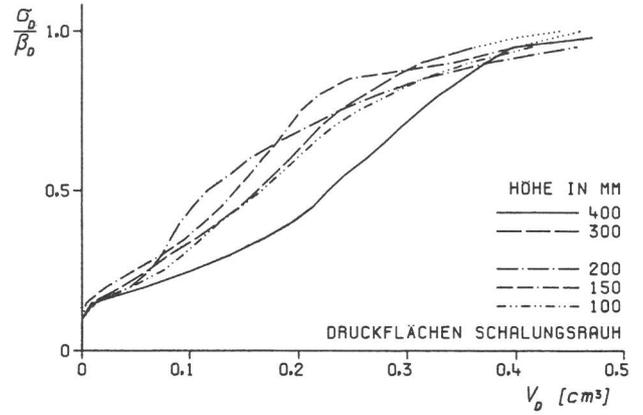
DRUCKPLATTE SCHLAFF + BETON B35/16

Bild A27

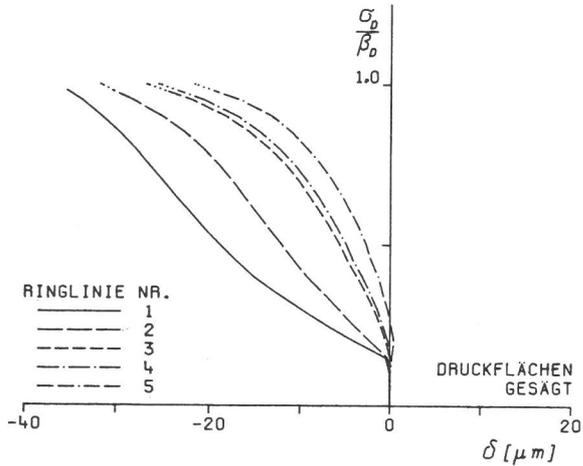
Mittig (MT) 50 mm oberhalb der unteren Probekörperendfläche gemessene Querdehnung bei Krafteinleitung über starre und schlaaffe Druckplatten



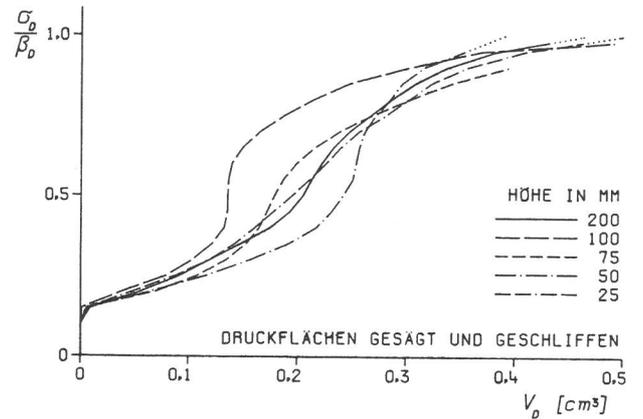
MÖRTEL B25/04 + PRÖBEKÖRPERHÖHE 400 MM



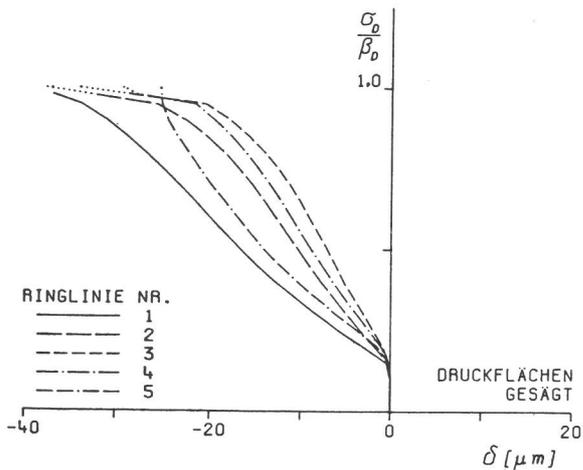
DRUCKPLATTE SCHLAFF + MÖRTEL B25/04



MÖRTEL B25/04 + PRÖBEKÖRPERHÖHE 200 MM



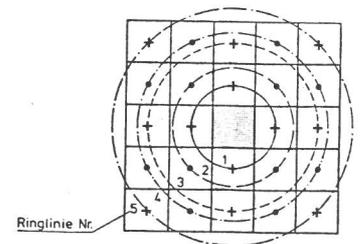
DRUCKPLATTE SCHLAFF + MÖRTEL B25/04



MÖRTEL B25/04 + PRÖBEKÖRPERHÖHE 25 MM

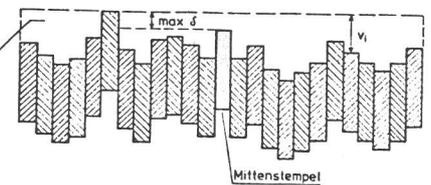
Lage der zu Ringlinien
zusammengefaßten Meßstellen
(Draufsicht auf untere
schlaffe Druckplatte)

+ gemessener } Wert δ
• interpolierter }



Volumen V_D der
deformierten
Druckfläche

$$V_D = A_S \cdot \sum_{i=1}^{25} v_i$$



Einzelstempel Nr. 1...25
Querschnittsfläche: $A_S = 400 \text{ mm}^2$

Bild A28

Längsbewegungen δ von Einzelstempeln der schlaffen Druckplatte und Volumen V_D der deformierten Druckfläche von Probekörpern aus Mörtel B25

