

Untersuchungen zur Drucktragfähigkeit
von Naturstein-Mauerwerk,
insbesondere von Bruchstein-Mauerwerk

T 1204

T 1204

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

B E R I C H T

über das Forschungsvorhaben

U N T E R S U C H U N G E N Z U R D R U C K T R A G -

F Ä H I G K E I T V O N N A T U R S T E I N -

M A U E R W E R K ,

I N S B E S O N D E R E V O N B R U C H S T E I N -

M A U E R W E R K

von Prof. Dr.-Ing. W. Mann und Dr.-Ing. H. Rustmeier

PROF. DR.-ING. WALTHER MANN

Lehrstuhl für Statik der Hochbaukonstruktionen
Technische Hochschule Darmstadt - Lichtwiese

6100 Darmstadt, den 28.11.1983
Petersenstraße 15 · Ruf 06151/162136

Kurzfassung des Forschungsberichtes

"Untersuchungen zur Druck-Tragfähigkeit von Natursteinmauerwerk,
insbesondere von Bruchsteinmauerwerk"

von Prof. Dr.-Ing. W. Mann und Dr.-Ing. H. Rustmeier

Die Tragfähigkeit von Natursteinmauerwerk ist heute vorwiegend beim Umbau und bei der Sanierung bestehender alter Bauwerke von Interesse. In der vorliegenden Arbeit werden die Faktoren untersucht, die die Tragfähigkeit des Mauerwerks beeinflussen. In einem theoretischen Teil wird eine Bruchtheorie entwickelt und zahlenmäßig ausgewertet. Wesentliche Parameter sind die Mörtelfestigkeit, Fugenschlankheit, Fugenneigung und das Verhältnis der lastübertragenden Steinflächen zum Wandquerschnitt. Mit diesen als Mittelwerte geschätzten Parametern läßt sich die Wandfestigkeit theoretisch ableiten. Im versuchstechnischen Teil der Arbeit wird die Festigkeit der Mörtelfuge an zylindrischen Probekörpern unterschiedlicher Schlankheit geprüft. Der Einfluß der Fugenschlankheit und Fugenneigung sowie des Verbandes wird an gemauerten würfelförmigen Probekörpern getestet. Die Versuchsergebnisse stimmen befriedigend mit den rechnerischen Ergebnissen überein.

PROF. DR.-ING. WALTHER MANN

Lehrstuhl für Statik der Hochbaukonstruktionen
Technische Hochschule Darmstadt - Lichtwiese

6100 Darmstadt, den 28.11.1983
Petersenstraße 15 · Ruf 06151/16 2136

Summary of research report

Research on load capacity of natural stone masonry,
especially of quarry stone masonry, under compression stress

by Prof. Dr.-Ing. W. Mann and Dr.-Ing. H. Rustmeier

Today the load capacity of natural stone masonry is of interest mainly in rebuilding and reconstruction of existing old buildings. The work analyses the factors influencing the load capacity of masonry. In the theoretical part a theory of breaking is developed and evaluated numerically. Substantial parameters are the stability of mortar, slenderness of joints, inclination of joints, and the relation of the load transferring area of stone to the wall cross section. By means of these parameters, which are taxed average values, one can derive theoretically the solidity of walls. In the experimental-technical part of the work the stability of the mortar joint is tested at cylindrical test models of different slenderness. The influence of the slenderness of joints and the inclination of joints is tested at cubical test models built of masonry. The test results are sufficiently in accordance with the mathematical results.

PROF. DR.-ING. WALTHER MANN

Lehrstuhl für Statik der Hochbaukonstruktionen
Technische Hochschule Darmstadt - Lichtwiese

6100 Darmstadt, den 28.11.1983
Petersenstraße 15 · Ruf 06151/162136

Resumé du rapport de recherche

"Analyse de la résistance à la compression et de la force portante de la maçonnerie de pierre, plus particulièrement de la maçonnerie en pierres brutes"

du Prof. Dr.-Ing. W. Mann et Dr.-Ing. H. Rustmeier

La force portante de la maçonnerie de pierre présente de l'intérêt à l'heure actuelle surtout dans les travaux de transformation et d'assainissement de vieilles constructions. Dans la présente étude, on examine les facteurs qui influencent la force portante. Dans une partie théorique, une théorie de la rupture est développée et évaluée numériquement. Les paramètres essentiels sont la résistance du mortier, le degré d'éclancement du joint, l'inclinaison du joint et le rapport entre la surface de la pierre transmettant la charge et la section transversale de la paroi.

A partir de ces paramètres, évalués en valeurs moyennes, il est possible de déduire théoriquement la résistance de la paroi. Dans la partie expérimentale de cette étude, la résistance du joint de mortier est vérifiée sur des échantillons à degrés d'éclancement divers. L'influence du degré d'éclancement, de l'inclinaison du joint ainsi que de l'appareil de maçonnerie est testée sur des échantillons cubiques préalablement maçonnés. Les résultats expérimentaux concordent de manière satisfaisante avec les résultats obtenus par voie de calcul.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Teil I: Einleitung

1

Teil II: Theoretische Untersuchungen -
Entwicklung einer Bruchtheorie für Natur-
steinmauerwerk

3

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. W. Mann

1.	Einleitung	3
2.	Bezeichnungen	3
3.	Grundlagen einer Bruchtheorie	5
4.	Allgemeine Bruchbedingung	7
5.	Behinderung der Querdehnung in der Fuge	8
6.	Tragfähigkeit und Formfaktor für horizontale Fugen	9
7.	Tragfähigkeit und Formfaktor der geneigten Fuge	9
8.	Steinversagen	11
9.	Auswertung der Theorie im Diagramm	13
10.	Zahlenwerte für Bruch- und zulässige Spannungen	15
11.	Erkenntnisse zur Beurteilung von Bruchstein- mauerwerk	16
12.	Bisherige Versuchsergebnisse	17
13.	Literatur	18

Teil III: Laborversuche und Parameterstudien zur
Drucktragfähigkeit von Natursteinmauerwerk

20

Verfasser: Dr.-Ing. H. Rustmeier

1.	Bezeichnungen	20
2.	Vorüberlegungen zu den Versuchen	22
3.	Laborversuche	22
3.1	Versuchsziele	22

	Seite	
3.2	Prüfkörper	23
3.3	Versuchsdurchführung	26
3.4	Versuchsergebnisse und Auswertungen	28
3.4.1	Formfaktor für die Druckfestigkeit von Mörtel-Prüfkörpern	28
3.4.2	Formfaktor für die Druckfestigkeit von würfel- förmigen Mauerwerksprüfkörpern	29
3.4.3	Formfaktor für die Druckfestigkeit von säulen- förmigen Mauerwerksprüfkörpern	30
3.4.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramme	31
4.	Untersuchungen an bestehendem Bruchsteinmauerwerk	32
4.1	Zweck und Umfang der Untersuchungen	32
4.2	Untersuchte Bauten	32
4.3	Umfang der Untersuchungen für die einzelnen Parameter	33
4.4	Methode der Untersuchungen am Bauwerk	34
4.5	Untersuchungsergebnisse und Auswertung	35
4.6	Beispiel für die Abschätzung der Druckfestigkeit	36
5.	Zusammenstellung weiterer Festigkeitswerte	39
5.1	Allgemeines	39
5.2	Steindruckfestigkeit	39
5.3	Steinzugfestigkeit	40
5.4	Zulässige Spannungen für Natursteinmauerwerk	40
5.4.1	Deutsche Mauerwerksnorm	40
5.4.2	Schweizer Norm	41
5.4.3	Österreichische Norm	43
5.4.4	Britische Norm	43
5.5	Vergleichende Betrachtung der genannten Normen	44
6.	Literaturverzeichnis	45
6.1	Zusammenfassende Darstellungen	45

	Seite	
6.2	Forschungsberichte	46
6.3	Normen	46
7.	Tabellen, Tafeln, Bilder	48
7.1	Verzeichnis der Tabellen 1 - 25	48
7.2	Verzeichnis der Tafeln 1 - 35	88
7.3	Verzeichnis der Bilder 1 - 53	129
<u>Teil IV:</u>	Zusammenfassung	164

Teil I: Einleitung

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Natursteinen interessiert in der Regel dann, wenn bestehende alte Bauwerke umgebaut werden sollen und deshalb ihre Standsicherheit nachgewiesen werden muß. Derartige Aufgaben sind in letzter Zeit häufiger geworden, da das Bewußtsein der Öffentlichkeit und der Fachwelt für den Wert alter Bausubstanz erfreulicherweise gewachsen ist.

Die Erfahrung beim Nachrechnen der Standsicherheit dieser Bauwerke hat gezeigt, daß die zulässigen Spannungen nach DIN 1053, Teil 1, Tabelle 13, häufig nicht ausreichen, um die seit Jahrhunderten vorhandenen Spannungen rechnerisch nachzuweisen. Auch ist die Abhängigkeit der zulässigen Spannungen von der Stein- druckfestigkeit nach dieser Tabelle nicht verständlich. So sind z.B. die zulässigen Spannungen von Bruchsteinmauerwerk so gering angesetzt, daß ein Versagen der Steine, und damit eine Abhängig- keit der Wandfestigkeit von der Steinfestigkeit, nicht möglich ist. Bei der Abfassung dieser Tabelle wurde wahrscheinlich das Bruchmodell für Mauerwerk aus künstlichen Steinen zugrundegelegt, was in dieser Form sicher nicht für Bruchsteinmauerwerk gültig ist.

Um die Drucktragfähigkeit von Natursteinmauerwerk besser beur- teilen zu können, wurde das Bruchverhalten sowohl theoretisch als auch durch Laborversuche studiert. Die Ergebnisse dieser Unter- suchungen sind im vorliegenden Forschungsbericht zusammengefaßt. Über einzelne Teile der Untersuchungen, die im Übrigen bereits in die Beratungen über die Neufassung von DIN 1053, Teil 1, ein- geflossen sind, wurde bereits vorab berichtet und zwar über die theoretischen Untersuchungen in [1], über die Laborversuche in [2]. Eine umfassendere Behandlung des Problems enthält [3]. Entsprechend werden diese Abschnitte im folgenden als separate, in sich geschlossene Teile II und III behandelt. Der theoretische Teil II mit der Entwicklung einer Bruchtheorie und der versuchs- technische Teil III wurden unabhängig voneinander entwickelt;

es ist erfreulich, daß die Ergebnisse gut übereinstimmen. Auch wenn die Theorie noch zu verfeinern und durch weitere Versuchsreihen zu ergänzen ist, scheint der ihr zugrundeliegende Bruchmechanismus schon jetzt bestätigt zu sein, so daß er für die praktische Auswertung an Bauwerken angewendet werden kann.

Literatur:

- [1] Mann, W. und Rustmeier, H.
Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Bruchsteinen
6. Internationale Mauerwerkskonferenz Rom 1982
- [2] Rustmeier, H.
Untersuchungen über Einflüsse auf die Drucktragfähigkeit
von Bruchsteinmauerwerk
Dissertation, Darmstadt 1982
- [3] Mann, W.
Zum Tragverhalten von Mauerwerk aus Natursteinen
Mauerwerk-Kalender 1983, Seite 675

Teil II: Theoretische Untersuchungen -
Entwicklung einer Bruchtheorie für Natursteinmauerwerk
Verfasser: Prof. Dr.-Ing. W. Mann

1. Einleitung

Mauerwerk aus Natursteinen wird heute bei Neubauten nurmehr in Ausnahmefällen für tragende Elemente verwendet. Bei der Sanierung und beim Umbau von alten Bauwerken trifft man jedoch häufig auf Natursteinmauerwerk, so daß Aussagen über seine Festigkeit erforderlich werden.

Die Nachrechnung alter Bauwerke hat in vielen Fällen ergeben, daß die vorhandenen Spannungen schon aus Eigengewicht weit größer als die zulässigen Spannungen für Bruchsteinmauerwerk nach DIN 1053, Teil 1, Tabelle 13, sind, ohne daß erkennbare Schäden auftraten. Diese Tabelle der zulässigen Spannungen hilft daher oft nicht weiter. Versuchswerte aus letzter Zeit, auf die man sich stützen könnte, sind nicht bekannt geworden. Ältere Veröffentlichungen über Konstruktionsregeln oder zulässige Spannungen, z.B. [1 bis 4], sind wegen der andersartigen Betrachtungsweise heute nur sehr beschränkt verwendbar.

Um diese Lücke einwenig zu füllen und um einen Anstoß zu weitergehenden Untersuchungen zu geben, wurde der vorliegende Beitrag verfaßt.

2. Bezeichnungen

B	Wandbreite
L	Wandlänge
h	Fugendicke
d	Länge des Fugenabschnitts, dessen Querdehnung behindert ist, also Durchmesser der Übertragungsfläche oder Durchmesser des Steines

- α Neigungswinkel der Fuge
- $\beta_w; \sigma_w$ Festigkeit bzw. Spannung der Bruchsteinwand
- β_m Mörtelfestigkeit, geprüft an Prüfkörpern $h/d = 1$
- β_x Fugenfestigkeit der Mörtelfuge
- $f = \beta_x / \beta_m$ Formfaktor
- $\beta_s; \sigma_s$ Festigkeit bzw. Spannung des Steines
- μ Querdehnzahl des Mörtels
- $\eta = \sigma_y / \sigma_x$ Verhältniswert der Querspannung zur Druckspannung in der Mörtelfuge
- $\bar{u} = \bar{F} / F$ Übertragungsfaktor =
statisch wirksame Übertragungsfläche \bar{F} : Querschnittsfläche F

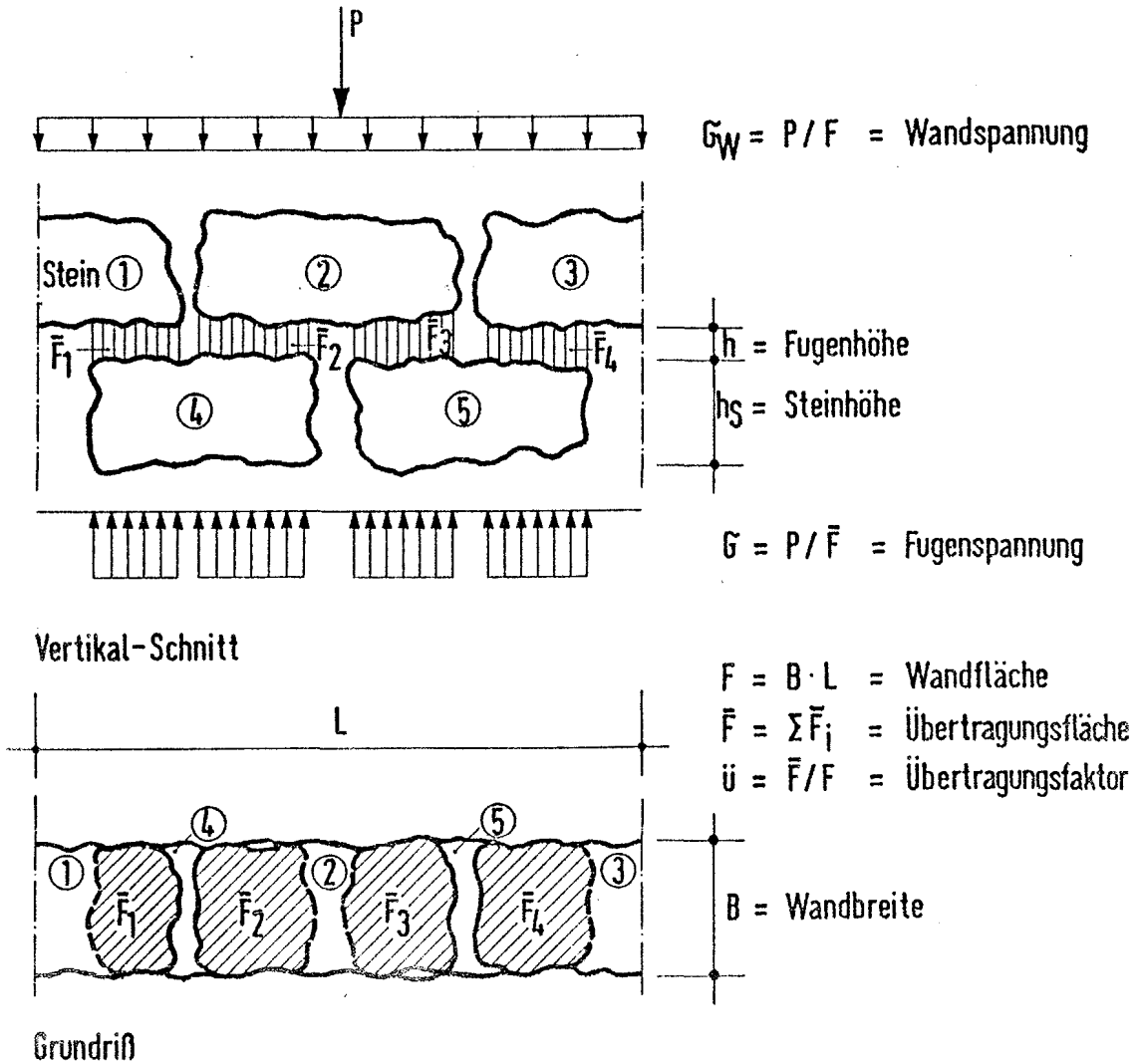


Bild 1 : Modell der Kraftübertragung in Bruchsteinmauerwerk

3. Grundlagen einer Bruchtheorie

Die Qualität und das Bruchverhalten von Mauerwerk aus natürlichen Steinen entspricht in wesentlichen Punkten nicht dem Mauerwerk aus künstlichen Steinen. Die planmäßigen Abmessungen der künstlichen Steine sind recht genau einzuhalten. Die Mörtelfugen können deshalb bei sorgfältiger Ausführung horizontal, dünn und gleichförmig hergestellt werden. Im Gegensatz dazu sind natürliche Steine meistens ungleichförmig, so daß die Mörtelfugen unregelmäßig, geneigt und dicker sein müssen.

Mauerwerk aus künstlichen Steinen versagt im Regelfall dadurch, daß das unterschiedliche Querdehnverhalten von Mörtel und Steinen zu Zwängungsspannungen führt, nämlich zu Quer-Zugspannungen im Stein und zu Quer-Druckspannungen im Mörtel. Dadurch zerreißen die Steine im Bruchzustand und verlieren damit ihre Druck-Tragfähigkeit. Im Gegensatz dazu wird die Zugfestigkeit der natürlichen Steine im Mauerwerk nur in Ausnahmefällen überschritten, da zuvor schon die Mörtelfuge versagt. Natürliche Steine verfügen nämlich in der Regel über größere Zugfestigkeit als künstliche Steine, während gleichzeitig die dickeren und geneigten Mörtelfugen geringere Festigkeit aufweisen.

Mauerwerk aus künstlichen Steinen versagt also in der Regel durch Zugversagen der Steine, während Mauerwerk aus natürlichen Steinen seine Festigkeit durch Versagen der Mörtelfugen und damit durch Verlust des Verbandes verliert. Die für Mauerwerk aus künstlichen Steinen entwickelten Faustformeln, die den Zusammenhang von Stein-, Mörtel- und Wandfestigkeit beschreiben, also z.B. nach [5] oder [6], sind daher auf Mauerwerk aus natürlichen Steinen nicht ohne weiteres anwendbar.

Aus diesem Grunde wurde eine Bruchtheorie entwickelt, die bereits in [7] vorgestellt wurde, und die darauf beruht, daß nur derjenige Teil einer Mörtelfuge, der oben und unten durch Steine begrenzt ist, die aus der Auflast entstehenden Kräfte überträgt. Dieser Teil sei "Übertragungsfläche" \bar{F} genannt (Bild 1). Die restlichen Teile der Mörtelfuge, also die Bereiche unter oder über einer Stoßfuge, werden bei der Kraftübertragung vernachlässigt, da die Steifigkeit der Stoßfuge sehr viel geringer als

die der Steine ist, und da außerdem Spannungen in der Stoßfuge durch den Krieeffekt weitgehend abgebaut worden wären.

Das Verhältnis der Summe aller Übertragungsflächen \bar{F} zur Fläche des Wandquerschnittes F sei Übertragungsfaktor $\bar{u} = \bar{F}/F$ genannt. Damit ist die Spannung in der Übertragungsfläche

$$\sigma = \sigma_w / \bar{u} \quad (1)$$

wobei die rechnerische Wandspannung $\sigma_w = P/F$ ist.

Die Bruchfestigkeit der Mörtelfuge im Übertragungsbereich wird im folgenden nach der Bruchhypothese von Mohr bestimmt. Die Querdehnung des Mörtels ist durch die Steine behindert, so daß im Mörtel auch ein Querdruck entsteht. Der Mörtel steht somit bei ebener Betrachtung unter einem zweiachsigen, bei räumlicher Betrachtung unter dreiachsigem Spannungszustand.

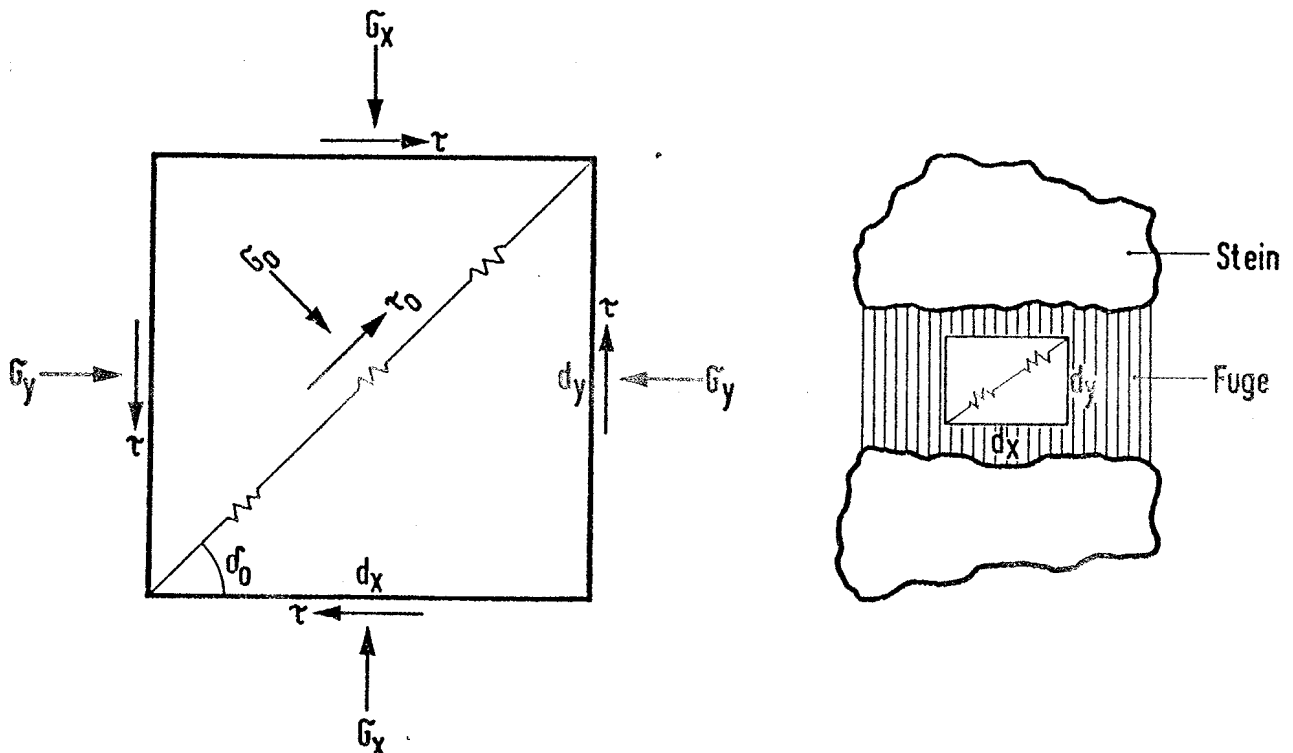


Bild 2 : Spannungen an einem Element der Mörtelfuge

4. Allgemeine Bruchbedingung

Ein Element, das aus der Fuge herausgeschnitten wird und nach Bild 2 von den Spannungen σ_x , σ_y und τ beansprucht ist, wird unter einem bestimmten Winkel δ_0 dann versagen, wenn in dieser Schnittebene nach dem Reibungsgesetz gilt

$$\tau_0 = c + \sigma_0 \cdot \operatorname{tg} \rho \quad (2)$$

c entspricht der inneren Kohäsion des Mörtels, ρ seinem inneren Reibungswinkel. Der Winkel δ_0 folgt aus der Bedingung $\tau_0 = (c + \sigma_0 \cdot \operatorname{tg} \rho)$ = extrem:

$$\operatorname{tg} 2\delta_0 = \frac{2\tau \cdot \operatorname{tg} \rho - (\sigma_x - \sigma_y)}{2\tau + \operatorname{tg} \rho \cdot (\sigma_x - \sigma_y)} \quad (3)$$

Die Spannungen in der durch δ_0 festgelegten Bruchfolge ergeben sich aus den bekannten Transformationen

$$\sigma_0 = \sigma_x \cdot \cos^2 \delta_0 + \sigma_y \cdot \sin^2 \delta_0 - \tau \cdot \sin 2\delta_0 \quad (4a)$$

$$\tau_0 = (\sigma_y - \sigma_x) \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin 2\delta_0 + \tau \cdot \cos 2\delta_0 \quad (4b)$$

Diese Werte in (2) eingesetzt, erhält man die Bedingungsgleichung des Bruchzustandes unter Verwendung von (3):

$$2c \cdot \cos \rho + (\sigma_x + \sigma_y) \cdot \sin \rho = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} \quad (5)$$

Da im folgenden reine Druckbeanspruchung betrachtet wird, gilt $\tau = 0$. Da bei reiner Druckbeanspruchung σ_x die aus Querdehnungsbehinderung entstehende Querspannung σ_y proportional zu σ_x ist, wird das Spannungsverhältnis η definiert:

$$\sigma_y / \sigma_x = \eta \quad (6)$$

Damit lautet die so vereinfachte Bruchbedingung der Fuge

$$\sigma_x = \beta_x = \frac{2c \cdot \cos \rho}{(1 - \sin \rho) - (1 + \sin \rho) \cdot \eta} \quad (7)$$

Der Verhältniswert η hängt von der Form des Prüfkörpers ab (Bild 3). Es ist üblich, die Druckfestigkeit des Mörtels β_M als Würfelfestigkeit an Proben der Schlankheit $h/d = 1$ zu messen.

Bezeichnet man dafür $\eta (h/d = 1) = \eta_1$

$$\beta_x = \beta_M \cdot \frac{(1 - \sin \rho) - (1 + \sin \rho) \cdot \eta_1}{(1 - \sin \rho) - (1 + \sin \rho) \cdot \eta} = \beta_M \cdot \frac{1 - \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \cdot \eta_1}{1 - \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \cdot \eta} \quad (8)$$

5. Behinderung der Querdehnung in der Fuge

Mit der Querdehnungszahl μ lautet die Querdehnung ϵ_y im 3-dimensionalen Spannungszustand

$$E \cdot \epsilon_y = \sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z) \quad (9)$$

Es wird vorausgesetzt, daß die Steine im Verhältnis zur Mörtelfuge so starr sind, daß für sehr dünne Fugen ($h/d \rightarrow 0$) die Bedingung $E \cdot \epsilon_y = 0$ angenommen werden kann. Damit und mit der bei annähernden Kreis- oder Quadratquerschnitten geltenden Beziehung $\sigma_z = \sigma_y$ folgt aus (9) für sehr dünne Fugen der Verhältniswert

$$\eta (h/d \rightarrow 0) = \eta_0 = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (10)$$

Es ist bekannt, daß für $h/d \geq 1,5$ der Querdehnungseinfluß auch bei starren Druckplatten vernachlässigbar gering ist, so daß dafür gilt $\eta (h/d \geq 1,5) = 0$.

Für den Zwischenbereich $0 < h/d < 1,5$ lieferte der mechanisch sinnvolle Ansatz

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \frac{h}{d}\right)^2 \quad (11)$$

die beste Annäherung an Versuchsergebnisse, z.B. an I8I und I9I, so daß dieser Ansatz im folgenden verwendet wird. Daraus folgt

$$\eta_1 = \eta (h/d = 1) = \frac{1}{9} \cdot \eta_0$$

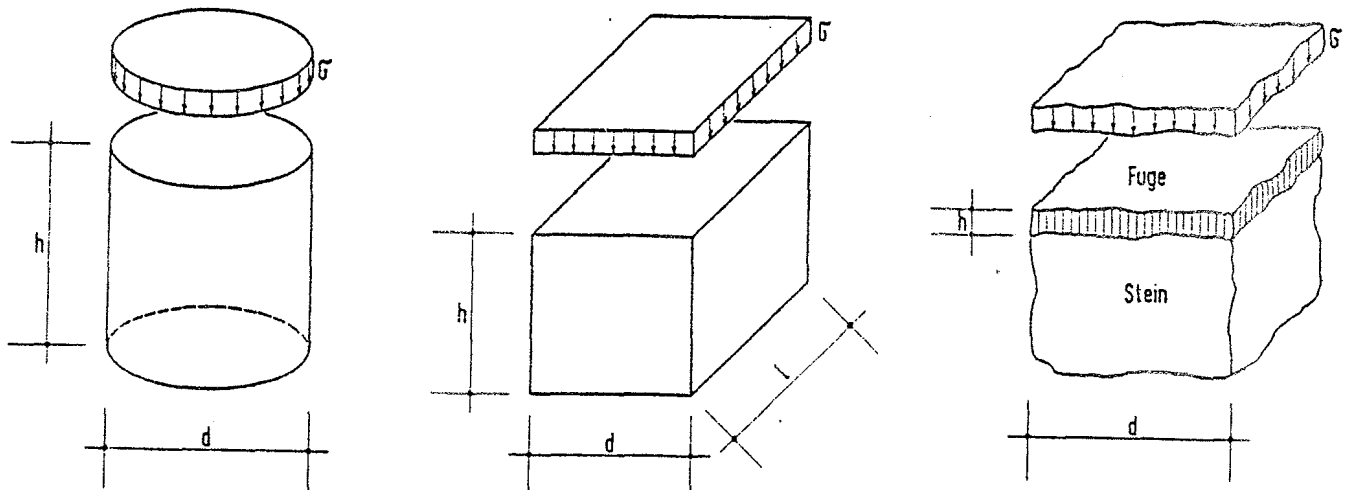


Bild 3 : Abmessungen der Mörtelprüfkörper und Fugenkörper

6. Tragfähigkeit und Formfaktor für horizontale Fugen

Es ist ohne weiteres einzusehen, daß die Bruchspannung sehr dünner Fugen ($h/d \rightarrow 0$) gegen unendlich anwächst. Dies bedeutet, daß der Nenner in (8) für $\eta = \eta_0$ gegen Null gehen muß. Daraus folgt

$$\frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \cdot \eta_0 \cong 1 \quad (12)$$

Zur Vereinfachung wird im folgenden die rechte Seite von (12) = 1 gesetzt.

Diese Bedingung wäre z.B. mit dem nach Versuchsberichten durchaus wahrscheinlichen Wertepaar $\mu = 0,2$ bzw. $\eta_0 = 0,25$ und $\operatorname{tg} \rho = 0,75$, also $\sin \rho = 0,6$, erfüllt. Setzt man (11) und (12) in (8) ein, so erhält man die Bruchspannung der horizontalen Fuge für den Bereich $0 < h/d < 1,5$:

$$\beta_x = \beta_M \cdot \frac{8}{9} \cdot \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{h}{d}\right)^2} \quad (13)$$

Der Formfaktor $f = \beta_x / \beta_M$ lautet also für diesen Bereich:

$$f = \frac{8}{9} \cdot \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{h}{d}\right)^2} \quad (14)$$

Diese theoretisch abgeleiteten Gleichungen entsprechen den Versuchswerten nach [8] und [9] mit befriedigender Genauigkeit. Sie sind in Bild 6 für $\alpha = 0$ graphisch dargestellt. Man erkennt, daß für $h/d = 1$ die Würfelfestigkeit β_M des Mörtels und für $h/d = 1,5$ die ebenfalls durch Versuche bestätigte Prismenfestigkeit $\beta_x(1,5) = 0,88 \cdot \beta_M$ entsteht; Schlankheiten $h/d > 1,5$ sind hier nicht weiter von Bedeutung.

7. Tragfähigkeit und Formfaktor der geneigten Fuge

Da bei Bruchsteinmauerwerk geneigte Fugen auftreten, ist der Einfluß einer Fugenneigung α zu berücksichtigen. Der Bruchzustand einer Fuge ohne Querdehnungsbehinderung unter σ_x ändert sich durch die Neigung nicht, da man das geneigte Element aus einem größeren horizontalen Element gemäß Bild 4 herausschneiden

kann, für das ebenfalls der Hauptspannungszustand $\tilde{\sigma}_x$ gilt. Die durch die angrenzenden Steine bedingte Querdehnungsbehinderung hingegen bewirkt Querspannungen

$$\tilde{\sigma}_\eta = \eta \cdot \tilde{\sigma}_\xi = \eta \cdot \tilde{\sigma}_x \cdot \cos^2 \alpha \quad (15)$$

aus denen durch Transformation die senkrecht zur Kraftwirkungs-
linie gerichteten Querspannungen $\tilde{\sigma}_y$ folgen:

$$\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}_\eta \cdot \cos^2 \alpha = \eta \cdot \tilde{\sigma}_x \cdot \cos^4 \alpha \quad (16)$$

Die Komponenten $\tilde{\sigma}_x$ und $\tilde{\tau}$ infolge $\tilde{\sigma}_\eta$ sind wegen des üblicher-
weise kleinen Winkels α klein und heben sich in ihrer Wirkung
teilweise auf. Sie werden deshalb im folgenden in erster Näherung
vereinfachend vernachlässigt. Bei größeren Winkeln wären sie zu
berücksichtigen, wodurch allerdings die folgenden Formeln eine
etwas kompliziertere Form erhielten.

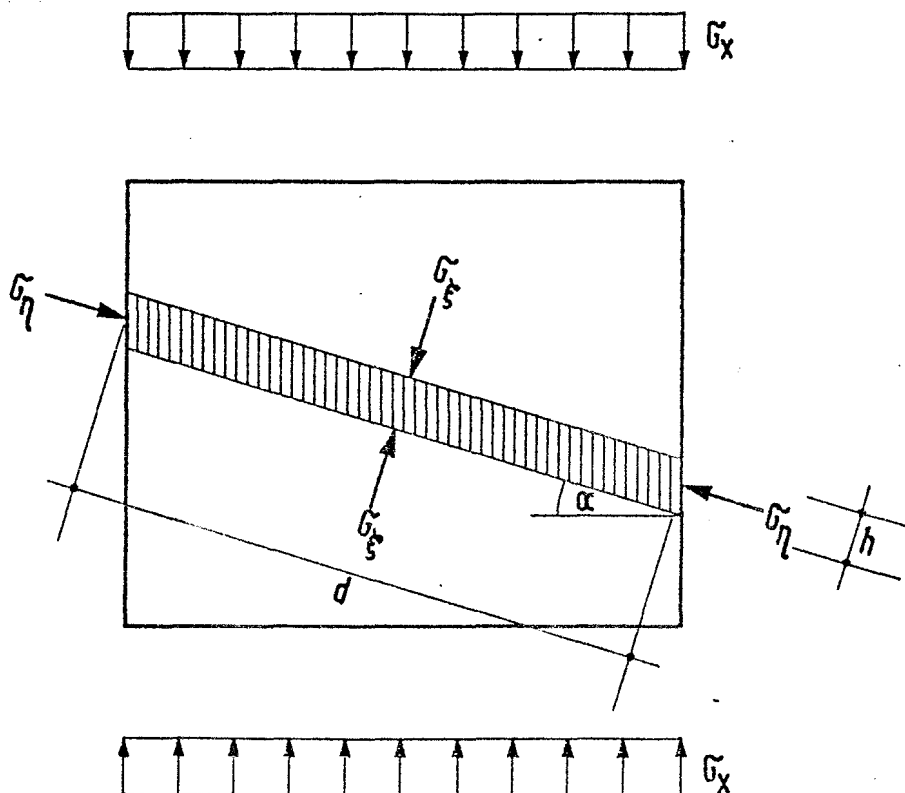


Bild 4 : Druckspannungen an einem geneigten Fugenelement

Die Bruchspannung β_x der Fugen nach Gleichungen (13) geht mit (16) über in

$$\beta_x(h/d; \alpha) = \beta_M \cdot \frac{8}{9} \cdot \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{2}{3} \frac{h}{d}\right)^2 \cdot \cos^4 \alpha} \quad (17)$$

Der durch die Fugenneigung bedingte Abminderungsfaktor k_α ergibt sich daraus zu

$$k_\alpha = \frac{\beta_x(h/d; \alpha)}{\beta_x(h/d)} = \frac{1 - \left(1 - \frac{2}{3} \frac{h}{d}\right)^2}{1 - \left(1 - \frac{2}{3} \frac{h}{d}\right)^2 \cdot \cos^4 \alpha} \quad (18)$$

Es wird darauf hingewiesen, daß ein Reibungsversagen durch Gleiten in der Fuge zwischen Mörtel und Stein nicht zu erwarten ist, da $\operatorname{tg} \alpha$ üblicherweise nicht über 0,4 und damit niedriger als der Reibungswinkel liegt.

8. Steinversagen

Es läßt sich leicht nachweisen, daß die Steine nur bei extremen Verhältnissen β_s/β_M der Stein- und Mörtelfestigkeit eine Versagensursache darstellen können. Im allgemeinen ist die Steinfestigkeit β_s sehr viel größer als die Fugenfestigkeit β_x . Lediglich bei Mörtelgruppe III mit $\beta_M \geq 10 \text{ N/mm}^2$ kombiniert mit extrem weichen Steinen ($\beta_s < 50 \text{ N/mm}^2$) empfiehlt sich eine Überprüfung des Steinversagens.

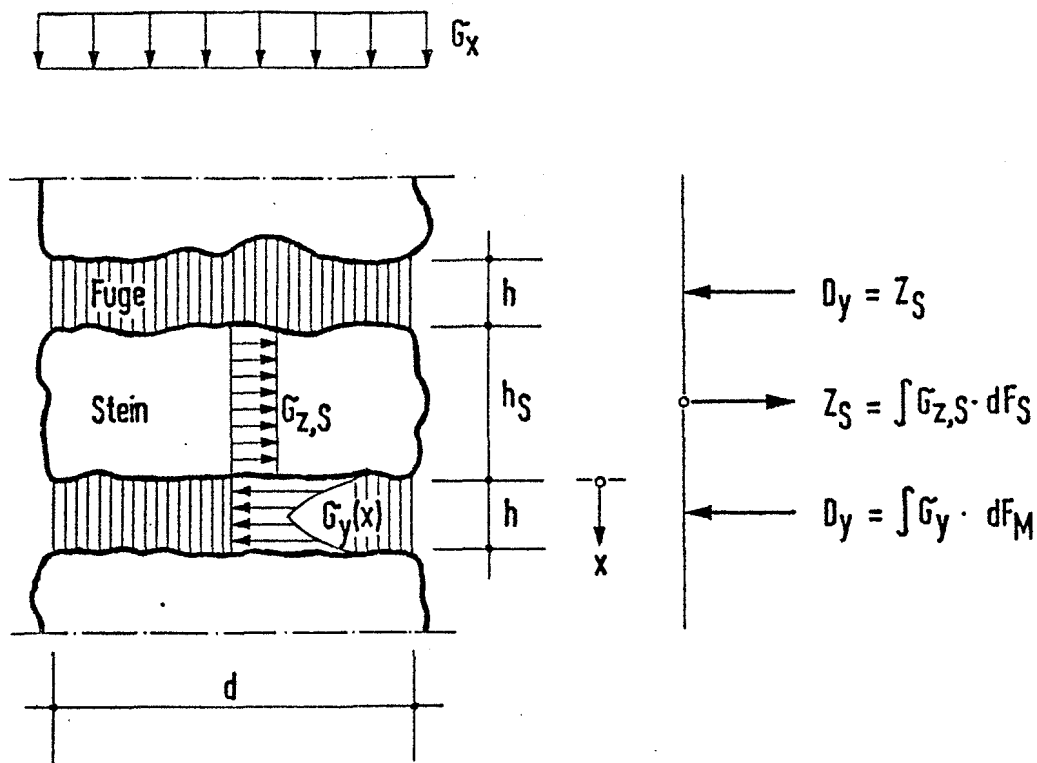


Bild 5 : Querkzug-Bbeanspruchung des Steines infolge der Querdehnungsbehinderung in der Mörtelfuge.

Auch die Querkzugbeanspruchung der Steine infolge der Querdehnungsbehinderung des Mörtels kann im Regelfall nicht zum Bruch der Steine führen. Setzt man nämlich mit (6) und analog zu (11) für die Querkdruckspannung in der Mörtelfuge nach Bild 5

$$\sigma_y(x) = \sigma_x \cdot \eta = \sigma_x \cdot \eta_0 \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \frac{x}{d}\right)^2 \quad (19)$$

so folgt die Druckkraft in der Fuge durch Integration der Spannung σ_y über die Fugenhöhe h

$$D_y = 2 \int_0^{h/2} \sigma_y dx = \sigma_x \cdot \eta_0 \cdot h \left(1 - \frac{1}{3} \frac{h}{d} + \frac{1}{27} \frac{h^2}{d^2}\right) \quad (20)$$

Die Zugkraft Z_S im Stein muß aus Gründen des Gleichgewichts gleich der Druckkraft D_y in der Fuge sein, so daß die Zug-

spannung im Stein lautet

$$\sigma_{xS} = \sigma_x \cdot \eta_0 \cdot \frac{h}{h_S} \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \frac{h}{d} + \frac{1}{27} \cdot \frac{h^2}{d^2} \right) \quad (21)$$

Durch Einsetzen üblicher Werte erkennt man, daß in den praktisch auftretenden Fällen kein Versagen durch Zerreißen der Steine eintreten kann.

9. Auswertung der Theorie im Diagramm

Die durch Gleichung (17) ausgedrückte Bruchspannung σ_x in der Mörtelfuge wurde für übliche Abmessungen ausgewertet und in Bild 6 graphisch dargestellt. Ein Vergleich dieser theoretischen Werte mit Kleinversuchen nach [9] ergab, daß als Fugenlänge d nicht nur der Durchmesser der einzelnen Übertragungsfläche \bar{F}_i , sondern der mittlere Durchmesser des Steines, also annähernd die Summe der Durchmesser zweier benachbarter Übertragungsflächen, eingesetzt werden darf. Offenbar ist bei den dünnen Fugen die einseitige Querdehnungsbehinderung durch 1 Stein so wirksam, daß die Stoßfuge der darunter liegenden Steinschicht überbrückt wird. Außerdem ist eine kegelförmige Kraftausbreitung innerhalb der Fuge und damit ein Übergang von der einzelnen Übertragungsfläche \bar{F}_i zur Steinfläche wahrscheinlich. Deshalb erscheint es zulässig, in diesem Zusammenhang zu definieren:

Querdehnungsbehinderte Fugenlänge d = mittlerer Durchmesser der Steine.

Der über bzw. unter der Stoßfuge befindliche Teil der Lagerfuge wirkt also nicht bei der Übertragung der Last, wohl aber bei der Querdehnungsbehinderung mit.

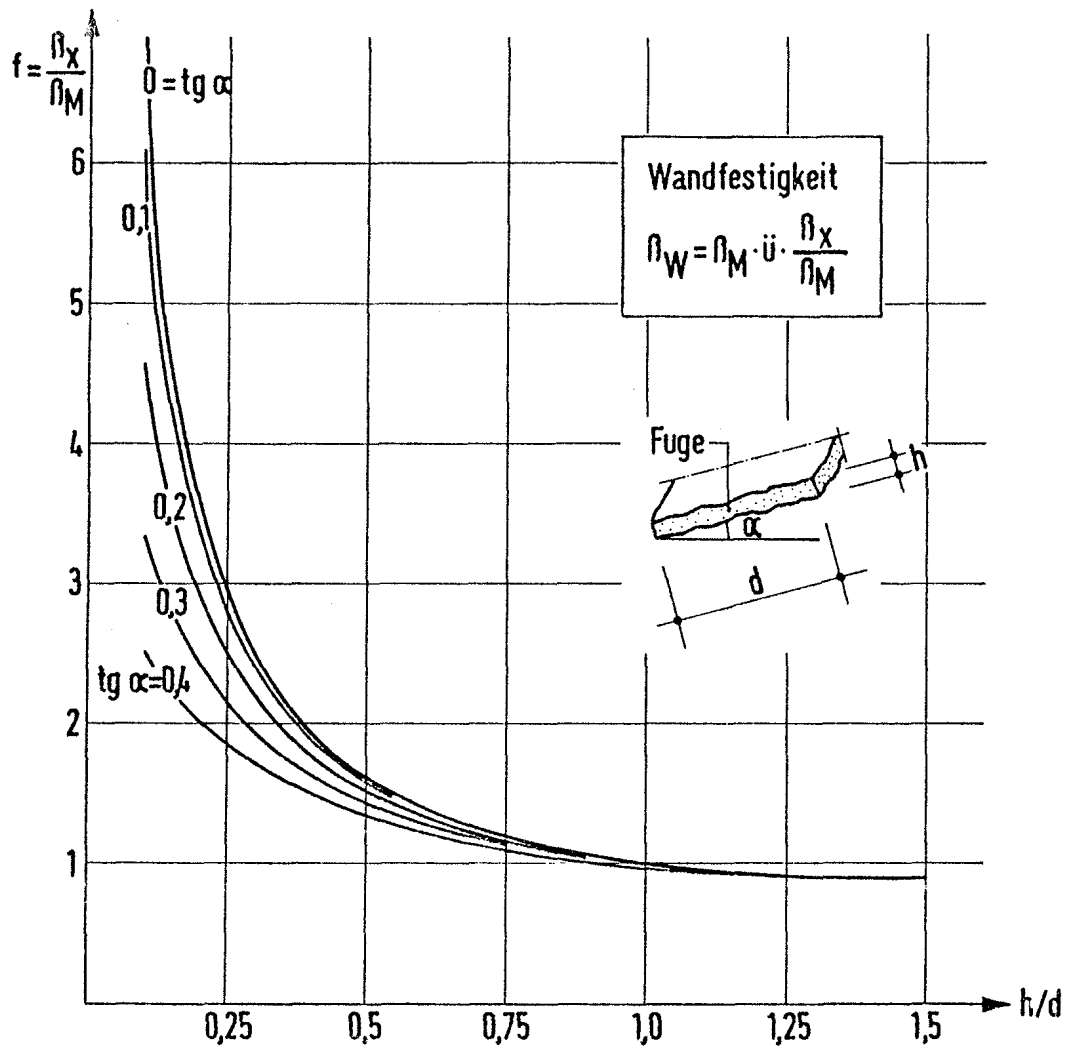


Bild 6 : Formfaktoren f der Mörtelfugen und Wandfestigkeit β_W von Bruchsteinmauerwerk. h/d = Höhe / Länge der wirksamen Fuge, β_M = Mörtelfestigkeit bei Prüfkörper $h/d = 1$; \ddot{u} = Übertragungsfaktor \bar{F}/F ; α = Fugenneigung; β_x nach (17)

10. Zahlenwerte für Bruch- und zulässige Spannungen

Im folgenden werden einige Zahlenwerte für die Wandfestigkeit $\beta_w = \bar{u} \cdot \beta_x$ theoretisch nach (17) ermittelt. Die statische Qualität des Bruchsteinmauerwerks wird dabei gemäß der folgenden Tabelle definiert. Die Druckfestigkeit der Mörtelgruppe I (reiner Kalkmörtel) ist nach DIN 1053 nicht festgelegt. Dafür wird im folgenden mit $\beta_M^I = 1,0 \text{ N/mm}^2$ gerechnet.