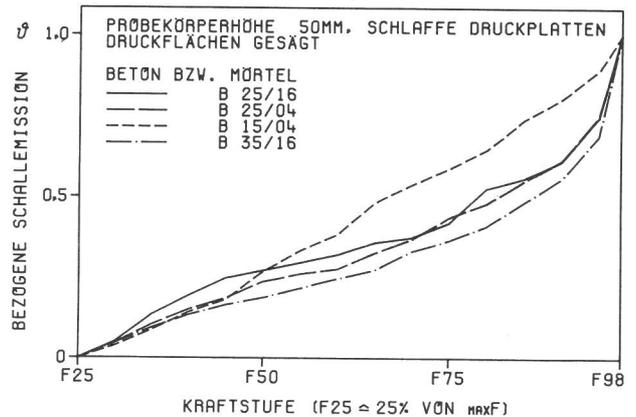
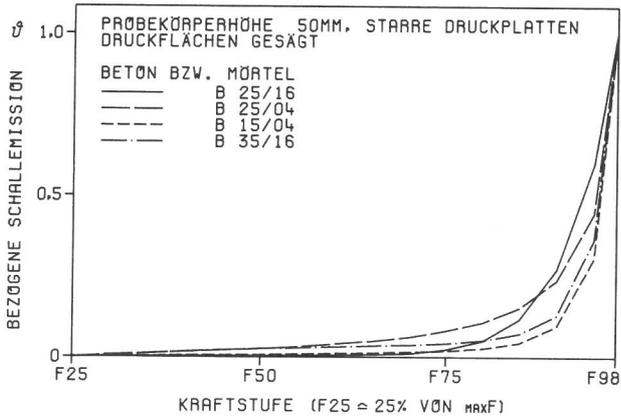
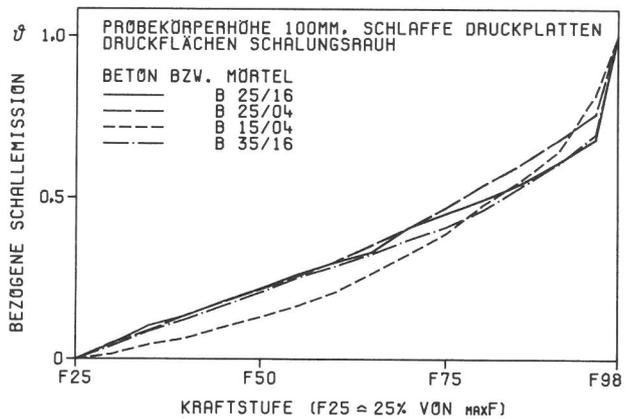
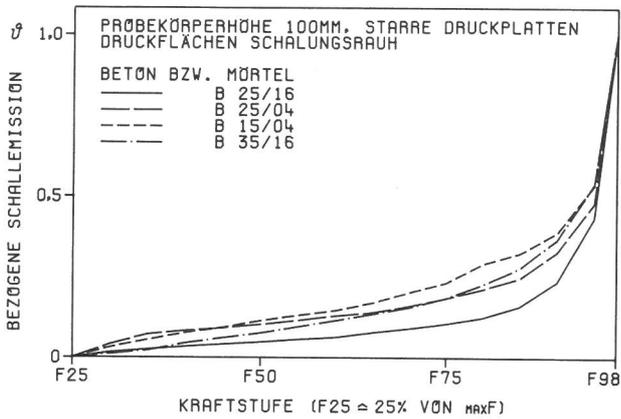
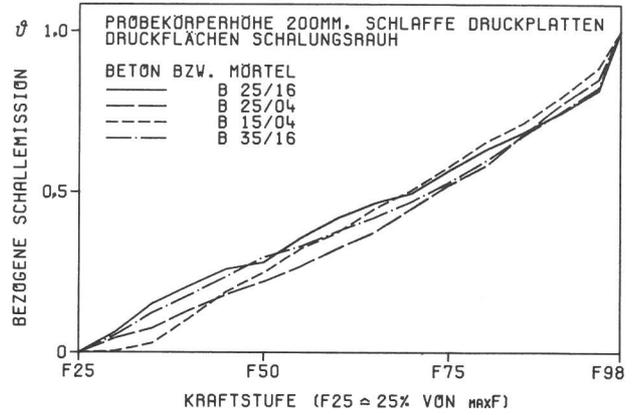
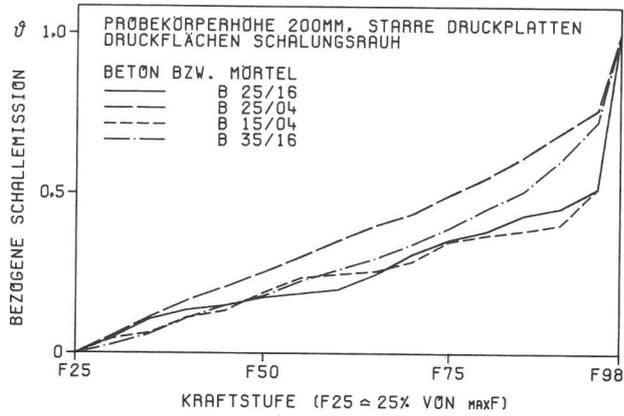


Bild A29

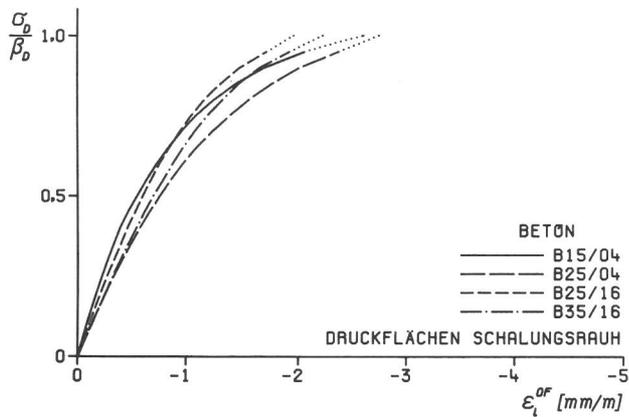
Schallemissionen - dargestellt als Summenlinien von Schallimpulsen - von 200 mm hohen Prismen, 100mm-Würfeln und 50 mm dicken Platten der 4 Versuchsbetone bei Krafteinleitung über starre im Vergleich zu schlaffen Druckplatten

Druckplatten	Versuchsserie Nr.	Druckflächen +)	Gruppe Nr.	Probekörper											
				11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
			Höhe [mm]	25	50	75	100	100	150	200	200	250	300	400	
starr	3	r	Anzahl n					5			3	3	3	3	
			β_D [N/mm ²]					33.33			29.44	25.97	26.65	26.45	
	4	r	n					6							
			β_D					31.32							
		ss	n	6	5	6	6				3				
			β_D	116.89	56.15	38.17	34.33				27.66				
	27	r	Anzahl n					6			3	3	3	3	
			β_D [N/mm ²]					32.87			29.05	27.77	27.32	27.81	
	28	r	n					6	3						
			β_D					31.80	27.57						
		ss	n	6	6	6	6				3				
			β_D	110.87	52.55	39.64	34.92				27.01				
	3 und 4			β_D	3.40	1.64	1.11	1.00	1.00	0.91	0.81	0.88	0.78	0.80	0.79
	27 und 28			β_{W100} ++)	3.17	1.50	1.14	1.00	1.00	0.87	0.77	0.88	0.85	0.83	0.85
3,4,27,28			f_W +++)	3.30	1.60	1.13	1.00	1.00	0.90	0.84	0.84	0.82	0.82	0.82	
			$\hat{f} = 0.82$ +++)												
			$f = f_W / \hat{f}$	4.02	1.95	1.38	1.22	1.22	1.10	1.02	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00
			β_D [N/mm ²]	113.88	54.19	38.89	34.63	32.29	28.05	27.34	29.25	26.87	26.99	27.13	
			$\beta_e = \beta_D / f$	28.33	27.79	28.18	28.39	26.47	25.50	26.80	28.68	26.87	26.99	27.13	
			β_e [N/mm ²]	27.4											
schlaff	5	r	Anzahl n					6			3	3	3	3	
			β_D [N/mm ²]					28.76			28.26	27.23	26.97	26.12	
	6	r	n					6	3						
			β_D					28.19	27.02						
		ss	n	6	5	4	5				3				
			β_D	29.15	28.38	25.68	26.91				26.02				
	7	r	Anzahl n					5			3	2	3	3	
			β_D [N/mm ²]					27.97			27.44	27.15	26.88	27.13	
	8	r	n					6	2						
			β_D					26.38	27.73						
		ss	n	6	6	6	6				3				
			β_D	28.08	26.77	28.12	27.31				25.82				
	5 und 6			β_D	1.08	1.05	0.95	1.00	1.00	0.96	0.97	0.98	0.95	0.94	0.91
	7 und 8			β_{W100} ++)	1.03	0.98	1.03	1.00	1.00	1.05	0.95	0.98	0.97	0.96	0.97
5,6,7,8			f_W +++)	1.06	1.01	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.93	
			$\hat{f} = 0.97$ +++)												
			$f = f_W / \hat{f}$	1.09	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	
			β_D [N/mm ²]	28.61	27.49	27.13	27.13	27.82	27.29	25.92	27.85	27.19	26.92	26.62	
			$\beta_e = \beta_D / f$	26.25	26.43	26.86	27.13	27.82	27.29	25.92	27.85	27.46	27.47	27.73	
			β_e [N/mm ²]	27.1											

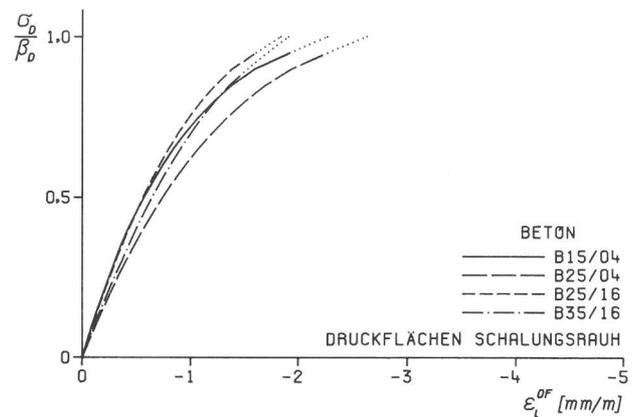
- +) r=schalungsrauh ss=gesägt und geschliffen
 ++) Werte im Bild 10.6 eingetragen
 +++) grafisch im Bild 10.6 ermittelt

Bild A30

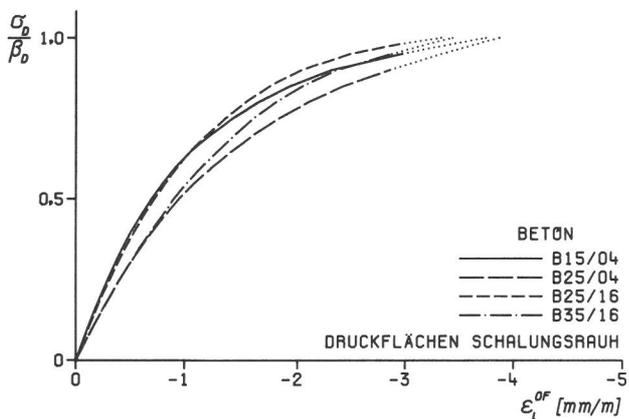
Ermittlung der Formfaktoren f und der einaxialen Betondruckfestigkeit β_e für Probekörper aus Beton B25/16 anhand der Probekörperfestigkeiten β_D und des Stufenwertes \hat{f} (s. Bild 10.6)



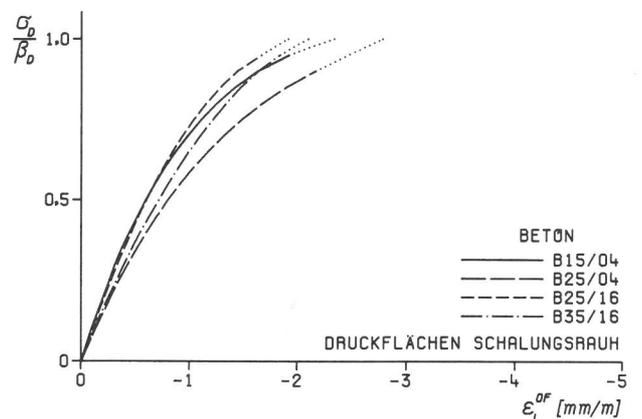
DRUCKPLATTE STARR + PRÜBEKÖRPERHÖHE 400 MM



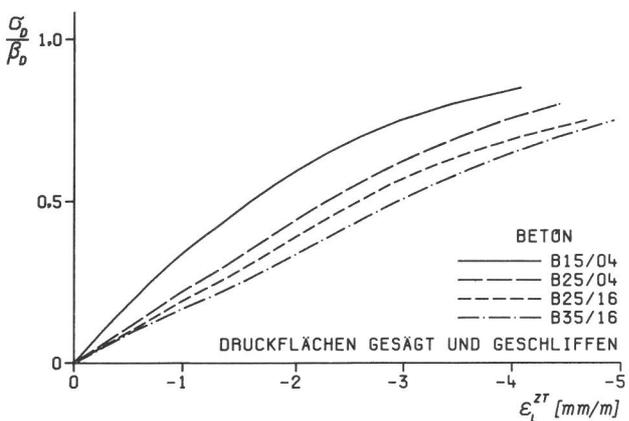
DRUCKPLATTE SCHLAFF + PRÜBEKÖRPERHÖHE 400 MM



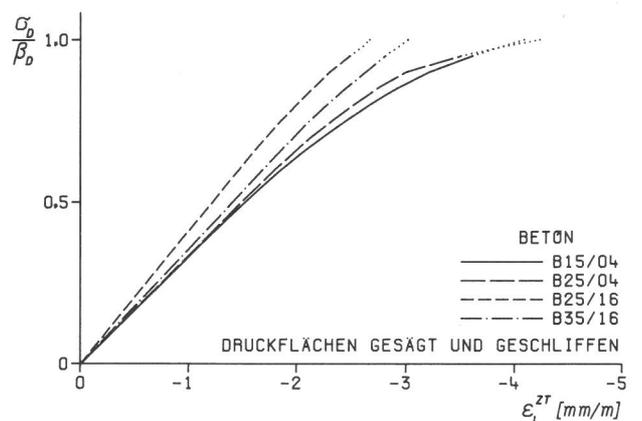
DRUCKPLATTE STARR + PRÜBEKÖRPERHÖHE 100 MM



DRUCKPLATTE SCHLAFF + PRÜBEKÖRPERHÖHE 100 MM



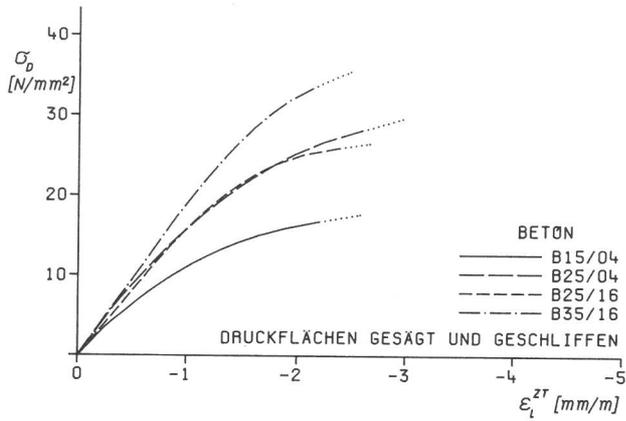
DRUCKPLATTE STARR + PRÜBEKÖRPERHÖHE 50 MM