Selbstverständlich kann es sich bei den Werten h/d , α und \bar{u} nur um Mittelwerte handeln, da die Form von Bruchsteinen und folglich auch die Form der Fugen nicht gleichmäßig ist.

TABELLE 1: Theoretisch abgeleitete Werte der Bruchspannung und der zulässigen Spannung von Bruchsteinmauerwerk

Qualität		gut	mittel	schlecht	
Fugenschlankheit	im Mittel $h/d \leq$	0,10	0,15	0,20	
Fugenneigung	im Mittel $\text{tg}\alpha \leq$	0,1	0,2	0,3	
Übertragungsfaktor	$\bar{u} = \bar{F}/F \geq$	0,7	0,6	0,5	
Wandfestigkeit β_w bei					
Mörtelgruppe I	($\beta_M \sim 1,0 \text{ N/mm}^2$) $\beta_w =$	4,2	2,2	1,2	N/mm^2
"	II ($\beta_M \geq 2,5$ ")	11,0	5,5	3,1	"
"	III ($\beta_M \geq 10,0$ ")	(42) ^x	(22) ^x	12	"
Zulässige Spannung	zul σ bei $\gamma = 5$				
Mörtelgruppe I	zul $\sigma =$	0,84	0,44	0,24	N/mm^2
"	II	2,2	1,1	0,62	"
"	III	(8,4) ^x	(4,4) ^x	2,4	"

^x) Bei diesen Werten wäre zusätzlich das Steinversagen zu überprüfen

Die zulässigen Spannungen ergeben sich wie üblich aus $\text{zul } \sigma = \beta_w / \gamma$, wobei ein hoher Sicherheitsbeiwert γ anzustreben ist, mindestens $\gamma = 3$, besser $\gamma = 5$. Vergleicht man die hier angegebenen zulässigen Spannungen mit den Werten nach DIN 1053, Tabelle 13, so erkennt man trotz übereinstimmender Grenzwerte erhebliche Unterschiede. Insbesondere die Abhängigkeit von der Steinfestigkeit in DIN 1053 erscheint nicht oder zumindest nicht in diesem Maße gerechtfertigt, während der Einfluß der Mörtelgüte offensichtlich nicht genügend berücksichtigt ist. Nicht erfaßt ist in Tabelle 1 der Einfluß der Schlankheit der Wand. Auf das Problem der zweischaligen Ausführung dicker Wände wurde bereits in Abschnitt 3 hingewiesen.

11. Erkenntnisse zur Beurteilung von Bruchsteinmauerwerk

Die beschriebene Theorie liefert Kriterien zur Beurteilung der Güte von Bruchsteinmauerwerk. Die Tragfähigkeit hängt vorwiegend von der Festigkeit des Fugenmörtels β_M , dem Übertragungsfaktor \bar{u} , der Fugenschlankheit h/d sowie der Fugeneigung α ab. Wenn diese Werte wegen der Unregelmäßigkeiten von Bruchsteinmauerwerk auch nur als Mittelwerte erfaßt werden können, werden sie in vielen Fällen doch eine zuverlässigere Beurteilung und Einordnung von Mauerwerk als nach den herkömmlichen Definitionen ermöglichen.

Im einzelnen gilt:

- a) Die Festigkeit β_M des Fugenmörtels beeinflusst die Wandfestigkeit β_w proportional. Je größer β_M , umso größer ist β_w .
- b) Der Anteil \bar{u} der statisch wirksamen Übertragungsflächen \bar{F} an der gesamten Querschnittsfläche F beeinflusst die Wandfestigkeit β_w proportional. Je größer \bar{u} , umso größer ist β_w .

- c) Die Schlankheit h/d der Mörtelfuge ist für die Festigkeit sehr wesentlich. Je kleiner die Fugendicke h und je größer der mittlere Durchmesser d der Einzelsteine, umso größer ist β_w .
- d) Eine Fugenneigung α verringert die Wandfestigkeit β_w . Am günstigsten wirken horizontale ($\alpha = 0$), gleichmäßige, dünne Fugen.
- e) Die Steinfestigkeit β_s wird bei Bruchsteinmauerwerk im Regelfall keinen Einfluß auf β_w ausüben, da die Fugen vor den Steinen versagen. Das Steinversagen wäre dann zu berücksichtigen, wenn Steine extrem niedriger Festigkeit mit Mörtel extrem hoher Festigkeit kombiniert werden.
- f) Die Schlankheit der Wand, d.h. der Einfluß des Knickens, ist hier nicht erfaßt und muß zusätzlich berücksichtigt werden. Die Möglichkeit, daß dicke Wände mehrschalig mit kaum tragender Füllschicht ausgeführt sind, ist stets zu prüfen.

12. Bisherige Versuchsergebnisse

Die beschriebene Theorie ist noch nicht vollständig durch Versuchsergebnisse abgesichert. Wie bereits erwähnt, sind Versuche mit Natursteinmauerwerk aus letzter Zeit nicht bekannt geworden. Die genannten alten Veröffentlichungen haben vorwiegend historischen Wert. So sind in [1] 40 gemauerte Brücken ohne nähere Materialangabe untersucht. Hier wird empfohlen, die zulässige Spannung nicht höher zu wählen, als der Eigengewichtsspannung einer 200 bis 300 Fuß hohen Mauerwerkssäule entspricht. Dabei ist zu bedenken, daß bei Brücken üblicherweise eine hohe Qualität vorhanden ist. Die zulässige Spannung für gutes Bruchsteinmauerwerk in Kalkmörtel ist in [2] mit $4-5 \text{ kp/cm}^2$ ($0,4-0,5 \text{ MN/m}^2$), in [3] mit 4 kp/cm^2 ($0,4 \text{ MN/m}^2$) angegeben. [4] enthält zulässige

Spannungen für Bruchsteinmauerwerk in Zementmörtel zwischen 21 und 84 kp/cm² (2,1-8,4 MN/m²).

Um diesem Mangel abzuhelpfen, wurden die im folgenden Abschnitt, Teil III, beschriebenen Versuchsreihen durchgeführt.

13. Literatur:

[1] Scheffler, H.

Theorie der Gewölbe etc.,
Braunschweig 1857, Seite 76

[2] Warth, O.

Die Konstruktionen in Stein,
Leipzig 1903, Seite 72 (aus Breymann, Baukonstruktionslehre I)

[3] Handbuch der Architektur, III. Teil, Band 2,
Stuttgart 1901, Seite 355

[4] Böhme

Tätigkeit der Prüfungsstation 1978,
Zeitschrift für Bauwesen, Berlin 1880, Seite 565

[5] Bröker, O.

Steinfestigkeit und Wandfestigkeit,
Betonstein-Zeitung 1961, Seite 120

[6] Mann, W.

Druckfestigkeit von Mauerwerk - eine statistische
Auswertung von Versuchsergebnissen in geschlossener
Darstellung mit Hilfe von Potenzfunktionen,
Mauerwerk-Kalender 1983, Seite 687

[7] Mann, W. und Rustmeier, H.

Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Bruchsteinen,
6. Intern. Mauerwerkskonferenz Rom 1982

[8] Schickert, G.

Formfaktoren der Betondruckfestigkeit,
Bautechnik 1981, Seite 52

[9] Rustmeier, H.

Untersuchungen über Einflüsse auf die Drucktrag-
fähigkeit von Bruchsteinmauerwerk,
Dissertation Darmstadt 1982

Teil III: Laborversuche und Parameterstudien zur Drucktragfähigkeit von Natursteinmauerwerk

Verfasser: Dr.-Ing. H. Rustmeier

1. Bezeichnungen

Belastungen, Kräfte

P Bruchlast in kN

Dehnungen, Spannungen

ϵ Stauchung in mm/m ($\hat{=} 0/00$)
unter Druckbeanspruchung

ϵ_m Mittlere Stauchung

σ Normalspannung in kN/cm²

σ_{zul} Zulässige Normalspannung

$\beta_0 (= \beta_{M0})$ Druckfestigkeit des Mörtels

β_{DIN} Druckfestigkeit des Mörtels nach DIN 18 555

β_{BZ} Biegezugfestigkeit des Mörtels

β_M Mauerwerks- Druckfestigkeit

Sonstige Bezeichnungen

K Formfaktor

γ Sicherheitsbeiwert

α Neigungswinkel der Fuge

$d_f (-d_{m0})$	Dicke der Mörtelfuge
$7d, 21d, 28d$	Prüfalter in Tagen
ρ_{m0}	Rohdichte bei Eignungsprüfungen des Mörtels
t	Sekunden
Geometrische Bezeichnungen	
F_u	Übertragungsfläche
d	Durchmesser
h	Höhe
b	Breite
$Z(h/d)/1$	Zylinder-Prüfkörper (Höhe/Durchmesser)/Nummer des Einzel- versuchs
$W(A)/2$	Würfel -Prüfkörper (Form A)/Nummer des Einzelversuchs
$S(C)/3$	Säulen -Prüfkörper (Form C)/Nummer des Einzelversuchs

2. Vorüberlegungen zu den Versuchen

Aufgrund von Vorversuchen und theoretischen Überlegungen war erkennbar, daß das Druckversagen von Naturbruchsteinmauerwerk vorwiegend zwei Ursachen haben kann:

- a) das Versagen der Mörtelfuge,
- b) das Versagen des Mauerwerksverbandes.

Weitere Versagensursachen wie zum Beispiel Druckversagen der Steine oder Zugversagen der Steine, tritt demgegenüber offensichtlich in den Hintergrund. Da die üblichen Abmessungen der Steine und der Mörtelfugen sowie das Verhältnis von Stein- zur Mörtelfestigkeit bei Natursteinmauerwerk anders gelagert ist, als bei Mauerwerk aus künstlichen Steinen, kann der dort übliche Bruchmechanismus nicht ohne weiteres auf Natursteinmauerwerk übertragen werden.

3. Laborversuche

3.1. Versuchsziele

Aus den genannten Gründen konzentrierten sich die Versuchsreihen auf folgende Punkte:

- a) Formfaktor des Fugenmörtels, d.h. Abhängigkeit der Festigkeit des Fugenmörtels von der Schlankheit der Fuge. Dieser Einfluß wurde in einem ersten Versuchsabschnitt an zylindrischen Mörtelkörpern unterschiedlicher Schlankheit geprüft.
- b) Einfluß des Formfaktors im Mauerwerksverband. Dieser Einfluß wurde an würfelförmigen Probekörpern geprüft, wobei die Natursteine durch vorgefertigte hochfeste Betonteile simuliert wurden. Dies erfolgte einmal aus

Gründen der Kostenersparnis, zum anderen wegen der besseren Übereinstimmung der Abmessungen der Einbauteile, um die Parameter genau darstellen zu können.

- c) Einfluß der Fugenneigung. Hierfür wurden die würfelförmigen Versuchskörper aus Einbauteilen mit trapez- und dreiecksförmigem Querschnitt gemauert.
- d) Einfluß der Schlankheit der Probekörper. Hierzu wurden jeweils 3 würfelförmige Prüfkörper zu Mauerwerkssäulen mit der Schlankheit $h/d = 3/1$ aufgemauert.

3.2 Prüfkörper

3.2.1 Geometrie

Für die Untersuchungen wurden prismatische, zylindrische und würfelförmige Probekörper verwendet. Eine Übersicht über die verwendeten Prüfkörper zeigen die BILDER 1 bis 4.

3.2.2 Baustoffe

Mörtel

Für die Versuchsreihen 1 - 8 fanden Mörtel der Gruppen I, II, IIa und III Verwendung; es wurden je Versuchsreihe drei Prüfkörper nach DIN 1164 [2] hergestellt. Die Zuschlagstoffe waren aus zwei Normensanden aufgebaut, definiert in DIN 1164, Ausgabe 11.58. Der Sand bestand aus reinem, aufbereitetem quarzitischem Rundkorn. Angaben über die Mörtel- und Sandzusammensetzung sind in TABELLE 1 und 2 enthalten.

Mit Ausnahme einer einzigen Versuchsreihe, die nach 21 Tagen geprüft wurde, erfolgten alle Prüfungen im Alter von 28 Tagen. Die Mindestdruckfestigkeit nach DIN 1053 Blatt 1 (Tabelle 21) wurde von keinem Prüfkörper unterschritten.

Die parallel dazu durchgeführten Eignungsprüfungen erfolgten nach DIN 18 555 [14]. In der TABELLE 3 sind die in den Güteprüfungen erzielten Mittelwerte (jeweils 3 Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm Kantenlänge) der Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit aller für die bei den Versuchsreihen verwendeten Mörtel nach Lagerung bei 20 °C und 7 Tagen an feuchter Luft (\cong 95 % rel. Luftfeuchtigkeit) und 21 Tagen bei Normalklima 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte zusammengestellt.

An je drei Mörtelprismen 4 cm x 4 cm x 16 cm wurde für die Mörtelgruppe II im Alter von 28 Tagen der Elastizitätsmodul ermittelt. Bei einer Bruchlast von 49,75 kN/cm² betrug der E-Modul 385 kN/cm².

Steine

Die Einbauten der Würfel- und Säulenprüfkörper wurden, wie bereits erläutert aus Beton hergestellt.

Die Güteprüfungen ergaben bei Verwendung eines PZ 55 eine mittlere Druckfestigkeit von 7,43 kN/cm².

3.2.3 Zuordnung der Prüfkörper

Prismen - Prüfkörper:

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit nach DIN 18 555 [14], im folgenden β_{DIN} genannt, mußten die geforderten Prüfungen an dafür vorgeschriebenen Mörtelprismen von 4 cm x 4 cm x 16 cm Kantenlänge (BILD 7) durchgeführt werden.

Zylinder - Prüfkörper

Die zylindrischen Mörtelprüfkörper mit unterschiedlichem Durchmesser (d) und variierendem Verhältnis Höhe/Durchmesser (h/d) wurden zur Untersuchung des Formfaktors für die Druckfestigkeit hergestellt. BILD 2 gibt einen Überblick über die verwendeten Prüfkörper.

Würfel - Prüfkörper

Im BILD 3 sind die verwendeten würfelförmigen Prüfkörper dargestellt. Durch verschiedenartige Einbauten, die die Neigung und Dicke der Mörtelfuge variieren, sollte der Einfluß des Verbandes auf die Druckfestigkeit geprüft werden.

Säulen - Prüfkörper

Um den Einfluß der Querdehnungsbehinderung aus der Prüfmaschine bei der Ermittlung der Druckfestigkeit an Mauerwerkskörpern auszuschließen, wurden bestimmte Würfel-Prüfkörper zu Säulen mit der Schlankheit $h/b = 3$ aufgemauert. Eine Zusammenstellung ist in BILD 4 enthalten.

3.2.4 Zusammenstellung der Prüfkörper und Versuchsreihen

In den TABELLEN 4 bis 6 sind alle geprüften Versuchskörper und damit durchgeführten Versuchsreihen zusammengestellt.

Nicht ausgefüllte Tabellenplätze bedeuten, daß entweder keine Prüfungen durchgeführt wurden oder daß keine einwandfreien Prüfkörper zur Verfügung standen (Beschädigung bei Herstellung oder Transport), so daß keine zuverlässigen Prüfergebnisse ermittelt werden konnten.

3.3 Versuchsdurchführung

3.3.1 Versuchsanlage

Die Versuchsreihen wurden vorwiegend auf einer servohydraulisch geregelten 5000-kN-Druckprüfmaschine der Genauigkeitsklasse 1 durchgeführt. Die Krafteinleitung erfolgte über starre Druckplatten, wobei die obere Druckplatte sphärisch gelagert war. BILD 5 zeigt den Versuchsaufbau.

Die Vorversuche sowie die Versuchsreihe 6 (Zylinder-Prüfkörper der Mörtelgruppe III) fanden auf einer 1000-kN-Druckprüfmaschine der Genauigkeitsklasse 1 statt. Die Eignungsprüfung der Prismen-Prüfkörper nach DIN 18 555 [14] erfolgte durch das in DIN 1164 Blatt 7 [13] vorgeschriebene Prüfgerät.

3.3.2 Einbau der Prüfkörper

Die Prüfkörper wurden zentriert eingebaut. Zuvor wurden die Prüfkörper an ihrer Unter- und Oberseite mit einem Zementmörtel abgeglichen. Damit konnte eine gute und gleichmäßige Krafteinleitung gewährleistet werden.

Zur Herstellung der Säulen waren jeweils drei Würfel-Prüfkörper kraftschlüssig miteinander zu verkleben und ebenfalls abzugleichen.

3.3.3 Belastung

Die Prüfung erfolgte bei konstant eingestellter Weggeschwindigkeit von 0,05 mm/min. Das entspricht etwa einer Dehnungsgeschwindigkeit des Prüfkörpers von ca. 0,002 (mm/m)/s.

Bei den Versuchen wurde die maximal aufnehmbare Last ermittelt. Die Last-Verformungskurve wurde auch nach Erreichen der Maximallast mit konstanter Weggeschwindigkeit aufgenommen, um auch den absteigenden Ast der Spannungs-Dehnungslinie (Spannungs-Stauchungslinie) im Bruch-

bereich zu erfassen. Zusätzlich zu den Verformungsmessungen wurde die Kraftsteigerung für jeden Prüfkörper von einem Linienschreiber aufgenommen.

3.3.4 Verformungsmessungen

Da es Ziel der Versuche war, die Bruchlast der Prüfkörper und nicht ihr Verformungsverhalten zu ermitteln, wurden für die Versuchsreihe 1 die Verformungen nur im Bereich der erwarteten Höchstlast gemessen, so daß hierfür keine vollständigen σ - ϵ -Diagramme vorliegen. Im Hinblick auf die angestrebte Bruchtheorie wurden dann bei den folgenden Versuchsreihen vollständige σ - ϵ -Diagramme ermittelt.

Zu diesem Zweck wurden die lotrechten Verformungen w_1 , w_2 und w_3 an drei Meßstrecken gemäß BILD 5 mittels Induktivgeber in einem Abfrageintervall von 5 s gemessen und auf einen X-Y-Schreiber übertragen. Für die weitere elektronische Datenverarbeitung wurden die Werte gespeichert und alle 60 s abgefragt und ausgedruckt.

Aus den Verformungen w_1 - w_3 werden die Verzerrungen ϵ_1 - ϵ_3 nach der Gleichung

$$\epsilon = \frac{w}{h} ; \quad h = \text{Höhe des Prüfkörpers für } P = 0$$

berechnet. Die Verzerrung in der Achse des Prüfkörpers wurde entsprechend der Anordnung der drei Meßstrecken ermittelt:

$$\epsilon_m = 0,5 \epsilon_1 + 0,25 (\epsilon_2 + \epsilon_3)$$

Die Ergebnisse der Verformungsmessungen sind auszugsweise in den TAFELN 11 bis 34 zusammengestellt.

3.4 Versuchsergebnisse und Auswertungen

3.4.1 Formfaktor für die Druckfestigkeit von Mörtel-Prüfkörpern

Als Mörtelprüfkörper wurden Zylinder (Durchmesser d , Höhe h) verwendet (BILD 6 und 7). Untersuchungen über Formfaktoren bei dem Baustoff Beton zeigen, daß die Formfaktoren von dem Verhältnis h/d und der absoluten Größe der Prüfkörper abhängig sind [9, Bild 4]. Darüber hinaus konnte eine Abhängigkeit dieser Faktoren von der Mörtelgüte erwartet werden.

Um diese drei Einflüsse auf die Faktoren zu untersuchen, wurde die Druckfestigkeit von Prüfkörpern der Mörtelgruppe I, II, IIa und III mit unterschiedlichem Durchmesser d und variierendem Verhältnis h/d ermittelt. Die Abmessungen der untersuchten Prüfkörper sind in BILD 2 zusammengestellt.

In den TABELLEN 7 bis 13 wurden diese Ergebnisse der Druckprüfungen aufgelistet.

Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, sind in den Tabellen die Bruchspannungen β_D auf die im DIN-Versuch für den verwendeten Mörtel ermittelte Bruchspannung β_{DIN} bezogen und der Verhältniswert $\kappa = \beta_D / \beta_{DIN}$ gemittelt.

In den TAFELN 1 bis 7 wurde der Wert κ über h/d aufgetragen. Der Einfluß der Prüfkörperform hat für alle Mörtelgüten einen charakteristischen hyperbelähnlichen Verlauf, wie er auch bei ähnlichen Untersuchungen an Beton vorzufinden ist.

Ein Einfluß der Größe des Prüfkörpers konnte nur für die Mörtelgruppe I eindeutig nachgewiesen werden. Er äußert sich durch drei (für die 2 cm hohen Prüfkörper liegen nur zwei Meßpunkte vor; die Kurve kann deshalb nur angedeutet werden) deutlich voneinander getrennte hyperbelähnliche Kurven in TAFEL 1:

Mit zunehmender Größe des Prüfkörpers nimmt der Formfaktor κ ab. Auch dieses Ergebnis zeigt Übereinstimmung mit den Ergebnissen für Betonprüfkörper [9, Bild 4]. Ausführungen über die Verformungsmessungen sind im Abschnitt 3.4.4 enthalten.

3.4.2 Formfaktor für die Druckfestigkeit von würfelförmigen Mauerwerksprüfkörpern

In den Würfelprüfkörpern (BILD 8 bis 25) sollte der Einfluß des Verbandes geprüft werden. Dieser Einfluß wird auch als "Formfaktor" bezeichnet, obwohl die äußeren Abmessungen der geprüften Würfel gleich waren.

Entsprechend wurden durch verschiedenartige Einbauten Neigung und Dicke der Fuge variiert. Die Mörtelgüte war mit Mörtelgruppe II für alle Prüfkörper gleich. Auch hier wurde aus den Bruchlasten der Wert

$\kappa = \beta_D / \beta_{DIN}$ als Mittelwert errechnet. Einen Überblick vermittelt TABELLE 14. Außerdem ist dieser Verhältniswert κ in Tafel 9 über der Fugendicke d_f (Definition siehe BILD 3) aufgetragen, und die Werte gleicher Fugenneigung sind zu Kurven verbunden. Die veränderliche Fugendicke d_f und die veränderliche Fugenneigung $\tan \alpha$ der Fugen sind somit die Parameter für den Formeinfluß.

Dieser Formeinfluß ist für die untersuchten Fugenneigungen ähnlich: Die Kurven für die verschiedenen Neigungen haben hyperbelähnlichen Charakter. Außerdem ist erkennbar: Mit zunehmender Fugendicke geht der Einfluß der Neigung zurück, so daß bei größerer Fugendicke die Kurven ineinander übergehen. Hier ist offenbar das Verhältnis h/d für den Bruch ausschlaggebend. Bei kleinen Fugendicken hingegen geht das Verhältnis

$\kappa = \beta_D / \beta_{DIN}$ mit wachsendem Neigungswinkel der Fuge zurück. Offenbar wirkt sich hier das Abscheren in der Fuge aus.

3.4.3 Formfaktor für die Druckfestigkeit von säulenförmigen Mauerwerksprüfkörpern

Die TABELLE 15 faßt die Versuchsergebnisse der Druckprüfungen an den Säulen (BILD 26 bis 30) mit der Schlankheit $h/d = 3$ zusammen. Auch hier wurde das Verhältnis $\kappa = \beta_D / \beta_{DIN}$ und dessen Mittelwert gebildet und in TAFEL 10 über die Fugenhöhe d_f aufgetragen. Um die Unterschiede zwischen dem Bruchverhalten von Würfeln und Säulen deutlich zu machen, sind in TAFEL 10 neben den Ergebnissen an Säulenprüfkörpern die zuvor in TAFEL 9 dargestellten Ergebnisse an Würfelprüfkörpern gestrichelt eingetragen, und zwar jeweils als Verhältniswert $\kappa = \beta_D / \beta_{DIN}$. Man erkennt, daß die Säulenprüfkörper überwiegend etwas geringere Tragkraft als die Würfelprüfkörper erbrachten. Im allgemeinen liegt der Unterschied bei etwa 10 %. Lediglich der Würfel mit $\alpha = 0$ und $d_f = 2$ cm erbrachte einen im Mittel etwa 75 % höheren Wert. Offenbar handelt es sich hier —herstellungsbedingt— um einen nicht repräsentativen Versuch, also einen sogenannten Ausreißer. Die geringen Unterschiede der Tragfähigkeit sind einerseits auf die Querdehnungsbehinderung durch die Prüfpresse zurückzuführen. Andererseits wäre denkbar, daß in den Säulenprüfkörpern, die mehr Fugen als die Würfelprüfkörper enthalten, zwangsläufig schon aus statistischen Gründen mit größerer Wahrscheinlichkeit Fugen geringerer Festigkeit auftreten.

Darüber hinaus können die unterschiedlichen Versuchsergebnisse zwischen den Würfel- und Säulenprüfkörpern, insbesondere der Einfluß der Fugenneigung bei geringer Fugendicke, wie folgt erklärt werden: Es ist ohne weiteres verständlich, daß die geneigte Fuge ungünstiger als die horizontale Fuge sein muß. Die Versuche haben dies bestätigt. Aus diesem Grunde wirkt sich der zusätzliche Einfluß der Querdehnungsbehinderung durch die Prüfpresse bei geneigten Fugen geringer aus, da er durch den ungünstigen Einfluß der Neigung stärker überlagert wird.

3.4.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Obwohl es Ziel der Arbeit war, die Bruchlast bzw. Bruchspannung festzustellen, wurden im Hinblick auf eine noch zu entwickelnde Bruchtheorie für die meisten Prüfkörperserien auch die Verformungen gemessen. Sie sind auszugsweise in den TAFELN 11 bis 34 in der Form von σ - ϵ -Diagrammen dargestellt. Über die Meßtechnik siehe Abschnitt 3.3.4

4. Untersuchungen an bestehendem Bruchsteinmauerwerk

4.1 Zweck und Umfang der Untersuchungen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Versuche haben allgemeine, nicht nur spezielle Gültigkeit für ein bestimmtes Mauerwerk.

Im folgenden soll geprüft werden, ob die in den Laboruntersuchungen erfaßten Parameter ausreichen, um historisches Bruchsteinmauerwerk im Hinblick auf seine Drucktragfähigkeit zu beschreiben. Ziel der Untersuchungen sollte es auch sein, einen Weg zur quantitativen Abschätzung aufzuzeigen.

Die Untersuchungen wurden auf typische Formen von Bruchsteinmauerwerk, wie sie in unserer mittelalterlichen Bausubstanz vorkommen, beschränkt.

4.2 Untersuchte Bauten

Für die beispielhaften Untersuchungen wurden drei Bauwerke unter dem Gesichtspunkt der räumlichen Nähe und einer erwünschten Vielfalt der Mauerwerksausführung ausgewählt. Obwohl an allen Bauwerken Restaurierungsarbeiten von unterschiedlichem Umfang durchgeführt wurden, war es nicht möglich, beliebig viele Prüfungen durchzuführen, da das von Schäden freie Originalmauerwerk verständlicherweise nur begrenzt abgetragen werden durfte. Nachfolgend werden die drei untersuchten Bauwerke kurz vorgestellt:

Burg Eppstein/Taunus

Urkundlich wurde die Burg Eppstein im Jahre 1122 zum ersten Mal er-

Burg Rheinfels/St. Goar

Die Burg Rheinfels in St. Goar ist als eine der größten Burgruinen am Rhein anzusehen (BILD 40).

Sie ist für diesen geographischen Bereich von besonderer Bedeutung – sowohl für die Burgenbaukunst im 14. Jh. wie für den Schloß- und Festungsbau des 16. bis 18. Jh. [4].

Die Burganlage wurde ab 1818 bis 1843 als Steinbruch für den Wiederaufbau der Festung Ehrenbreitstein verwendet. Kennzeichnend für das Bruchsteinmauerwerk der Burg Rheinfels ist der rheinische Schiefer, der teilweise von Quarzitadern durchsetzt ist (BILD 41 bis 47). Dieses Mauerwerk mit seinem kleinteiligen, schichthafte n Erscheinungsbild enthält auch einige Basaltsteine, die den Verband insgesamt verstärken.

Für die Untersuchungen wurde der "Darmstädter Bau" (BILD 43) gewählt.

4.3 Umfang der Untersuchungen für die einzelnen Parameter

Die zuvor beschriebenen Versuche haben gezeigt, daß die folgenden Parameter Einfluß auf die Tragfähigkeit von Natursteinmauerwerk haben.:

a) Mörtelgüte

In diesem Zusammenhang interessiert die Druckfestigkeit des Mörtels, deren Bestimmung jedoch nicht Ziel dieser Arbeit ist. Im praktischen Fall wird man durch chemische Analyse versuchen, Aufschluß über die Zusammensetzung des Mörtels zu finden und durch Augenschein (z. B. Herauskratzen des Mörtels) einen Eindruck von der Mörtelqualität zu gewinnen. Es läßt sich aber allgemein sagen, daß bei historischen Bauwerken die Mörtelfestigkeiten im Regelfall der Mörtelgruppe I zuzuordnen sind.

b) Fugenneigung im Bereich der Übertragungsfläche.

c) Formfaktor der Mörtelfuge im Übertragungsbereich.

Hierzu ist die Kenntnis der zwischen zwei Steinen vorhandenen Übertragungsfläche sowie die der Fugendicke erforderlich.

d) Steifigkeit

Bei den im Normalfall anzusetzenden Steifigkeiten wird - wie bereits ausgeführt - kein Einfluß auf die Wandfestigkeit zu erwarten sein, sofern die Steine die in den heute geltenden Normen festgelegten Baustoffkennwerte nicht unterschreiten. Ausnahmen sind dann zu erwarten, wenn die Steine nicht auf ihr natürliches Lager, das durch die Schichtung bestimmt ist, gelegt wurden [5], [6]. Die Folge wäre ein Abblättern und Verwittern der Steine, wodurch die üblicherweise für Bruchsteine zu erwartende Festigkeit verlorengehe.

Die nachfolgenden Untersuchungen dienen zur Feststellung der unter b) und c) angeführten Parameter.

4.4 Methode der Untersuchungen am Bauwerk

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungsmethoden zeigen eine Möglichkeit zum Auffinden und zur zahlenmäßigen Beschreibung der im Labor untersuchten Parameter eines Mauerwerkes. Die angeführten Ergebnisse gelten selbstverständlich nur für das jeweils untersuchte Mauerwerk.

Es wurden insgesamt 18 Schnitte und 126 Punkte an den drei Bauwerken untersucht. Einen Überblick der Untersuchungsergebnisse geben die TABELLEN 16 bis 18.

Zuerst wurden die Außenflächen eines Mauerwerkes mit einem sichtbaren Vertikalschnitt aufgenommen und damit die Fugenhöhe und Fugenneigung ermittelt.

Anschließend wurden, wo es vertretbar erschien, die Mauerwerkskronen soweit abgeräumt, daß ein meßbarer horizontaler Schnitt vorlag. Vertikaler- und horizontaler Schnitt erlaubten nunmehr, von vornherein sicherzustellen, daß zwischen den tragenden Schalen und dem Füllmauerwerk unterschieden werden konnte (BILD 48).

Auf die zu untersuchende tragende Schale des Bruchsteinmauerwerks wurde eine Klarsichtfolie mit den Abmessungen 50 cm x 100 cm gelegt, auf der mit Filzschreiber die genaue Lage der Steine des betreffenden Horizontalschnitts aufgezeichnet wurden. Nach dem die Steinlage aufgezeichnet und abgetragen war, wurde die Dicke der Mörtelschicht noch einmal im Innern der Mauer überprüft und festgehalten. Anschließend wurde der Mörtel ebenfalls entfernt und die darunterliegende Steinlage mit einem Besen gereinigt. Es wiederholte sich der Vorgang mit der Klarsichtfolie, wobei darauf zu achten war, daß die Folie so gelegt wurde, daß sie genau unter der Folie der vorhergehenden Schicht zu liegen kam. Durch späteres Übereinanderlegen der Folien bestand jetzt die Möglichkeit, die Übertragungsflächen des Mörtels zwischen zwei Steinlagen zu messen (BILD 48).

4.5 Untersuchungsergebnisse und Auswertung

Wände des historischen Mauerwerks mit Dicken über 1 m sind fast immer als Schalenmauerwerk vollfugig gemauert, wobei der Kern mit minderwertiger Füllung ausgeführt wurde. Als Füllmaterial dienten meistens kleinteilige Bruchstücke. Obwohl die Füllung schichtweise mit den Schalenmauern entstand, kann von einem auf volle Breite gleichmäßig tragendem Mauerwerk nicht die Rede sein.

Die Fugendicken können nicht allein an der Außenfläche des Mauerwerks gemessen werden. Die tatsächliche Fugendicke in der Übertragungsfläche ist oftmals wesentlich geringer. An einzelnen Punkten lagen die Steine sogar unmittelbar aufeinander. Durch die Steinformen bedingte größere Fugendicken wurde durch Kleinschlag reduziert.

Der historische Mauermörtel machte bei den drei Bauwerken einen mürben Eindruck und ließ auf eine geringe Festigkeit schließen. An allen Bauwerken wurden große Teile der Fugen mindestens einmal ausgeworfen, wobei man sie offenbar zuerst auskratzt und dann mit einem besseren Mörtel gefüllt hatte. Der nachträglich angebrachte Mörtel, der daran erkennbar ist, daß er recht grobe Körnung enthält, läßt sich an vielen Stellen leicht herausnehmen. Dies ist eine Folge von Frost und Verwitterung, so daß man darunter den mehr feinsandigen, wenig festen Originalmörtel erkennt. Wann diese nachträglichen Ver fugungen erfolgten, konnte in keinem Fall festgestellt werden. Wie der alte Mörtel zusammengesetzt ist, kann nur - wie bereits erwähnt - durch eine detaillierte chemische Untersuchung geklärt werden. Die Mörtelfestigkeit ist in Mörtelgruppe I einzustufen.

Bei der Auswertung wurde festgehalten, welcher Anteil der Wand als tragender Querschnitt anzusehen ist, wobei ganz offensichtlich die Bindertiefe des Steines maßgebend ist. Bei einer untersuchten Wand war die tragende Schale, entsprechend TABELLE 18, im Mittel 40 cm dick.

Innerhalb dieser tragenden Schale wurde festgestellt, wieviel Prozent eines Horizontalschnittes im Mittel als Übertragungsfläche anzusehen sind. Die übrigen Mörtelanteile blieben als Füllmörtel unberücksichtigt. Der Anteil der Übertragungsflächen lag in TABELLE 18 i. M. bei rd. 75 %.

Weiterhin wurde festgestellt, welches Verhältnis h/d zur Bestimmung des Formfaktors im Mittel angesetzt werden kann.

4.6 Beispiel für die Abschätzung der Drucktragfähigkeit

Die Versuchsergebnisse erlauben auch im gegenwärtigen Stadium der Untersuchungen eine Abschätzung der Drucktragfähigkeit für ein zahlenmäßiges Beispiel. Stellvertretend dafür wird die Burg Rheinfels/ St. Goar gewählt, deren Untersuchungsergebnisse in TABELLE 18 zusammengefaßt sind.

Für das zahlenmäßige Beispiel wird aus der TABELLE 18 der Horizontalschnitt Nr. 5 betrachtet, da dieser mit 70 % den geringsten Übertragungsflächenanteil aufweist.

Aus Spalte 5 folgt eine mittlere Fugendicke $d_f = 2,0$ cm; aus Spalte 6 eine mittlere Fugenneigung $\tan \alpha = 0,06$; aus Spalte 7 ein mittlerer Durchmesser der Übertragungsfläche $d = 12$ cm und nach Spalte 8 ein Anteil von 70 % der Mauerwerksschale als Übertragungsfläche F_U .

Die vorhandene Mörtelfestigkeit wird aufgrund der Erfahrung beim Abbau der Schichtung zu $\beta_D = 0,10$ kN/cm² geschätzt. Der Mörtel ist in Mörtelgruppe I einzustufen.

1. Bestimmung des Wertes $\kappa = \beta_D / \beta_{DIN}$

Formfaktor: $h/d = d_f/d = 2/12 = 1/6$

Dieser Wert stimmt mit dem Verhältnis d_f/d bei den Würfelprüfkörpern annähernd überein, so daß der Formfaktor aus TAFEL 8 ohne Einrechnung der Formfaktoren aus den Mörtelprüfkörpern nach TAFEL 1 bis 7 übernommen werden kann.

Fugenneigung: $\tan \alpha = 0,06$

Dieser Wert liegt zwischen $\tan \alpha = 0$ und $\tan \alpha = 0,375$. Der Wert κ für $\tan \alpha = 0,06$ wird durch lineare Interpolation aus TAFEL 10 gewonnen:

Für $d = 2,0$ cm und $\tan \alpha = 0$: $\kappa = 3,85$

Für $d = 2,0$ cm und $\tan \alpha = 0,375$: $\kappa = 3,55$

Linear Interpoliert - $\tan \alpha = 0,06$: $\kappa = 3,80$

2. Bestimmung der Mauerwerksdruckfestigkeit β_M

$$\beta_M = \kappa \cdot \beta_D \cdot \frac{F_U}{F} = 3,80 \cdot 0,10 \cdot 0,70 = 0,26 \text{ kN/cm}^2$$

3. Bestimmung der zulässigen Druckspannung $\sigma_{zul.}$

Die zulässige Druckspannung folgt aus $\sigma_{zul.} = \beta_M / \gamma$

Wählt man, wie für Mauerwerke üblich, die Sicherheit $\gamma = 3$, so wäre für das gewählte Beispiel

$$\sigma_{zul.} = \frac{0,26}{3} = 0,086 \text{ kN/cm}^2.$$

5. Zusammenstellung weiterer Festigkeitswerte

5.1 Allgemeines

Zur Abrundung der Arbeit werden nachfolgend einige Festigkeitswerte zusammengestellt, die aus verschiedenen Normen entnommen sind und die für die Beurteilung von Bruchsteinmauerwerk von Interesse sein könnten. Sie beruhen also nicht auf eigenen Versuchen, sondern werden hier zusammengestellt, um die Betrachtung von Bruchsteinmauerwerk zu vervollständigen.

5.2 Steindruckfestigkeit

Für die Prüfung von Natursteinmauerwerk ist DIN 52 100 [15] sowie DIN 52 105 [16] maßgebend. In Tafel 1 der DIN 52 100, Spalte 5, sind Werte für die Druckfestigkeit ("Vorläufige Richtzahlen für Auswahl und Bewertung von Natursteinen - mittlere Häufigkeitswerte") angegeben. TABELLE 19 gibt die darin enthaltenen Druckfestigkeitswerte des trockenen Gesteins vollständig wieder. In [7] werden diese Materialkennwerte ebenfalls wiedergegeben. Die niedrigsten Druckfestigkeiten weisen danach vulkanische Tuffsteine mit 2,0 - 3,0 kN/cm², d. h. die niedrigste Steinfestigkeit liegt in der Größenordnung der höchsten, derzeit zulässigen künstlichen Mauersteinfestigkeit. Die höchsten Druckfestigkeiten natürlicher Steine weisen Basalt und Melaphyr mit 25,0 - 40,0 kN/cm² auf, somit ein Mehrfaches der höchsten, heute möglichen Betonfestigkeiten.

Die DIN 1053 Blatt 1 führt in Abschnitt 7.5.2, Tabelle 12, ebenfalls Mindestdruckfestigkeiten für Natursteine auf. Sie entsprechen den untersten Werten der genannten Tafel 1 der DIN 52100, werden allerdings zu fünf Gruppen (A - E) zusammengefaßt, TABELLE 20 gibt einen Überblick der Mindestdruckfestigkeiten.

5.3 Steinzugfestigkeit

Für die Steinzugfestigkeit gilt ebenfalls DIN 52 100 [15] sowie DIN 52 112 [17]. In Tafel 1 der DIN 52 100, Spalte 6, sind Werte für die Biegefestigkeit angegeben, die ebenfalls in TABELLE 19 aufgeführt werden.

Daraus ergibt sich, daß die Biegezugfestigkeit im Regelfall 6 -10 % der Druckfestigkeit des Natursteines erreicht, in Ausnahmefällen, nämlich bei Kalkkonglomeraten und Travertin, also bei Steinen mit der geringsten Druckfestigkeit, bis zu 25 %.

5.4 Zulässige Spannungen für Natursteinmauerwerk

5.4.1 Deutsche Mauerwerksnorm

In DIN 1053 Blatt 1, Tabelle 13 [11] sind die Grundwerte der zulässigen Druckspannungen von Mauerwerk aus natürlichen Steinen angegeben. Sie hängen von folgenden vier Parametern ab:

a) Mörtelgüte nach Abschnitt 4.1.4

Darin ist grundsätzlich Gruppe I Kalkmörtel, Gruppe II Kalkzementmörtel und Gruppe III reiner Zementmörtel. Die Anforderungen an die Mörteldruckfestigkeit nach DIN 1053 Blatt 1, Abschnitt 4.2 sind in TABELLE 21 wiedergegeben.

b) Mindestdruckfestigkeit gemäß Abschnitt 7.5.2

In Tabelle 12 sind die Mindestdruckfestigkeiten der Gesteinsarten in Gruppe A bis E eingeteilt.

c) Mauerwerksart nach Abschnitt 6.2.2

Dabei wird unterschieden zwischen Bruchsteinmauerwerk ("Wenig bear-

beitete Bruchsteine sind im ganzen Mauerwerk im Verband und satt in Mörtel zu verlegen“) (BILD 49), Hammerrechtes Schichtenmauerwerk (“Die Steine der Sichtfläche erhalten auf mindestens 12 cm Tiefe bearbeitete Lager- und Stoßfugen, die ungefähr rechtwinklig zueinander stehen“) (BILD 50), Unregelmäßiges und Regelmäßiges Schichtenmauerwerk (“Die Steine der Sichtfläche erhalten auf mindestens 15 cm Tiefe bearbeitete Lager- und Stoßfugen, die zueinander und zur Oberfläche senkrecht stehen“) (BILD 51 und 52) und Quadermauerwerk (“ Lager- und Stoßfugen müssen in ganzer Tiefe bearbeitet sein.“) (BILD 53).

d) Schlankheit bzw. Ersatzschlankheit der Wand

Die Grundwerte der zulässigen Druckspannungen der DIN 1053 Blatt 1, Abschnitt 7.5.2, Tabelle 13, sind in TABELLE 22 wiedergegeben. Sie gelten für eine Wandschlankheit $h/d = 10$. Schlankere Wände mit $h/d = 10$ sind nach Abschnitt 7.5.2.1 nur für Quadermauerwerk erlaubt. In diesem Fall sind die zulässigen Spannungen nach TABELLE 14 der DIN 1053 Blatt 1, Abschnitt 7.5.2 abzumindern. Die danach zulässigen Druckspannungen sind in TABELLE 23 angegeben.

5.4.2 Schweizer Norm

Natursteinmauerwerk ist behandelt in der Norm S.I.A. 178 [18]. Die zulässigen mittigen Druckspannungen (Schwerpunktsspannungen) sind in TABELLE 1 dieser Norm in Abhängigkeit von folgenden Parametern angegeben:

a) Mörtelgüte nach Abschnitt 4.1

Portlandzementmörtel = Güte C (entspricht also der deutschen Mörtelgruppe III), verlängerter Mörtel = Güte V (entspricht also der deutschen Mörtelgruppe II).