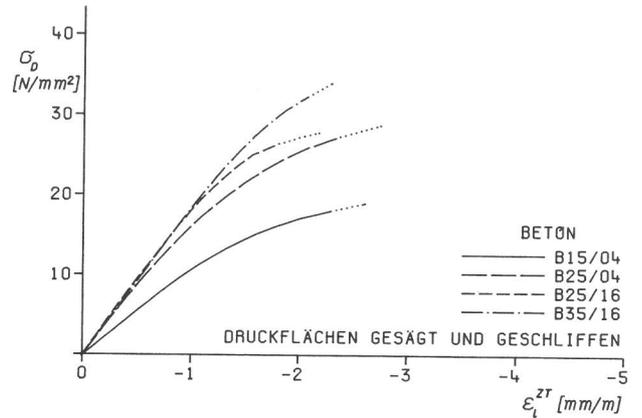
DRUCKPLATTE SCHLAFF + PRÜBEKÖRPERHÖHE 50 MM

Bild A32

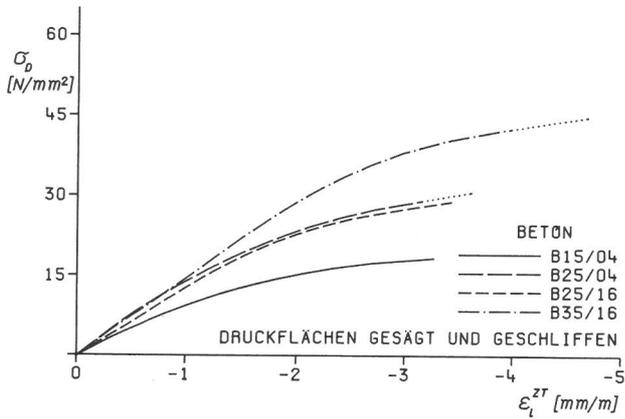
Stauchungslinien von schlanken im Vergleich zu gedungenen Probekörpern aus zentrischer (ZT) und Oberflächenmessung (OF) bei Kräfteinleitung über starre und schlaaffe Druckplatten



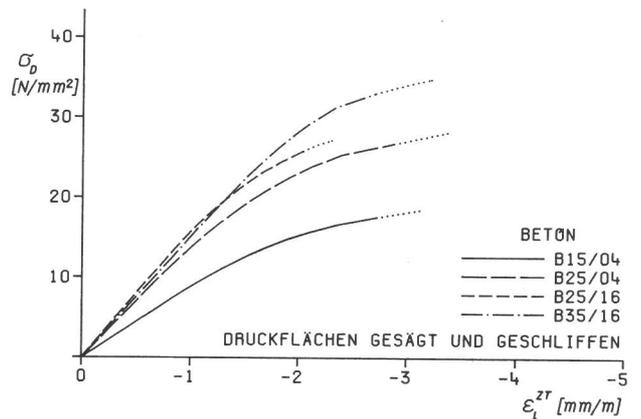
DRUCKPLATTE STARR + PROBEKÖRPERHÖHE 200 MM



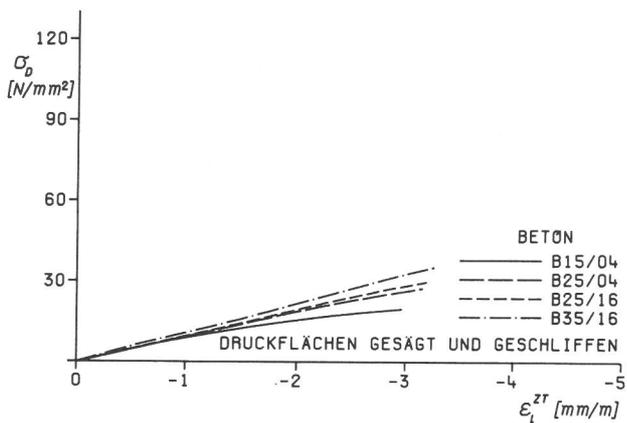
DRUCKPLATTE SCHLAF + PROBEKÖRPERHÖHE 200 MM



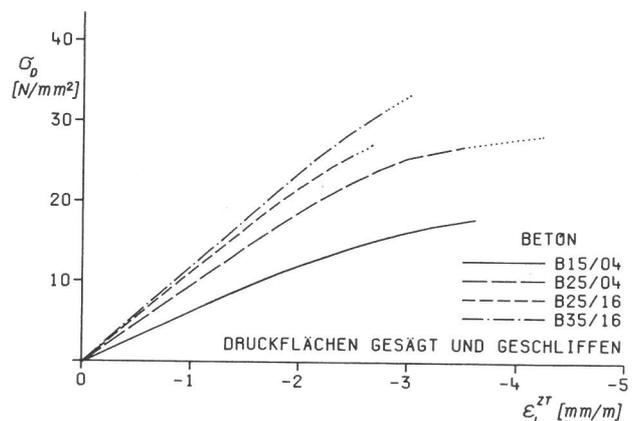
DRUCKPLATTE STARR + PROBEKÖRPERHÖHE 100 MM



DRUCKPLATTE SCHLAF + PROBEKÖRPERHÖHE 100 MM



DRUCKPLATTE STARR + PROBEKÖRPERHÖHE 50 MM



DRUCKPLATTE SCHLAF + PROBEKÖRPERHÖHE 50 MM

Bild A33

Spannungs-Stauchungslinien der 4 Versuchsbetone aus zentrischer Messung (ZT) zwischen den Druckplatten bei verschiedenen Probekörperhöhen und unterschiedlicher Krafteinleitung (Ordinatenmaßstab teilweise verkürzt)

Krafteinleitung: Starre Druckplatten												
Beton	Probekörper- höhe [mm]	Serie Nr.	Gruppe Nr. (+)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	s_d [N/mm ²]	t_{vorh}	t_{95} (++)	Unterschied statistisch gesichert ? (+++)		
B25/16	200	3	4	3	29.44	1.740	1.61891	1.3	2.78	nein		
		4	5	3	27.66	1.488						
		27	4	3	29.05	2.327						
		B25/04	200	28	5	3	27.01	2.897	2.62750	1.0	2.78	nein
				3	4	3	29.44	1.740	2.38958	1.2	2.78	nein
				28	5	3	27.01	2.897				
				4	5	3	27.66	1.488				
B15/04	200			27	4	3	29.05	2.327	1.95308	0.9	2.78	nein
				9	4	3	29.11	0.802	1.79668	1.1	2.78	nein
				10	5	3	30.70	2.411				
		11	4	3	31.10	2.129						
		B35/16	200	12	5	3	28.63	2.153	2.14103	1.4	2.78	nein
				9	4	3	29.05	2.327	2.24168	0.2	2.78	nein
				12	5	3	28.63	2.153				
10	5			3	29.11	0.802						
B15/04	200			11	4	3	31.10	2.129	1.60870	1.5	2.78	nein
				25	4	3	19.09	0.827	0.60511	0.9	2.78	nein
26	5			3	18.65	0.220						
B35/16	200	19	4	3	37.78	0.922	1.00842	4.3	2.78	u.U.		
		20	5	3	34.21	1.088						

Krafteinleitung: Schläffe Druckplatten												
Beton	Probekörper- höhe [mm]	Serie Nr.	Gruppe Nr. (+)	Anzahl n	β_D [N/mm ²]	s [N/mm ²]	s_d [N/mm ²]	t_{vorh}	t_{95} (++)	Unterschied statistisch gesichert ? (+++)		
B25/16	200	5	4	3	28.26	1.026	1.43077	1.9	2.78	nein		
		6	5	3	26.02	1.744						
		7	4	3	27.44	0.837						
		B25/04	200	8	5	3	25.82	0.549	0.70780	2.8	2.78	u.U.
				5	4	3	28.26	1.026	0.82282	3.6	2.78	u.U.
				8	5	3	25.82	0.549				
				6	5	3	26.02	1.744				
B15/04	200			7	4	3	27.44	0.837	1.36786	1.3	2.78	nein
				13	4	3	29.54	0.383	1.64246	1.3	2.78	nein
				14	5	3	31.26	2.291				
		15	4	3	29.54	0.499						
		B35/16	200	16	5	3	28.31	1.063	0.83035	1.8	2.78	nein
				13	4	3	27.44	0.383	0.79895	1.3	2.78	nein
				16	5	3	28.31	1.063				
14	5			3	31.26	2.291						
B15/04	200			15	4	3	29.54	0.499	1.65796	1.3	2.78	nein
				23	4	3	17.72	0.162	0.52391	0.3	2.78	nein
24	5			3	17.60	0.723						
B35/16	200	21	4	3	36.00	0.722	1.20887	2.3	3.18	nein		
		22	5	2	33.45	1.828						

- +) Die Probekörper-Druckflächen der Gruppe 4 sind schalungsrauh, die der Gruppe 5 gesägt und geschliffen.
 ++) Aussagewahrscheinlichkeit 95%
 +++ u.U. (unter Umständen) weil $t_{95} < t_{vorh} \leq t_{99}$

Bild A34

Zweistichproben-t-Test zum Unterschied der mittleren Druckfestigkeiten von Prismen mit schalungsrauhem und gesägt/geschliffenen Druckflächen

lfd. Nr.	Beton bzw. Mörtel	Probekörper	zon $\epsilon_l = a+c \times \sigma_D$							
			Starre Druckplatten				Schläffe Druckplatten			
			Anzahl Wertepaare	a	c	B ⁺⁾	Anzahl Wertepaare	a	c	B ⁺⁾
1	B25/16	Prismen 200mm	13	10.88	6.20	0.999	13	5.87	14.62	0.992
		Würfel 100mm	15	18.07	-8.47	0.999	13	8.72	-3.90	0.997
		zusammengefaßt	28	17.39	-29.70	0.885	26	7.28	5.05	0.928
2	B25/04	Prismen 200mm	14	17.22	77.35	0.994	13	5.35	29.13	0.987
		Würfel 100mm	13	19.04	171.78	0.931	13	10.47	-77.38	0.948
		zusammengefaßt	27	18.76	113.83	0.748	26	7.11	-9.14	0.738
3	B15/04	Prismen 200mm	14	7.92	-25.10	0.965	14	(19.55)	(-173.83)	(0.961)
		Würfel 100mm	14	19.73	-28.47	0.983	8	(22.52)	(-204.04)	(0.997)
		zusammengefaßt	28	12.85	-20.55	0.435	-	-	-	-
4	B35/16	Prismen 200mm	12	6.07	8.20	0.997	15	2.31	1.59	0.974
		Würfel 100mm	12	3.80	-1.63	0.917	15	10.81	3.12	0.997
		zusammengefaßt	24	3.84	17.18	0.593	30	7.88	-15.20	0.394

+) Bestimmtheitsmaß, einfache lineare Korrelation

Bild A35

Auf die einwirkende Druckspannung bezogene Abhängigkeit der zusätzlichen Stauchungsbeträge $zon\epsilon_l$ von schalungsrauhem Probekörperendzonen

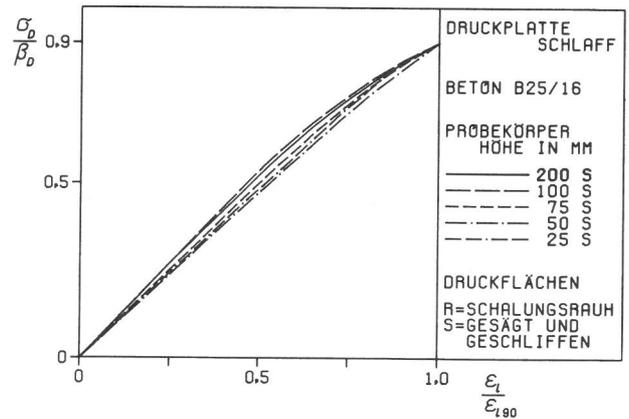
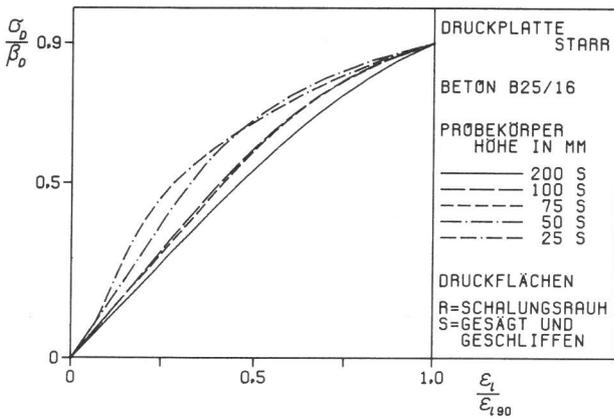
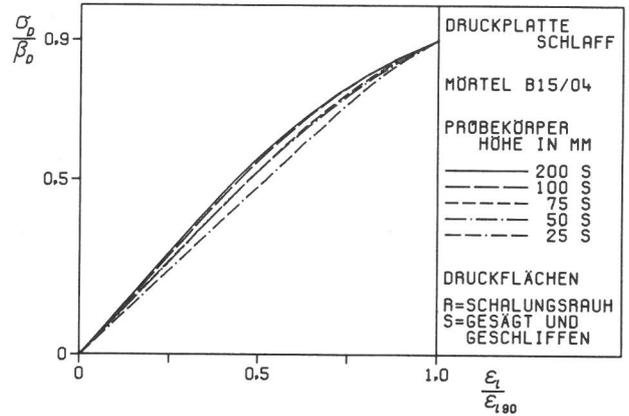
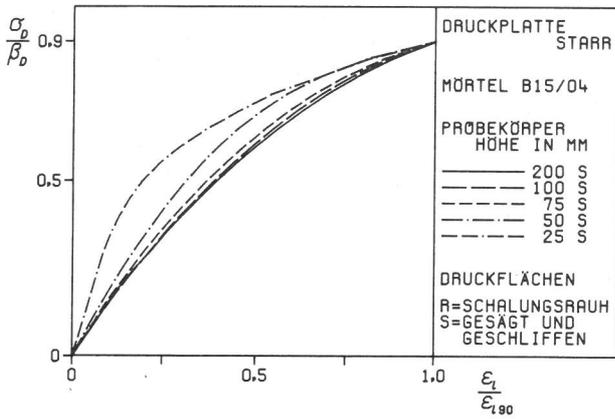
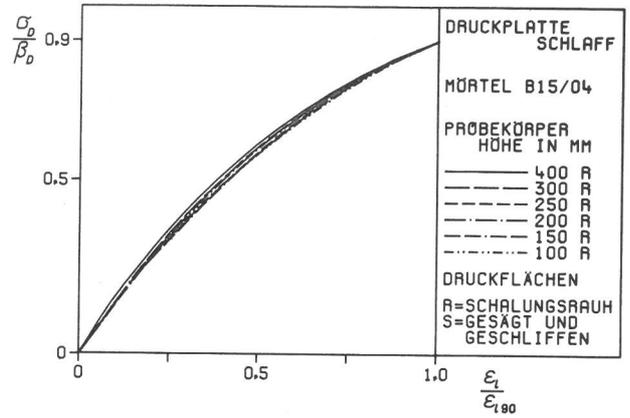
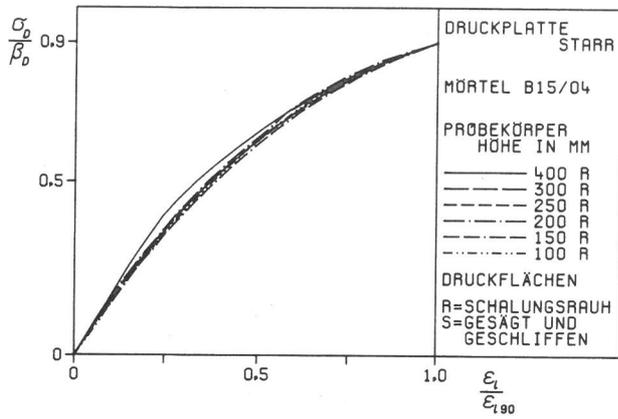