Eine Mörtelgüte entsprechend der deutschen Mörtelgruppe I ist nicht vorgesehen.

b) Steinkategorien gem. Abschnitt 4.2

Die verschiedenen Steinkategorien sind dargestellt durch die Mindestdruckfestigkeit der Steine:

Kategorie I – Mindestdruckfestigkeit $80 \text{ N/mm}^2 \cong 8,0 \text{ kN/cm}^2$

Kategorie II – Mindestdruckfestigkeit $160 \text{ N/mm}^2 \cong 16,0 \text{ kN/cm}^2$

c) Mauerwerksarten nach Abschnitt 4.3

Es werden folgende Mauerwerksklassen mit verschiedenen zulässigen Belastungen unterschieden:

M 0 – Bruchsteinmauerwerk
(entspricht dem deutschen Bruchsteinmauerwerk)

M 1 – Spitzsteinmauerwerk
(entspricht dem deutschen hammerrechten Schichtenmauerwerk)

M 2 – Schichtenmauerwerk
(entspricht ungefähr dem deutschen regelmäßigen Schichtenmauerwerk)

M 3 – Quadermauerwerk
(entspricht dem deutschen Quadermauerwerk)

d) Schlankheit der Wand

Die Grundwerte der zulässigen Schwerpunktsspannungen sind in TABELLE 24 wiedergegeben. Bei veränderlicher Spannung darf die zulässigen Kantenpressung 40 % über der Schwerpunktsspannung liegen.

Ein Vergleich dieser zulässigen Spannungen mit denen der DIN 1053 Blatt 1 ergibt, daß hier auch für anderes als Quadermauerwerk Schlankheiten $h/d > 10$ mit der oberen Grenze $h/d = 20$ zulässig sind. Vergleicht man die Grundwerte für $h/d = 10$ und einer Steindruckfestigkeit $= 8,0 \text{ kN/cm}^2$, also die Deutsche Gruppe D, so liegen die zulässigen Spannungen nach

S.I.A.—Norm 178 stets höher als die entsprechenden deutschen Spannungen, teilweise mehr als doppelt so hoch. Hinzu kommen die nach der schweizer Norm zulässigen 40 % höheren Kantenpressung.

5.4.3 Österreichische Norm

Massive Mauern und Wände werden in der ÖNorm B 3350 [19] behandelt. Sie gilt in dieser Fassung nur noch für das Natursteinmauerwerk.

Die Festigkeit schwerachsig (mittig) belasteter Mauerpfeiler mit der Höhe h ist für die in Aussicht genommenen tatsächlichen Dicken (d) und für den in Aussicht genommenen Mörtel in ihrer Abhängigkeit vom Verhältnis h/d festzustellen. Dabei sind im Bereich $h/d \cong 4 - 12$ mindestens 10 Versuche, im Bereich $h/d \cong 12 - 25$ mindestens 20 Versuche derart durchzuführen, daß die Abhängigkeit der Höchstspannung vom Verhältnis deutlich erkennbar wird. Bei einem Verhältnis $h/d > 25$ sind besondere Nachweise erforderlich.

Die zulässigen Druckspannungen ergeben sich aus den in Versuchen gewonnenen Bruchfestigkeiten von Mauerwerkspfeilern, geteilt durch den Sicherheitsbeiwert $\gamma = 4$. Tabellenwerte für zulässige Spannungen sind in dieser Norm nicht angegeben.

Die Standsicherheit muß mindestens 1,5 betragen. Der Begriff Standsicherheit bedeutet nach der bei uns üblichen Bezeichnung Kippsicherheit um die Kante; die Kippsicherheit 1,5 läßt eine klaffende Fuge bis maximal zur Querschnittsmitte zu.

5.4.4 Britische Norm

Die Richtlinien für Steinmauerwerk BS 5390 [20] umfassen auch das Natursteinmauerwerk. Diese Norm enthält ausführliche Anweisungen für die

Herstellung von Mörtel sowie des Mauerwerks und ist somit ausschließlich handwerklich orientiert. Bezüglich der zulässigen Druckspannungen wird in Abschnitt 17.1.1 auf eine neue Norm verwiesen, die sich noch in Vorbereitung befindet.

5.5 Vergleichende Betrachtung der genannten Normen

Ein ausführlicher Vergleich hinsichtlich der Druckfestigkeiten kann nur zwischen der schweizer Norm S.I.A. 178 und der deutschen DIN 1053 Blatt 1 durchgeführt werden, da nur diese beiden Normen zulässige Spannungen enthalten.

Die schweizer Norm läßt, soweit vergleichende Werte vorliegen, durchweg höhere Druckspannungen zu als die deutsche Norm.

Das Verhältnis $\bar{\kappa} = \sigma_{zul. S.I.A.} / \sigma_{zul. DIN}$ wächst mit zunehmender Güte des Mauerwerks und zunehmender Schlankheit. Besonders auffällig ist die unterschiedliche Bewertung des Einflusses der Schlankheit.

In TABELLE 25 sind die zulässigen Spannungen für zwei den Normen entsprechenden vergleichbaren Stein- und Mörtelgruppen für die jeweiligen Schlankheiten ermittelt. TAFEL 35 zeigt die graphische Auswertung der vergleichenden Betrachtung.

Die österreichische Norm verweist auf Versuche und gibt keine zulässigen Spannungen an.

Die englische Norm legt ebenfalls keine zulässigen Spannungen fest. Eine entsprechende Norm befindet sich in Vorbereitung.

6. Literaturverzeichnis

Im Literaturverzeichnis sind nur die benutzten Literaturstellen aufgeführt. Weiteres Schrifttum ist vor allem auf baustoffkundlichem Gebiet vorhanden; es ist aber nicht Aufgabe dieser Arbeit, hier eine Vollständigkeit anzustreben.

6.1. Zusammenfassende Darstellungen

I 1I Funk, P. und Irmschler, H.J.

Erläuterungen zu den Mauerwerksbestimmungen, Band I,
DIN 1053 Blatt 1 und zugehörige Normen,
Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1975

I 2I Grün, W.

Mörtel - Prüfung und Bewährung, Bauingenieur-Praxis,
Heft 36
Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1974

I 3I Dehio, Georg

Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler - Band Hessen, S. 190,
Deutscher Kunstverlag, Berlin, 1966

I 4I Dehio, Georg

Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler - Band Rheinland-Pfalz,
Deutscher Kunstverlag, Berlin, 1972

I 5I Behse, W.H.

Die praktischen Arbeiten und Baukonstruktionen des Maurers
und Steinhauers in allen ihren Theilen,
Voigt Verlag, Weimar, 1879

I 6I Lindner, W. und Tamms, F.

Mauerwerk,
Metzner Verlag, Berlin, 1937

I 7I Mehling, G.
Naturstein - Lexikon,
Callwey Verlag, München, 1973

6.2. Forschungsberichte

I 8I Mann, W.
Nicht veröffentlichte Gutachten über Tragwerke aus
Bruchsteinmauerwerk

I 9I Schickert, G.
Formfaktoren der Betondruckfestigkeit,
Die Bautechnik, Heft 2/1981, S. 52 ff.

I10I Kirtschig, K. und Kasten, D.
Formfaktoren für die Prüfung von Mauersteinen,
Universität Hannover,
Mauerwerk-Kalender 1981, S. 687 ff.

6.3. Normen

I11I DIN 1053, Blatt 1
Mauerwerk - Berechnung und Ausführung,
Ausgabe 11.74,
Mauerwerk - Kalender 1981, S. 437 - 476

I12I DIN 1053, Teil 2 (Entwurf, Anhang A)
Mauerwerk; Ingenieurmäßig bemessene Bauten -
Berechnung und Ausführung;
Ausgabe 8/81

I13I DIN 1164, Teil 7
Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement -
Bestimmung der Festigkeit,
Ausgabe 11.78

- I14I DIN 18 555
Mörtel aus mineralischen Bindemitteln - Prüfung,
Ausgabe 1.72
- I15I DIN 52 100
Prüfung von Naturstein -
Richtlinien zur Prüfung und Auswahl von Naturstein,
Ausgabe 7.39
- I16I DIN 52 105
Prüfung von Naturstein - Druckfestigkeit,
Ausgabe 11.42
- I17I DIN 52 112
Prüfung von Naturstein - Biegefestigkeit,
Ausgabe 9.42
- I18I S.I.A. 178
Schweizer Norm
Naturstein - Mauerwerk,
Ausgabe 9.80
- I19I ÖNORM B 3350
Österreichische Norm,
Massive Mauern und Wände - Güteeigenschaften,
Ausgabe 6.51
- I20I BS 5390
British Standards Institution,
Code of practice for Stone
masonry, Ausgabe 8.76, S.7

7. TABELLEN, TAFELN, BILDER

7.1 VERZEICHNIS DER TABELLEN

- TABELLEN 1 und 2** Zusammensetzung der Mörtelgüte in Raumteilen nach DIN 1053 Teil 1 und Aufbau der Normensande. Diese Tabellen sind hier wiedergegeben, da die bei den Versuchskörpern verwendeten Mörtel nach diesen Normen hergestellt wurden.
- TABELLE 3** Eigenschaften der erhärteten Mörtel (Mittelwerte) nach DIN 18 555. Für die in den Versuchskörpern verwendeten Mörtel wurden gemäß Norm die Druckfestigkeit, die Biegezugfestigkeit und die Rohdichte ermittelt. Man erkennt, daß die nach der Norm geforderte Druckfestigkeit der MG II, II α und III erreicht bzw. überschritten wurde.
- TABELLEN 4 bis 6** Übersicht der verwendeten Versuchskörper und die damit durchgeführten Versuchsreihen. Es handelt sich dabei um Mörtelprüfkörper in zylindrischer Gestalt, sowie Mauerwerksprüfkörper in Würfel- und Säulenform mit dem Verhältnis $h/d = 1$ bzw. $h/d = 3$. Die unterschiedlichen Einbauten der Würfel- bzw. Säulenprüfkörper sind jeweils als Querschnitt dargestellt.

TABELLEN 7 bis 15 Versuchsergebnisse der Druckprüfungen. Die Bruchspannungen β_D der Prüfkörper wurden, um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, auf die im DIN-Versuch für den jeweiligen Mörtel ermittelte Bruchspannung β_{DIN} bezogen und der Verhältniswert $\kappa = \beta_D / \beta_{DIN}$ gemittelt. Die Tabellen 7 bis 13 betreffen die Mörtelprüfkörper, Tabelle 14 den Mauerwerkswürfel und Tabelle 15 den säulenförmigen Mauerwerksprüfkörper.

TABELLEN 16 bis 18 Ergebnisse der Untersuchungen an bestehendem Bruchsteinmauerwerk:

1. Burg Eppstein/Taunus
2. Burg Schönecken/Eifel
3. Burg Rheinfels/St. Goar

TABELLEN 19 bis 24 Die folgenden Tabellen sind gültigen Normen entnommen und dienen der Vervollständigung der Arbeit. Die Tabellen 19 bis 20 beinhalten eine Zusammenstellung von Festigkeitswerten von Natursteinen. Diese Tabellen sind entnommen aus DIN 52 100 und DIN 1053, Teil 1.

Zulässige Spannungen für Natursteinmauerwerk nach DIN 1053, Blatt 1, sind in den Tabellen 21 bis 23 wiedergegeben.

Tabelle 24 gibt einen Überblick über die zulässigen Schwerpunktsspannungen nach der schweizer Norm S.l.A. 178.

TABELLE 25 Vergleich der zulässigen Druckspannungen zwischen der schweizer Norm S.l.A. 178 und der deutschen Norm DIN 1053, Blatt 1. Sie zeigt, daß die zulässigen Spannungen nach DIN wesentlich geringer als nach S.l.A. sind.

(Es folgen die Tabellen 1 - 25)

TABELLE 1: Mörtelzusammensetzung in Raumteilen
(entsprechend DIN 1053 Teil 1)

1	2	3	4	5
Mörtel- gruppe	Bindemittel			Sand
	Weißkalk- hydrat	Hochhydr. Kalk	PZ 35 F	
I	1			3
II		1		3
IIa		2	1	8
III	0,4		1	4

TABELLE 2: Aufbau der Normensande ¹⁾

1	2	3
Sand	Kornaufbau in mm	Durchgang durch die Siebe in M - % ²⁾
Normen- sand I -fein-	0 - 0,063	20 - 30
	- 0,09	30 - 40
	- 0,2	86 - 92
Normen- sand II -grob-	0 - 0,63	≤ 5
	- 1,25	≥ 99

1) Die Normensande I (fein) und II (grob) wurden im Verhältnis 1:2 verarbeitet.

2) Masseprozent

TABELLE 3: Eigenschaften der erhärteten Mörtel

Mittelwerte der Güteprüfungen im Prüfalalter d von 7, 21 und 28 Tagen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mörtel- gruppe	Druckfestigkeit			Biegezugfestigkeit			Rohdichte		
	β_D [kN/cm ²]			β_{BZ} [kN/cm ²]			$\rho_{Mö}$ [kg/dm ³]		
	7 d	21 d	28 d	7 d	21 d	28 d	7 d	21 d	28 d
I	-2)	0,060	0,070	-2)	0,050	0,040	-2)	1,93	1,93
II ¹⁾	0,21	0,37	0,43	0,10	0,21	0,25	1,92	1,94	1,94
II	0,16	-2)	0,41	0,080	-2)	0,24	1,90	-2)	1,80
II a	0,68	-2)	1,17	0,23	-2)	0,31	2,01	-2)	1,87
III	1,63	-2)	2,49	0,41	-2)	0,48	2,20	-2)	2,10

1) Versuchsreihe 2, Prüfalalter 21 d

2) nicht bestimmt

TABELLE 4: Versuchsreihe 1-6
Übersicht der Versuchstabellen

1	2	3	4	5	6	7
Versuchsreihe	1	2	3	4	5	6
Mörtelgruppe	I	II ¹⁾	II	II	IIa	III
Tabelle/Tafel	7/1	8/2	9/3	11/5	12/6	13/7

1) Versuchsreihe 2, Prüfalter 21 d

TABELLE 4: Versuchsreihe 1-6
Anzahl der Prüfkörper-Zylinder (h/d)

1	2	3	4	5	6	7
Z (2/4)	3	3	3	3	2	3
Z (2/8)	3	3	3	3	3	3
Z (2/12)	3	3	-1)	2	3	-1)
Z (2/16)	2 ²⁾	3	-1)	-1)	-1)	-1)
Z (2/20)	-1)	-1)	-1)	-1)	-1)	-1)
Z (4/4)	3	3	3	3	3	3
Z (4/8)	3	3	3	3	3	3
Z (4/12)	3	3	2	3	3	3
Z (4/16)	3	3	3	-1)	-1)	-1)
Z (4/20)	-1)	-1)	-1)	-1)	-1)	-1)

1) Nicht bestimmt

2) Einzelwert streute stark

Fortsetzung TABELLE 4: Versuchsreihe 1-6

Anzahl der Prüfkörper-Zylinder (h/d)

1	2	3	4	5	6	7
Z (6/ 4)	3	3	3	3	3	3
Z (6/ 8)	3	2 ²⁾	3	3	3	3
Z (6/12)	3	3	3	3	3	3
Z (6/16)	3	3	3	3	3	3
Z (6/20)	-1)	-1)	3	-1)	3	-1)
Z (8/ 4)	-1)	-1)	3	-1)	3	-1)
Z (8/ 8)	-1)	-1)	3	-1)	3	3
Z (8/12)	-1)	-1)	3	-1)	3	3
z (8/16)	-1)	-1)	3	-1)	3	-1)
Z (8/20)	-1)	-1)	3	-1)	3	-1)
Z (10/ 4)	-1)	-1)	3	-1)	3	3
Z (10/ 8)	-1)	-1)	3	-1)	3	3
Z (10/12)	-1)	-1)	3	-1)	3	3
Z (10/16)	-1)	-1)	3	-1)	3	-1)
Z (10/20)	-1)	-1)	3	-1)	3	-1)

1) Nicht bestimmt

2) Einzelwert streute stark

Fortsetzung TABELLE 4: Versuchsreihe 1-6

Anzahl der Prüfkörper-Würfel (Form)

1	2	3	4	5	6	7
W (A) <input type="checkbox"/>	3	-1)	-1)	3	-1)	-1)
W (B) <input type="checkbox"/>	3	-1)	-1)	3	-1)	-1)
W (C) <input type="checkbox"/>	3	3	-1)	3	-1)	-1)

1) Nicht bestimmt

TABELLE 5: Versuchsreihe 7

Übersicht der Versuchstabellen

1.	2.
Versuchsreihe	7
Mörtelgruppe	II
Tabelle/Tafel	14/9

TABELLE 5: Versuchsreihe 7

Anzahl der Prüfkörper-Würfel (Form)











1.	2.
W (C) 	3
W (D) 	3
W (E) 	3
W (F) 	3
W (G) 	3
W (H) 	3
W (J) 	3
W (K) 	3
W (L) 	3
W (M) 	3

TABELLE 6: Versuchsreihe 8
Übersicht der Versuchstabellen

1	2
Versuchsreihe	8
Mörtelgruppe	II
Tabelle/Tafel	15/10

TABELLE 6: Versuchsreihe 8
Anzahl der Prüfkörper-Säulen (Form)







S (C)		3
S (F)		3
S (H)		3
S (J)		3
S (L)		3
S (M)		3

TABELLE 7: Versuchsreihe I
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG I

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D/\beta_{DIN} = \kappa$			MITTELWERT
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
Z (2/ 4)	2,15	2,10	2,00	0,17	0,17	0,16	0,070	2,43	2,43	2,29	2,38
Z (2/ 8)	21,10	23,00	22,70	0,42	0,46	0,45	0,070	6,00	6,57	6,43	6,33
Z (2/12)	1440,0	1411,1	1147,5	12,74	12,49	10,15	0,070	-1)	-1)	-1)	-1)
Z (2/16)	2035,7	3303,1	-1)	10,13	16,44	-1)	0,070	-1)	-1)	-1)	-1)
Z (4/ 4)	1,00	1,10	0,95	0,080	0,088	0,076	0,070	1,14	1,26	1,09	1,16
Z (4/ 8)	5,50	5,10	4,90	0,11	0,10	0,10	0,070	1,57	1,43	1,43	1,48
Z (4/12)	19,00	16,20	17,55	0,17	0,14	0,16	0,070	2,43	2,00	2,29	2,24
Z (4/16)	49,50	42,50	43,30	0,25	0,21	0,22	0,070	3,57	3,00	3,14	3,24

1) Nicht bestimmt

Fortsetzung TABELLE 7: Versuchsreihe 1
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG I

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D/\beta_{DIN} = \kappa$			MITTELWERT
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
Z (6/ 4)	0,30	0,50	0,45	0,024	0,040	0,036	0,070	0,34	0,57	0,51	0,47
Z (6/ 8)	2,00	2,30	1,80	0,040	0,046	0,036	0,070	0,57	0,66	0,51	0,58
Z (6/12)	7,30	7,70	7,80	0,065	0,068	0,070	0,070	0,93	0,97	1,00	0,97
Z (6/16)	22,50	14,70	19,10	0,11	0,073	0,10	0,070	1,57	1,04	1,43	1,35

Fortsetzung TABELLE 7: Versuchsreihe I
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG I

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER WÜRFEL (Form)	BRUHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
W (A) <input type="checkbox"/>	3,30	3,80	3,80	0,033	0,038	0,038	0,070	0,47	0,54	0,54	0,52
W (B) <input type="checkbox"/>	5,80	6,30	6,80	0,025	0,028	0,030	0,070	0,36	0,40	0,43	0,40
W (C) <input type="checkbox"/>	16,50	15,30	14,30	0,041	0,038	0,035	0,070	0,59	0,54	0,50	0,54

TABELLE 8: Versuchsreihe 2
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II (21 d)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
Z (2/ 4)	2,80	4,00	3,80	0,22	0,32	0,30	0,37	0,59	0,86	0,81	0,75
Z (2/ 8)	30,20	28,50	29,50	0,60	0,57	0,59	0,37	1,62	1,54	1,59	1,58
Z (2/12)	90,50	95,20	102,50	0,80	0,84	0,91	0,37	2,16	2,27	2,46	2,30
Z (2/16)	308,60	300,60	336,00	1,54	1,50	1,67	0,37	4,16	4,05	4,51	4,24
Z (4/ 4)	2,00	2,60	2,50	0,20	0,21	0,20	0,37	0,54	0,57	0,54	0,55
Z (4/ 8)	17,80	18,20	18,00	0,35	0,36	0,36	0,37	0,95	0,97	0,97	0,96
Z (4/12)	60,50	48,80	60,80	0,54	0,43	0,54	0,37	1,46	1,16	1,46	1,36
Z (4/16)	164,10	133,10	140,00	0,82	0,66	0,70	0,37	2,17	1,78	1,89	1,95

Fortsetzung TABELLE 8: Versuchsreihe 2
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II (21 d)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
Z (6/ 4)	2,90	2,70	2,50	0,23	0,21	0,20	0,37	0,62	0,57	0,54	0,58
Z (6/ 8)	13,60	16,50	-1)	0,27	0,33	-1)	0,37	0,73	0,89	-1)	(0,81)
Z (6/12)	46,70	44,80	45,00	0,41	0,40	0,40	0,37	1,11	1,08	1,08	1,09
Z (6/16)	119,20	122,00	114,70	0,59	0,61	0,57	0,37	1,59	1,65	1,54	1,59

1) Einzelwert streute stark

(): Mittelwerte aus zwei Einzelwerten

100

Fortsetzung TABELLE 8: Versuchsreihe 2
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II (21d)


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER WÜRFEL (Form)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
W (C) 	101,70	107,60	114,30	0,25	0,27	0,29	0,37	0,68	0,73	0,78	0,73

TABELLE 9: Versuchsreihe 3
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
Z (2/ 4)	4,05	3,50	4,25	0,32	0,28	0,34	0,41	0,78	0,68	0,83	0,76
Z (2/ 8)	54,50	56,00	60,00	1,08	1,11	1,19	0,41	2,63	2,85	3,05	2,84
Z (2/12) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (2/16) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (2/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (4/ 4)	4,00	4,35	4,05	0,32	0,35	0,32	0,41	0,78	0,85	0,78	0,80
Z (4/ 8)	29,00	35,30	29,00	0,58	0,70	0,58	0,41	1,41	1,71	1,41	1,51
Z (4/12)	96,50	97,00	- ¹⁾	0,85	0,86	- ¹⁾	0,41	2,07	2,10	- ¹⁾	(2,09)
Z (4/16)	220,00	225,00	229,50	1,09	1,12	1,14	0,41	2,66	2,73	2,78	2,72
Z (4/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Nicht bestimmt

(): Mittelwert aus zwei Einzelwerten

Fortsetzung TABELLE 9: Versuchsreihe 3
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			MITTELWERT
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
Z (6/ 4)	4,50	3,30	3,20	0,36	0,26	0,25	0,41	0,88	0,63	0,61	0,71
Z (6/ 8)	19,17	16,25	17,20	0,38	0,32	0,34	0,41	0,93	0,78	0,83	0,85
Z (6/12)	57,00	43,50	55,00	0,50	0,38	0,49	0,41	1,22	0,93	1,20	1,12
Z (6/16)	127,00	143,00	148,00	0,63	0,71	0,74	0,41	1,54	1,73	1,80	1,69
Z (6/20)	180,00	223,50	292,00	0,89	0,71	0,93	0,41	2,17	1,73	2,27	2,06
Z (8/ 4)	4,25	3,20	3,30	0,34	0,25	0,26	0,41	0,83	0,61	0,63	0,69
Z (8/ 8)	16,85	16,00	19,70	0,34	0,32	0,39	0,41	0,83	0,78	0,95	0,85
Z (8/12)	48,70	47,20	48,40	0,43	0,42	0,43	0,41	1,05	1,02	1,05	1,04
Z (8/16)	89,00	91,00	94,60	0,44	0,45	0,47	0,41	1,07	1,10	1,15	1,11
Z (8/20)	160,50	166,00	173,50	0,51	0,53	0,55	0,41	1,24	1,29	1,34	1,29

Fortsetzung TABELLE 9: Versuchsreihe 3
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
Z (10/ 4)	3,75	4,00	3,70	0,30	0,32	0,29	0,41	0,73	0,78	0,70	0,74
Z (10/ 8)	18,25	19,80	20,50	0,36	0,39	0,41	0,41	0,88	0,95	1,00	0,94
Z (10/12)	41,50	52,00	45,50	0,37	0,46	0,40	0,41	0,90	1,12	0,98	1,00
Z (10/16)	89,00	85,20	85,00	0,44	0,42	0,42	0,41	1,07	1,02	1,02	1,04
Z (10/20)	135,00	126,50	129,00	0,43	0,40	0,41	0,41	1,05	0,98	1,00	1,01

TABELLE 10: Versuchsreihen 3 und 4
 Ergebnisse der Druckprüfungen - gewichtete Mittelwerte
 Mörtelprüfkörper - MG II

1	2	3	4
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	MITTELWERTE Reihe 3 (n-Versuche)	MITTELWERTE Reihe 4 (n-Versuche)	GEWICHTETER MITTELWERT (n-Versuche)
Z (2/ 4)	0,76 (3)	0,83 (3)	0,80 (6)
Z (2/ 8)	2,84 (3)	3,01 (3)	2,93 (6)
Z (2/12)	-1)	4,65 (2)	4,65 (2)
Z (2/16)	-1)	-1)	-1)
Z (2/20)	-1)	-1)	-1)
Z (4/ 4)	0,80 (3)	0,83 (3)	0,82 (6)
Z (4/ 8)	1,51 (3)	1,41 (3)	1,46 (6)
Z (4/12)	2,09 (3)	2,21 (3)	2,15 (6)
Z (4/16)	2,72 (3)	2,70 (3)	2,71 (6)
Z (4/20)	-1)	-1)	-1)
Z (6/ 4)	0,71 (3)	0,68 (3)	0,70 (6)
Z (6/ 8)	0,85 (3)	1,02 (3)	0,94 (6)
Z (6/12)	1,12 (3)	1,29 (3)	1,21 (6)
Z (6/16)	1,69 (3)	1,63 (3)	1,66 (6)
Z (6/20)	2,06 (3)	-1)	2,06 (3)

1) Nicht bestimmt
 n: Anzahl der Versuchswerte

TABELLE 11: Versuchsreihe 4
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P[kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
Z (2/ 4)	4,10	4,30	4,35	0,33	0,34	0,35	0,41	0,80	0,83	0,85	0,83
Z (2/ 8)	61,50	56,70	67,80	1,22	1,13	1,35	0,41	2,98	2,76	3,29	3,01
Z (2/12)	199,20	231,80	- ²⁾	1,76	2,05	- ²⁾	0,41	4,29	5,00	- ²⁾	(4,65)
Z (2/16) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (4/ 4)	4,10	4,20	4,60	0,33	0,33	0,37	0,41	0,80	0,80	0,90	0,83
Z (4/ 8)	28,70	31,00	27,00	0,57	0,62	0,54	0,41	1,39	1,51	1,32	1,41
Z (4/12)	87,20	105,10	115,10	0,77	0,93	1,02	0,41	1,88	2,27	2,49	2,21
Z (4/16)	230,10	198,60	237,10	1,15	0,99	1,18	0,41	2,80	2,41	2,88	2,70

1): Nicht bestimmt

2): Einzelwert streute stark

(): Mittelwert aus zwei Einzelwerten

Fortsetzung TABELLE 11: Versuchsreihe 4
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			MITTELWERT
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
Z (6/ 4)	3,00	4,45	3,30	0,24	0,35	0,26	0,41	0,56	0,85	0,63	0,68
Z (6/ 8)	24,80	20,10	18,20	0,49	0,40	0,36	0,41	1,20	0,98	0,88	1,02
Z (6/12)	59,00	64,50	56,80	0,52	0,57	0,50	0,41	1,27	1,39	1,22	1,29
Z (6/16)	134,20	137,30	130,60	0,67	0,68	0,65	0,41	1,63	1,66	1,59	1,63

Fortsetzung TABELLE 11: Versuchsreihe 4
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II




1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER WÜRFEL (Form)	BRUHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
W (A) 	38,00	35,80	40,70	0,38	0,36	0,41	0,41	0,93	0,88	1,00	0,94
W (B) 	81,60	80,20	77,10	0,36	0,36	0,34	0,41	0,88	0,88	0,83	0,86
W (C) 	150,50	139,60	144,60	0,38	0,35	0,36	0,41	0,93	0,85	0,88	0,89

TABELLE 12: Versuchsreihe 5
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II a

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D/\beta_{DIN} = \kappa$			MITTELWERT
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
Z (2/ 4)	16,00	13,00	- ²⁾	1,27	1,04	- ²⁾	1,17	1,09	0,89	- ²⁾	(0,99)
Z (2/ 8)	155,50	138,00	169,00	3,10	2,75	3,36	1,17	2,65	2,35	2,87	2,62
Z (2/12)	610,30	615,00	622,50	5,40	5,44	5,51	1,17	4,62	4,65	4,71	4,66
Z (2/16) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (2/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (4/ 4)	14,50	10,30	11,00	1,15	0,82	0,88	1,17	0,98	0,70	0,75	0,81
Z (4/ 8)	62,00	60,50	59,50	1,23	1,20	1,18	1,17	1,05	1,02	1,00	1,02
Z (4/12)	245,00	238,00	241,50	2,17	2,11	2,14	1,17	1,85	1,80	1,83	1,83
Z (4/16) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (4/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Nicht bestimmt

2) Einzelwert streute stark

() Mittelwert aus zwei Einzelwerten

Fortsetzung TABELLE 12: Versuchsreihe 5
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II a

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D/\beta_{DIN} = \kappa$			MITTELWERT
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	
Z (6/ 4)	12,90	11,50	13,00	1,03	0,92	1,04	1,17	0,88	0,79	0,89	0,85
Z (6/ 8)	50,50	56,20	55,00	1,00	1,12	1,09	1,17	0,85	0,96	0,93	0,91
Z (6/12)	153,00	141,00	140,00	1,35	1,29	1,24	1,17	1,15	1,07	1,06	1,09
Z (6/16)	365,00	335,00	316,00	1,82	1,67	1,57	1,17	1,63	1,62	1,65	1,63
Z (6/20)	600,50	649,00	670,00	1,91	2,07	2,13	1,17	1,63	1,77	1,82	1,74
Z (8/ 4)	11,50	13,00	12,00	0,92	1,04	0,96	1,17	0,79	0,89	0,82	0,83
Z (8/ 8)	63,50	49,90	53,00	1,26	0,99	1,05	1,17	1,08	0,85	0,90	0,94
Z (8/12)	130,50	132,00	132,00	1,15	1,17	1,17	1,17	0,98	1,00	1,00	0,99
Z (8/16)	238,00	242,00	238,00	1,18	1,20	1,18	1,17	1,01	1,03	1,01	1,02
Z (8/20)	466,00	456,00	468,50	1,48	1,45	1,49	1,17	1,26	1,24	1,27	1,26

Fortsetzung TABELLE 12: Versuchsreihe 5
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG II a

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
Z (10/ 4)	10,50	11,50	11,00	0,84	0,92	0,88	1,17	0,72	0,79	0,75	0,75
Z (10/ 8)	47,50	55,10	48,50	0,95	1,10	0,97	1,17	0,81	0,94	0,83	0,86
Z (10/12)	130,00	120,50	125,00	1,15	1,07	1,11	1,17	0,98	0,91	0,95	0,95
Z (10/16)	226,00	216,00	215,00	1,12	1,07	1,07	1,17	0,96	0,91	0,91	0,93
Z (10/20)	398,00	388,00	365,00	1,26	1,24	1,16	1,17	1,08	1,06	0,99	1,04

TABELLE 13: Versuchsreihe 6
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST			DRUCKFESTIGKEIT			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	P [kN]			β_D [kN/cm ²]				1	2	3	MITTELWERT
	1	2	3	1	2	3					
Z (2/ 4)	21,50	25,00	34,80	1,71	1,99	2,77	2,49	0,69	0,80	1,11	0,87
Z (2/ 8)	168,50	248,00	196,00	3,35	4,94	3,90	2,49	1,35	1,98	1,57	1,63
Z(2/12) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (2/16) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (2/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (4/ 4)	11,70	15,50	21,00	0,93	1,23	1,67	2,49	0,37	0,49	0,67	0,51
Z (4/ 8)	94,50	93,50	88,00	1,88	1,86	1,75	2,49	0,76	0,75	0,70	0,74
Z (4/12)	275,00	272,00	285,00	2,43	2,40	2,54	2,49	0,98	0,96	1,02	0,99
Z (4/16) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (4/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Nicht bestimmt

Fortsetzung TABELLE 13: Versuchsreihe 6
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
Z (6/ 4)	16,00	16,30	14,50	1,27	1,30	1,15	2,49	0,51	0,52	0,46	0,50
Z (6/ 8)	67,80	69,30	69,00	1,35	1,38	1,37	2,49	0,54	0,55	0,55	0,55
Z (6/12)	225,00	228,00	205,00	1,99	2,02	1,81	2,49	0,80	0,81	0,73	0,78
Z (6/16)	450,50	437,00	465,00	2,24	2,17	2,31	2,49	0,90	0,87	0,93	0,90
Z (6/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (8/ 4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (8/ 8)	60,00	66,50	70,50	1,19	1,32	1,40	2,49	0,48	0,53	0,56	0,52
Z (8/12)	165,00	176,00	170,00	1,46	1,56	1,50	2,49	0,59	0,63	0,60	0,61
Z (8/16) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (8/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Nicht bestimmt

Fortsetzung TABELLE 13: Versuchsreihe 6
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Mörtelprüfkörper - MG III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER ZYLINDER (h/d)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
Z (10/ 4)	14,50	16,00	15,50	1,15	1,27	1,23	2,49	0,46	0,51	0,49	0,49
Z (10/ 8)	72,00	65,50	58,90	1,43	1,30	1,17	2,49	0,57	0,52	0,47	0,52
Z (10/12)	177,00	162,00	155,00	1,57	1,43	1,37	2,49	0,63	0,57	0,55	0,58
Z (10/16) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z (10/20) ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Nicht bestimmt

TABELLE 14: Versuchsreihe 7
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Würfelprüfkörper - MG II

















1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER WÜRFEL (Form)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
W (C) 	176,20	173,70	172,50	0,44	0,43	0,43	0,41	1,07	1,05	1,05	1,06
W (D) 	370,10	353,10	295,20	0,93	0,88	0,74	0,41	2,27	2,15	1,81	2,07
W (E) 	395,50	504,30	533,50	0,99	1,27	1,33	0,41	2,42	3,10	3,24	2,92
W (F) 	1088,00	1040,50	1146,20	2,72	2,60	2,87	0,41	6,63	6,34	7,00	6,66
W (G) 	190,30	152,70	164,70	0,48	0,38	0,41	0,41	1,17	0,93	1,00	1,03
W (H) 	188,80	189,60	162,10	0,47	0,47	0,40	0,41	1,15	1,15	0,98	1,09
W (J) 	397,00	380,50	420,50	0,99	0,95	1,05	0,41	2,41	2,31	2,56	2,43
W (K) 	180,80	176,80	176,80	0,45	0,44	0,44	0,41	1,10	1,07	1,07	1,08
W (L) 	226,70	229,60	256,20	0,57	0,57	0,64	0,41	1,39	1,39	1,56	1,45
W (M) 	737,50	754,70	732,00	1,84	1,89	1,83	0,41	4,49	4,61	4,46	4,52

TABELLE 15: Versuchsreihe 8
 Ergebnisse der Druckprüfungen
 Säulenprüfkörper - MG II

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PRÜFKÖRPER SÄULEN (Form)	BRUCHLAST P [kN]			DRUCKFESTIGKEIT β_D [kN/cm ²]			β_{DIN} [kN/cm ²]	$\beta_D / \beta_{DIN} = \kappa$			
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	MITTELWERT
S (C) 	124,0	129,0	146,0	0,31	0,32	0,37	0,41	0,76	0,78	0,90	0,81
S (F) 	573,0	700,0	619,0	1,43	1,75	1,55	0,41	3,49	4,27	3,78	3,85
S (H) 	149,0	219,0 ²⁾	129,0 ¹⁾	0,37	0,55	0,32	0,41	0,90	1,34	0,78	1,01
S (J) 	341,0	344,0	365,0	0,85	0,86	0,91	0,41	2,07	2,10	2,22	2,13
S (L) 	260,0	252,0	254,0	0,65	0,63	0,64	0,41	1,59	1,54	1,56	1,56
S (M) 	564,0	592,0	588,0	1,41	1,48	1,47	0,41	3,44	3,61	3,59	3,55

- 1) Unterer Würfel gerissen
 2) Einzelwert streute stark

TABELLE 16: Burg Eppstein/Taunus
 Untersuchungsergebnisse an der Palasmauer

1	2	3	4	5	6	7	8
HORIZONTAL- SCHNITT Nr.:	WANDDICKE GESAMT [cm]	TRAGENDE SCHALE ¹⁾ [cm]	FÜLL- MAUERWERK [cm]	FUGEN- DICKE ²⁾ d_f [cm]	FUGEN- NEIGUNG ²⁾ [tan α]	MITTLERER ϕ d.Ü-FLÄCHE ³⁾ $F_{\ddot{U}}$ [cm]	ÜBERTRAGUNGS- FLÄCHE ³⁾ $F_{\ddot{U}}$ ³⁾ [%]
1	180	45	85	2,5	0-0,375	8	60
2	180	50	90	1,5	0-0,10	10	70
3	180	50	85	3,0	0-0,15	12	70
4	180	50	90	2,5	0-0,375	10	65
5	180	45	85	2,0	0-0,12	12	65
6	180	50	90	3,0	0-0,10	12	60

1) Untersucher Horizontalschnitt für $F_{\ddot{U}}$

2) Mittelwert aus mehreren Messungen im Horizontalschnitt

3) $F_{\ddot{U}}$ in %, bezogen auf die horizontale Schnittfläche der untersuchten tragenden Schale

TABELLE 17: Burg Schönecken/Eifel
 Untersuchungsergebnisse an der Ringmauer

1	2	3	4	5	6	7	8
HORIZONTAL- SCHNITT Nr.:	WANDDICKE GESAMT [cm]	TRAGENDE SCHALE ¹⁾ [cm]	FÜLL- MAUERWERK [cm]	FUGEN- DICKE ²⁾ d_f [cm]	FUGEN- NEIGUNG ²⁾ [tan α]	MITTLERER \emptyset ³⁾ d. Ü-FLÄCHE $F_{\ddot{U}}$ [cm]	ÜBERTRAGUNGS- FLÄCHE ³⁾ $F_{\ddot{U}}$ [%]
1	150	35	70	2,0	0 - 0,10	10	65
2	150	40	65	2,5	0 - 0,375	16	80
3	150	40	65	3,5	0 - 0,15	10	60
4	150	35	70	3,0	0 - 0,625	12	70
5	150	40	65	2,5	0 - 0,12	16	75
6	150	35	70	3,5	0 - 0,12	12	60

1) Untersucher Horizontalschnitt für $F_{\ddot{U}}$

2) Mittelwert aus mehreren Messungen im Horizontalschnitt

3) $F_{\ddot{U}}$ in %, bezogen auf die horizontale Schnittfläche der untersuchten tragenden Schale

TABELLE 18: Burg Rheinfels/St. Goar
 Untersuchungsergebnisse am "Darmstädter Bau"

1	2	3	4	5	6	7	8
HORIZONTAL- SCHNITT Nr.:	WANDDICKE GESAMT [cm]	TRAGENDE SCHALE ¹⁾ [cm]	FÜLL- MAUERWERK [cm]	FUGEN- DICKE ²⁾ d_f [cm]	FUGEN- NEIGUNG ²⁾ [tan α]	MITTLERER ϕ ³⁾ d. Ü-FLÄCHE ³⁾ $F_{\ddot{U}}$ [cm]	ÜBERTRAGUNGS- FLÄCHE ³⁾ $F_{\ddot{U}}$ [%]
1	180	40	100	2,0	0 - 0,10	12	78
2	180	45	90	1,5	0 - 0,15	8	75
3	180	40	100	2,5	0 - 0,12	12	85
4	180	35	110	2,5	0 - 0,15	10	75
5	180	40	100	2,0	0 - 0,12	8	70
6	180	40	100	2,5	0 - 0,15	10	75

1) Untersuchter Horizontalschnitt für $F_{\ddot{U}}$

2) Mittelwert aus mehreren Messungen im Horizontalschnitt

3) $F_{\ddot{U}}$ in %, bezogen auf die horizontale Schnittfläche der untersuchten tragenden Schale

TABELLE 19: Vorläufige Richtzahlen für Auswahl und Bewertung
von Natursteinen (mittlere Häufigkeitswerte)
nach DIN 52 100, Tafel 1

1	2	3
Gesteinsgruppen	Druckfestigkeit des trockenen Gesteins DIN 52 105 [kp/cm ²]	Biegezugfestigkeit [kg/cm ²]
A. ERSTARRUNGSGESTEINE		
1. Granit, Syenit	1600 bis 2400	100 bis 200
2. Diorit, Gabbro	1700 bis 3000	100 bis 220
3. Quarzporphyr Keratophyr, Porphyrit Andesit	1800 bis 3000	150 bis 200
4. Basalt, Melaphyr	2500 bis 4000	150 bis 250
Basaltlava	800 bis 1500	80 bis 120
5. Diabas	1800 bis 2500	150 bis 250
B. SCHICHTGESTEINE		
6. Kieselige Gesteine		
a) Gangquarz, Quarzit, Grauwacke	1500 bis 3000	130 bis 250
b) quarzitisches Sandsteine	1200 bis 2000	120 bis 200
c) sonstige Quarzsandsteine	300 bis 1800	30 bis 150
7. Kalksteine		
a) Dichte (feste) Kalke und Dolomite (einschl. Marmore)	800 bis 1800	60 bis 150
b) sonstige Kalksteine einschl. Kalkkonglo- merate	200 bis 900	60 bis 80
c) Travertin	200 bis 600	40 bis 100
8. Vulkanische Tuffsteine	200 bis 300	20 bis 60
C. METAMORPHE GESTEINE		
9.		
a) Gneise, Granulit	1600 bis 2800	-
b) Amphibolit	1700 bis 2800	-
c) Serpentin	1400 bis 2500	-
d) Dachschiefer	-	500 bis 800

TABELLE 20: Mindestdruckfestigkeiten der Gesteinsart in kp/cm^2 (MN/m^2)
 nach DIN 1053 Blatt 1, Tabelle 12

1	2	3
Gruppe	Gesteinsarten	Mindestdruckfestigkeit in kp/cm^2 (MN/m^2)
A	Kalksteine, Travertin, vulkanische Tuffsteine	200 (20)
B	Weiche Sandsteine (mit tonigem Bindemittel) und dgl.	300 (30)
C	Dichte (feste) Kalksteine und Dolomite (einschließlich Marmor), Basaltlava und dgl.	500 (50)
D	Quarzitische Sandsteine (mit kieseligem Bindemittel), Grauwacke u. dgl.	800 (80)
E	Granit, Syenit, Diorit, Quarzporphyr, Melaphyr, Diabas und dgl.	1200 (120)

TABELLE 21: Anforderungen an die Mörteldruckfestigkeit
nach DIN 1053 Blatt 1, Tabelle 7

	1	2	3
	Mörtelgruppe	Druckfestigkeit kp/cm^2 (MN/m^2) nach 28 Tagen	
		Einzelwert	Mittelwert
1	I	-	-
2	II	≥ 20 (2)	≥ 25 (2,5)
3	IIa	≥ 40 (4)	≥ 50 (5)
4	III	≥ 80 (8)	≥ 100 (10)

TABELLE 22: Grundwerte der zulässigen Druckspannungen von Mauerwerk aus natürlichen Steinen
in Kp/cm^2 (MN/m^2)
nach DIN 1053 Blatt 1, Tabelle 13

	1	2	3	4	5	6	7
	Mauerwerksart	Mörtel- gruppe	Gruppe nach Tabelle 12				
			A	B	C	D	E
1	Bruchsteinmauerwerk	I	2 (0,2)	2 (0,2)	3 (0,3)	4 (0,4)	6 (0,6)
2		II/IIa	2 (0,2)	3 (0,3)	5 (0,5)	7 (0,7)	9 (0,9)
3		III	3 (0,3)	5 (0,5)	6 (0,6)	10 (1,0)	12 (1,2)
4	Hammerrechtes Schichten- mauerwerk	I	3 (0,3)	4 (0,4)	6 (0,6)	8 (0,8)	10 (1,0)
5		II/IIa	5 (0,5)	7 (0,7)	9 (0,9)	12 (1,2)	16 (1,6)
6		III	6 (0,6)	10 (1,0)	12 (1,2)	16 (1,6)	22 (2,2)
7	Unregelmäßiges und regelmäßiges Schichtenmauerwerk	I	4 (0,4)	6 (0,6)	8 (0,8)	10 (1,0)	16 (1,6)
8		II/IIa	7 (0,7)	9 (0,9)	12 (1,2)	16 (1,6)	22 (2,2)
9		III	10 (1,0)	12 (1,2)	16 (1,6)	22 (2,2)	30 (3,0)
10	Quadermauerwerk	I	8 (0,8)	10 (1,0)	16 (1,6)	22 (2,2)	30 (3,0)
11		II/IIa	12 (1,2)	16 (1,6)	22 (2,2)	30 (3,0)	40 (4,0)
12		III	16 (1,6)	22 (2,2)	30 (3,0)	40 (4,0)	50 (5,0)

TABELLE 23: Zulässige Druckspannungen von Mauerwerk aus natürlichen Steinen in kp/cm^2 (MN/m^2)
nach DIN 1053 Blatt 1, Tabelle 14

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Schlankheit bzw. Ersatzschlankheit	Grundwerte der zulässigen Druckspannungen in kp/cm^2 (MN/m^2)							
		8 (0,8)	10 (1,0)	12 (1,2)	16 (1,6)	22 (2,2)	30 (3,0)	40 (4,0)	50 (5,0)
1	10	8 (0,8)	10 (1,0)	12 (1,2)	16 (1,6)	22 (2,2)	30 (3,0)	40 (4,0)	50 (5,0)
2	12	6 (0,6)	7 (0,7)	8 (0,8)	11 (1,1)	15 (1,5)	22 (2,2)	30 (3,0)	40 (4,0)
3	14	4 (0,4)	5 (0,5)	6 (0,6)	8 (0,8)	10 (1,0)	14 (1,4)	22 (2,2)	30 (3,0)
4	16	3 (0,3)	3 (0,3)	4 (0,4)	6 (0,6)	7 (0,7)	10 (1,0)	14 (1,4)	22 (2,2)
5	18			3 (0,3)	4 (0,4)	5 (0,5)	7 (0,7)	10 (1,0)	14 (1,4)
6	20					3 (0,3)	5 (0,5)	7 (0,7)	10 (1,0)

TABELLE 24: Zulässige Schwerpunktsspannungen σ_{adm} in N/mm^2
nach Schweizer Norm S.I.A. 178, Tabelle 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Steinkategorien	Kategorie I: $f_s \geq 80 N/mm^2$				Kategorie II: $f_s \geq 160 N/mm^2$			
Mörtel	C	C	V	V	C	C	V	V
Schlankheit $\Lambda = l_k/d^1)$	5	20	5	20	5	20	5	20
$\sigma_{adm}^2)$	σ_5	σ_{20}	σ_5	σ_{20}	σ_5	σ_{20}	σ_5	σ_{20}
M0 (Bruchsteinmauerwerk)	1,8	1,0	1,0	0,5	2,2	1,2	1,2	0,6
M1 (Spitzsteinmauerwerk)	4,0	2,0	2,0	1,0	5,0	2,5	2,5	1,2
M2 (Schichtenmauerwerk)	6,5	3,5	3,2	1,5	9,0	4,5	5,0	2,0
M3 (Quadermauerwerk)	10,0	6,5	-	-	15,0	10,0	-	-

Die zulässigen Kantenpressungen liegen 40 % über den entsprechenden oben angegebenen Schwerpunktsspannungen.

1) $\Lambda = l_k/d =$ Schlankheit = Knicklänge / Mauerdicke

2) σ_{adm} = zulässige Spannung im Mauerwerk nach Tabelle 1

TABELLE 25: Vergleich der zulässigen Druckspannungen zwischen der schweizer Norm S.I.A. 178 und der deutschen Norm DIN 1053, Blatt 1 für zwei, den Normen entsprechende, vergleichbare Stein- und Mörtelgruppen. $\bar{\kappa} = \text{zul. } \sigma \text{ (S.I.A.)} / \text{zul. } \sigma \text{ (DIN)}$

1		2		3		4		5		6		7	
STEINKATEGORIE (S.I.A.)		I : $f_s = 80 \text{ N/mm}^2$						I : $f_s = 80 \text{ N/mm}^2$					
GESTEINSGRUPPE (DIN)		D : $\sigma = 80 \text{ N/mm}^2$						D : $\sigma = 80 \text{ N/mm}^2$					
MAUERMÖRTEL (S.I.A.)		Verlängerter Mörtel V : $3,5 \text{ N/mm}^2$						Zementmörtel C : $20,0 \text{ N/mm}^2$					
MÖRTELGRUPPE (DIN)		Kalkmörtel, MG II : $4,0 \text{ N/mm}^2$						Zementmörtel MG III : $8,0 \text{ N/mm}^2$					
SCHLANKHEIT $\bar{\lambda}$		$10^{5)}$		16		20		$10^{5)}$		16		20	
		SIA/DIN	$\bar{\kappa}$	SIA/DIN	$\bar{\kappa}$	SIA/DIN	$\bar{\kappa}$	SIA/DIN	$\bar{\kappa}$	SIA/DIN	$\bar{\kappa}$	SIA/DIN	$\bar{\kappa}$
MAUERWERKSKATEGORIEN	M0/ 1 - 3 ¹⁾	0,83	1,19	0,63	-	0,50	-	1,53	1,53	1,21	4,03	1,00	-
		0,70		-		-		1,00		0,30		-	
	M1/ 4 - 6 ²⁾	1,67	1,39	1,27	3,18	1,00	-	3,33	2,08	9,53	4,22	2,00	-
		1,20		0,40		-		1,60		0,60		-	
	M2/ 7 - 9 ³⁾	2,63	1,64	1,95	3,25	1,50	-	5,50	2,50	4,30	6,14	3,50	11,6
		1,60		0,60		-		2,20		0,70		0,30	
	M3/ 10 - 12 ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	8,83	2,21	7,43	5,31	6,50	9,29
		3,00		1,00		0,50		4,00		1,40		0,70	

Schweizer Norm S.I.A. 178, Tabelle 1

Deutsche Norm, DIN 1053 Blatt 1, Tabelle 13

1) M0 = Bruchsteinmauerwerk

= Bruchsteinmauerwerk, Zeile 1-3

2) M1 = Spitzsteinmauerwerk

= Hammerrechten Schichtenmauerwerk, Zeile 4-6

3) M2 = Schichtenmauerwerk

= Regelmäßigen Schichtenmauerwerk, Zeile 7-9

4) M3 = Quadermauerwerk

= Quadermauerwerk, Zeile 10-12

5) Die Werte der S.I.A.- Norm für $\bar{\lambda} = 10$ wurden durch Interpolation ermittelt.

FORTSETZUNG TABELLE 25:

1		2		3		4		5		6		7	
STEINKATEGORIE (S.I.A.)		II : $f_s = 160 \text{ N/mm}^2$						II : $f_s = 160 \text{ N/mm}^2$					
GESTEINSGRUPPE (DIN)		E : $\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$						E : $\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$					
MAUERMÖRTEL (S.I.A.)		Verlängerter Mörtel V : $3,5 \text{ N/mm}^2$						Zementmörtel C : $20,0 \text{ N/mm}^2$					
MÖRTELGRUPPE (DIN)		Kalkmörtel MG II : $4,0 \text{ N/mm}^2$						Zementmörtel MG III : $8,0 \text{ N/mm}^2$					
SCHLANKHEIT $\bar{\lambda}$		$10^{5)}$		16		20		$10^{5)}$		16		20	
		SIA/DIN	\bar{k}	SIA/DIN	\bar{k}	SIA/DIN	\bar{k}	SIA/DIN	\bar{k}	SIA/DIN	\bar{k}	SIA/DIN	\bar{k}
MAUERWERKSKATEGORIEN	M0/ 1 - 3 ¹⁾	1,00	1,11	0,76	2,53	0,60	—	1,87	1,56	1,47	3,68	1,20	—
		0,90		0,30		—		1,20		0,40		—	
	M1/ 4 - 6 ²⁾	2,07	1,29	1,55	2,58	1,20	—	4,17	1,90	3,17	4,53	2,50	8,33
		1,60		0,60		—		2,20		0,70		0,30	
	M2/ 7 - 9 ³⁾	4,00	1,82	2,80	4,00	2,00	—	7,50	2,50	5,70	5,70	4,50	9,00
		2,20		0,70		0,30		3,00		1,00		0,50	
	M3/10 - 13 ⁴⁾	—	—	—	—	—	—	13,30	2,66	11,33	5,15	10,00	10,00
		4,00		1,40		0,70		5,00		2,20		1,00	

Schweizer Norm S.I.A. 178, Tabelle 1

Deutsche Norm, DIN 1053 Blatt 1, Tabelle 13

- 1) M0 = Bruchsteinmauerwerk = Bruchsteinmauerwerk, Zeile 1-3
- 2) M1 = Spitzsteinmauerwerk = Hammerrechten Schichtenmauerwerk, Zeile 4-6
- 3) M2 = Schichtenmauerwerk = Regelmäßigen Schichtenmauerwerk, Zeile 7-9
- 4) M3 = Quadermauerwerk = Quadermauerwerk, Zeile 10-12
- 5) Die Werte der S.I.A.- Norm für $\bar{\lambda} = 10$ wurden durch Interpolation ermittelt.

7.2. Verzeichnis der Tafeln

- Tafeln 1 bis 7 Die aus den Bruchspannungen β_D ermittelten Werte $K = \beta_D / \beta_{DIN}$ (vgl. hierzu Tabellen 7 bis 13) wurden über h/d aufgetragen und die Werte gleicher Fugenhöhe zu Kurven verbunden; sie zeigen einen hyperbelähnlichen Verlauf. Man erkennt aus den Kurven die Abhängigkeit der Bruchspannung von den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers bei gleichem Mörtel.
- Tafel 8 Übersicht der verwendeten Würfelprüfkörper und deren Formfaktor $K = \beta_D / \beta_{DIN}$ (Mittelwert).
- Tafel 9 Graphische Darstellung des Formfaktors $K = \beta_D / \beta_{DIN}$ für die Druckfestigkeit von würfelförmigen Mauerwerksprüfkörpern, entsprechend den in Tabelle 14 aufgelisteten Ergebnissen. Der Verhältnswert K wurde über der Fugendicke d_f aufgetragen. Außerdem wurde in einer 2. Skala der Verhältnswert $d_f / d_{\text{Würfel}}$ dargestellt, um eine Vergleichbarkeit zu den Tafeln 7.1 und 7.2, die auf h/d aufbauen, zu erhalten. Die Fugendicke d_f entspricht h ; als Bezugswert d wurde die Kantenlänge $d_{\text{Würfel}} = 20 \text{ cm}$ gewählt, da sie die größte Abmessung der Einbauteile darstellt.
- Tafel 10 Graphische Darstellung des Formfaktors für die Druckfestigkeit von säulenförmigen Mauerwerksprüfkörpern, entnommen aus Tabelle 15. Um die unterschiedlichen Ergebnisse der Verhältnswerte K deutlich zu machen, wurden neben den ermittelten Werten an Säulenprüfkörpern die zuvor in Tafel 9 dargestellten Ergebnisse an Würfelprüfkörpern gestrichelt dargestellt.

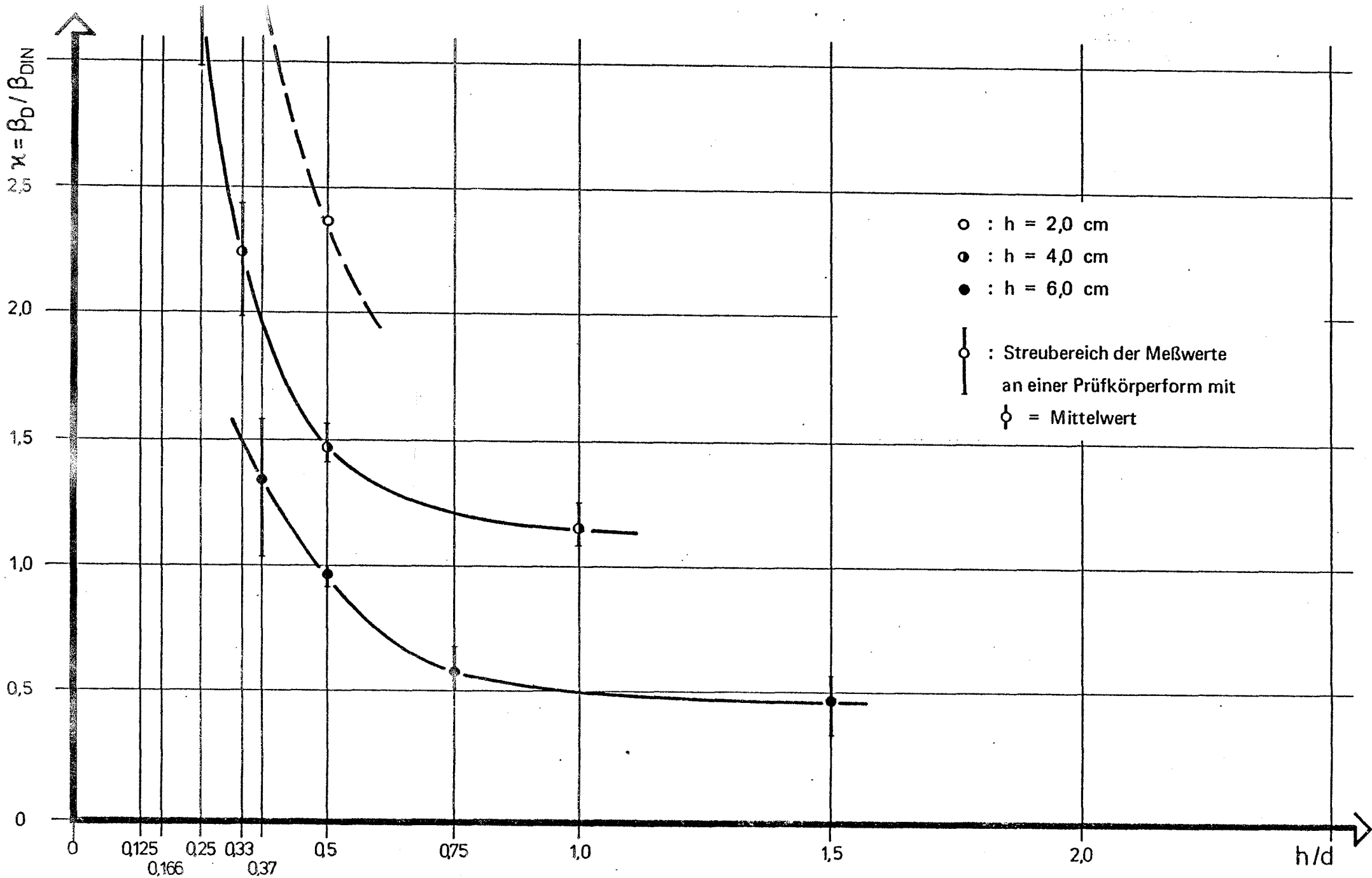
Man erkennt, daß die Würfelprüfkörper durchweg etwas höhere Festigkeit ergaben (vgl. hierzu Abschnitt 3.4.3).

Tafeln 11 bis 34

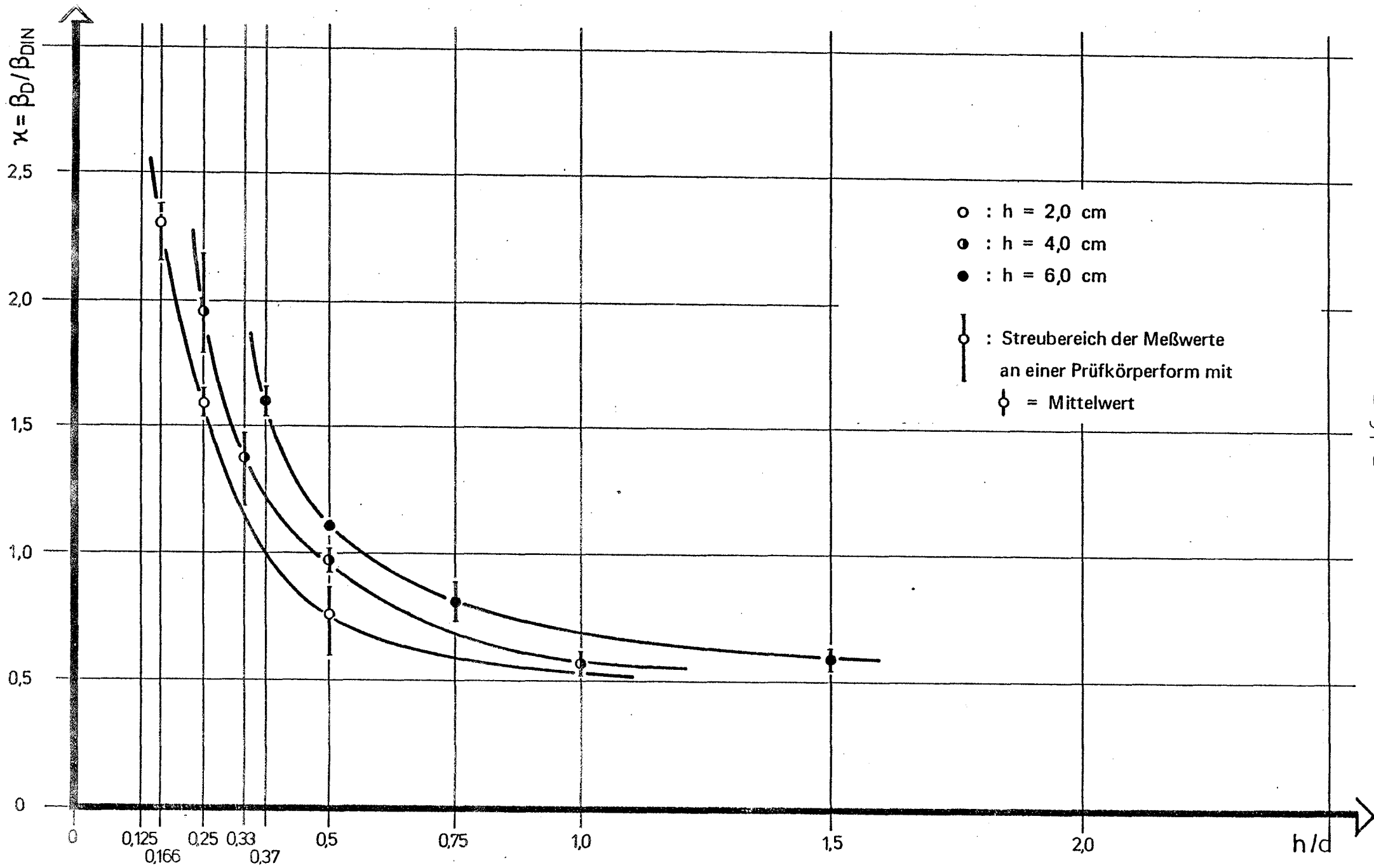
Für die meisten Prüfkörperserien wurden auch die Verformungen gemessen und in Form von -Diagrammen dargestellt. Als Beispiel für die Lastverformungskurven werden hier die Ergebnisse der Versuchsreihe 4 (Mörtelzylinder - MG II) sowie die Versuchsreihe 7 (Mauerwerkswürfel - MG II - mit unterschiedlichen Einbauten) wiedergegeben. Die -Diagramme der übrigen Versuchskörper zeigen den gleichen charakteristischen Verlauf und sind deshalb nicht in die Arbeit aufgenommen, können jedoch im Bedarfsfall vorgelegt werden.

Tafel 35

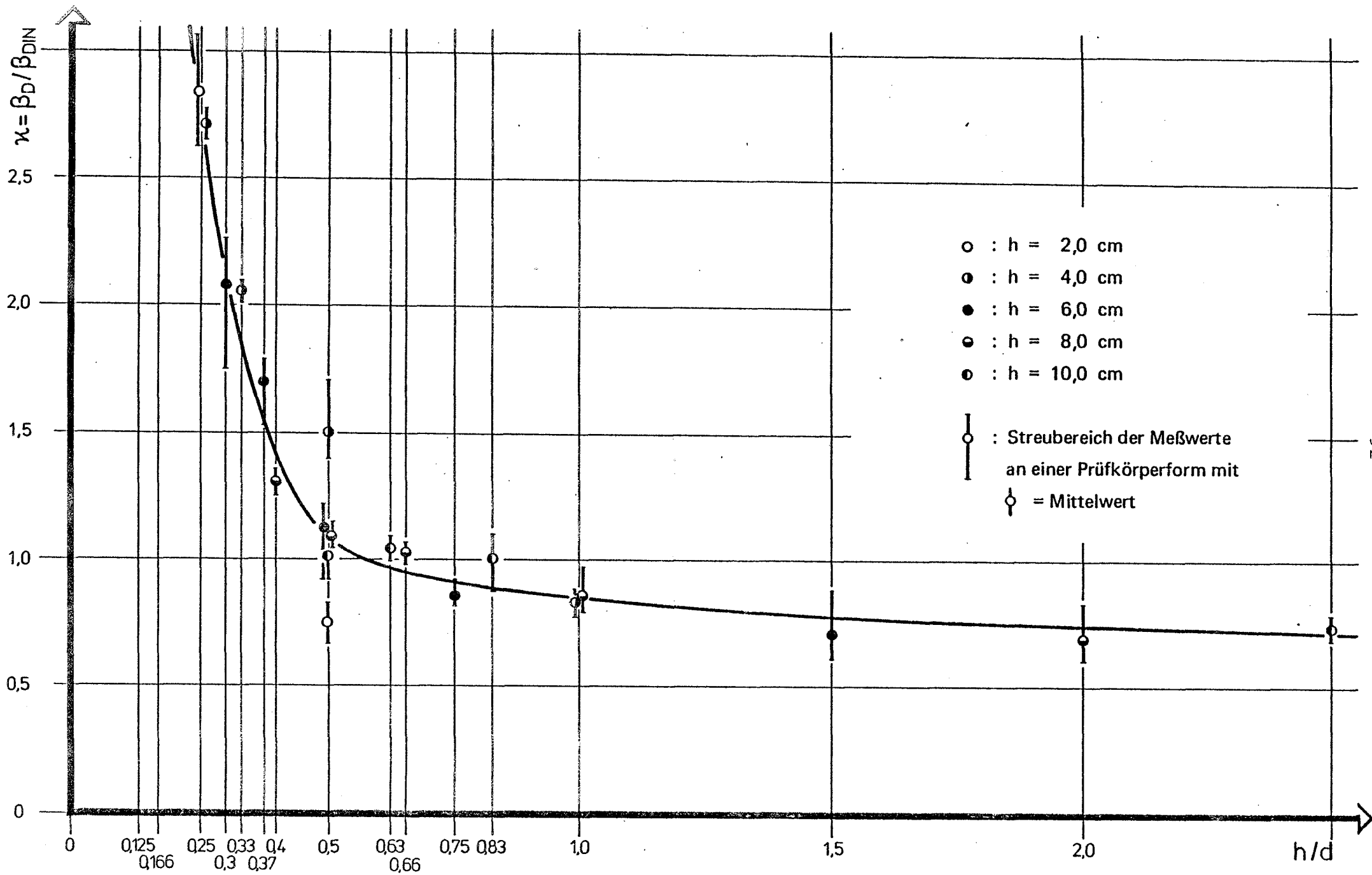
Graphische Auswertung der vergleichenden Betrachtung zwischen der schweizer Norm S.I.A. 178 und der deutschen Norm DIN 1053, Blatt 1. Es wurden die zulässigen Spannungen ins Verhältnis gesetzt (vgl. hierzu Fortsetzung Tabelle 25, Spalte 5 bis 7) und die Verhältniswerte $K = \frac{\text{zul. (S.I.S.)}}{\text{zul. (DIN)}}$ über der Schlankheit $= h_k/d_w$ aufgetragen. Es wird deutlich erkennbar, daß die S.I.A. höhere Werte zuläßt, insbesondere bei höherer Schlankheit der Wand.



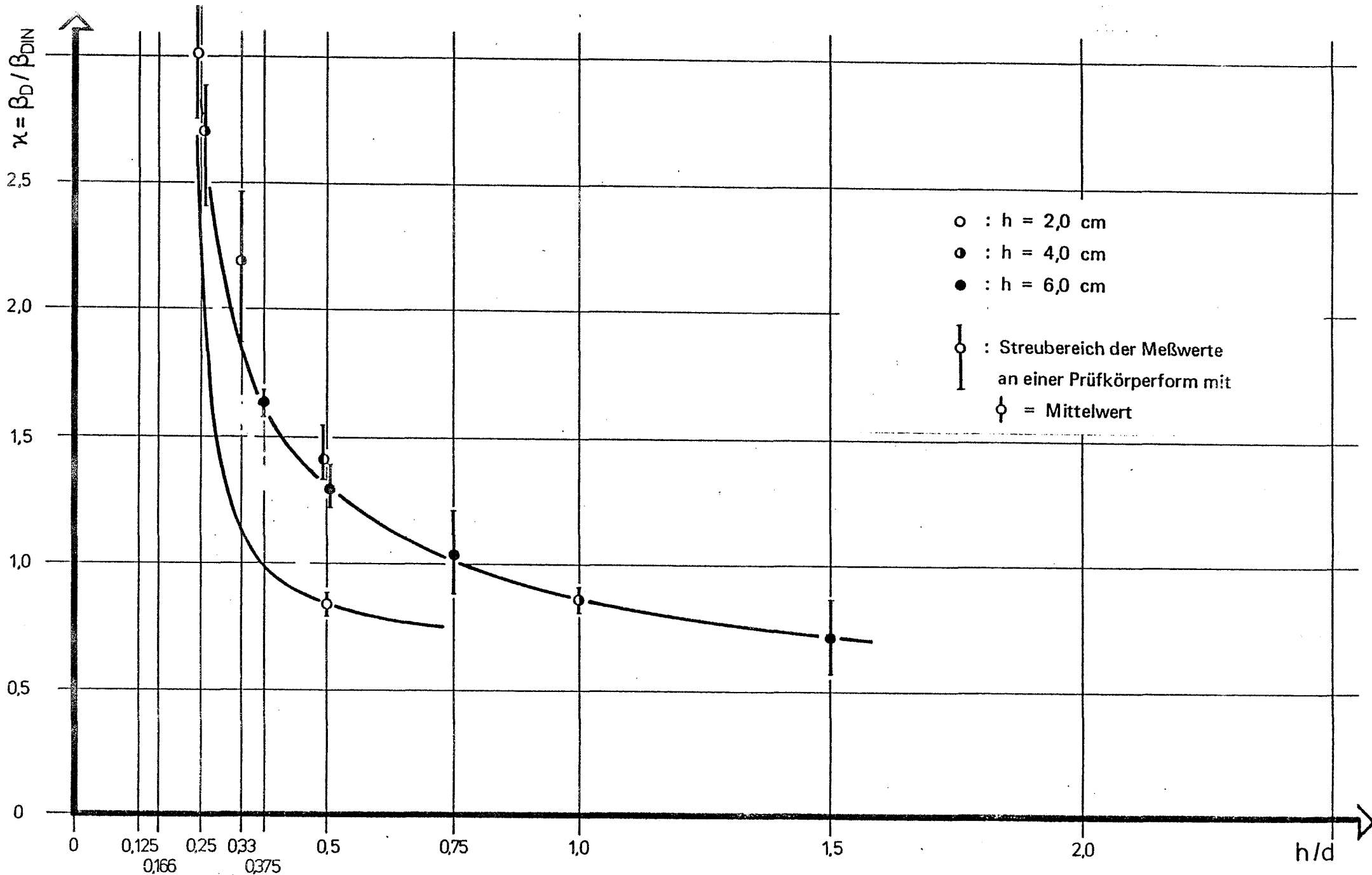
TAFEL 1: Versuchsreihe 1
 Formfaktoren κ für Mörtelprüfkörper - MG I



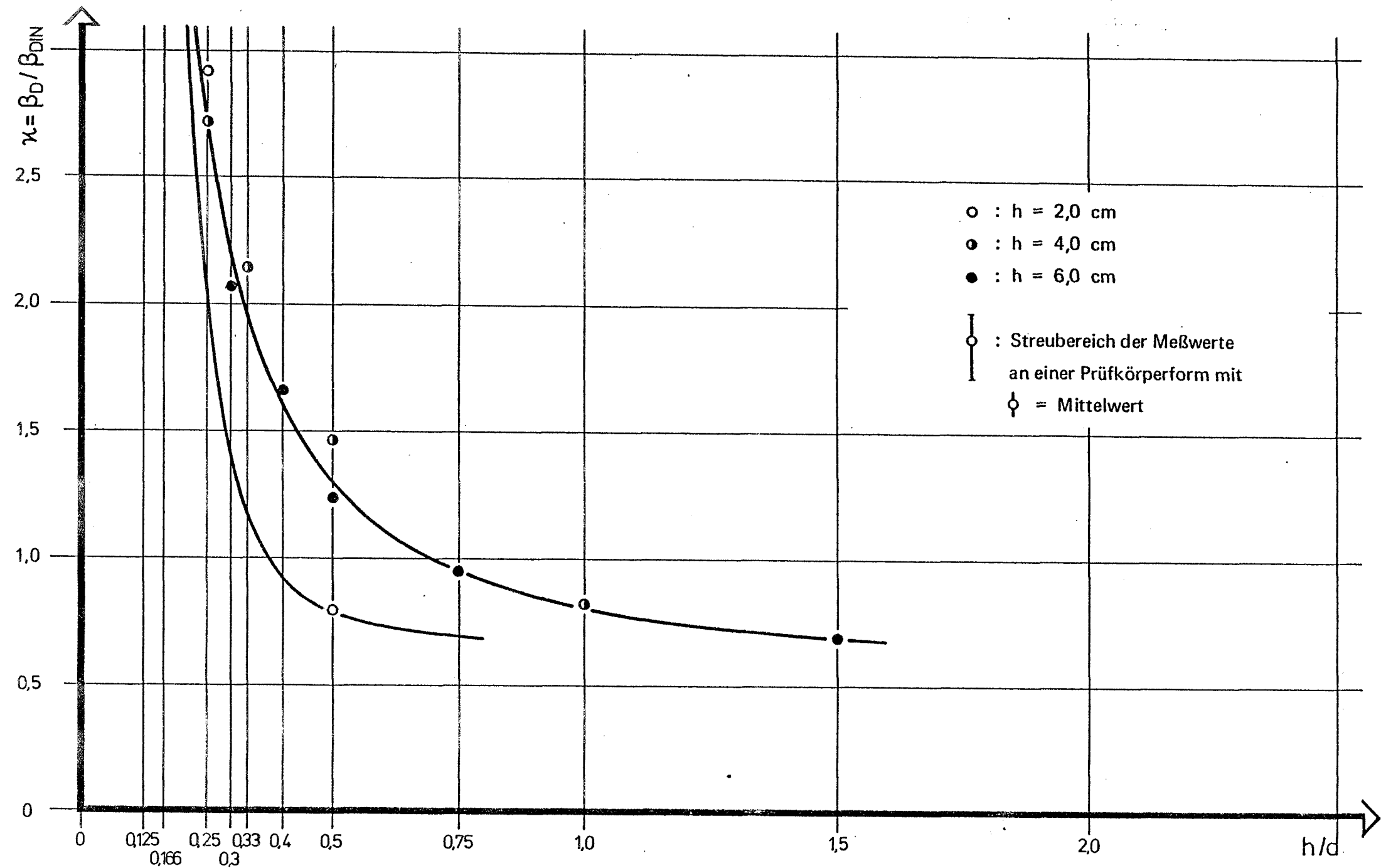
TAFEL 2: Versuchsreihe 2
 Formfaktoren κ für Mörtelprüfkörper - MG II (21 d)



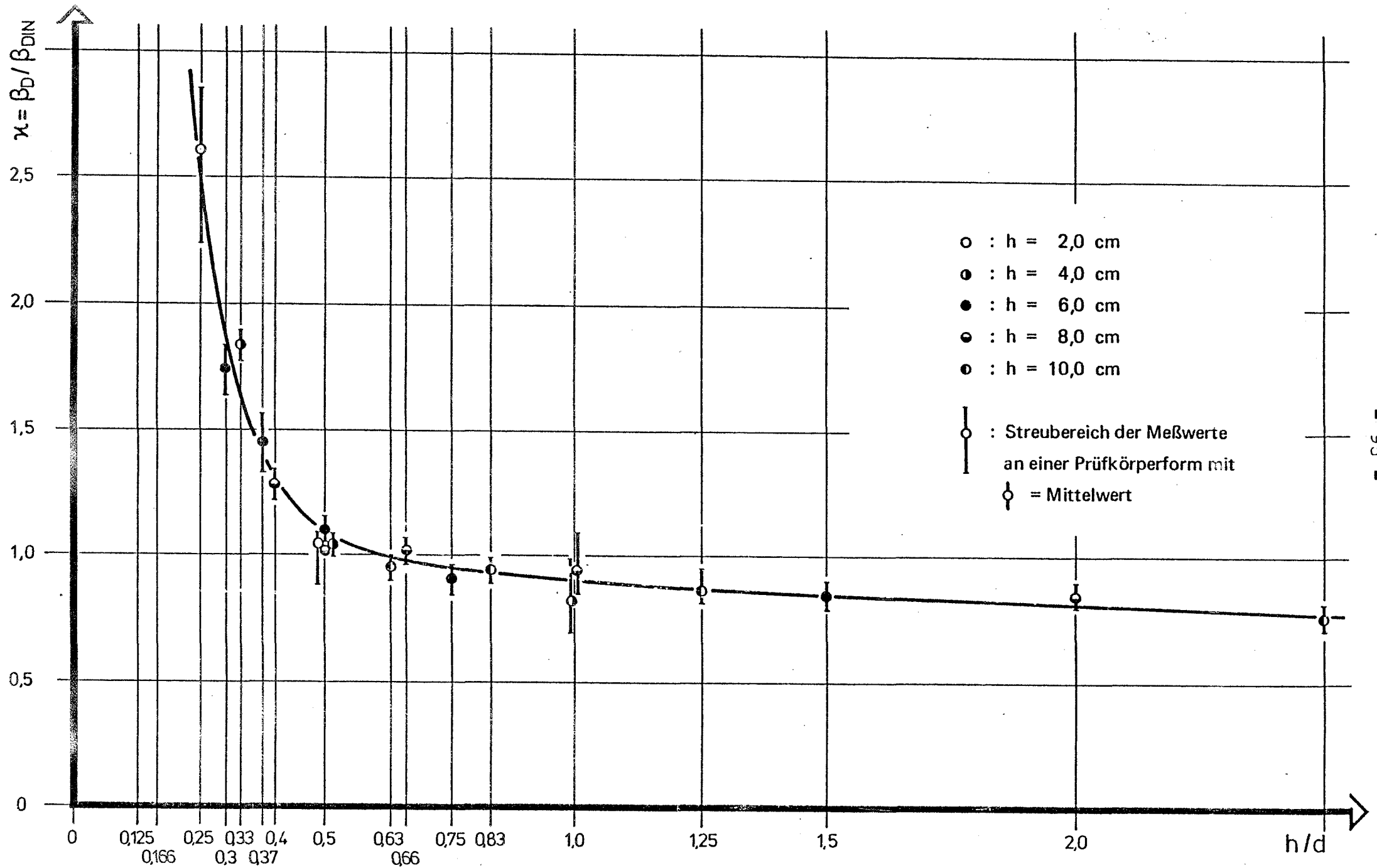
TAFEL 3: Versuchsreihe 3
 Formfaktoren κ für Mörtelprüfkörper - MG II



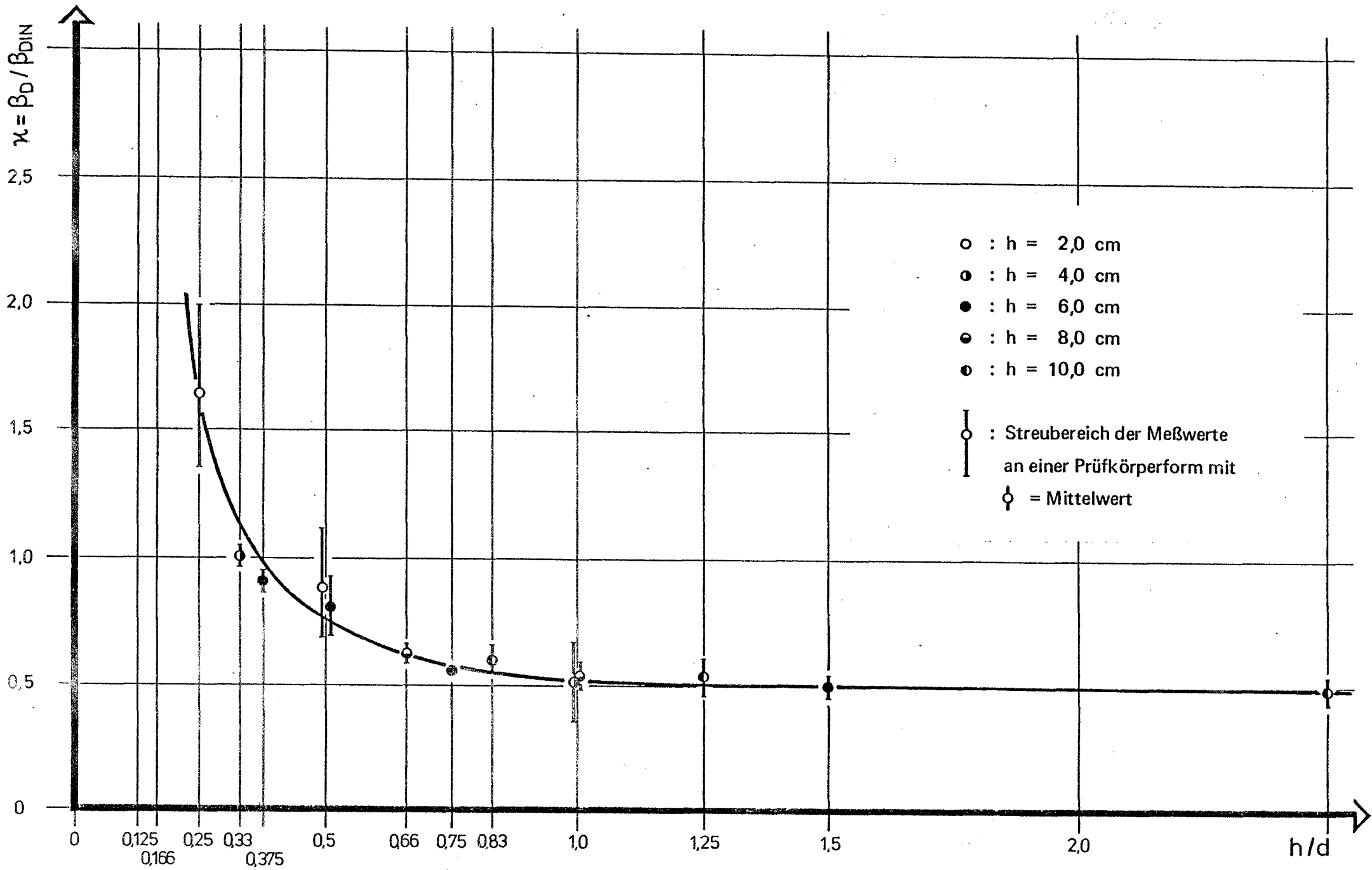
TAFEL 4: Versuchsreihe 4
 Formfaktoren κ für Mörtelprüfkörper - MG II



TAFEL 5: Versuchsreihe 3 und 4
 Ergebnisse der Druckprüfungen - gewichtete Mittelwerte - Mörtelprüfkörper - MG II



TAFEL 6: Versuchsreihe 5
Formfaktoren κ für Mörtelrükkörper - MG IIa



TAFEL 7: Versuchsreihe 6
 Formfaktoren κ für Mörtelbrüfkörper - MG III

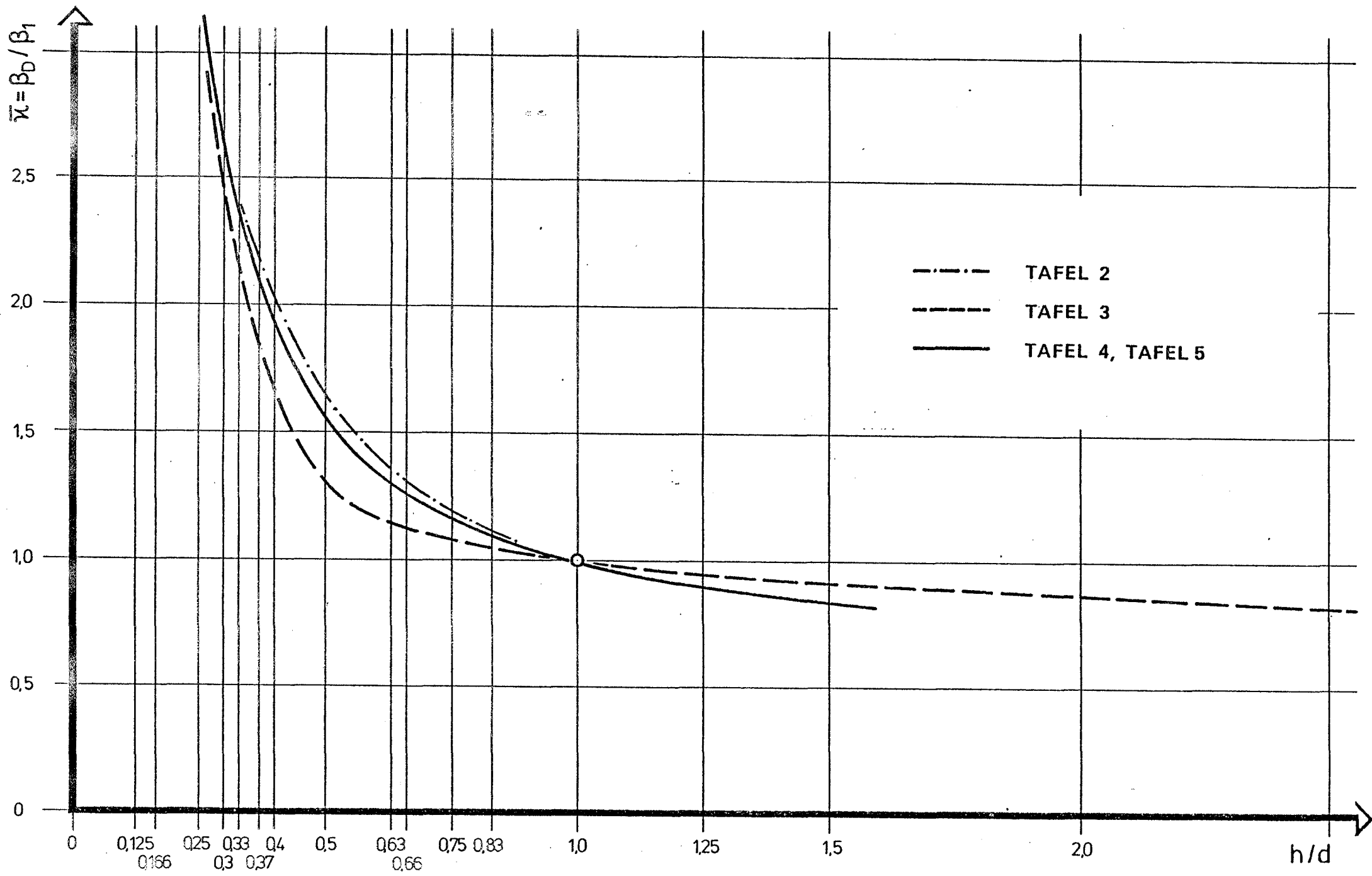
TAFELN 7.1 und 7.2 Die graphische Darstellung der κ -Werte in den Tafeln 1 bis 7 zeigt, daß die Kurven bei $h/d = 1$ nicht durch den Wert $\kappa = 1$ gehen. Eigentlich müßte dies so sein, da der Prüfkörper nach DIN 18 555 im Querschnitt $h/d = 4/4 \text{ cm} = 1$ aufweist, der entsprechende Mörtelprüfkörper also $\beta_D = \beta_{DIN}$ sein müßte. Eine geringe Abweichung wäre denkbar, da es sich bei den DIN-Prüfkörpern nicht um einen Zylinder, sondern um ein Prisma mit den Kantenlängen $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ handelt. Die Differenzen sind aber größer als zu erwarten ist. Mit einer einzigen Ausnahme liegen alle Werte zwischen 10 % und 50 % niedriger. Diese Tatsache erklärt sich offenbar dadurch, daß die große Zahl der zylindrischen Mörtelprüfkörper nicht auf gleiche Art und Weise wie die Prismen-Prüfkörper nach DIN 18 555 im Feuchtraum gelagert werden konnten. Die unterschiedliche Feuchtigkeit bei der Lagerung hat demnach zu unterschiedlicher Erhärtung geführt. Der Bezug auf β_{DIN} ist daher rein theoretisch.

Um auch hier eine durchgängige Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Verhältniswerte $\kappa = \beta_D / \beta_{DIN}$ umgerechnet in $\bar{\kappa} = \beta_D / \beta_1$. Hierin bedeutet β_1 die Festigkeit des Zylinders mit $h/d = 1$.