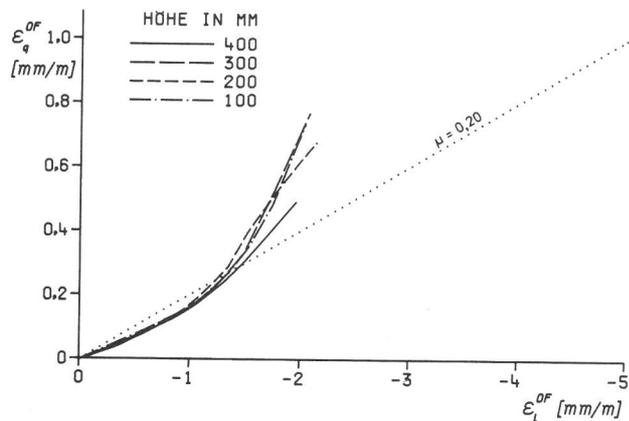
Bild A36

Spannungs-Stauchungslinien prismatischer Probekörper unterschiedlicher Schlankheit in bezogener Darstellung bei Krafteinleitung über starre (links) und schlaffe Druckplatten ($\beta_D \Delta \sigma_D$ bei 100% $\max \sigma_D$, $\epsilon_{L90} \Delta \epsilon_L$ bei 90% $\max \sigma_D$)

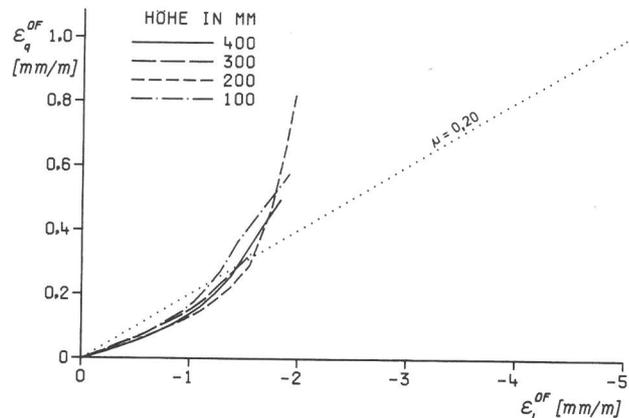
Druck- platten	Mörtel bzw. Beton	Kraftstufe in Prozent von β_D	Spezifische Verformungsarbeit [kJ/m ³]								
			Probekörperhöhe [mm]								
			25	50	75	100	150	200	250	300	400
starr	B25/16	25%	55	9	4	3	2	2	1	1	1
		50%	285	36	16	10	6	6	5	4	4
		65%	694	70	28	18	10	11	9	8	8
		80%	1456	145	50	32	17	18	15	14	13
		90%	2285	265	81	50	25	26	21	20	19
		95%	3055	405	111	67	34	33	27	25	24
	100%	3949	571	177	100	44	45	37	34	33	
	B25/04	25%	36	6	4	3	2	2	1	1	1
		50%	241	24	16	12	7	7	6	6	5
		65%	702	44	28	22	14	14	12	11	10
		80%	1510	80	51	39	24	24	21	19	18
		90%	2492	129	79	60	37	37	32	29	28
		95%	3917	174	106	79	49	47	41	37	35
	100%	5498	263	134	100	67	58	59	47	44	
	B15/04	25%	27	3	2	1	1	1	1	1	0
		50%	178	12	7	6	4	3	3	3	2
		65%	496	24	14	12	8	7	7	7	5
		80%	1202	47	26	21	15	13	12	12	10
		90%	2053	87	43	33	22	21	19	19	16
		95%	2913	141	60	45	30	27	23	24	21
	100%	3163	236	79	67	38	33	29	30	26	
	B35/16	25%	63	13	7	5	3	2	2	2	2
		50%	256	49	27	18	12	9	8	9	8
		65%	547	90	48	32	20	16	15	15	4
80%		1193	165	83	53	33	26	25	26	23	
90%		2020	282	126	80	46	37	35	36	33	
95%		2694	458	168	106	58	46	43	44	40	
100%	3404	643	219	136	71	57	52	53	51		
schlaff	B25/16	25%	4	2	2	2	2	1	1	1	1
		50%	15	9	7	7	6	5	5	5	4
		65%	24	15	12	12	11	9	8	8	8
		80%	36	24	20	20	18	16	14	13	13
		90%	48	31	27	28	26	22	20	19	19
		95%	58	33	34	35	30	27	25	25	23
	100%	75	39	43	46	36	36	32	31	31	
	B25/04	25%	4	3	2	2	2	2	1	1	1
		50%	16	11	9	9	8	7	6	6	6
		65%	26	19	16	17	15	14	12	12	11
		80%	40	32	28	29	26	24	20	21	20
		90%	53	45	41	43	38	36	30	32	30
		95%	64	60	53	56	48	45	37	39	37
	100%	77	78	66	72	58	55	51	48	44	
	B15/04	25%	3	2	1	1	1	1	1	1	1
		50%	11	7	5	6	4	4	4	4	3
		65%	19	12	10	10	8	8	8	8	6
		80%	29	20	16	18	14	13	14	14	11
		90%	40	28	23	26	20	20	21	21	17
		95%	48	35	27	33	25	25	26	26	22
	100%	55	43	33	43	32	31	35	33	27	
	B35/16	25%	6	3	2	3	3	2	2	2	2
		50%	23	12	9	12	11	8	8	7	7
		65%	38	21	16	20	20	15	14	12	12
80%		60	33	24	33	32	24	24	21	20	
90%		79	43	33	45	44	34	33	29	28	
95%		89	49	38	56	50	42	40	36	35	
100%	98	56	45	72	60	52	48	43	43		