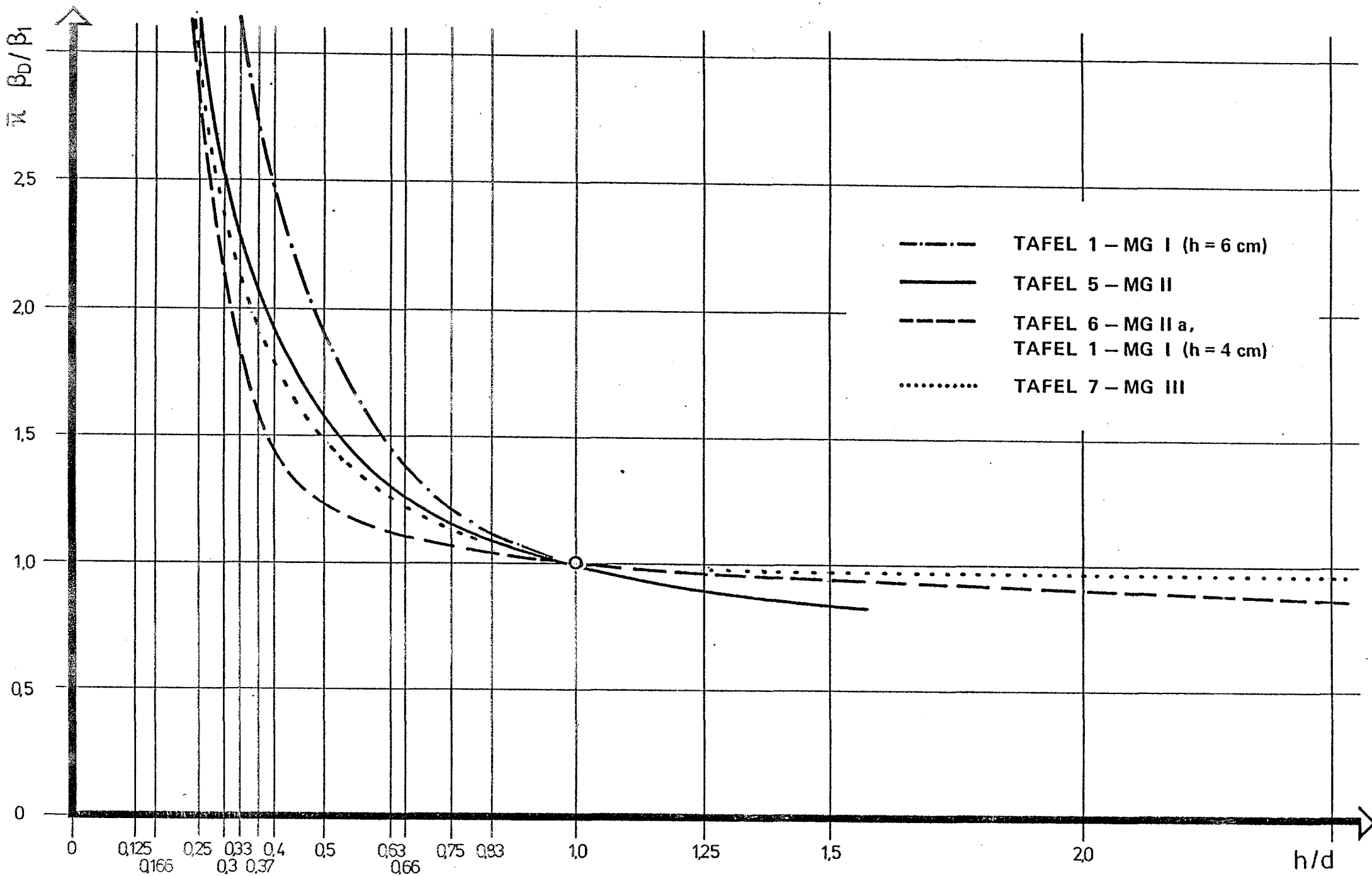
In Tafel 7.1 sind alle Versuchsreihen der Mörtelgruppe II, in Tafel 7.2 die Versuchsreihen der übrigen Mörtelgruppen sowie den gewichteten Mittelwert für Mörtelgruppe II nach Tafel 5 dargestellt.

Alle Kurven verlaufen voraussetzungsgemäß bei $\bar{\lambda} = h/d = 1$ durch denselben Punkt, nämlich $\bar{\kappa} = 1$. Im übrigen Verlauf zeigen sie sehr gute Übereinstimmung, d. h. die Mörtelgüten haben keinen gravierenden Einfluß auf $\bar{\kappa}$. Die Unterschiede der Kurven für $d = 4$ cm und $d = 6$ cm bei MG I könnten auf einen unterschiedlichen Austrocknungsprozess dieser kleinen Prüfkörper zurückgeführt werden.

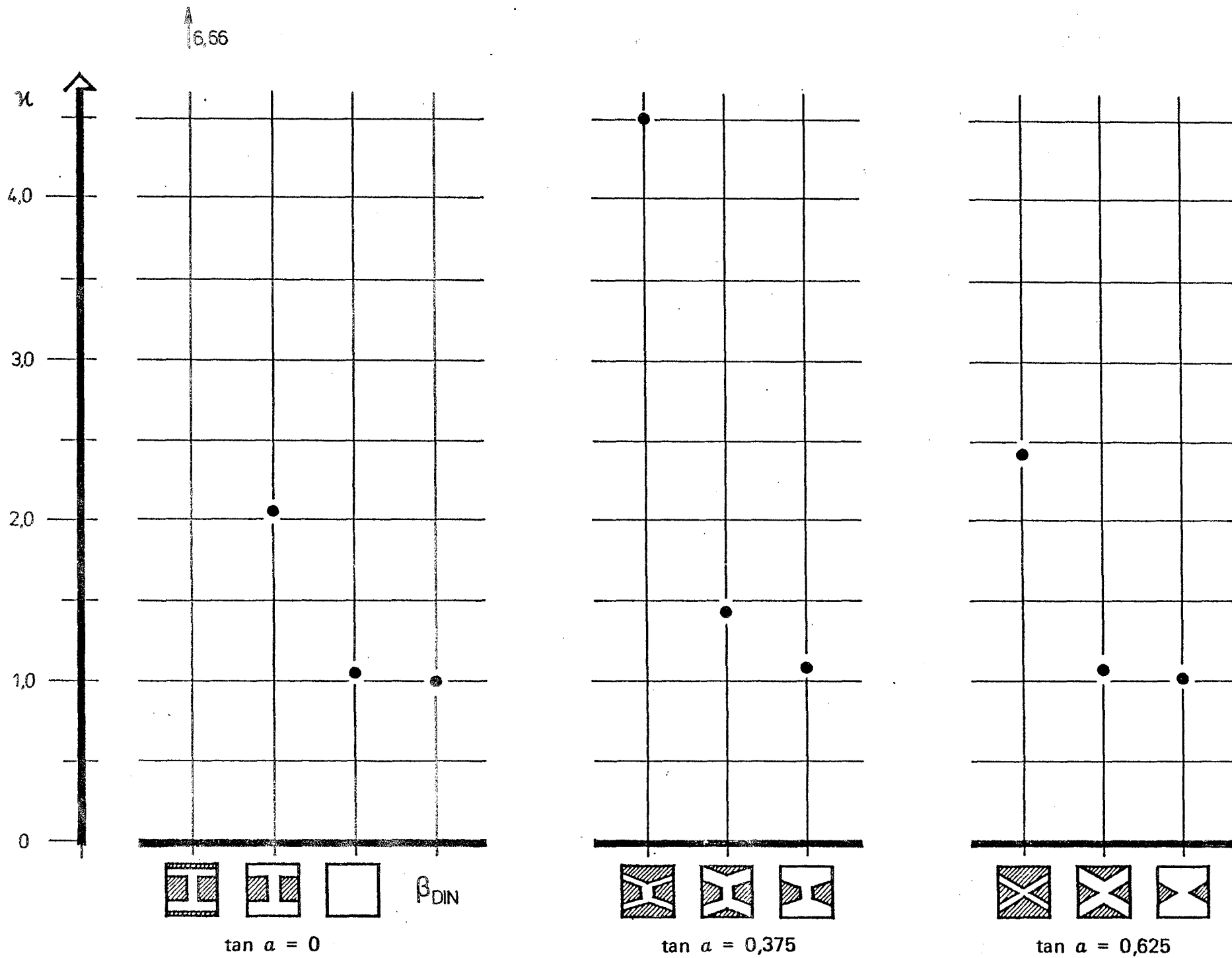
Als Erkenntnis bleibt, daß bei einer Ergänzung der Versuche sichergestellt werden muß, daß alle Prüfkörper während der ersten 7 Tage bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von $\cong 95$ % gelagert werden.



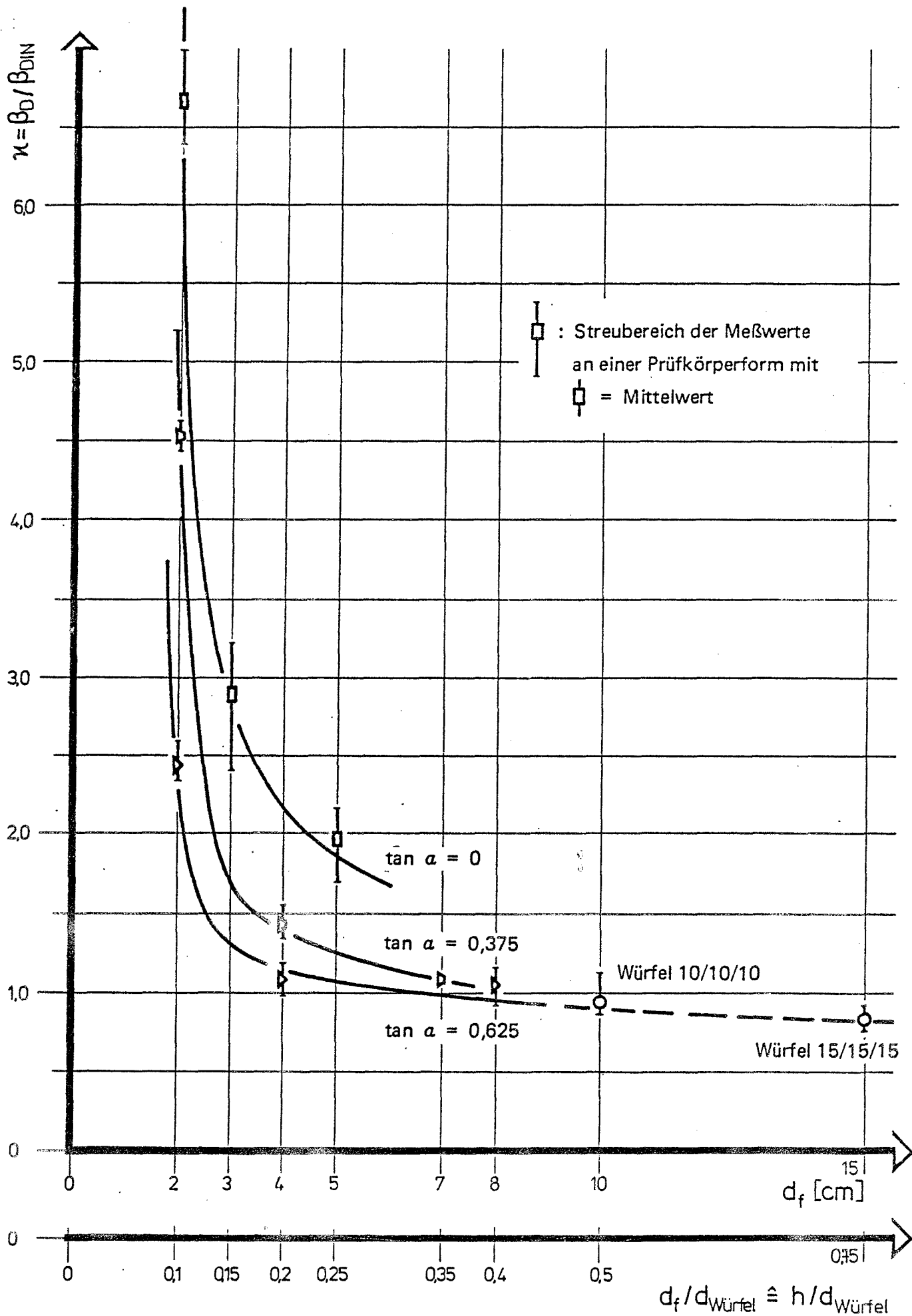
TAFEL 7.1: Verhältniswert $\bar{\kappa} = \beta_D / \beta_1$ für die Versuchsreihen der Mörtelgruppe II, entwickelt aus den Tafeln 2.3.4 und 5.



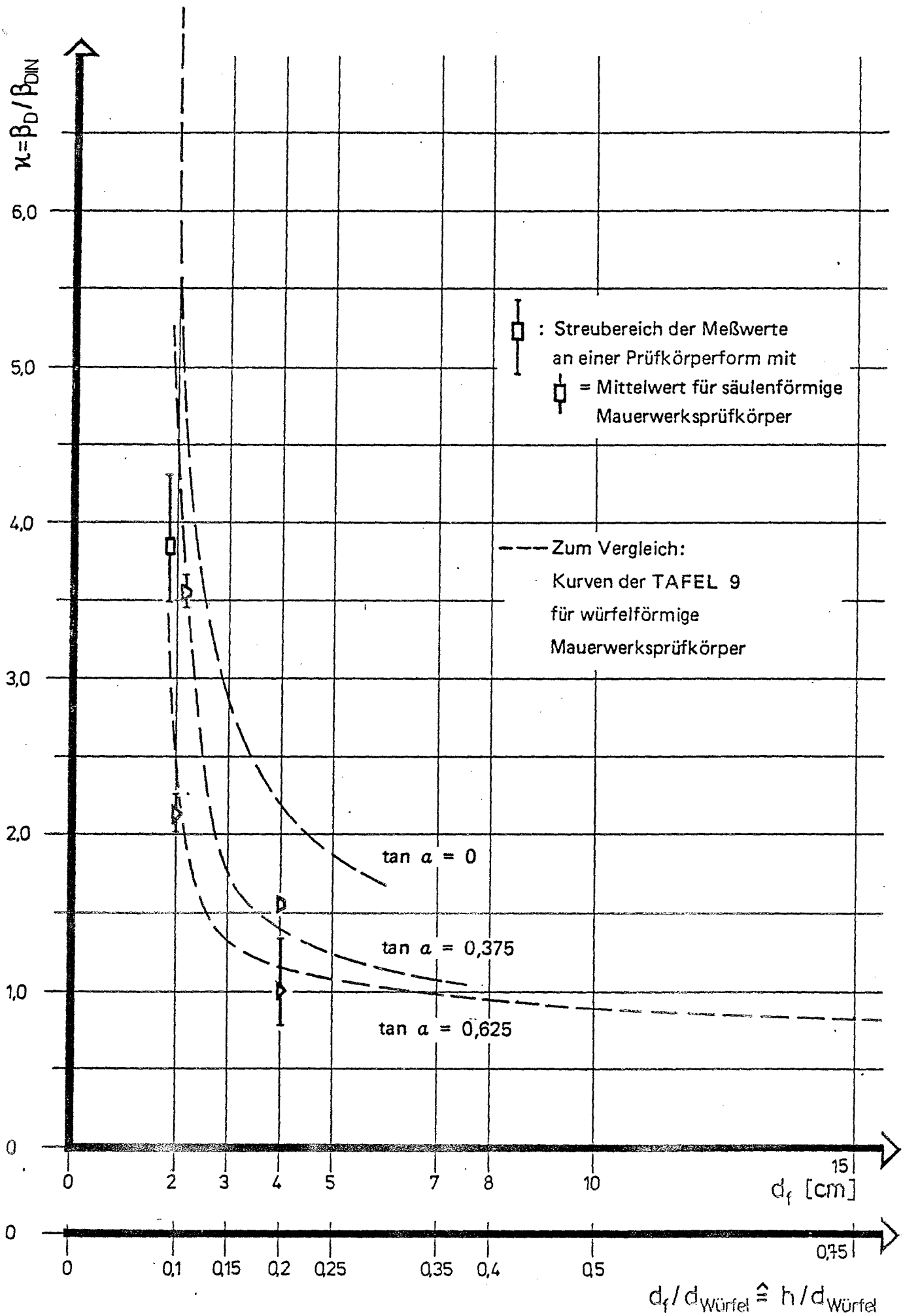
TAFEL 7.2: Verhältnswert $\bar{\kappa} = \beta_D / \beta_1$ für die verschiedenen Mörtelgruppen, entwickelt aus den Tafeln 1,5,6 und 7.



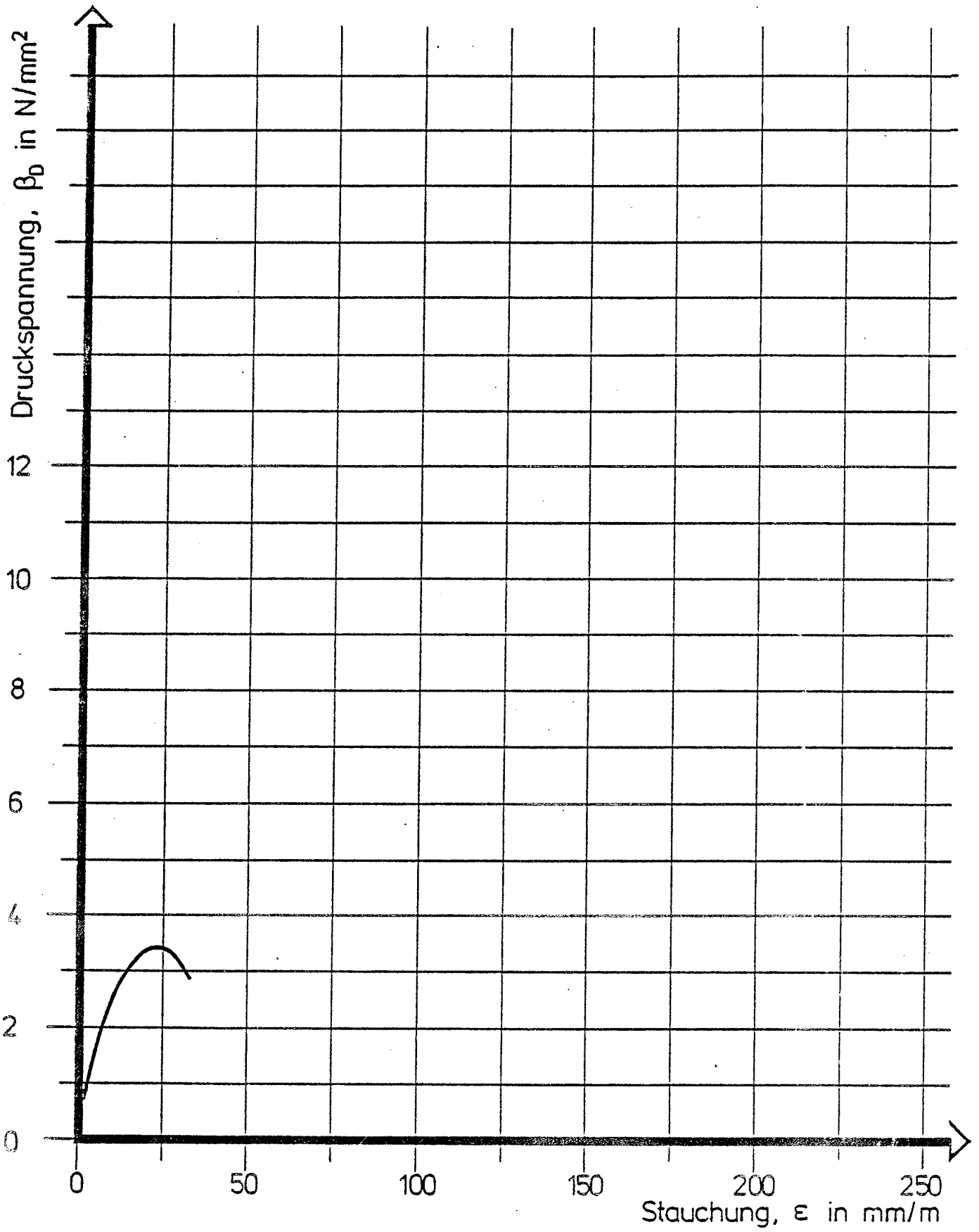
TAFEL 8: Übersicht der verwendeten Würfelprüfkörper und Formfaktor κ (Mittelwert)



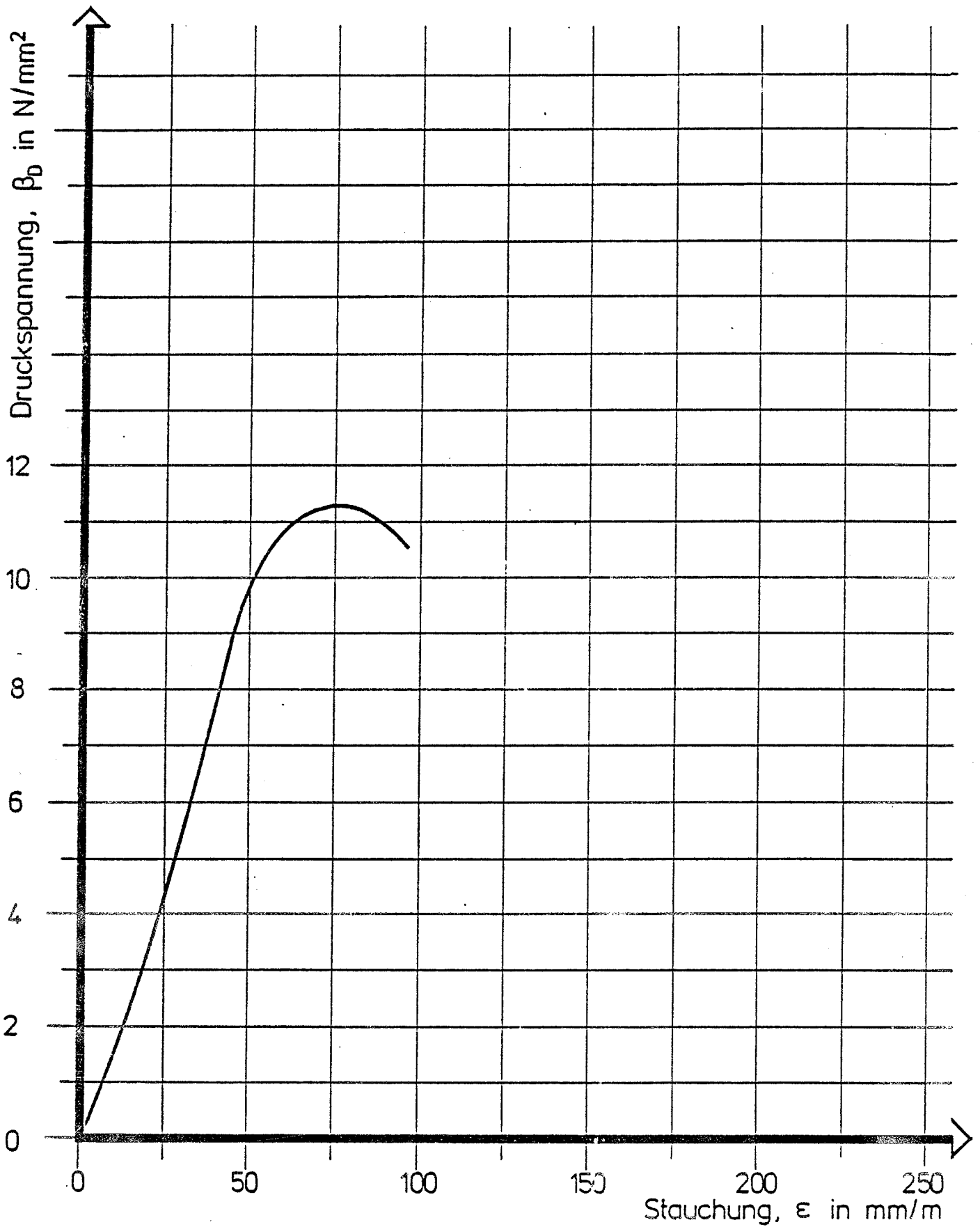
TAFEL 9: Versuchsreihe 7
 Verhältniszerte κ für verschiedene Fugenformen in Würfeln $h/d = 1$
 Würfelprüfkörper - MG II



TAFEL 10: Versuchsreihe 8
Verhältnismerte κ für verschiedene Fugenformen in Säulen $h/d = 3$
Säulenprüfkörper - MG II



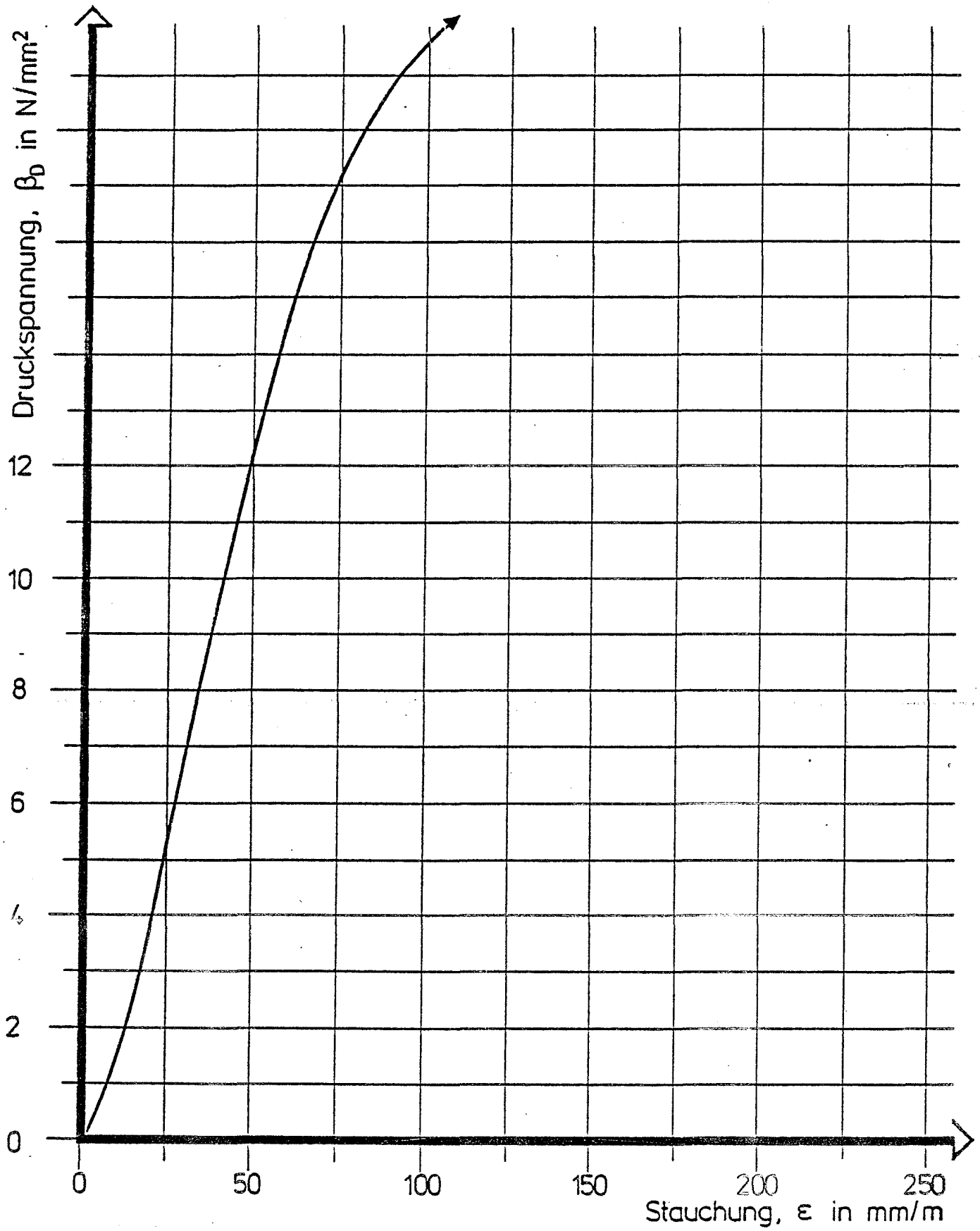
TAFEL 11: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 4 - MG II
Mörtelprüfkörper : Z (2/4)/2



TAFEL 12: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 4 - MG II

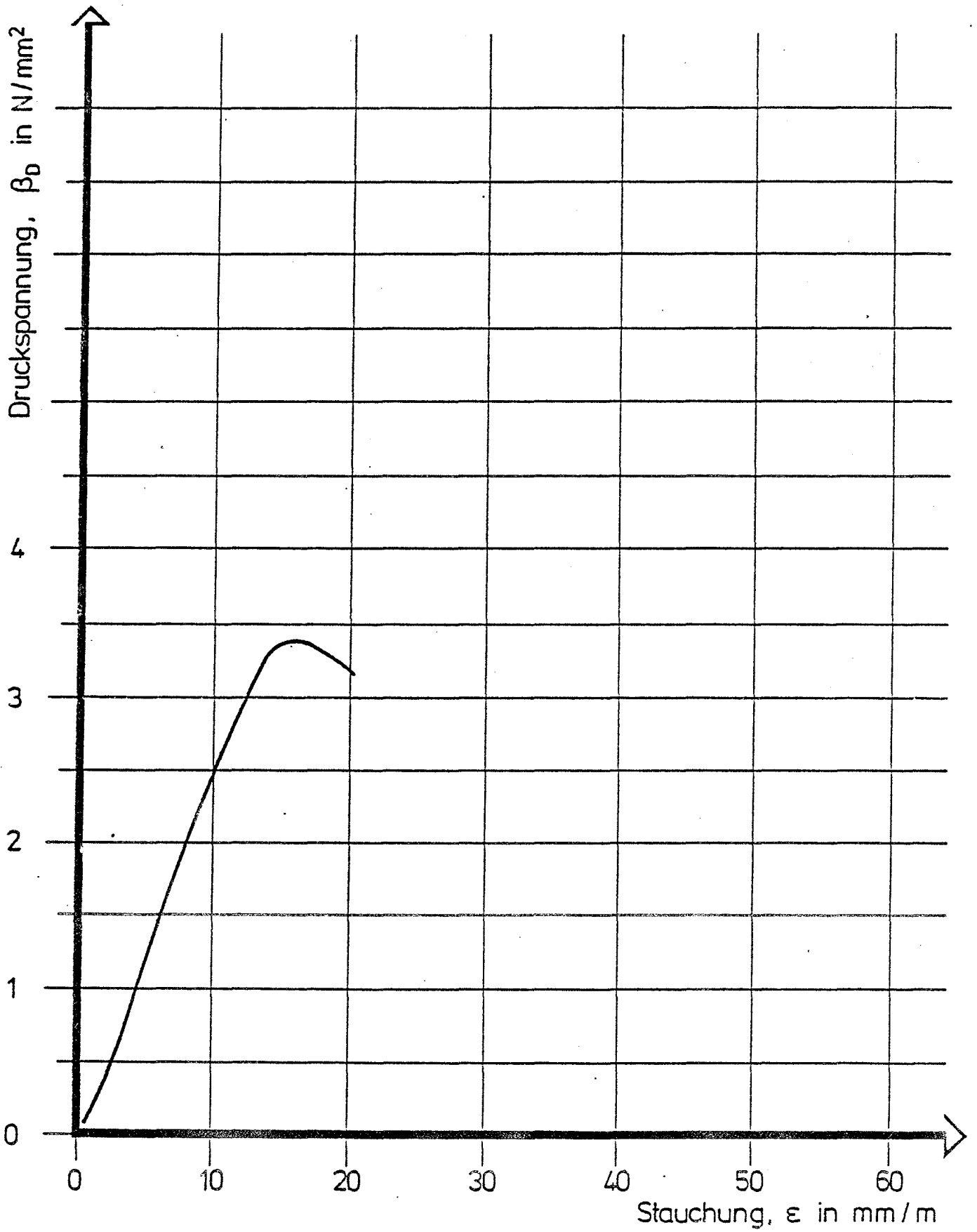
Mörtelprüfkörper : Z (2/8)/2



TAFEL 13: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 4 – MG II

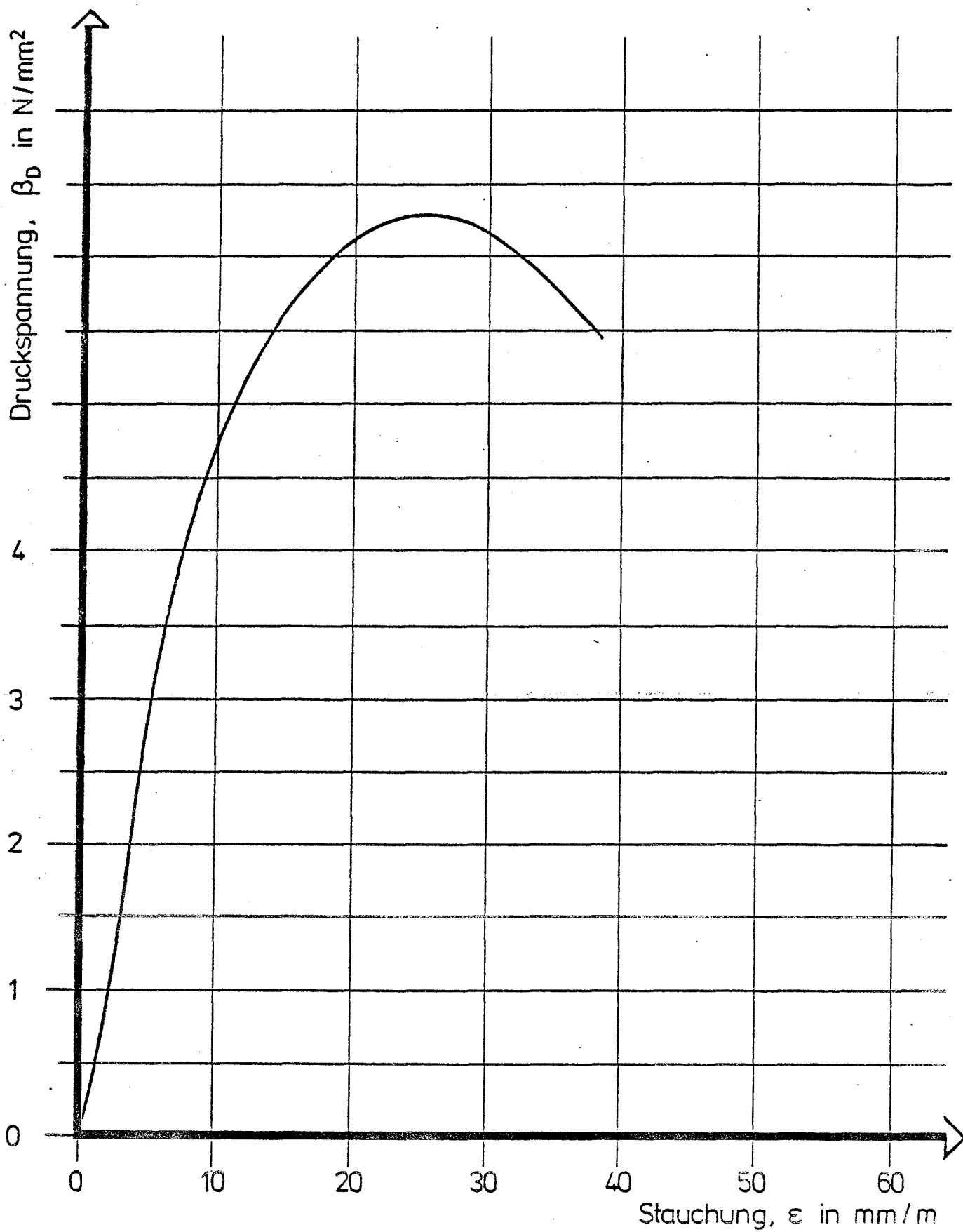
Mörtelprüfkörper : Z (2/12)/2



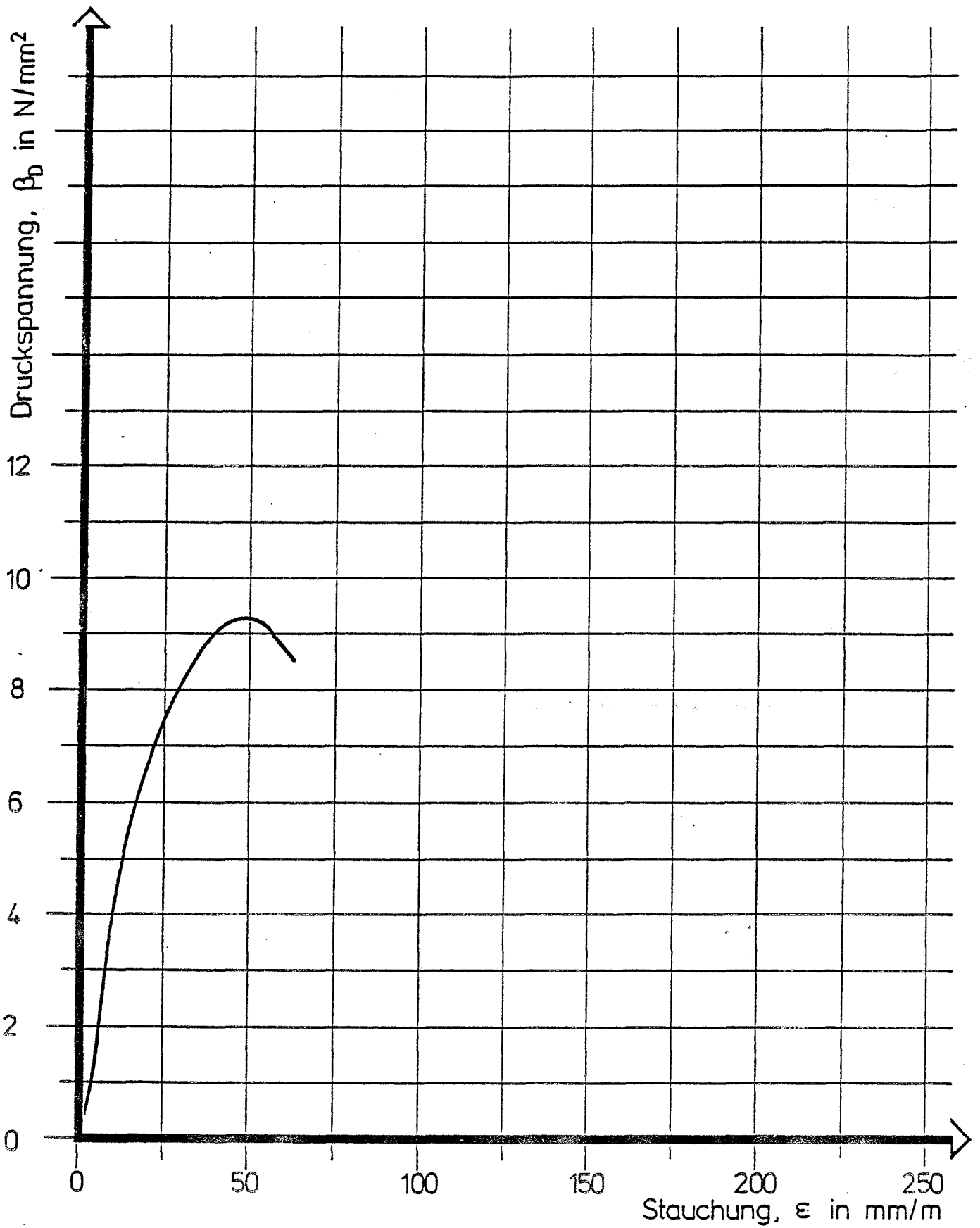
TAFEL 14: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 4 – MG II

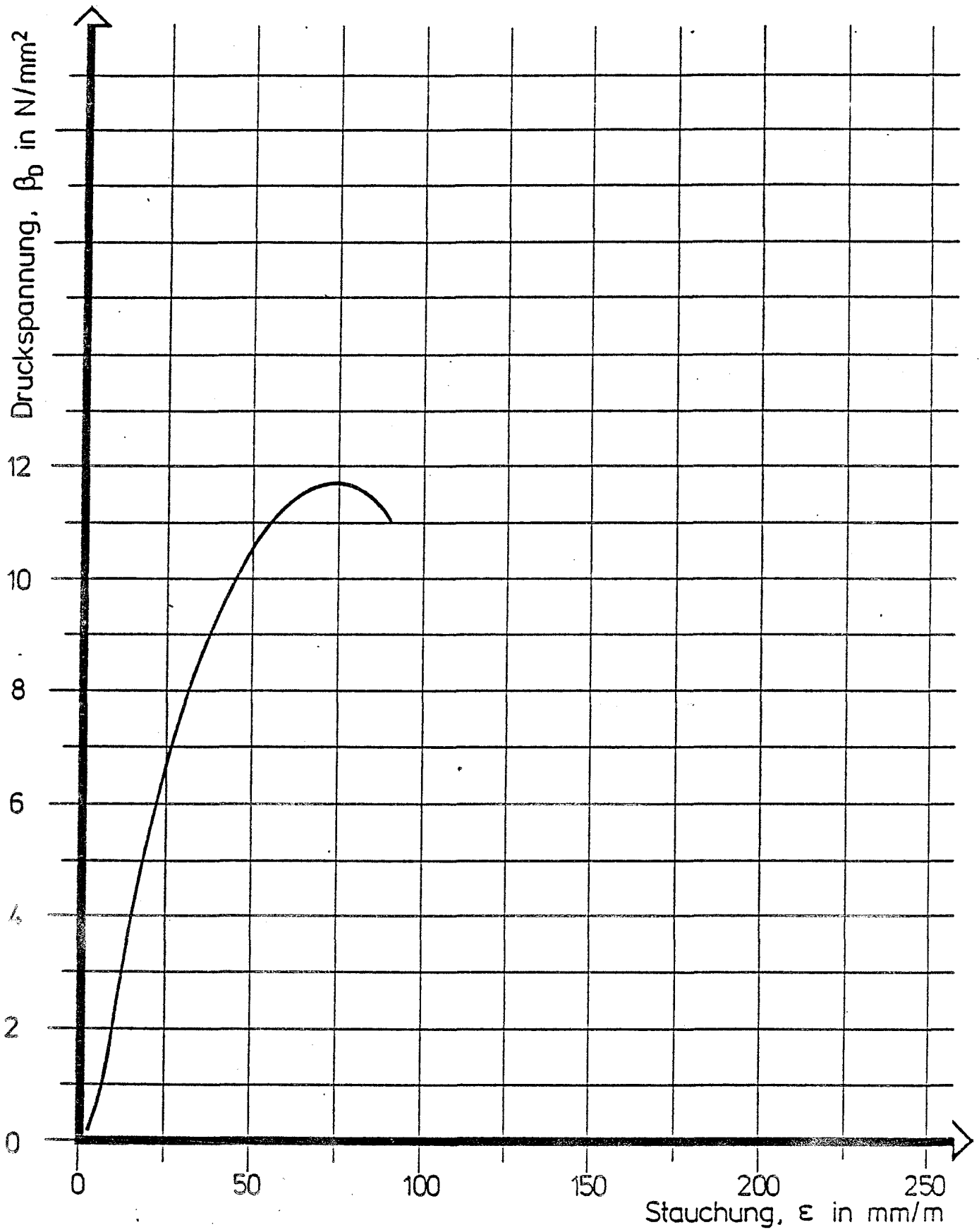
Mörtelprüfkörper : Z (4/4)/2



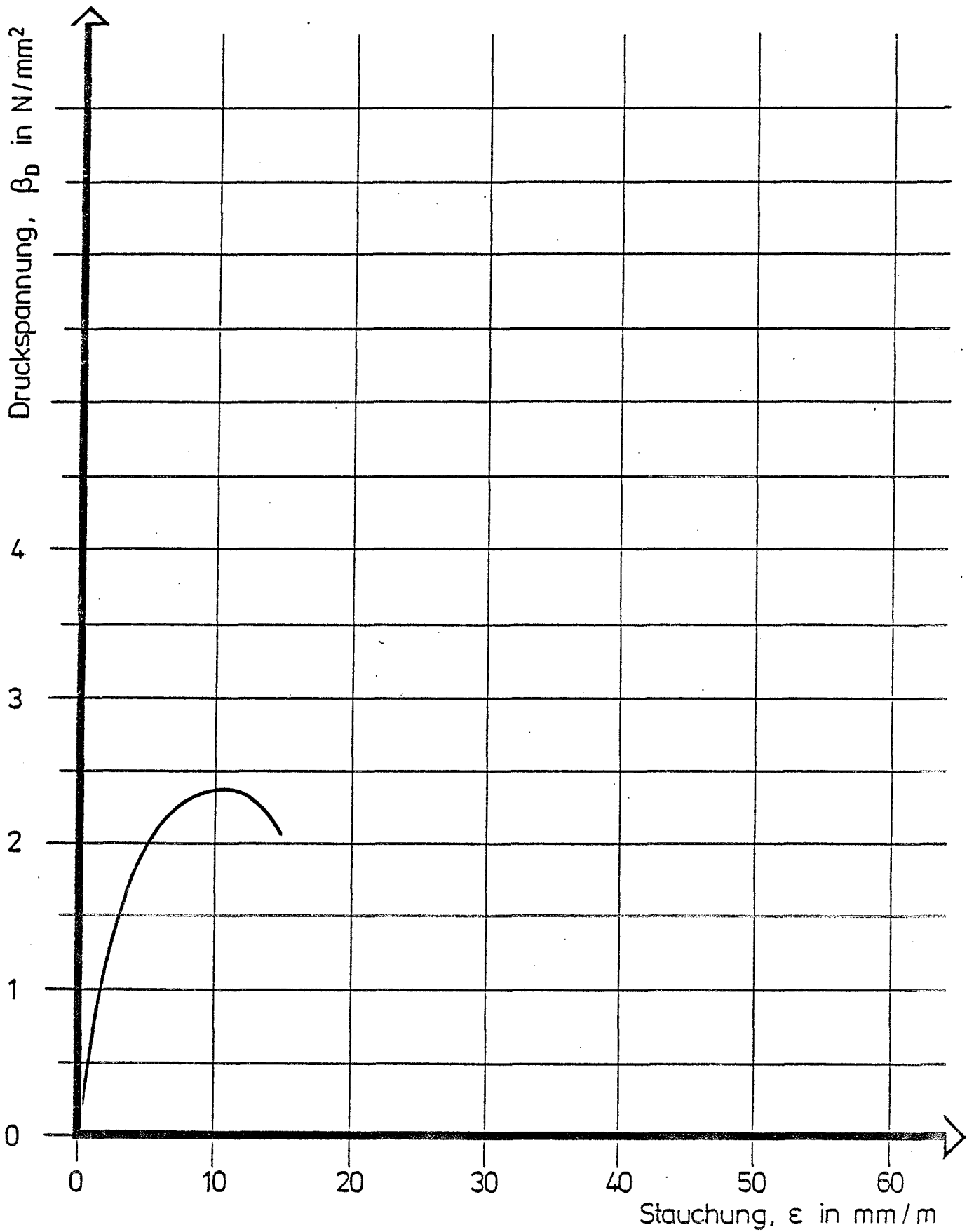
TAFEL 15: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 4 - MG II
Mörtelprüfkörper : Z (4/8)/2



TAFEL 16: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 4 – MG II
Mörtelprüfkörper: Z (4/12)/2



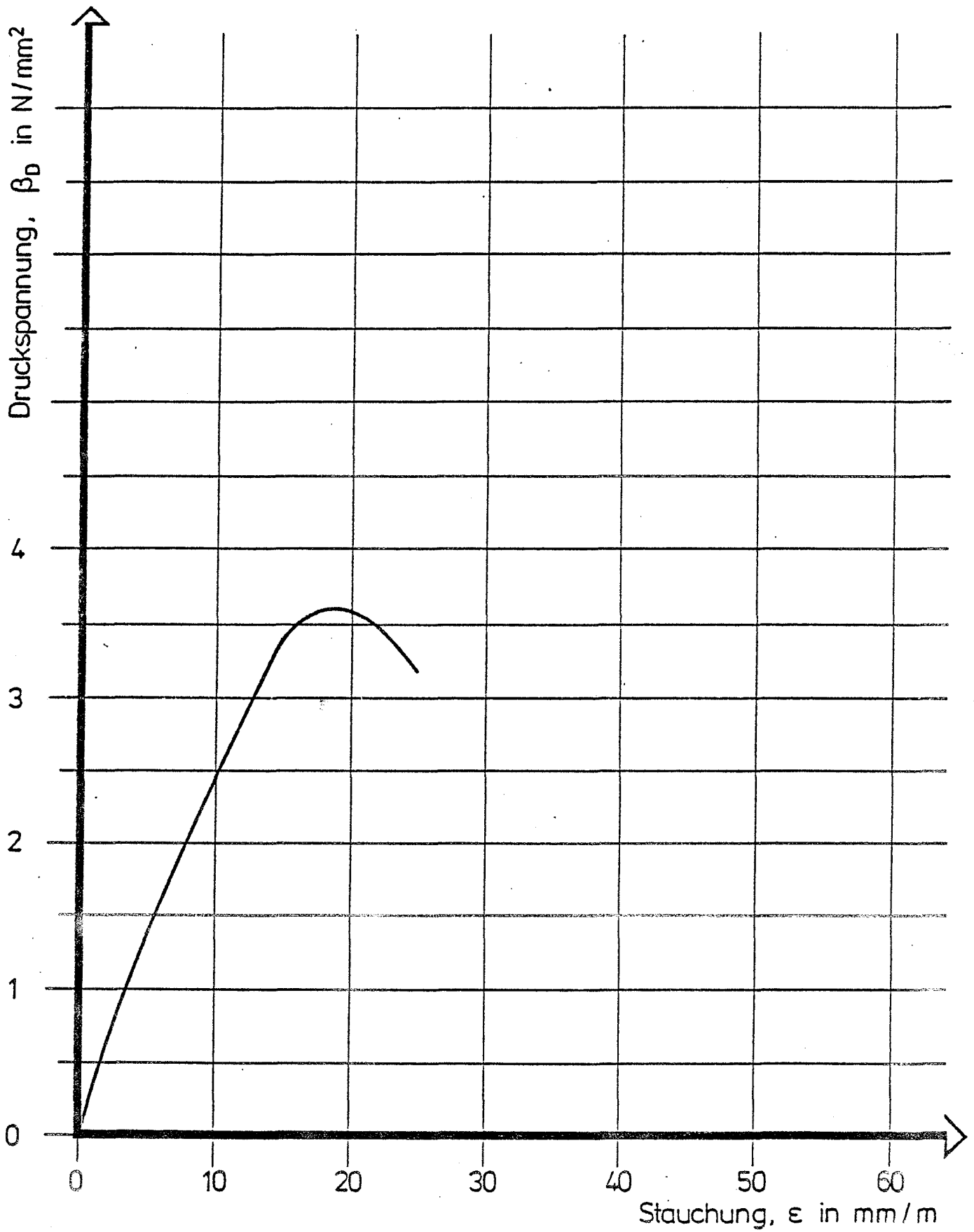
TAFEL 17: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 4 – MG II
Mörtelprüfkörper: Z (4/16)/3



TAFEL 18: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 4 – MG II

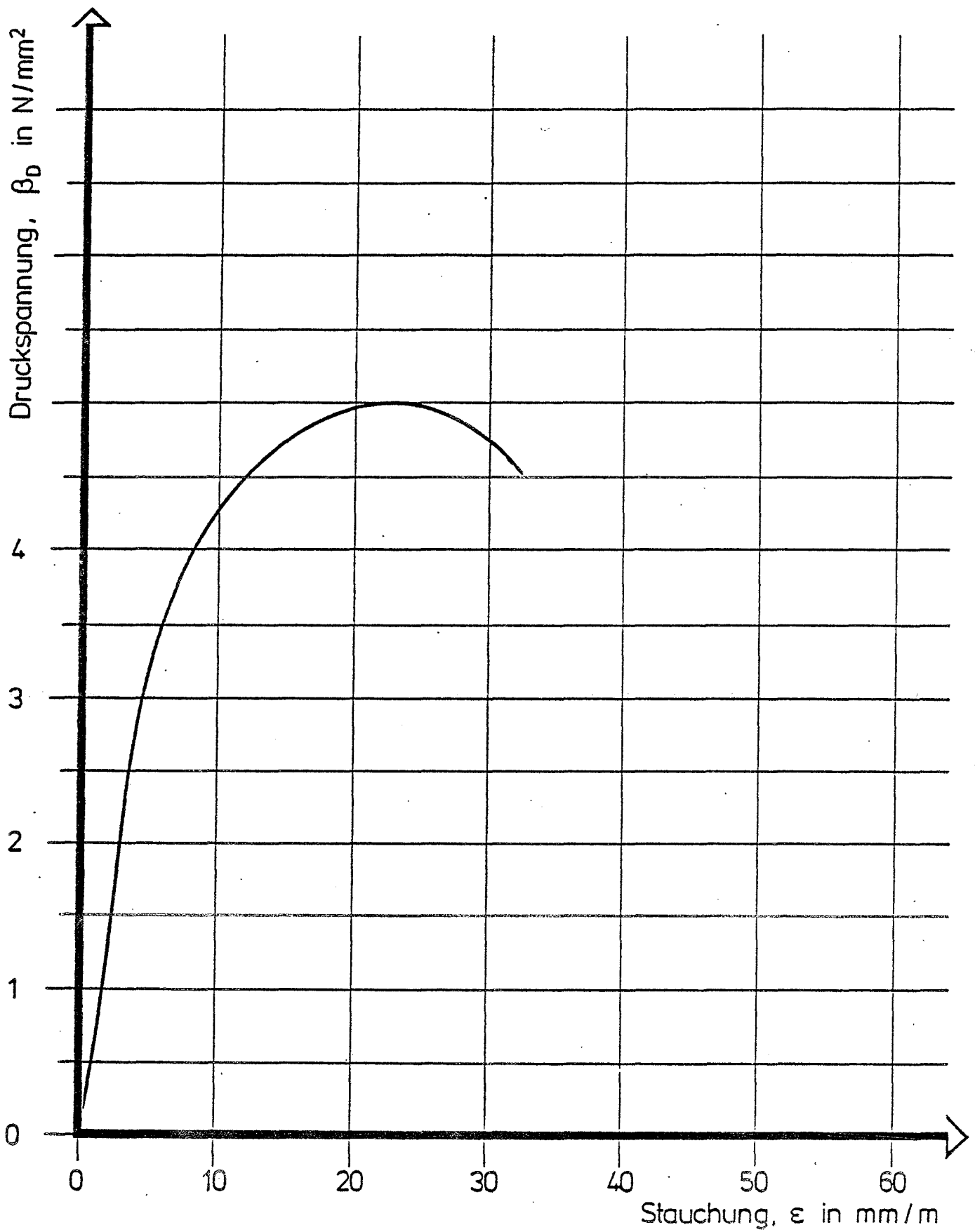
Mörtelprüfkörper: Z (6/4)/1



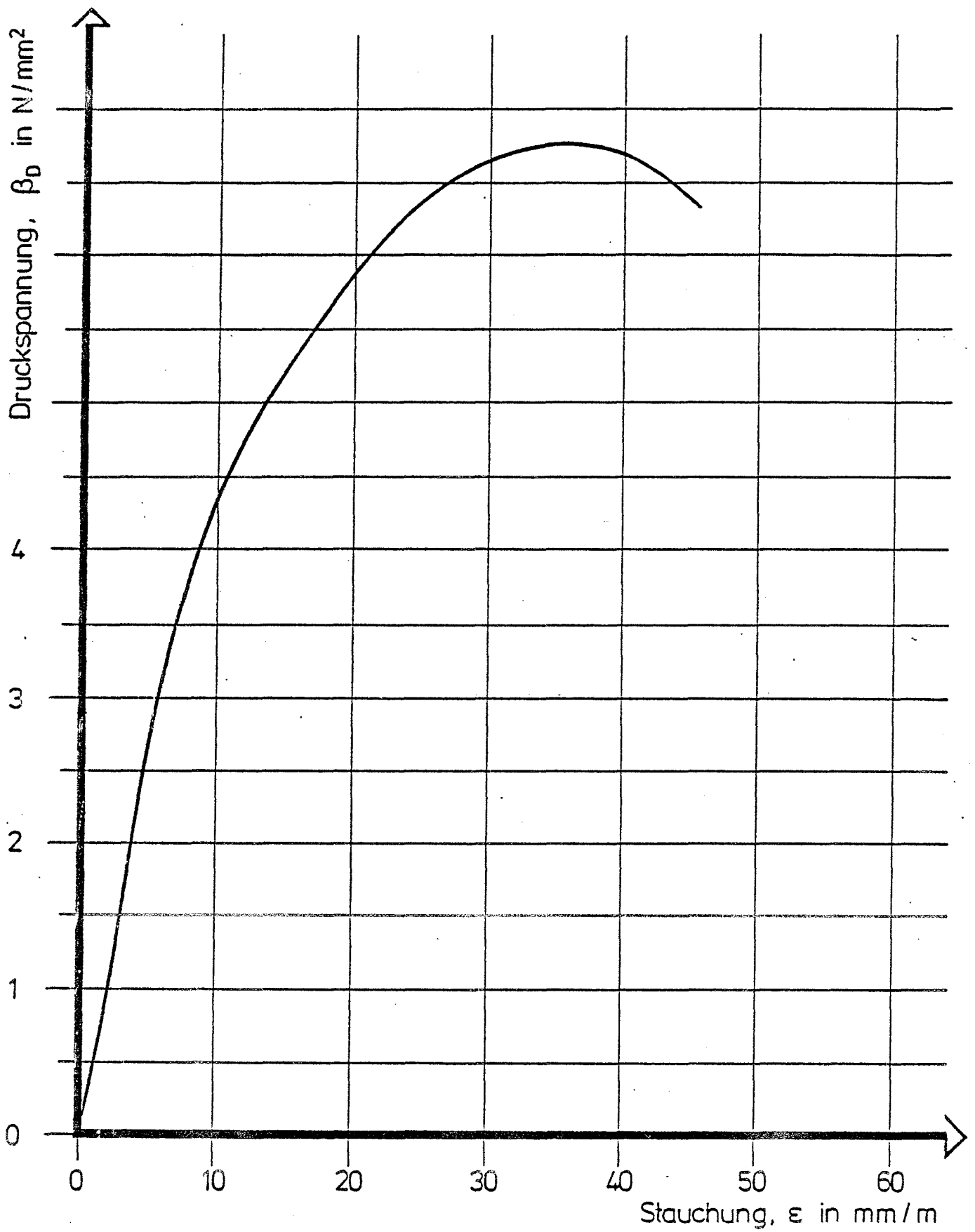
TAFEL 19: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 4 – MG II

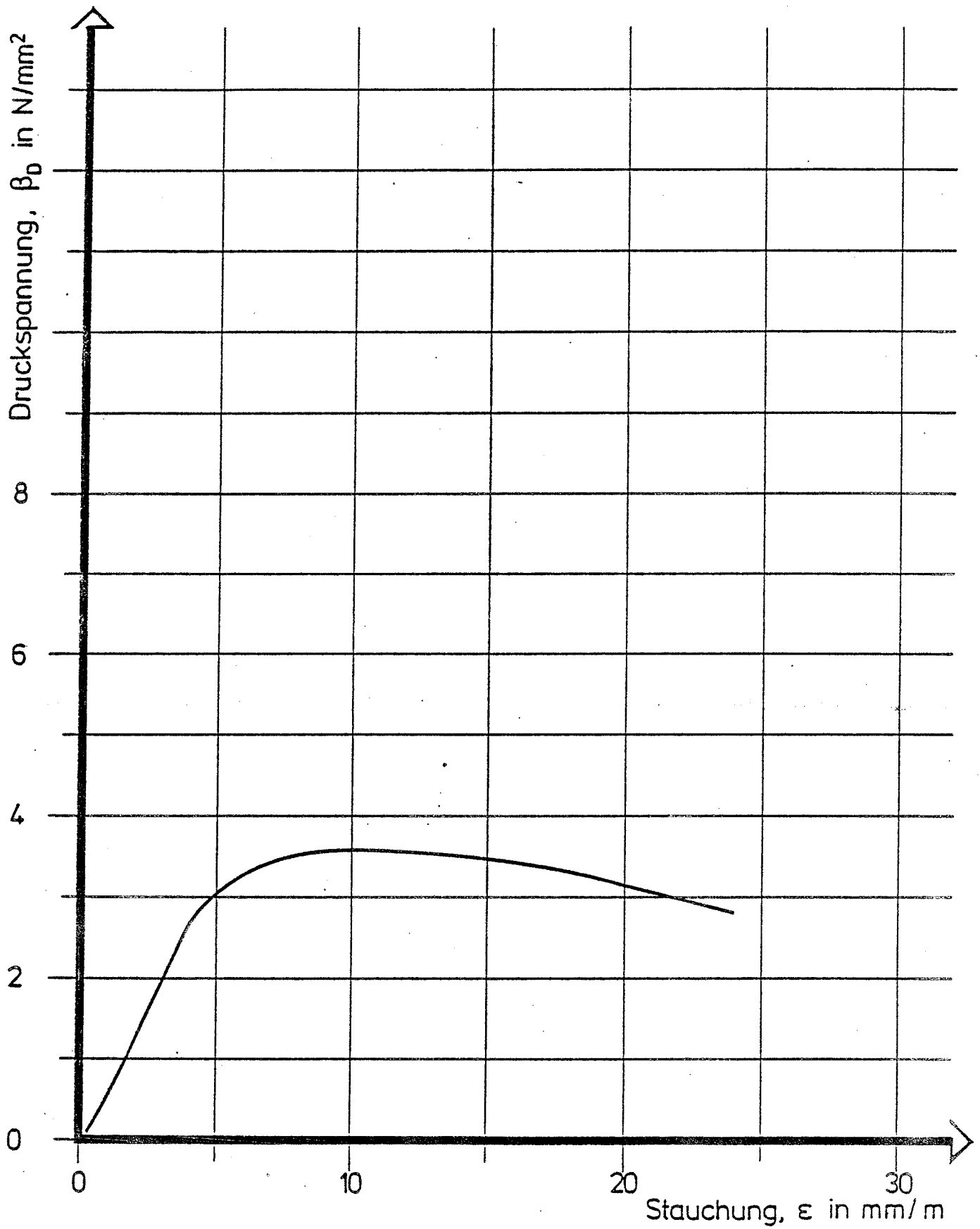
Mörtelprüfkörper: Z (6/8)/3



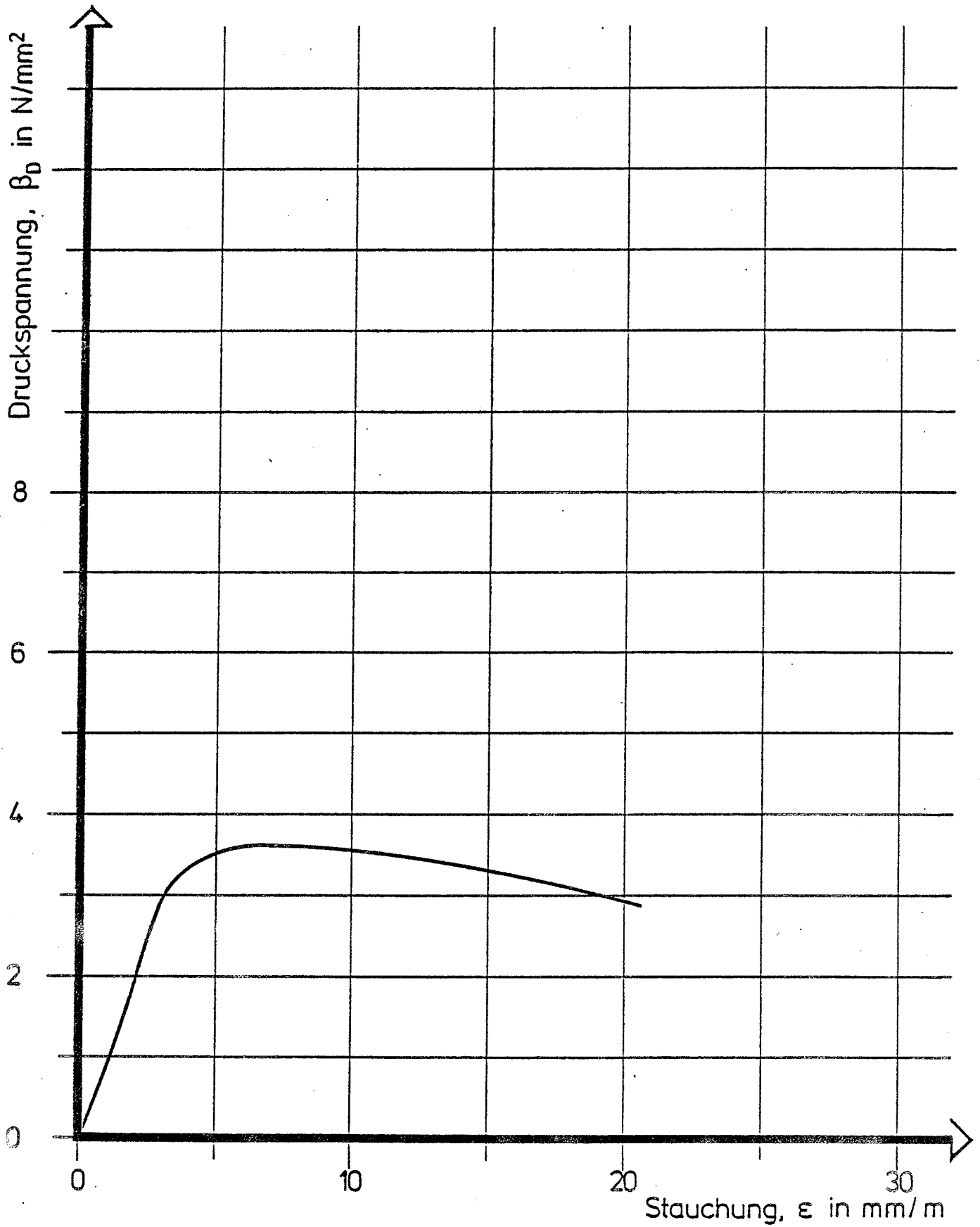
TAFEL 20: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 4 – MG II
Mörtelprüfkörper: Z (6/12)/3



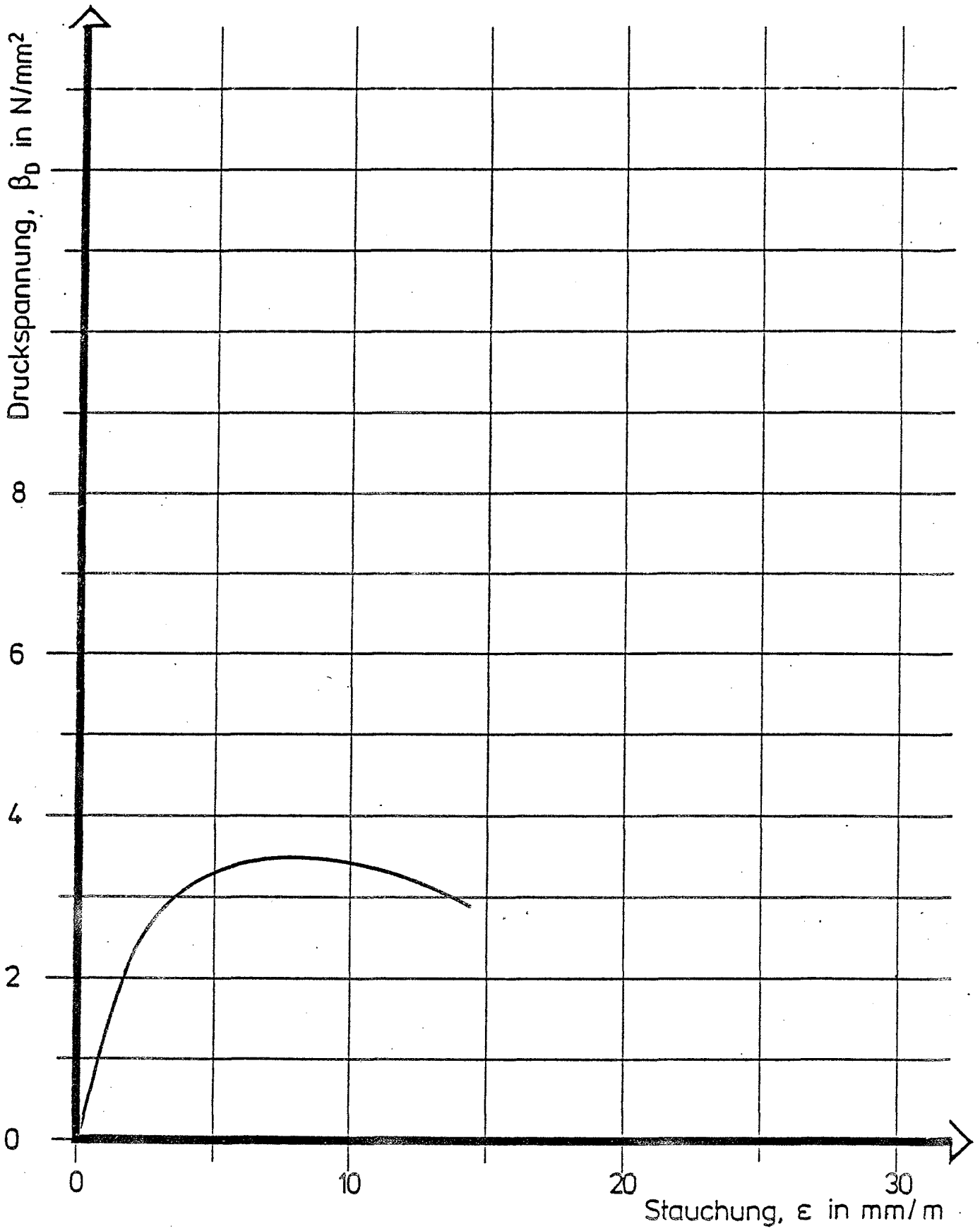
TAFEL 21: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 4 – MG II
Mörtelprüfkörper: Z (6/16)/2



TAFEL 22: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 4 – MG II
Würfelprüfkörper: W (A)/2



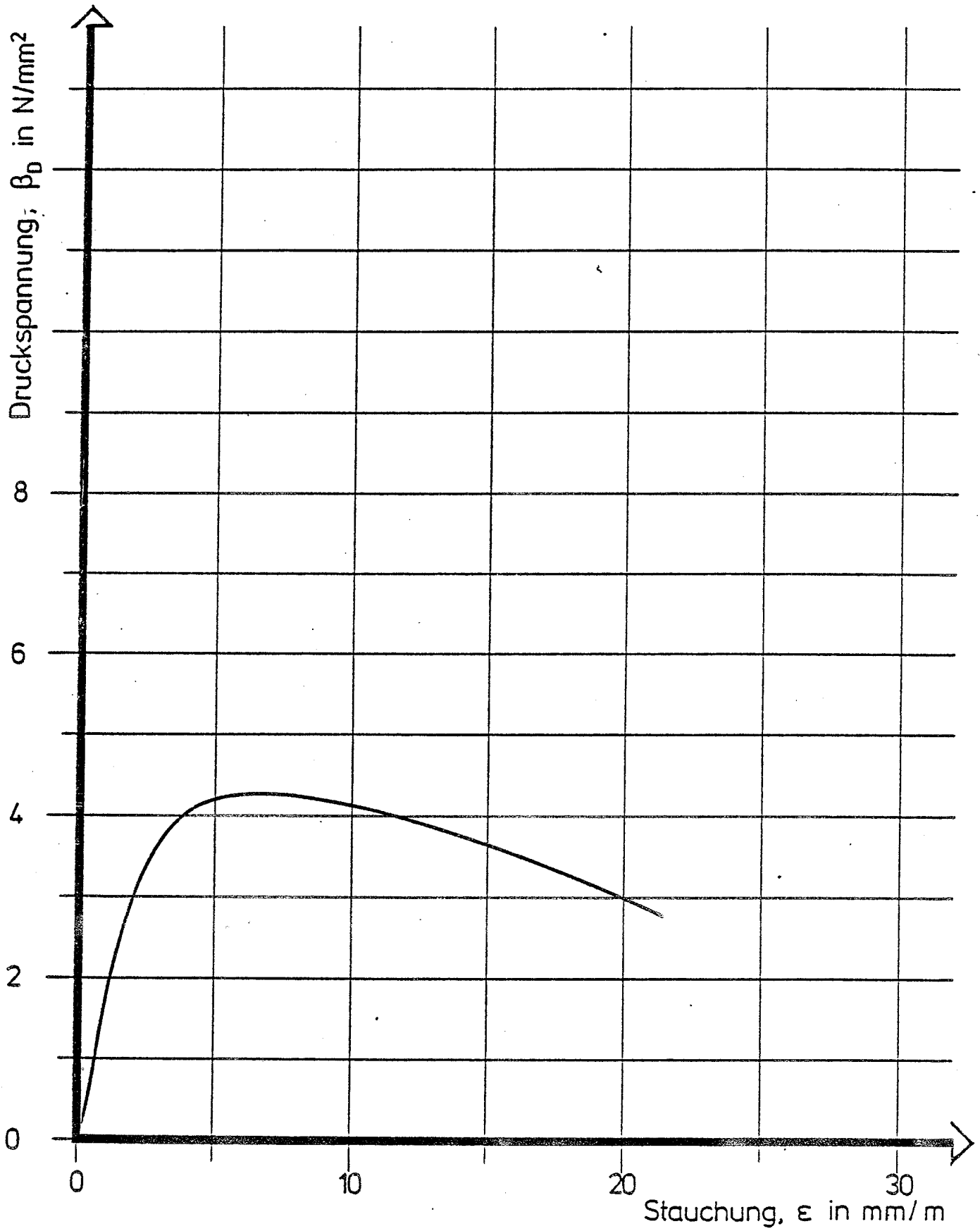
TAFEL 23: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 4 – MG II
Würfelprüfkörper: W (B)/2



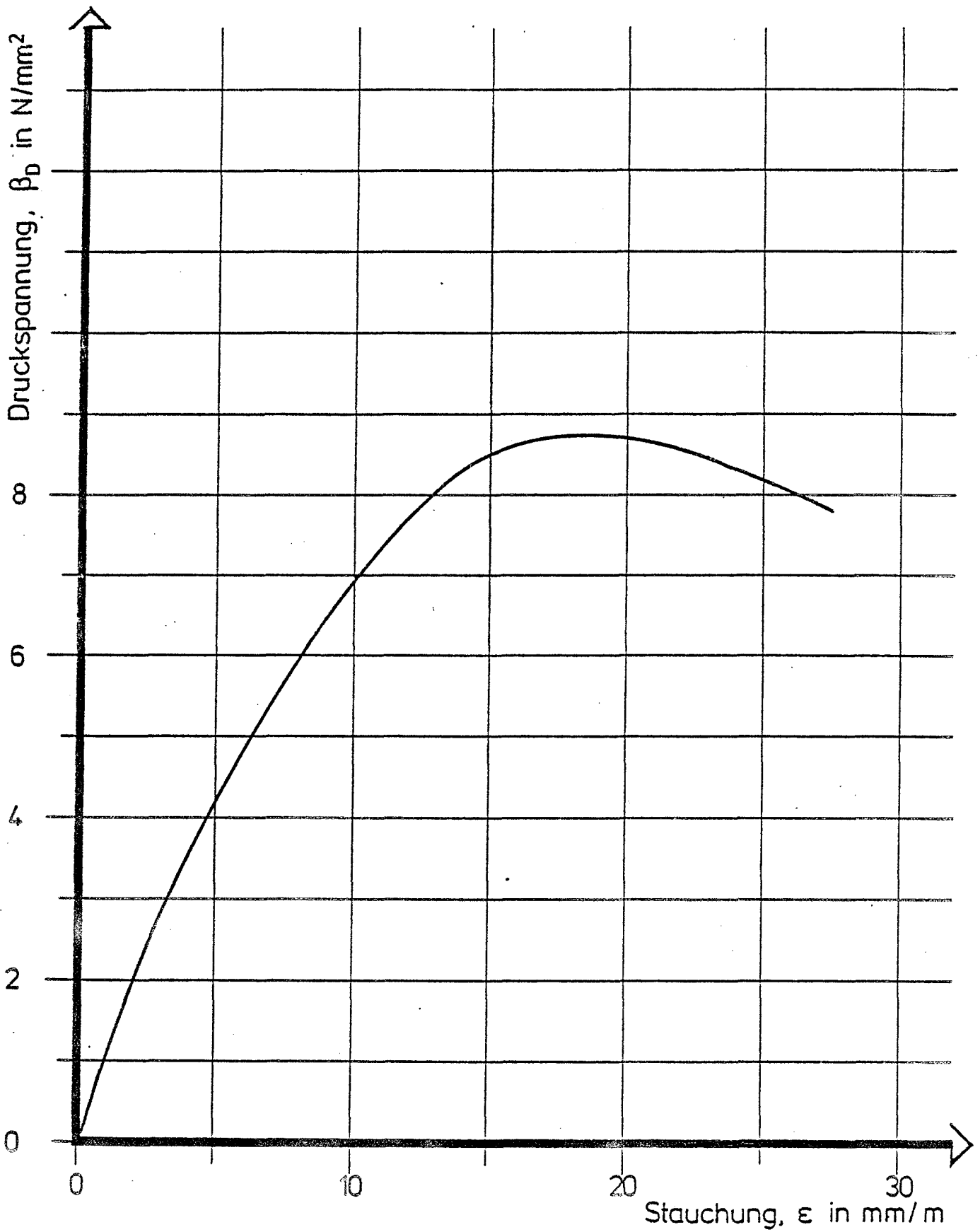
TAFEL 24: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 4 – MG II

Würfelprüfkörper: W (C)/2



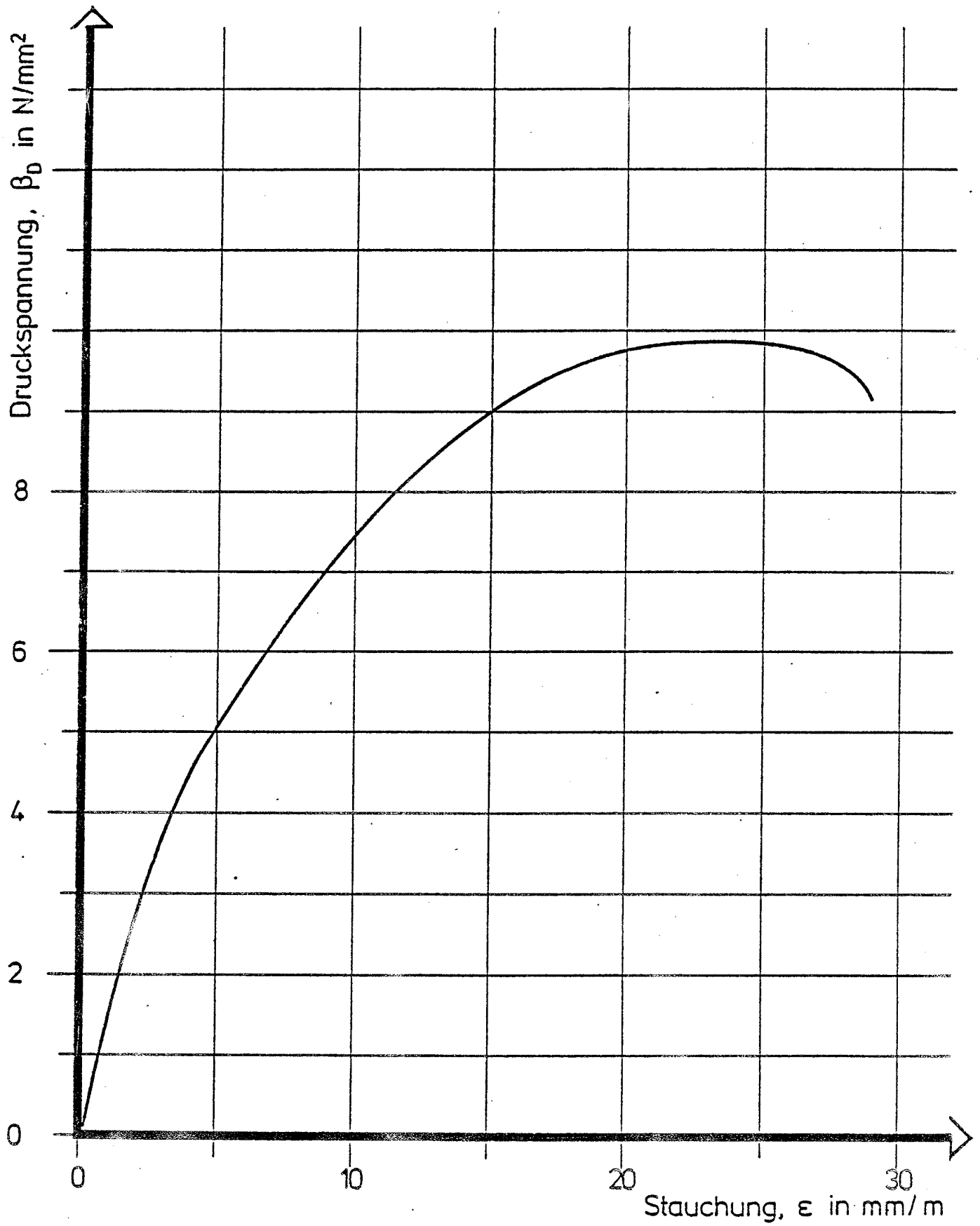
TAFEL 25: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 7 – MG II
Würfelprüfkörper: W (C)/2



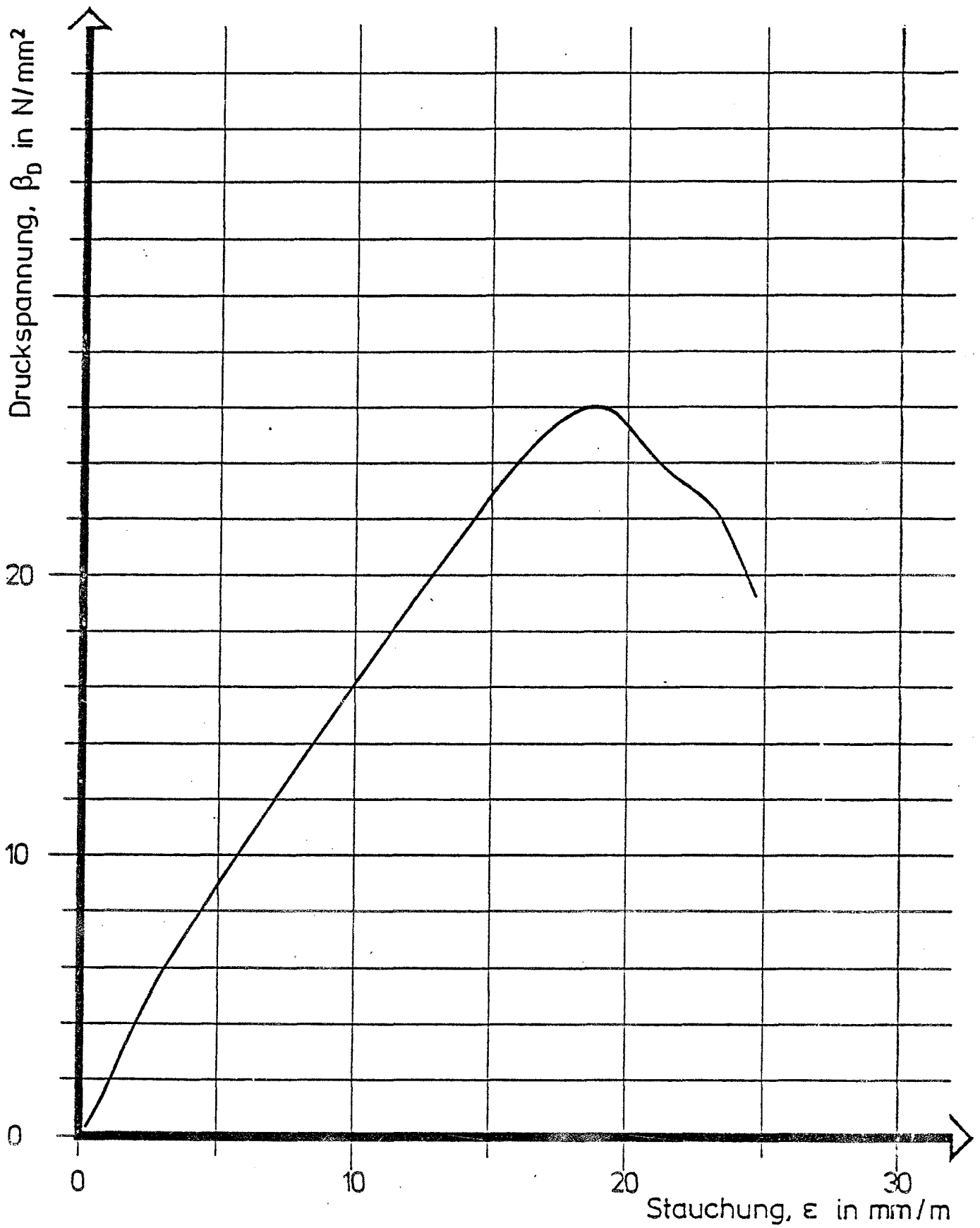
TAFEL 26: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 7 — MG II

Würfelprüfkörper: W (D)/2



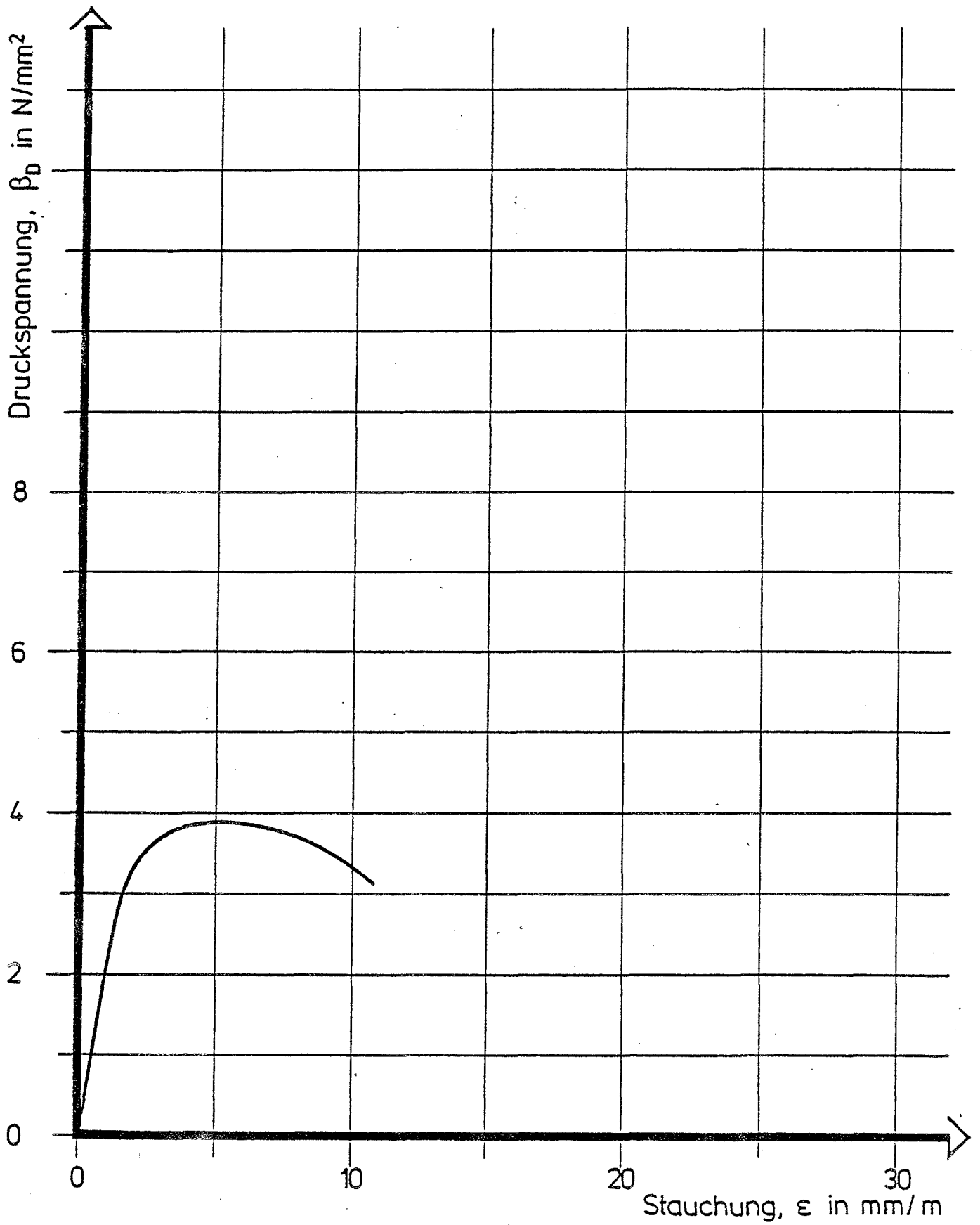
TAFEL 27: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 7 – MG II
Würfelprüfkörper: W (E)/1