Bild A37

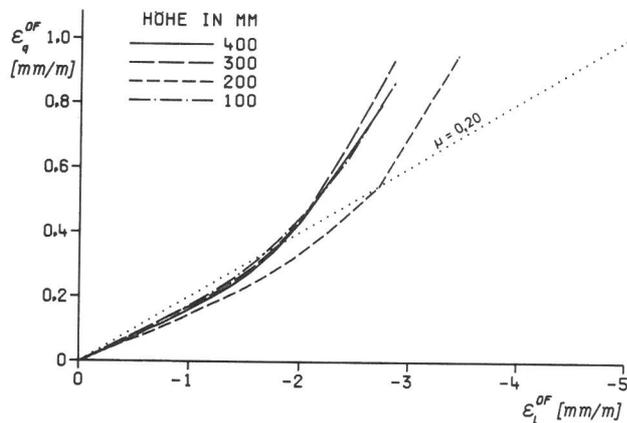
Spezifische Verformungsarbeit w unterschiedlich schlanker Probekörper der 4 Versuchsbetone in Abhängigkeit von der Art der Krafteinleitung und der Höhe der Druckbeanspruchung



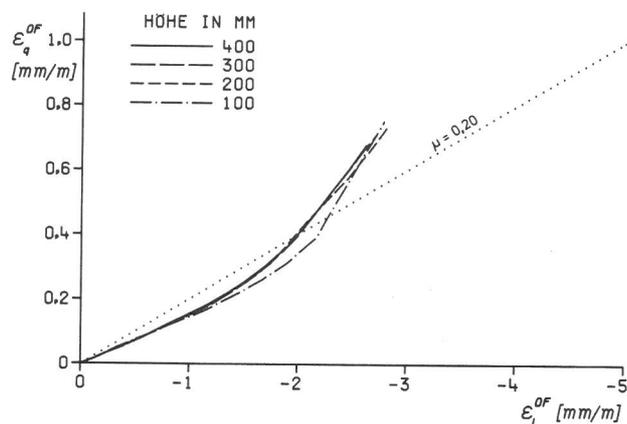
DRUCKPLATTE STARR + BETON B25/16



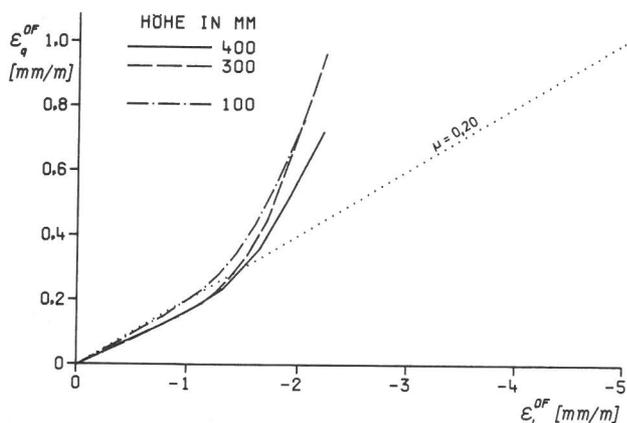
DRUCKPLATTE SCHLAFF + BETON B25/16



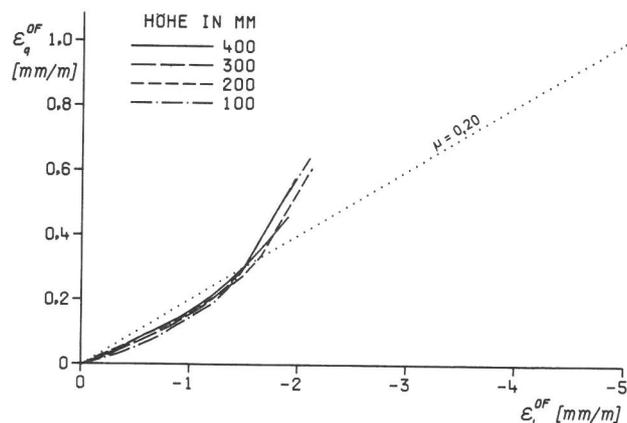
DRUCKPLATTE STARR + MÖRTEL B25/04



DRUCKPLATTE SCHLAFF + MÖRTEL B25/04



DRUCKPLATTE STARR + BETON B35/16



DRUCKPLATTE SCHLAFF + BETON B35/16

Bild A38

Verhältnis von Querdehnungen und Längsstauchungen (μ = Querdehnzahl) verschiedener Versuchsbetone bei starrer (links) und schlaffer Krafteinleitung