TAFEL 28: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 7 – MG II

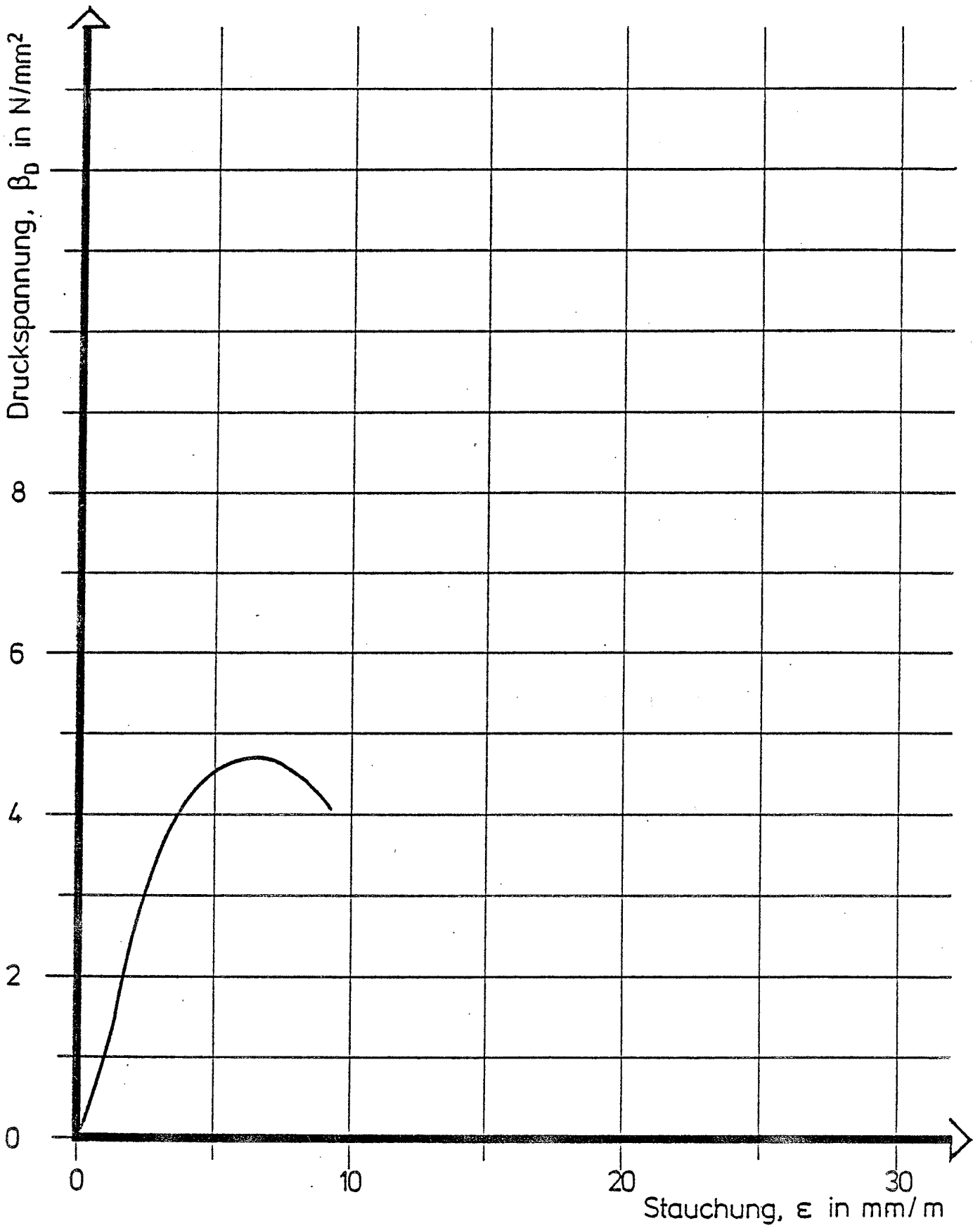
Würfelprüfkörper: W(F)/2



TAFEL 29: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 7 – MG II

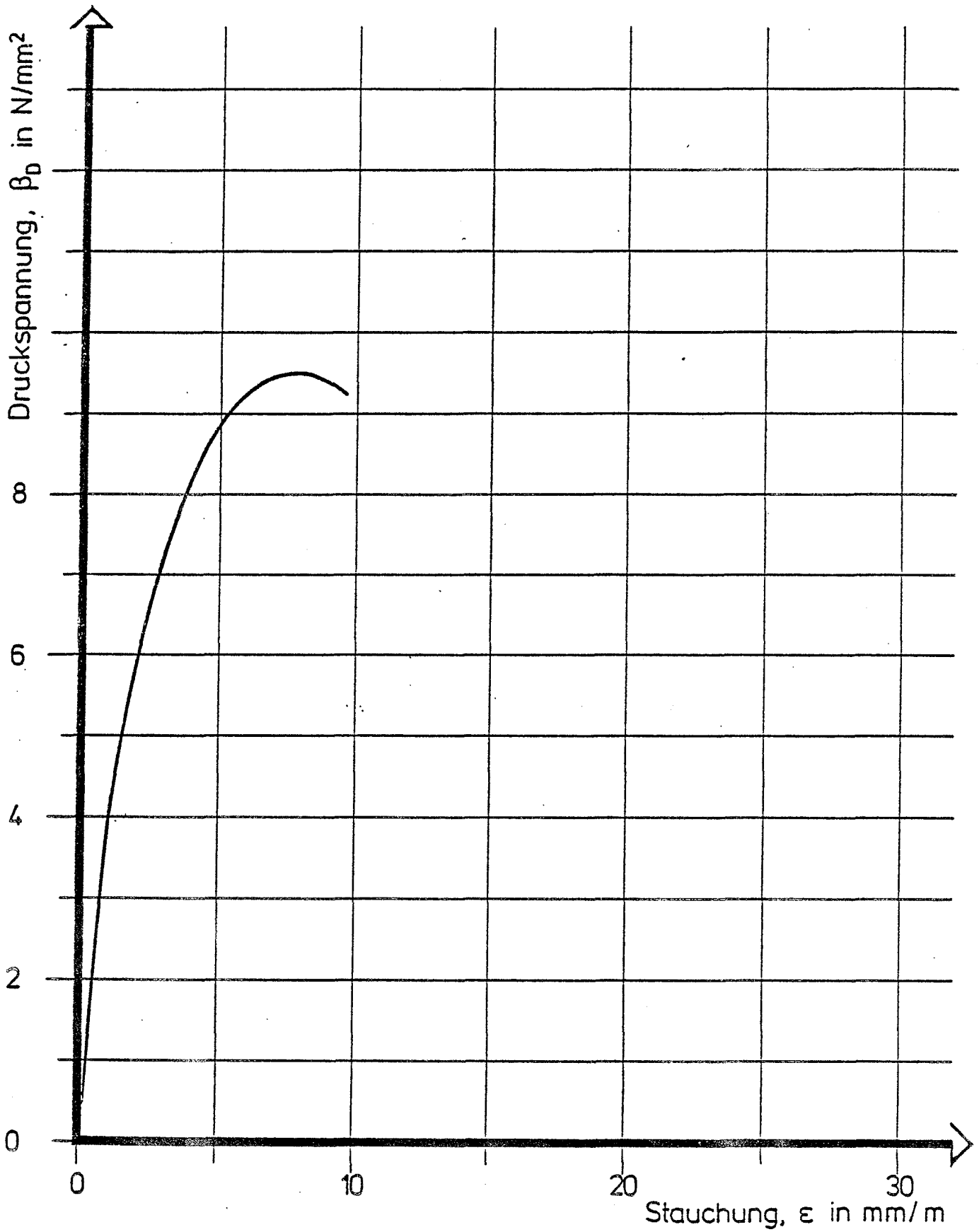
Würfelprüfkörper : W (G)/ 2



TAFEL 30: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 7 – MG II

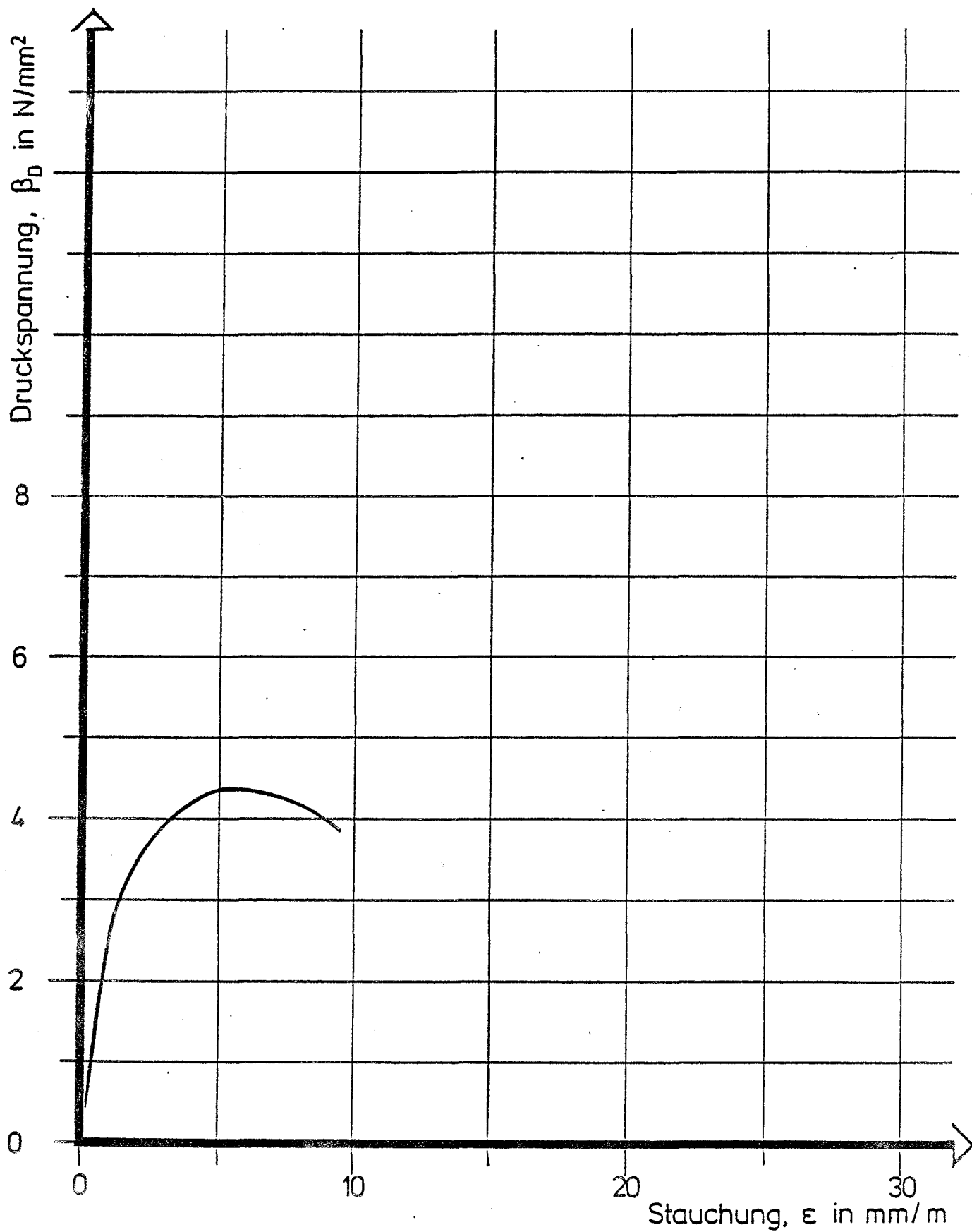
Würfelprüfkörper : W (H)/2



TAFEL 31: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 7 – MG II

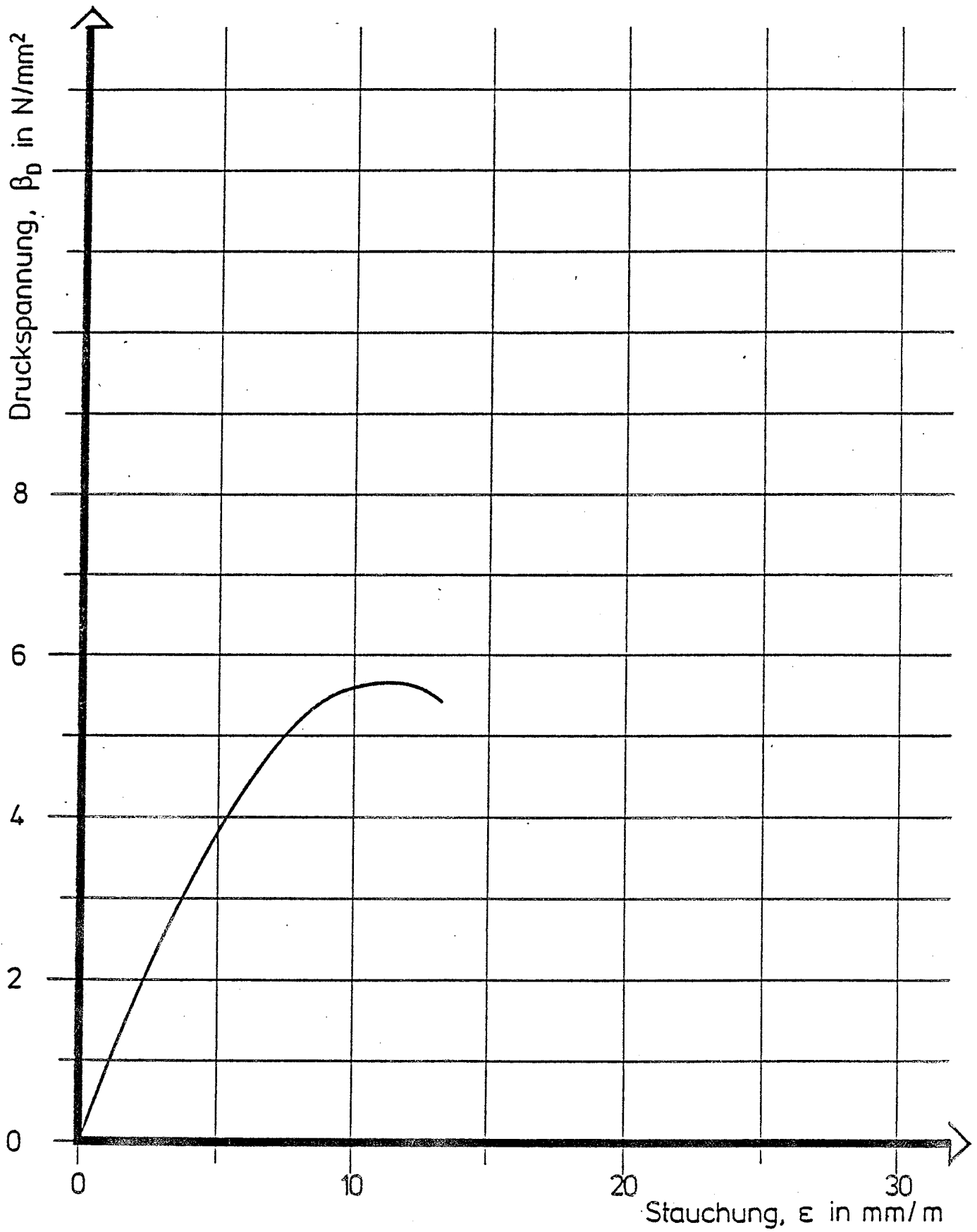
Würfelprüfkörper : W (J)/ 2



TAFEL 32: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 7 – MG II

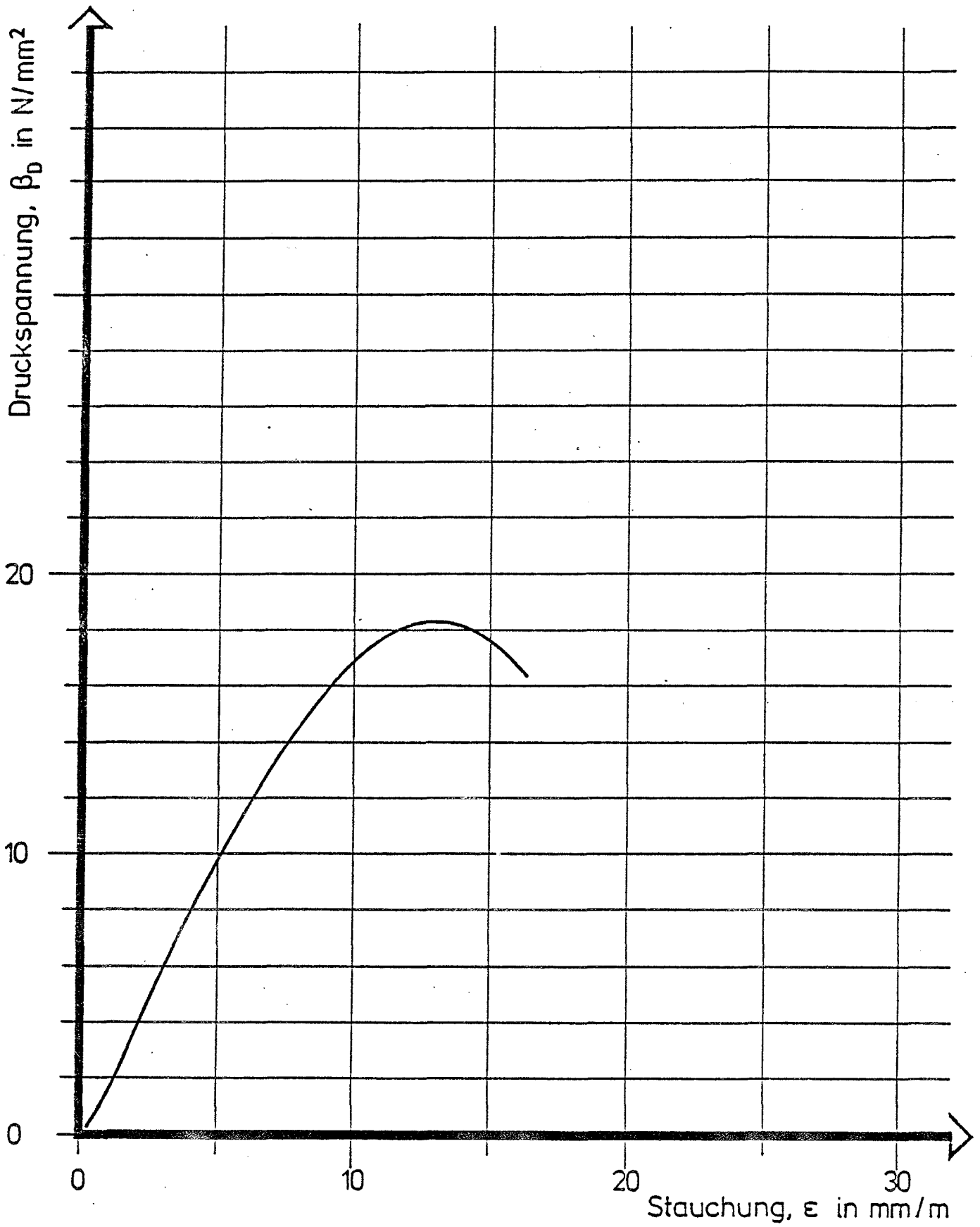
Würfelprüfkörper : W (K)/3



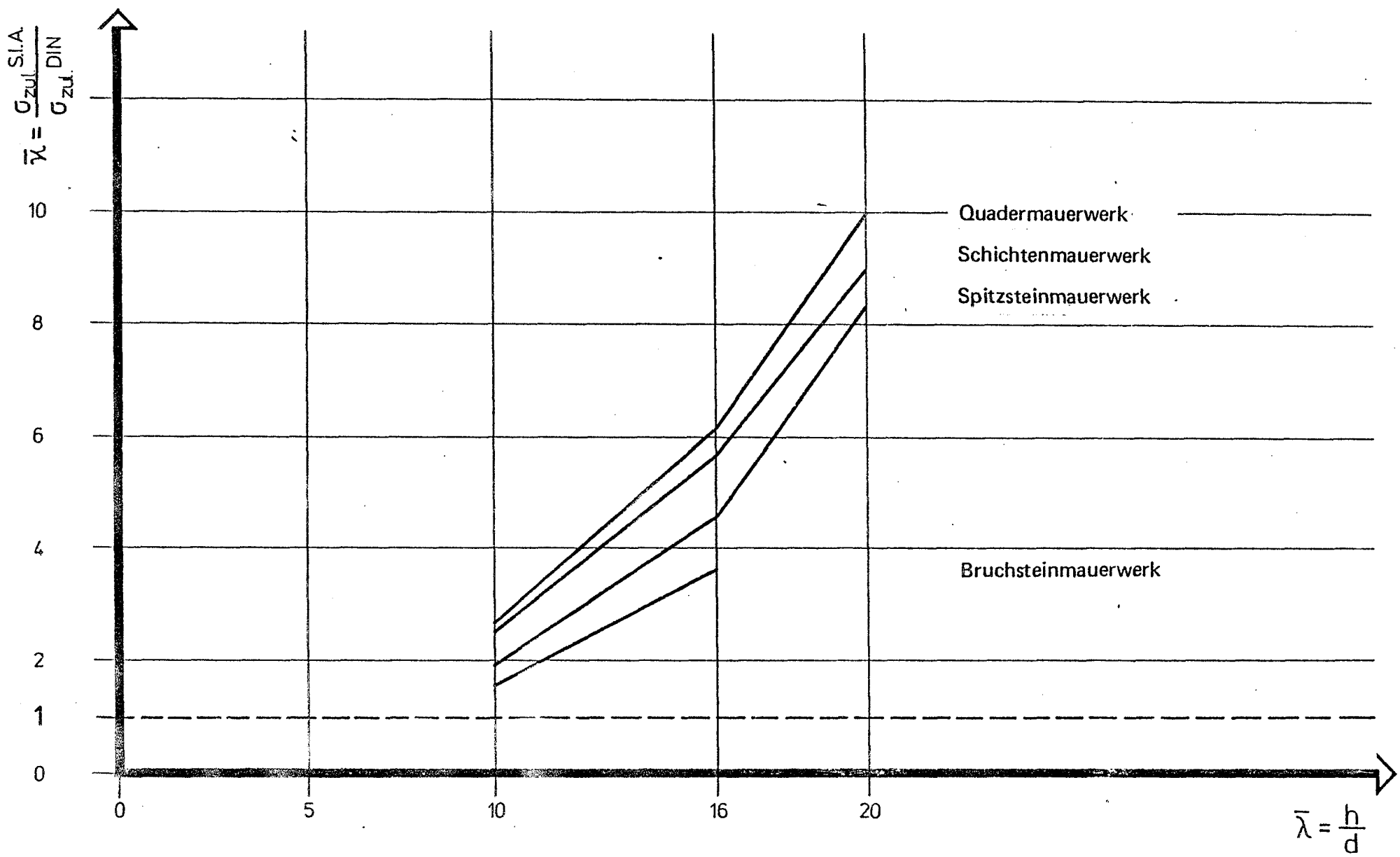
TAFEL 33: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung

Versuchsreihe 7 – MG II

Würfelprüfkörper : $W(L)/2$



TAFEL 34: Spannungs-Dehnungs-Linie bei Druckbeanspruchung
Versuchsreihe 7 – MG II
Würfelprüfkörper : W (M)/1



TAFEL 35: Graphische Auswertung der vergleichenden Betrachtung zwischen der schweizer Norm S.I.A. 178 und der deutschen DIN 1053, Blatt 1 hier: Steinkategorie II, Zementmörtel C nach S.I.A. 178 bzw. Gesteinsgruppe E, Mörtelgruppe III nach DIN 1053, Blatt 1

7.3. Verzeichnis der Bilder

- Bilder 1 bis 4 Übersicht der verwendeten Mörtel-,
Würfel- und Säulenkörper
- Bild 5 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus
- Bilder 6 bis 30 Ausschnittweise Dokumentation der ver-
wendeten Prüfkörper während bzw. nach
Beendigung der Druckprüfung im Labor
- Bilder 31 bis 36 Gesamtansichten und Detailaufnahmen der
Burg Eppstein/Taunus
- Bilder 37 bis 39 Gesamtansicht und Detailaufnahmen der
Burg Schönecken/Eifel
- Bilder 40 bis 47 Gesamtansicht und Detailaufnahmen der
Burg Rheinfels/St.Goar
- Bilder 48 Isometrie und Grundriß einer tragenden
Außenschale eines zweischaligen Burch-
steinmauerwerks
- Bilder 49 bis 53 Zusammstellung der nach DIN 1053, Blatt 1
(Bild 13 bis 17), bezeichneten Naturstein-
mauern

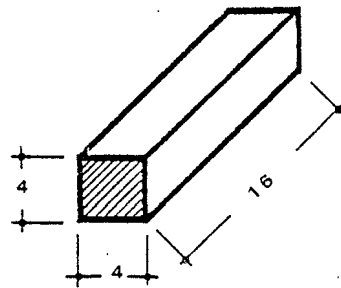
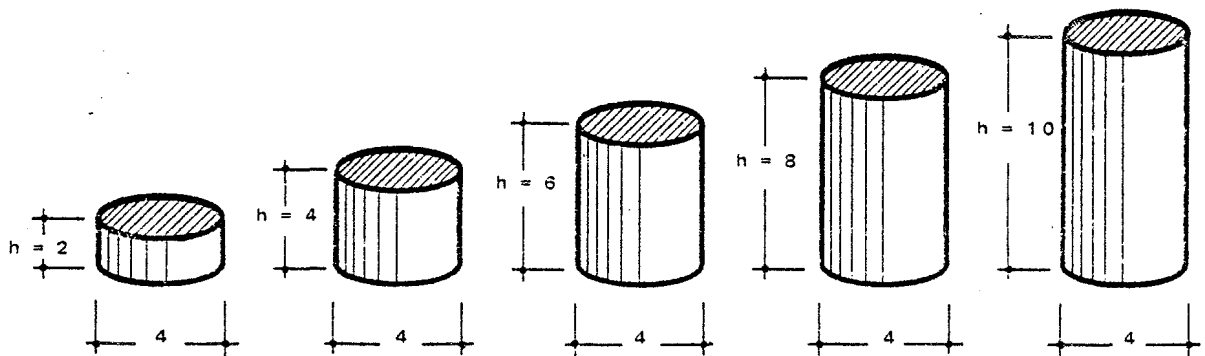
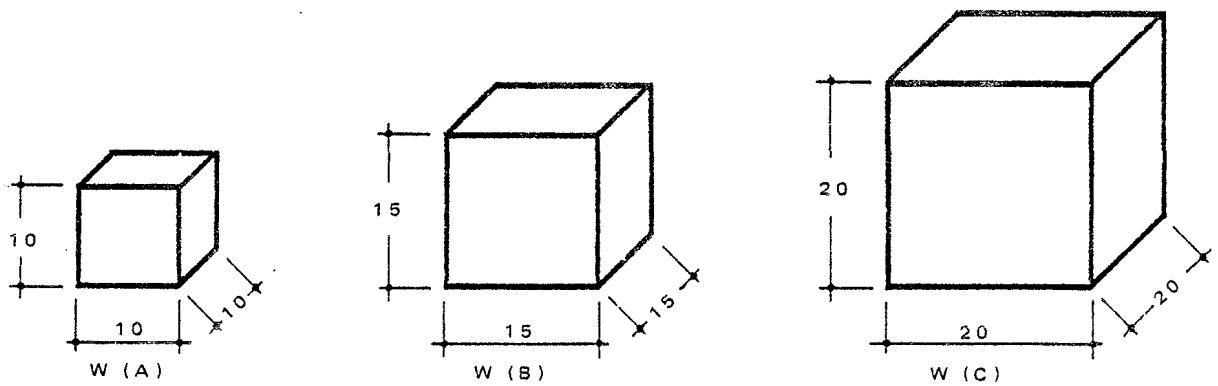


BILD 1: Prismen-Mörtelprüfkörper



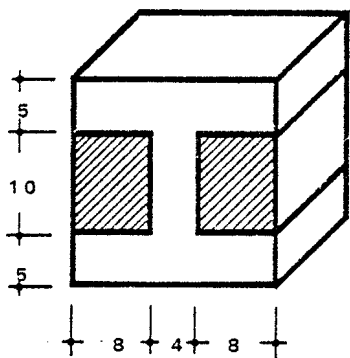
Hergestellte Höhen: 2, 4, 6, 8 und 10 cm
Hergestellte Durchmesser: 4, 8, 12, 16 und 20 cm
Bezeichnung: Z (h/d)

BILD 2: Zylinder - Mörtelprüfkörper

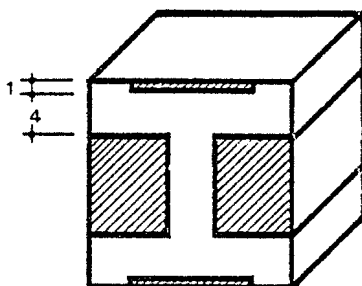


Hergestellte Kantenlängen: 10, 15 und 20 cm
Bezeichnung: W (Form)

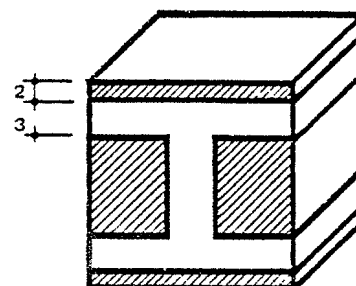
BILD 3: Würfel - Prüfkörper



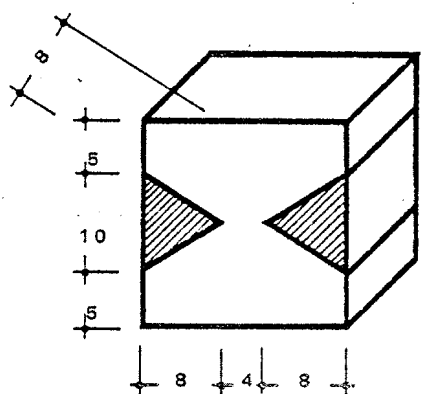
W (D), $\tan \alpha = 0$



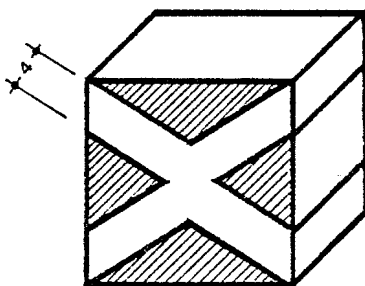
W (E), $\tan \alpha = 0$



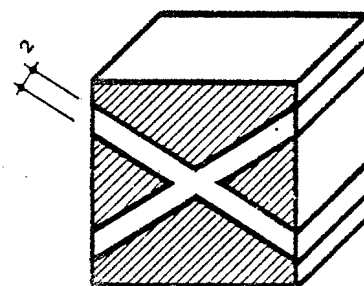
W (F), $\tan \alpha = 0$



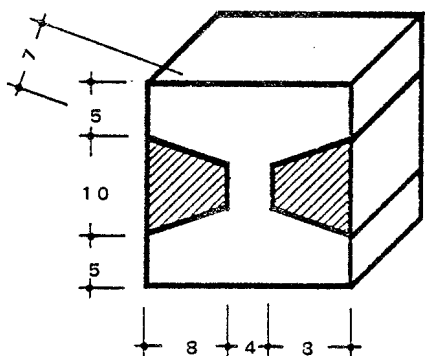
W (G), $\tan \alpha = 0,625$



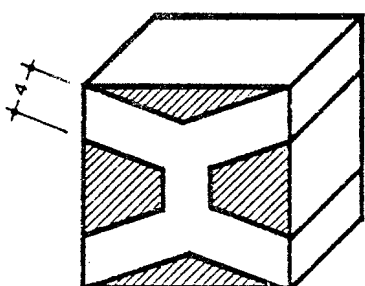
W (H), $\tan \alpha = 0,625$



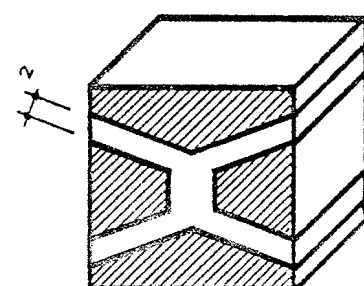
W (I), $\tan \alpha = 0,625$



W (K), $\tan \alpha = 0,375$



W (L), $\tan \alpha = 0,375$

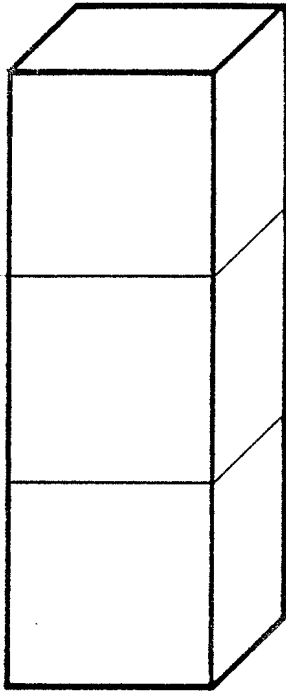


W (M), $\tan \alpha = 0,375$

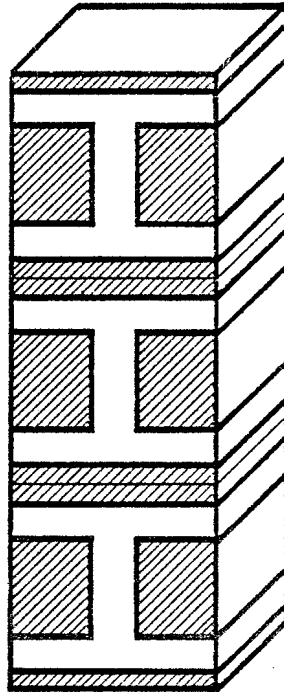
Hergestellte Kantenlänge: 20 cm x 20 cm x 20 cm

Bezeichnung: W (Form)

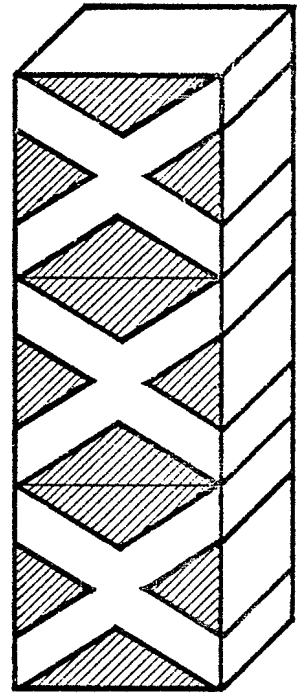
Fortsetzung BILD 3: Würfel - Prüfkörper



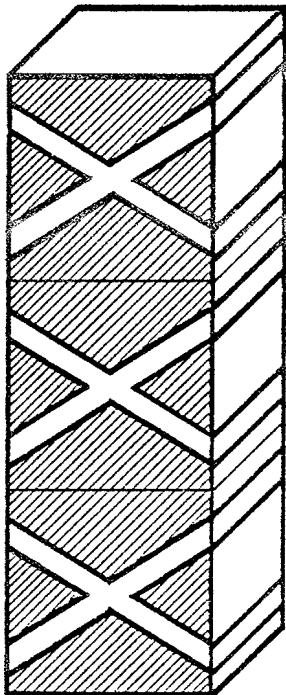
S (C)



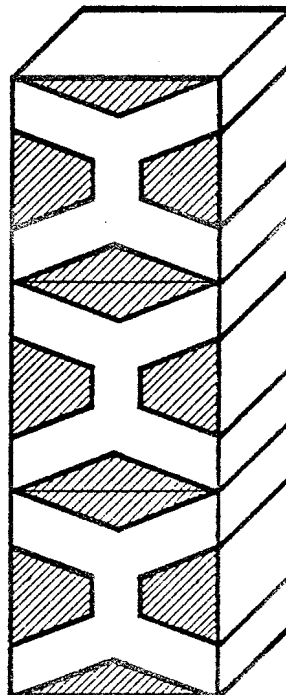
S (F)



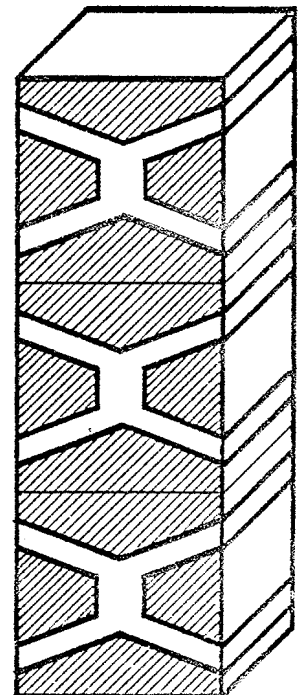
S (H)



S (J)



S (L)

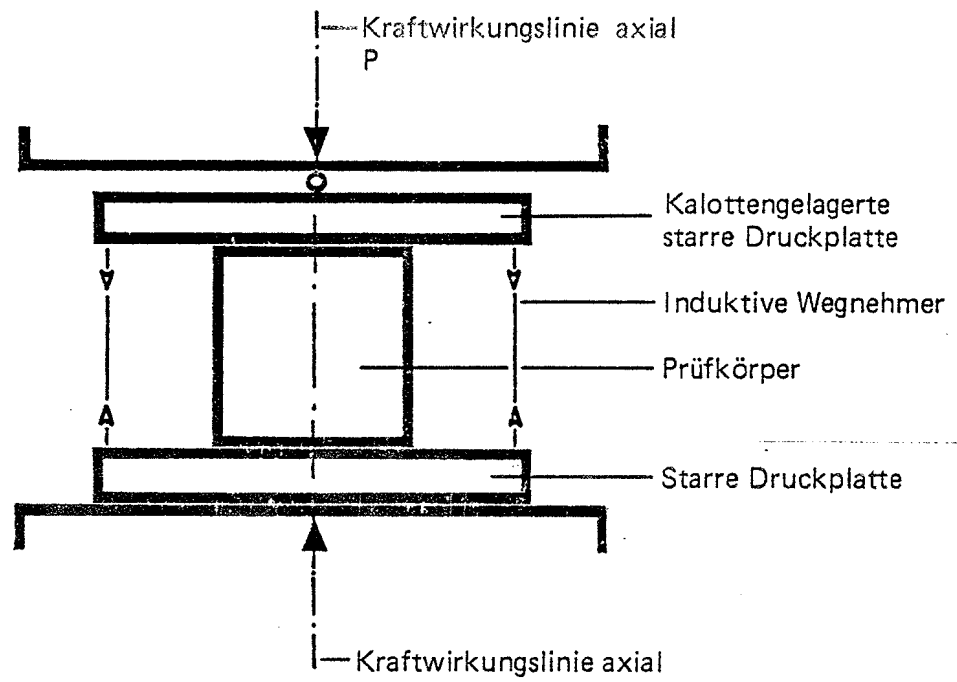


S (M)

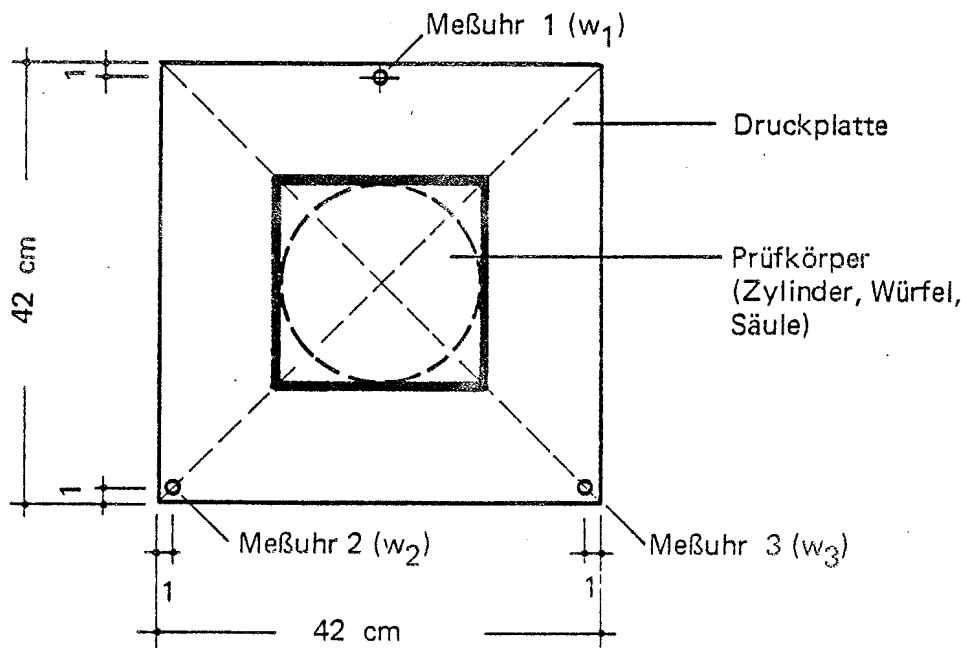
Hergestellte Kantenlänge: 20 cm x 20 cm x 60 cm ($h/b = 3$)

Bezeichnung: S (Form)

BILD 4: Säulen - Prüfkörper



Ansicht



Grundriß

BILD 5: Versuchsaufbau

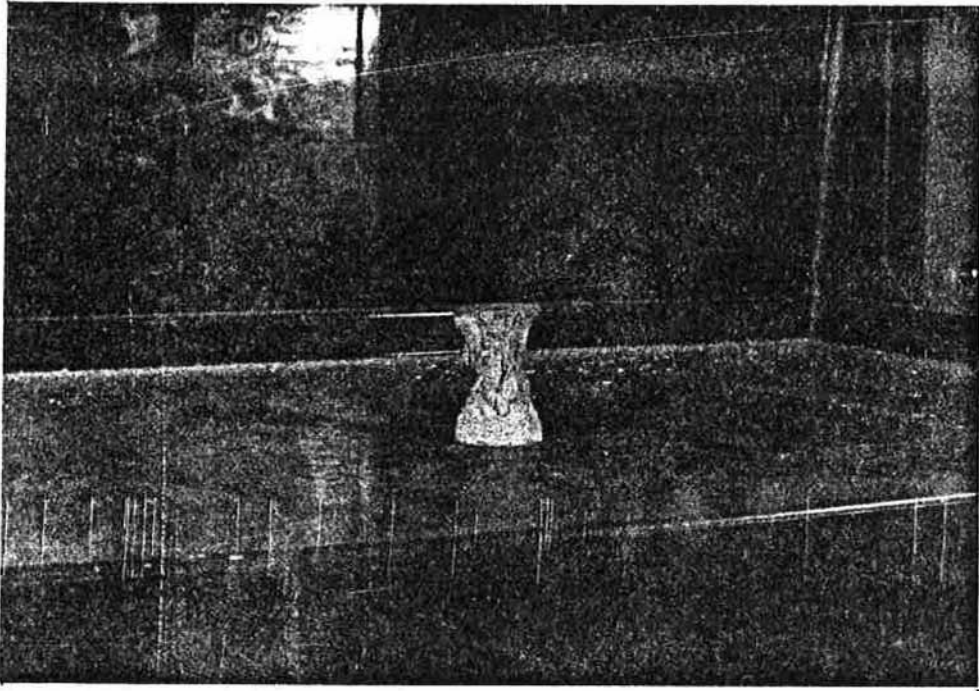


BILD 6 : Zylindrische Mörtelprüfkörper

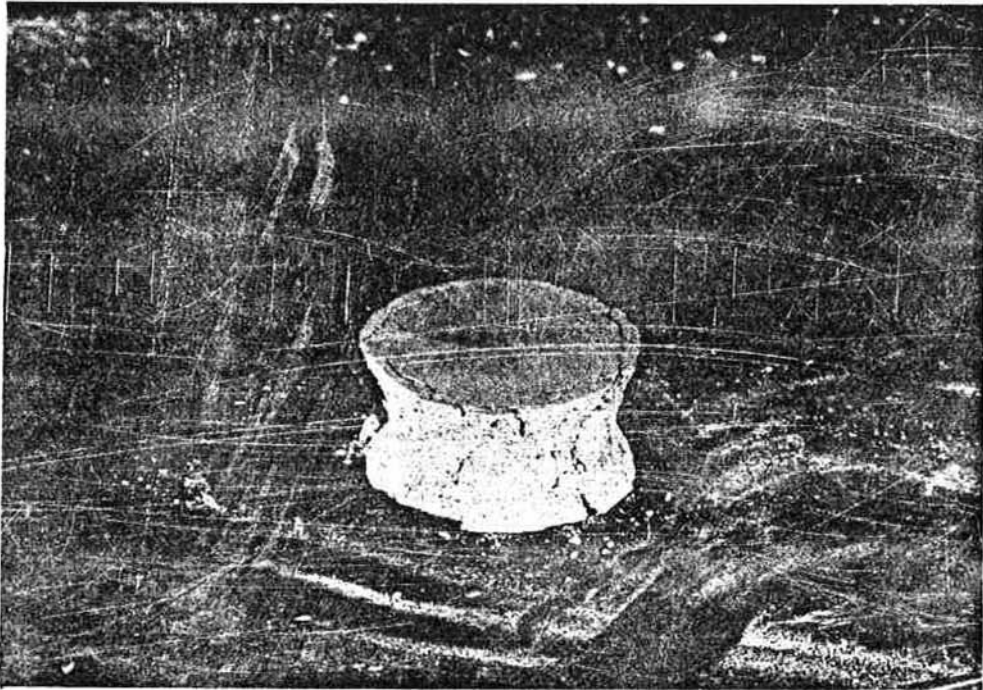


BILD 7 : Zylindrischer Mörtelprüfkörper

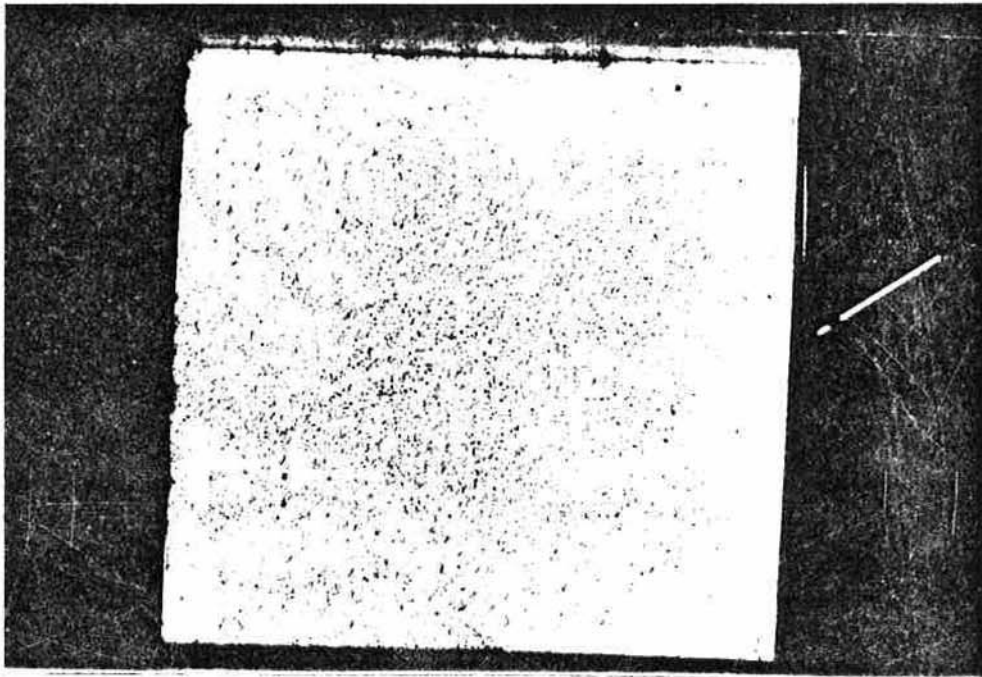


BILD 8 : Würfel - Prüfkörper W (C)

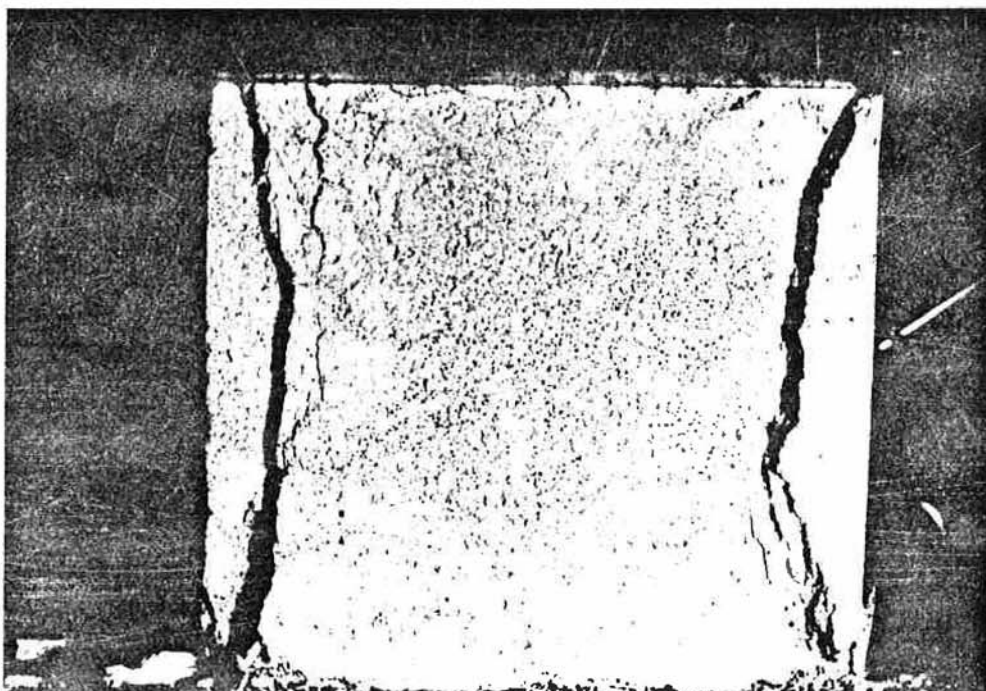


BILD 9 : Würfel - Prüfkörper W (C) während der Druckprüfung

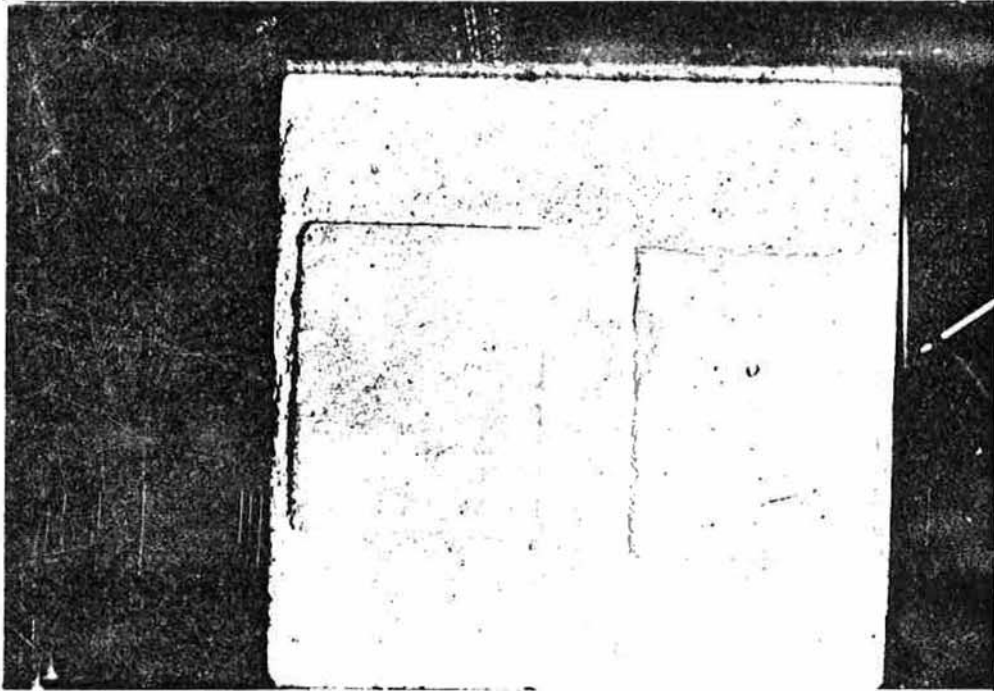


BILD 10: Würfel - Prüfkörper W (D)

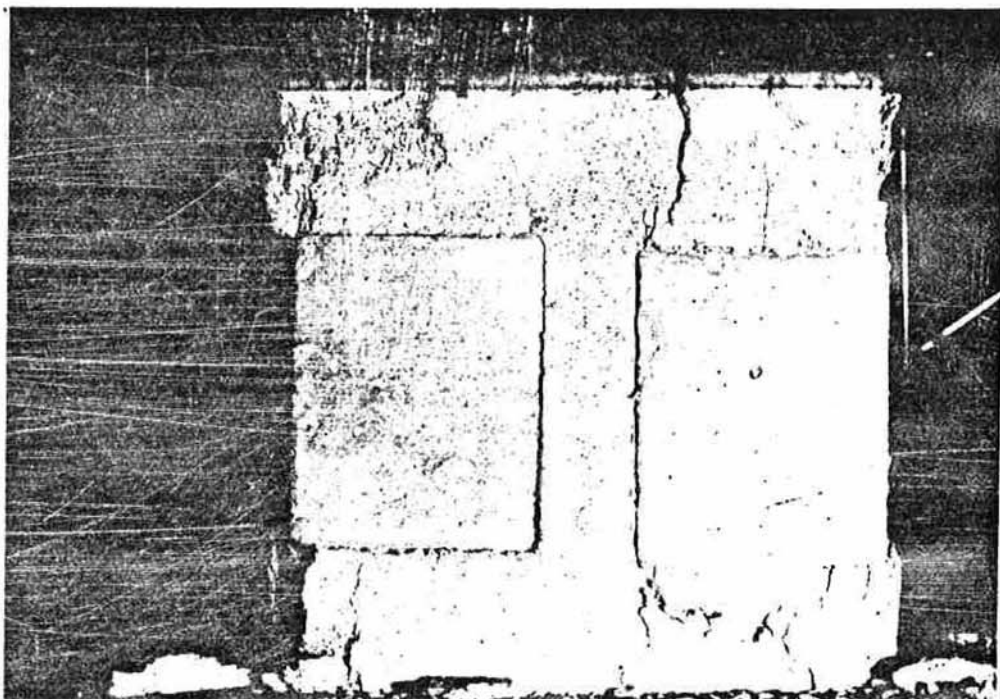


BILD 11 : Würfel - Prüfkörper W·(D) während der Druckprüfung

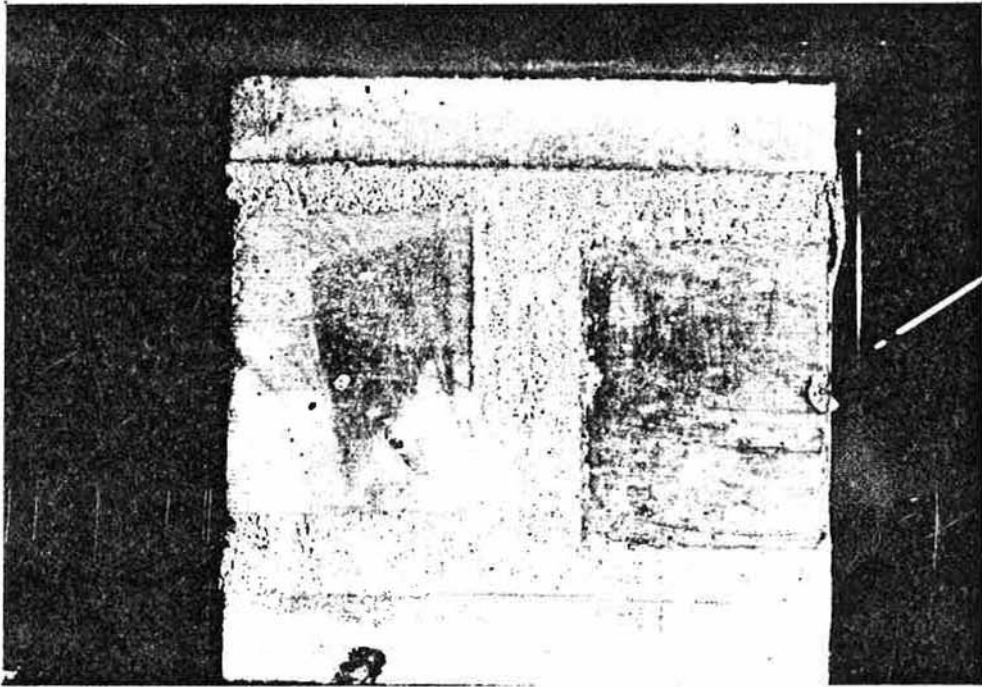


BILD 12 : Würfel - Prüfkörper W.(F)

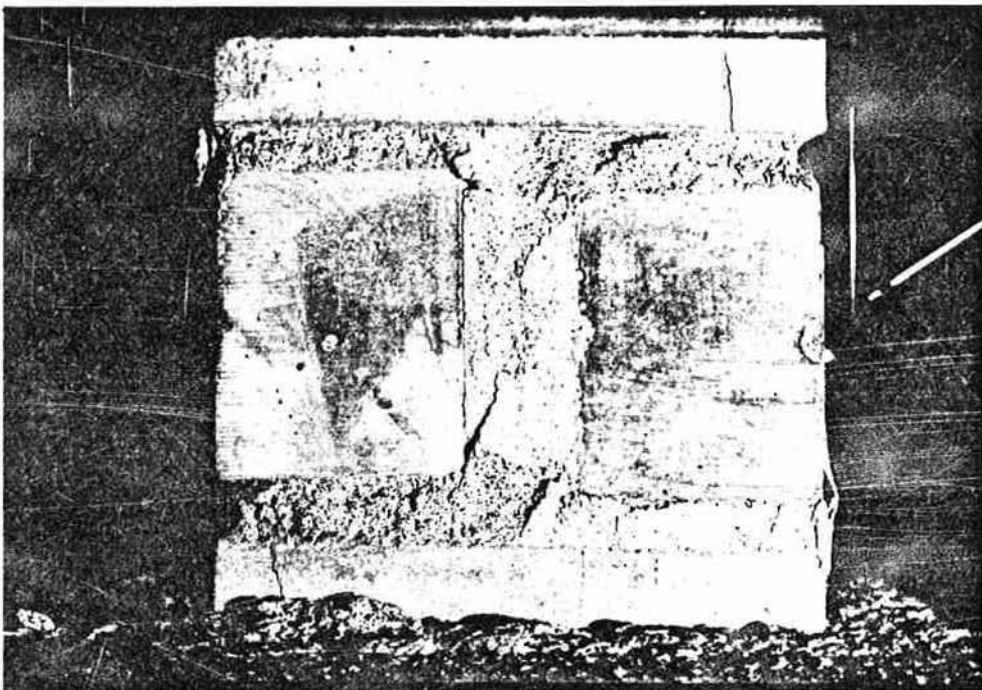


BILD 13 : Würfel - Prüfkörper W(F) während der Druckprüfung

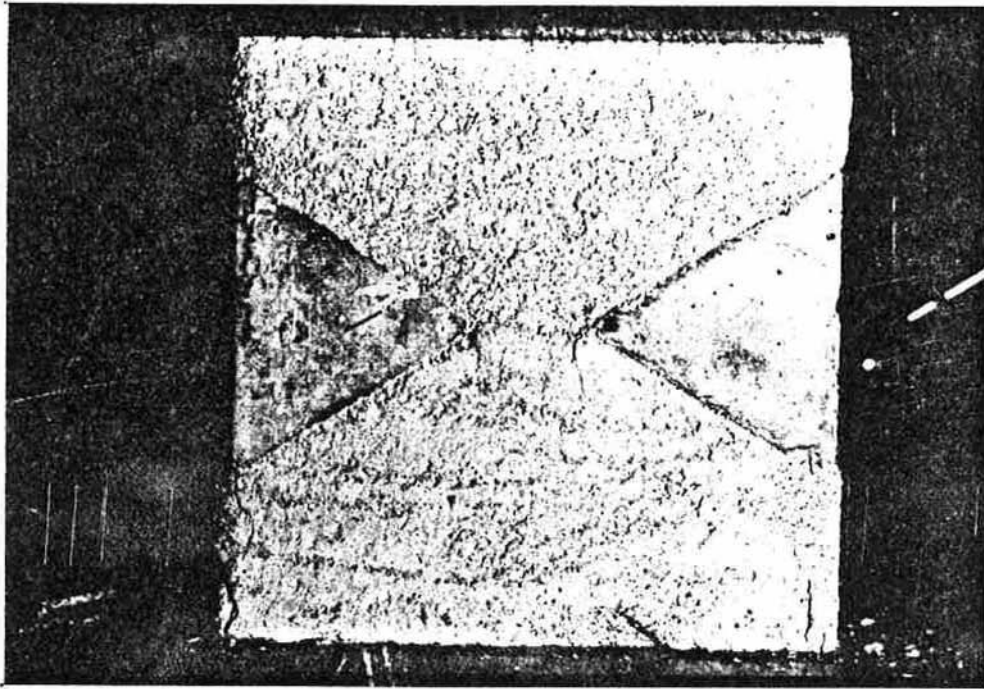


BILD 14 : Würfel - Prüfkörper W(G) während der Druckprüfung bei $P = 120 \text{ kN}$

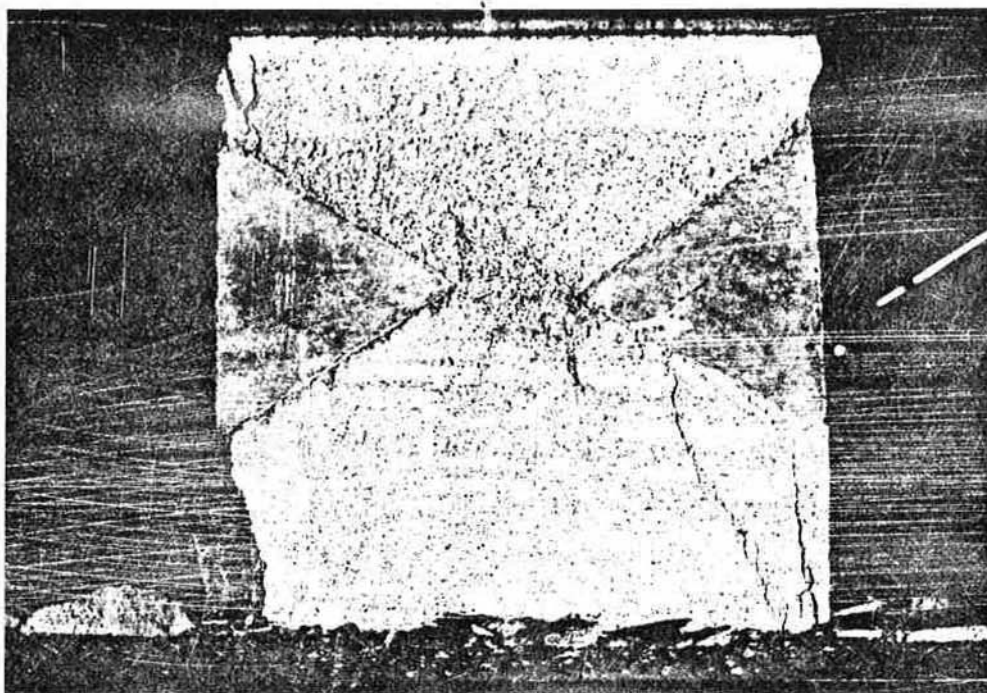


BILD 15 : Würfel - Prüfkörper W (G) während der Druckprüfung bei $P = 150 \text{ kN}$

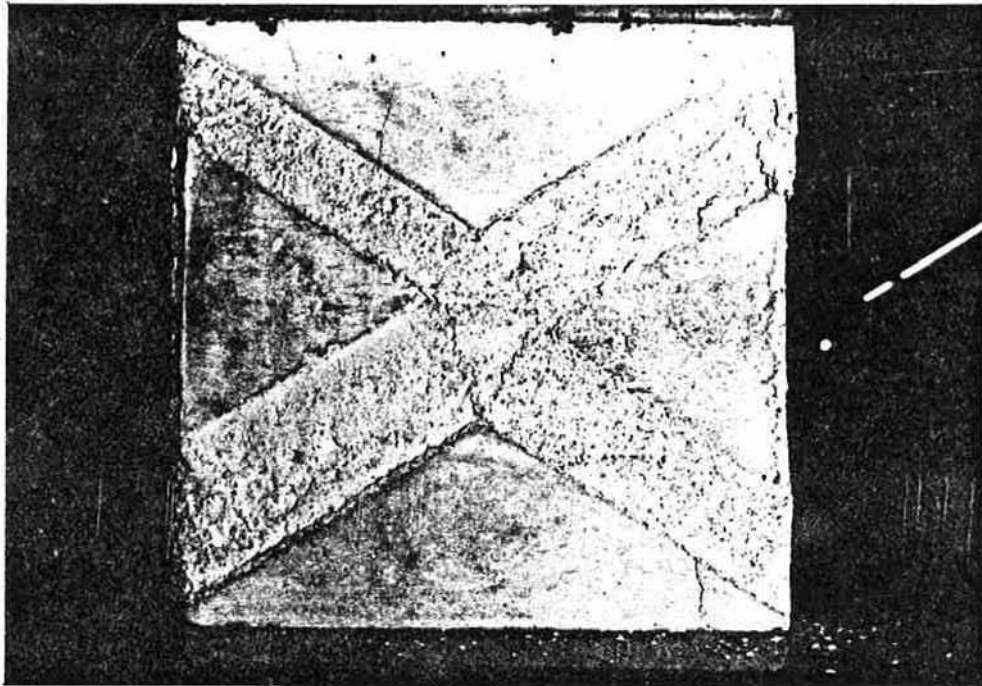


BILD 16 : Würfel-Prüfkörper W (H) während der Druckprüfung bei $P = 150 \text{ kN}$

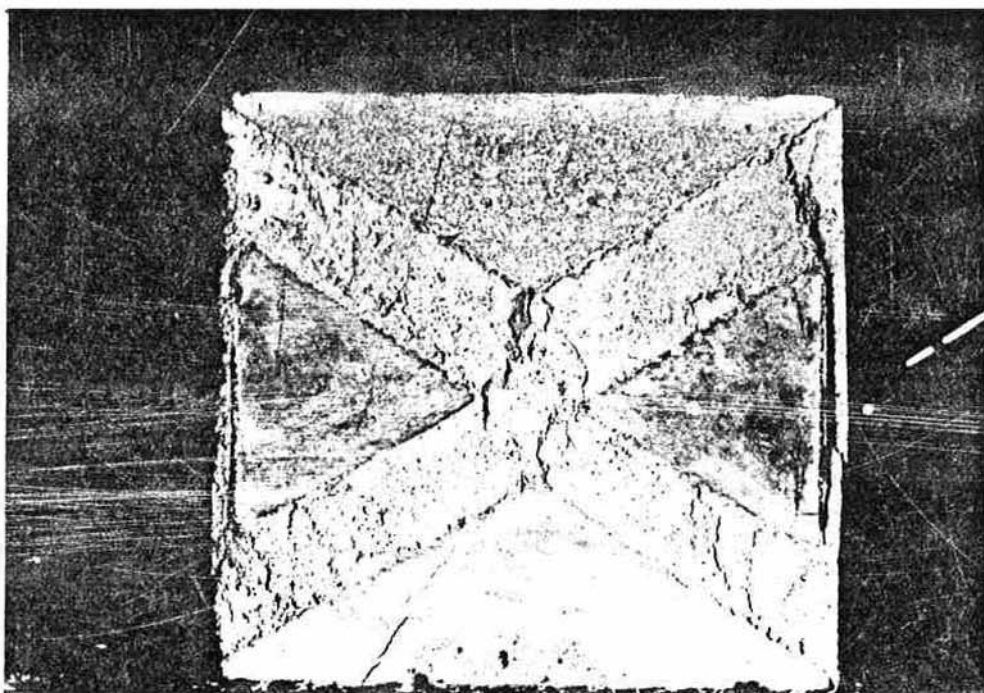


BILD 17 : Würfel - Prüfkörper W (H) während der Druckprüfung bei $P = 190 \text{ kN}$

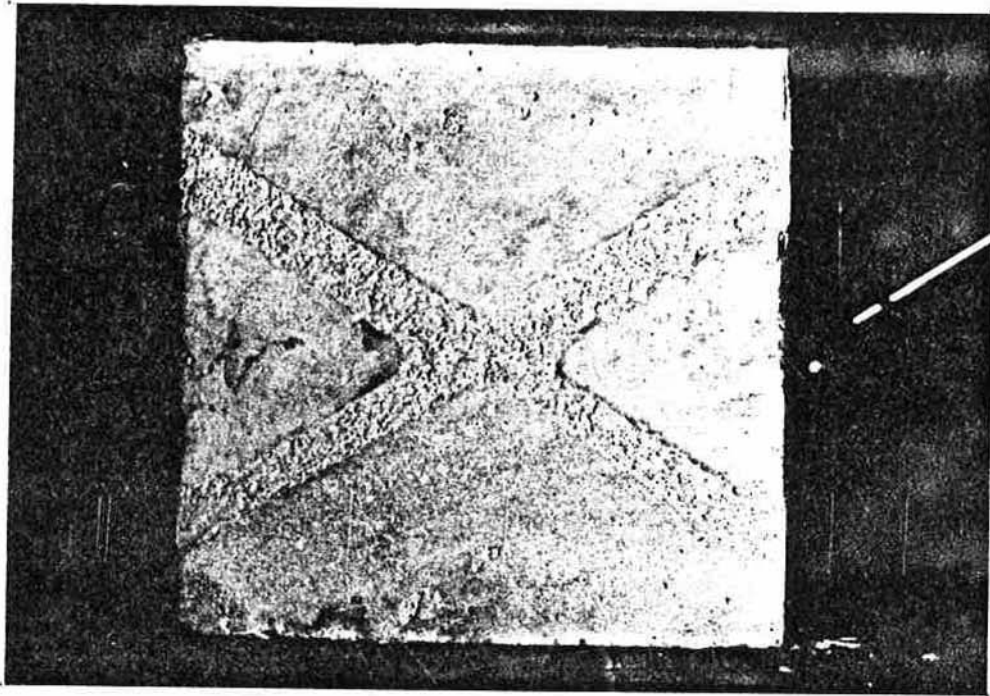


BILD 18 : Würfel - Prüfkörper W (J)

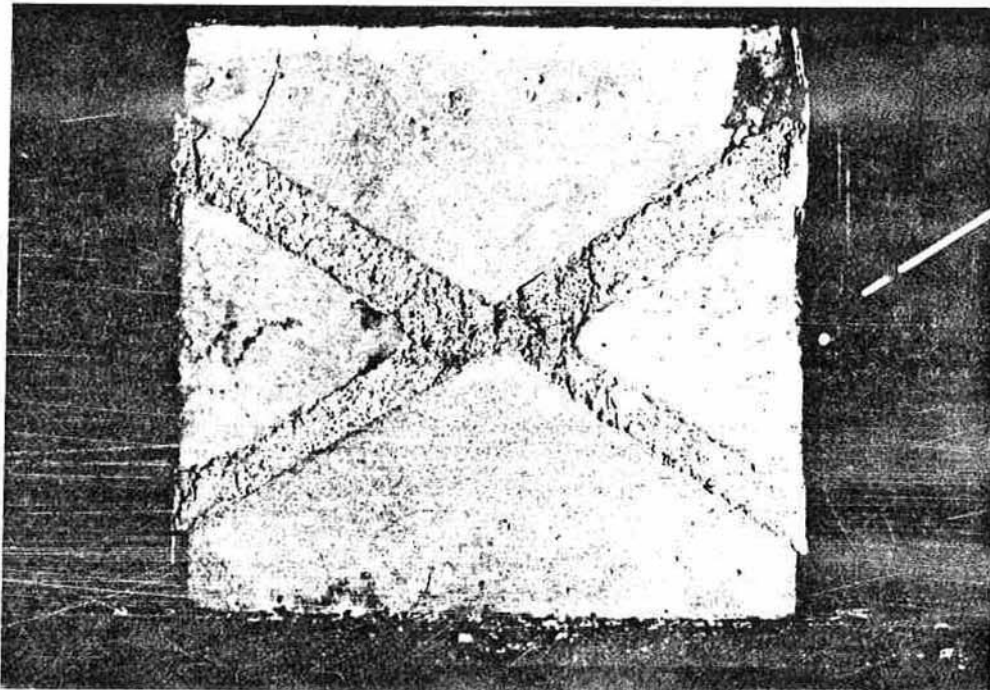


BILD 19 : Würfel - Prüfkörper W (J) während der Druckprüfung

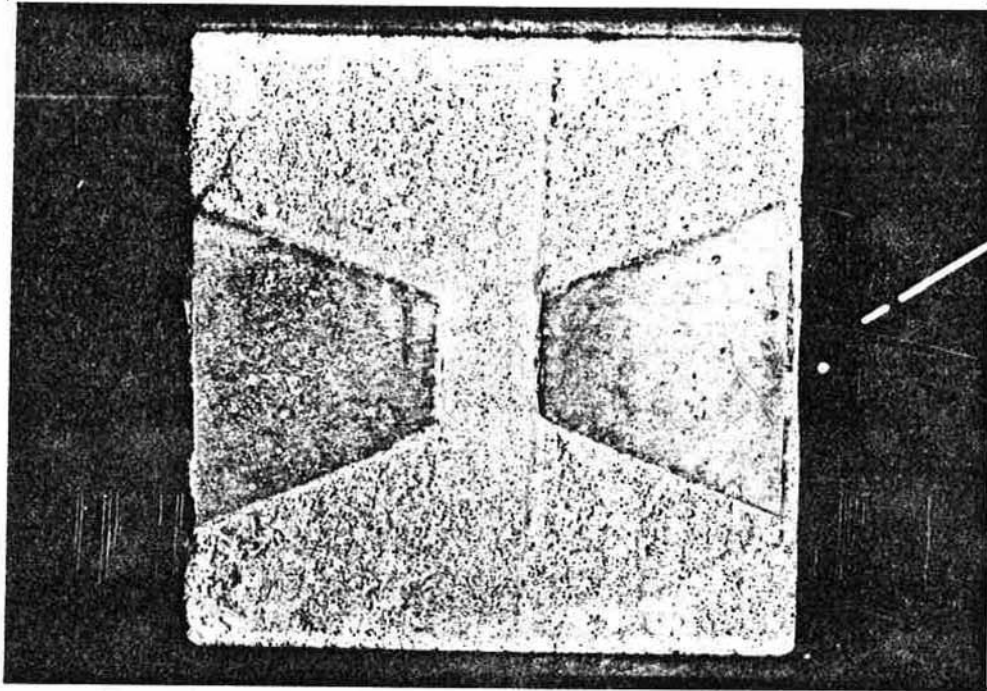


BILD 20 : Würfel - Prüfkörper W (K)

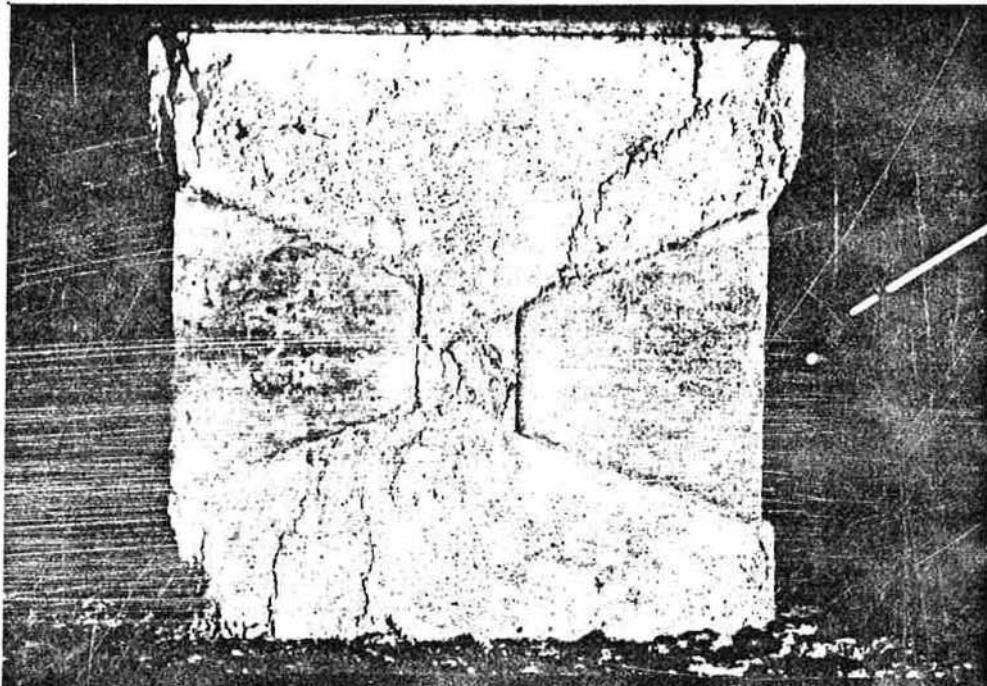


BILD 21 : Würfel - Prüfkörper W (K) während der Druckprüfung

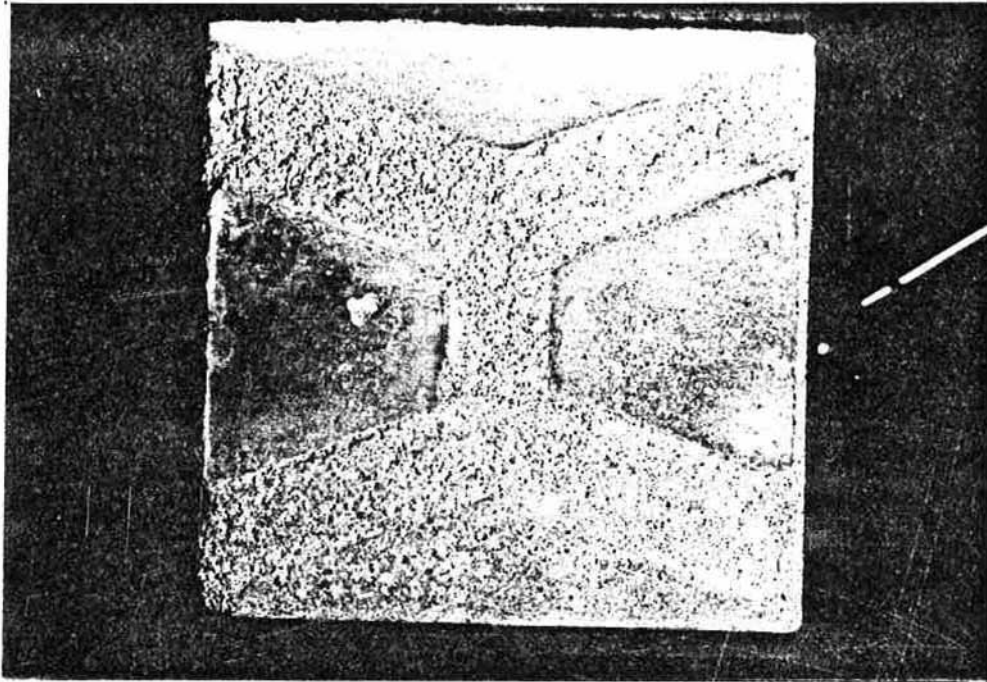


BILD 22 : Würfel - Prüfkörper W (L)

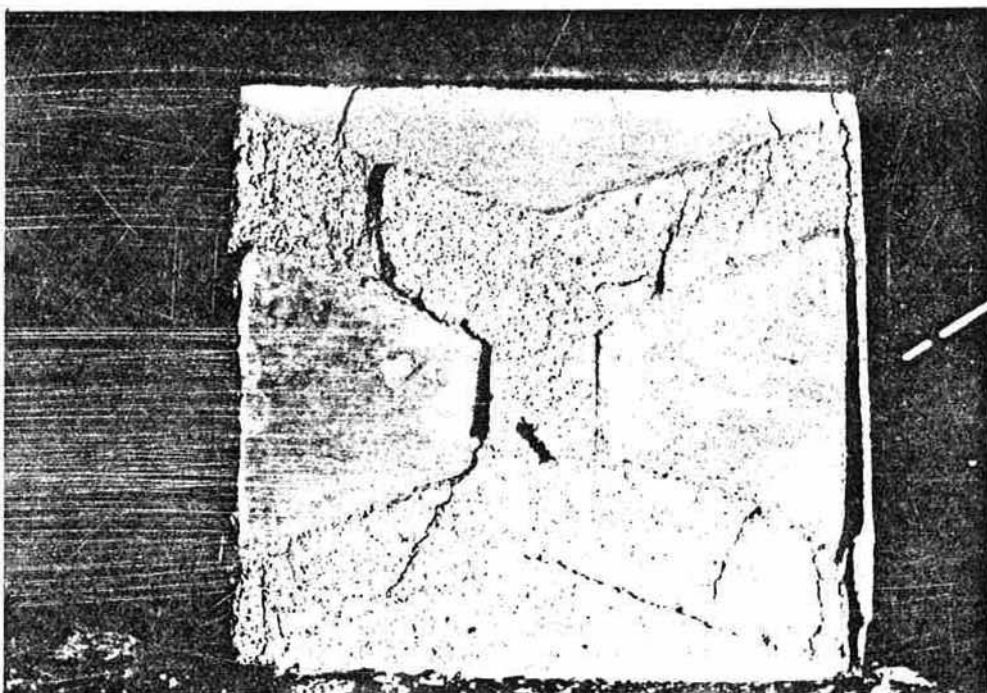


BILD 23 : Würfel - Prüfkörper W (L) während der Druckprüfung

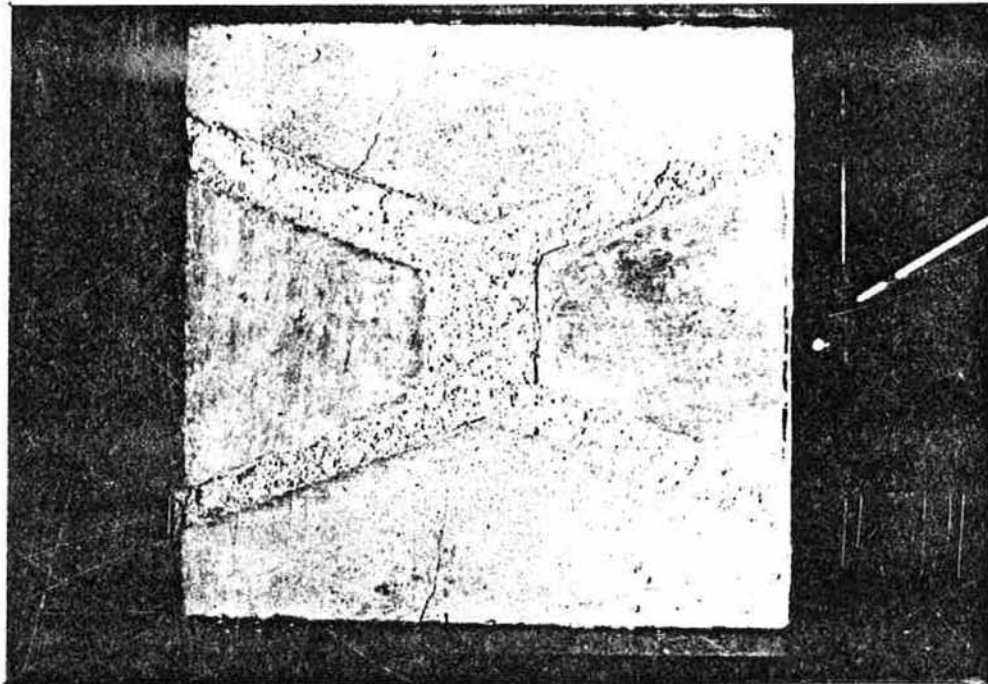


BILD 24 : Würfel - Prüfkörper W (M) während der Druckprüfung

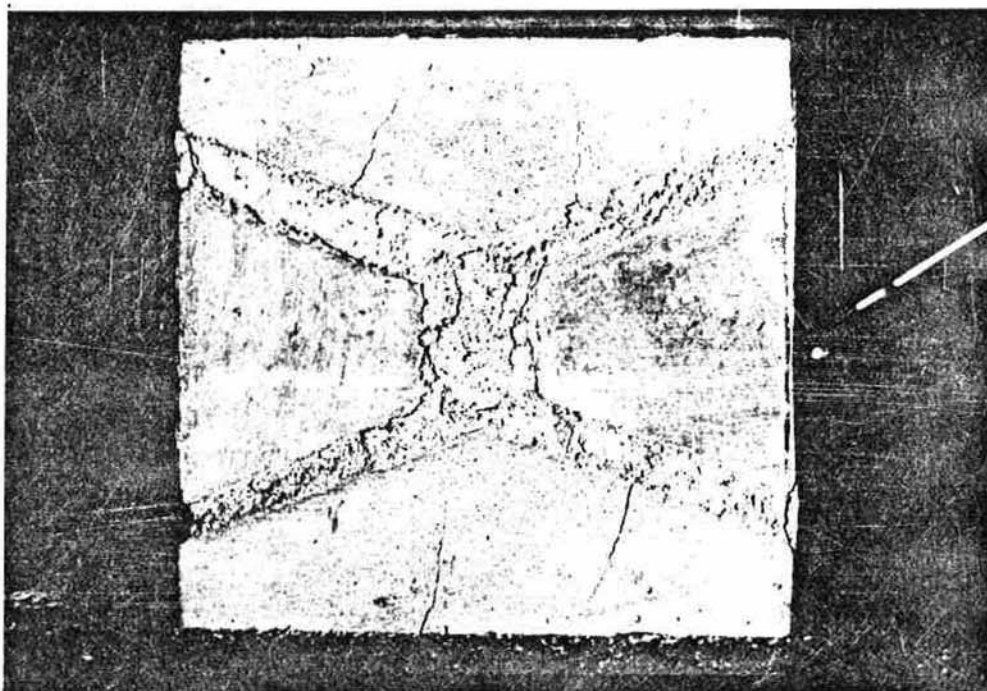


BILD 25 : Würfel - Prüfkörper W (M) während der Druckprüfung

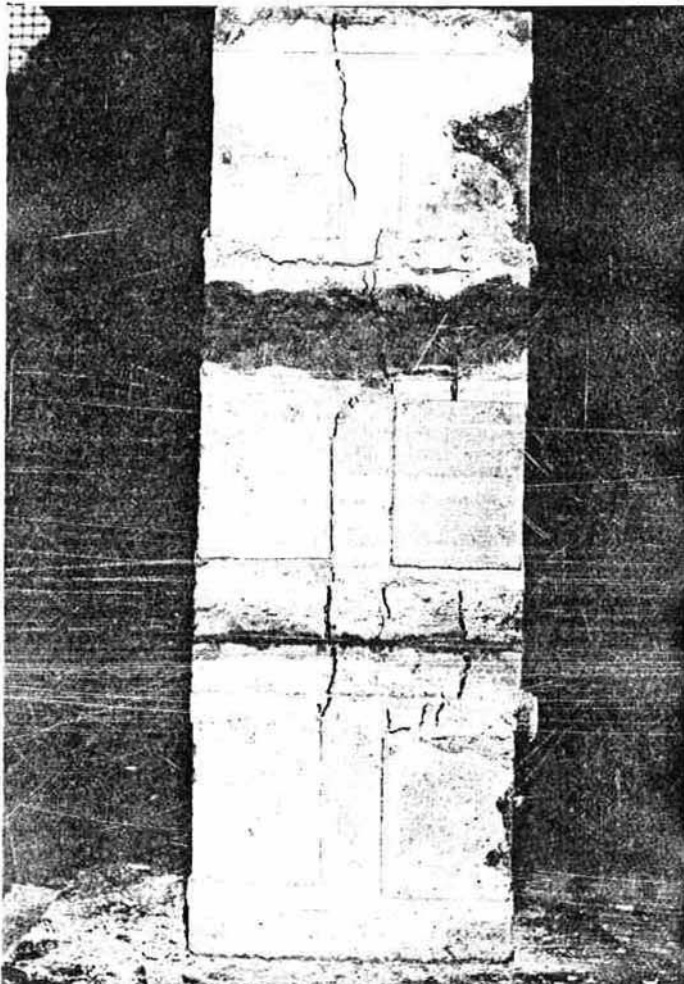
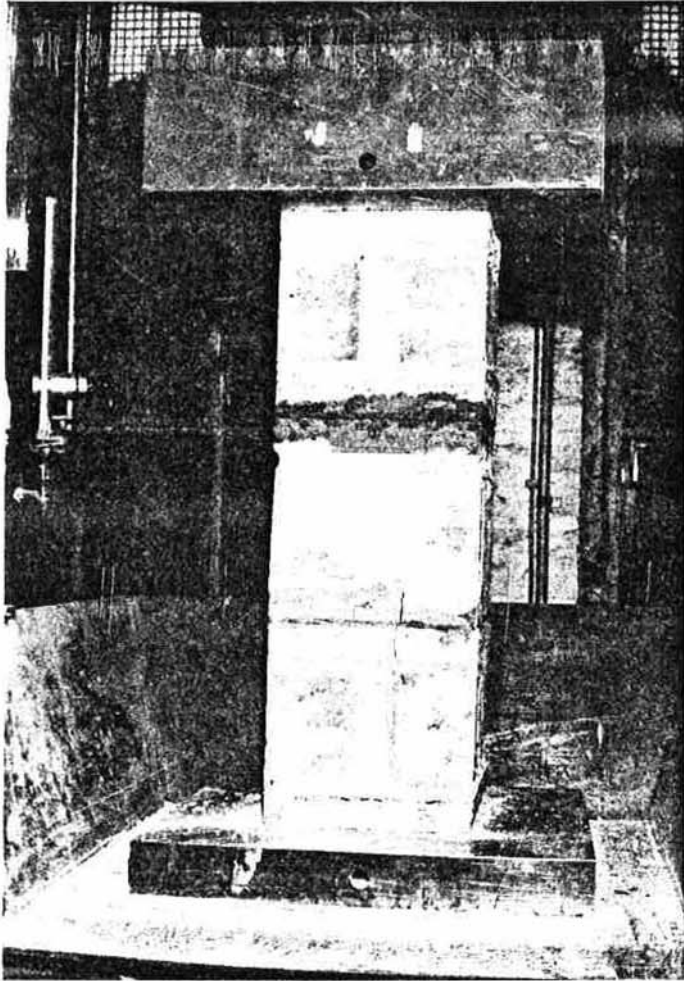


BILD 26:

BILD 27:

Säulen - Prüfkörper S (F)

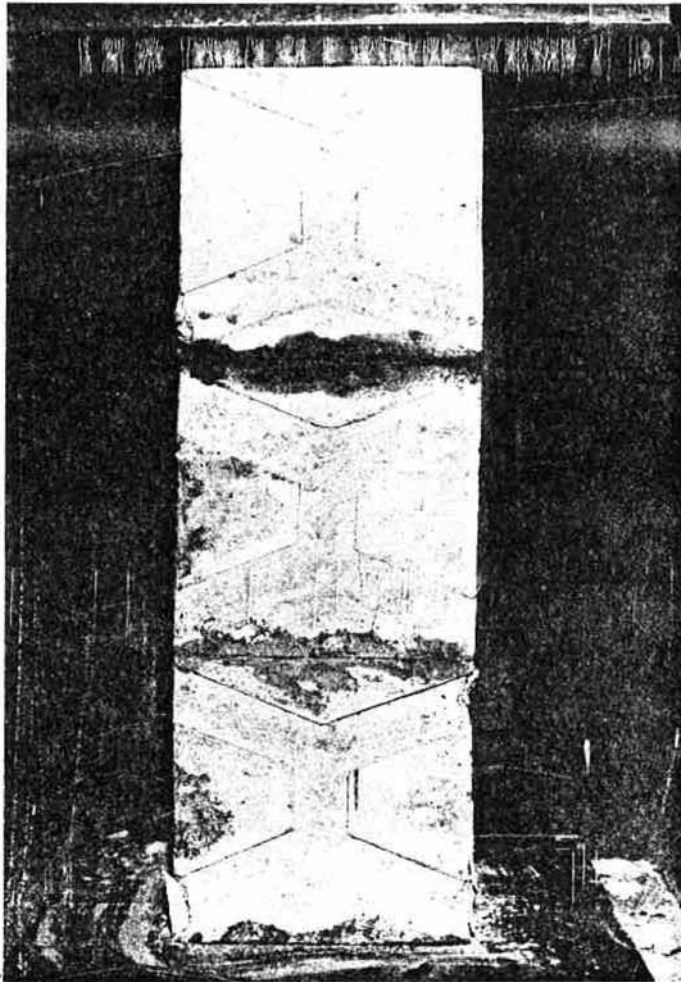


BILD 28 :
Säulen - Prüfkörper S (J)

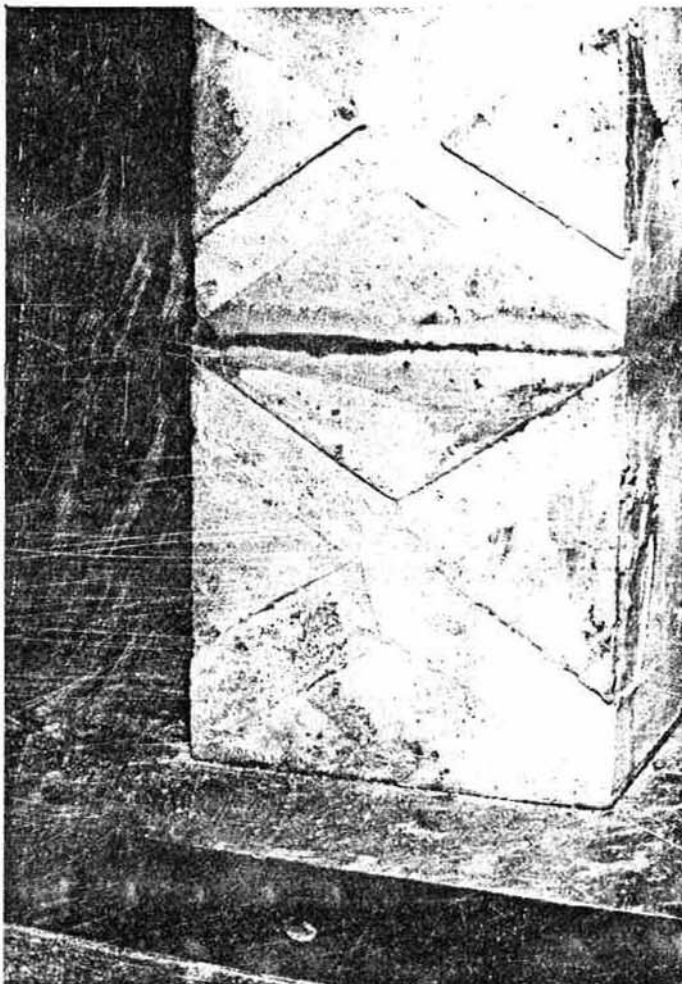


BILD 29 :
Säulen - Prüfkörper S (L)