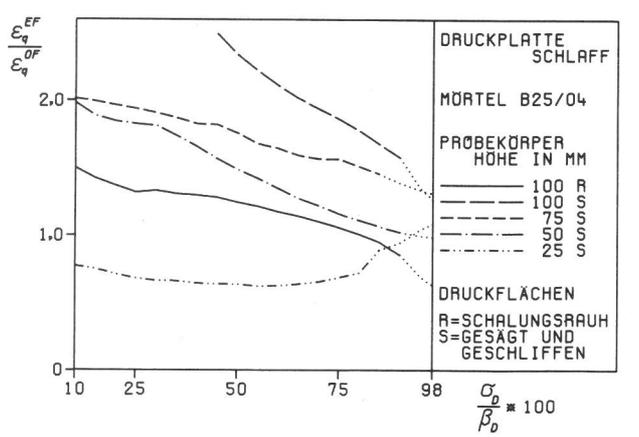
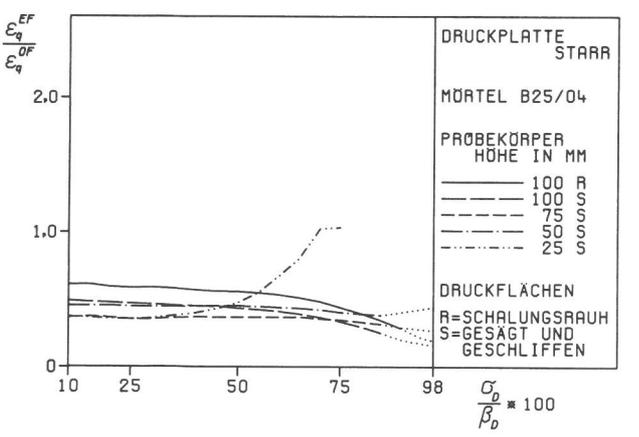
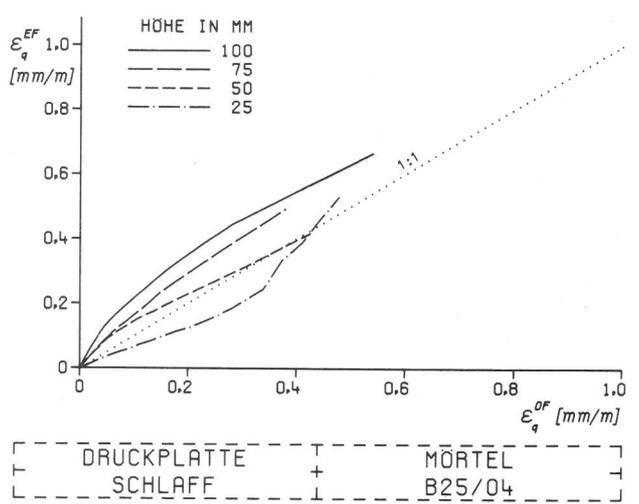
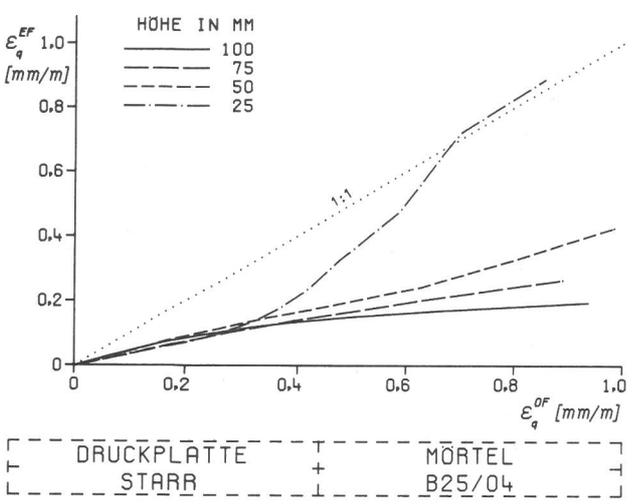
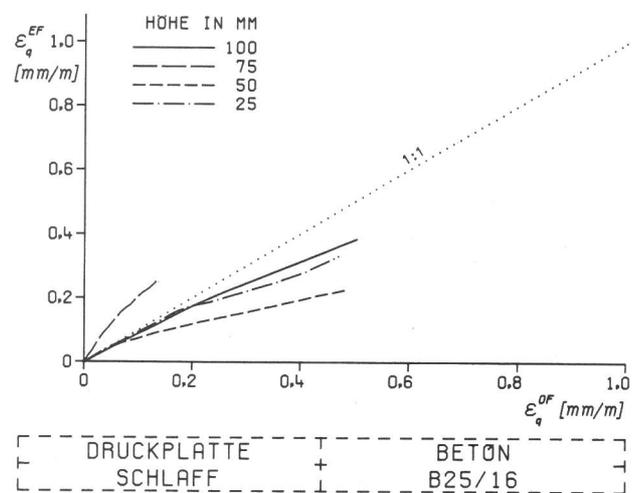
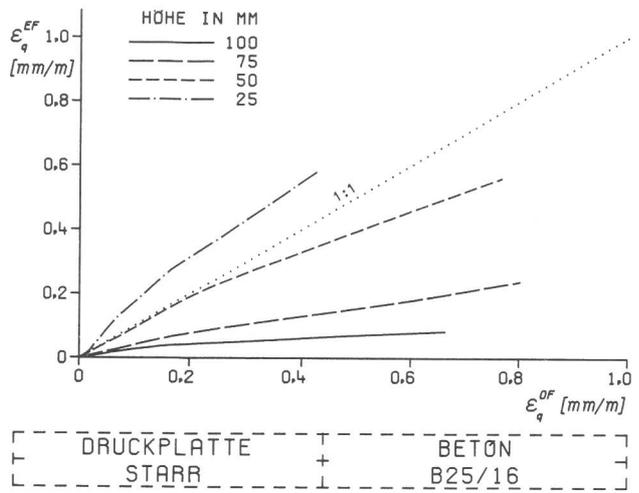


Bild A39

Querdehnungen nahe der Endfläche (EF) im Verhältnis zur Querdehnung in mittlerer Probekörperhöhe (OF) bei Krafteinleitung über starre (links) und schlaffe Druckplatten

Druckplatten	Probekörperhöhe [mm]	Tabellenwerte: $\frac{\sigma_D}{\beta_D} \times 100$ (Spannungsstufen in Prozent der Druckfestigkeit)													
		B25/16				B25/04			B15/04			B35/16			
		inf σ_D	mic σ_D	sup σ_D	mac σ_D	inf σ_D	mic σ_D	sup σ_D	inf σ_D	mic σ_D	sup σ_D	inf σ_D	mic σ_D	sup σ_D	mac σ_D
starr	25	44	55.5	(72.5)	(85)	46	59	78	(41)	(61)	(81)	(39.5)	(61.5)	(75)	(88)
	50	48	60	(76.5)	89	50.5	64	82	45	65	(84)	43	65	(78)	90.5
	75	52	64	(80)	91.5	54	67.5	85	48	68	(87)	46	68	(80)	92
	100	55	67	82.5	93	57	70	87	50	69.5	89	49	71	82.5	93
	150	60	71.5	86	95	60.5	73	90	52.5	72	92	54	75.5	85	93.5
	200	64.5	74	87.5	95	63	74.5	92	53	72	93	59	78	87	94
	250	66.5	75	88	95	64.5	75	92	53	72	93	62.5	79	88	94
	300	68	75	88	95	65	75	92	53	72	93	62.5	80	89	94
	400	68	75	88	95	65	75	92	60	71	93	69	82	91	94
schlaff	25	58.5	79	99		60	80	(95.5)	60	77	91	58	90	96	
	50	62	78.5	97		63	75.5	(97)	65.5	77	96	61	84	93	
	75	64.5	78	96		64.5	73.5	(98)	67	77	98	63.5	80.5	92	
	100	66	78	95		65	72	98.5	67	77	98	64	79	92	
	150	69	78	93.5		65	72	98.5	67	77	98	64	79	92	
	200	70.5	78	92.5		65	72	98.5	67	77	98	64	79	92	
	250	71	78	92		65	72	98.5	67	77	98	64	79	92	
	300	71	78	92		65	72	98.5	67	77	98	64	79	92	
	400	71	78	92		65	72	98.5	67	77	98	64	79	92	

() Eingeklammerte Werte sind geschätzt

□ Stark umrandete Felder: 100% Δ einaxiale Druckfestigkeit (Formfaktor=1.0)

Bild A40

Auf die jeweilige Probekörperfestigkeit β_D bezogene ausgezeichnete Spannungswerte zur quantitativen Bestimmung von Gefügeschwellen beim Betondruckversuch

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungssellen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen

Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden

von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung

Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen

von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin

Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen

von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung

von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen

von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —

von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall

von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern

von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall

von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology

von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung

von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen

von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens

von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen

von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —

von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Okttober 1976

Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Okttober 1976

Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Okttober 1976

Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/November 1976

Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezember 1976

Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Okttober 1977

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlhöner

Nr. 49/Dezember 1977

Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andrae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Okttober 1978

Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Nr. 54/Oktober 1978

Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander

Nr. 55/November 1978

Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke

Nr. 56/Januar 1979

Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langli

Nr. 57/März 1979

Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus

Nr. 58/März 1979

Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 59/Juli 1979

Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk

Nr. 60/August 1979

Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs

Nr. 61/Dezember 1979

Beschreibung von Problemen der höheren Farbmimetrie mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter

Nr. 62/Dezember 1979

Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker

Nr. 63/Dezember 1979

Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig

Nr. 64/Februar 1980

Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 65/Februar 1980

Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 66/Mai 1980

Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig

Nr. 67/Mai 1980

Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Nr. 68/Juni 1980

Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn

Nr. 69/Juni 1980

Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Burchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl

Nr. 70/August 1980

Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert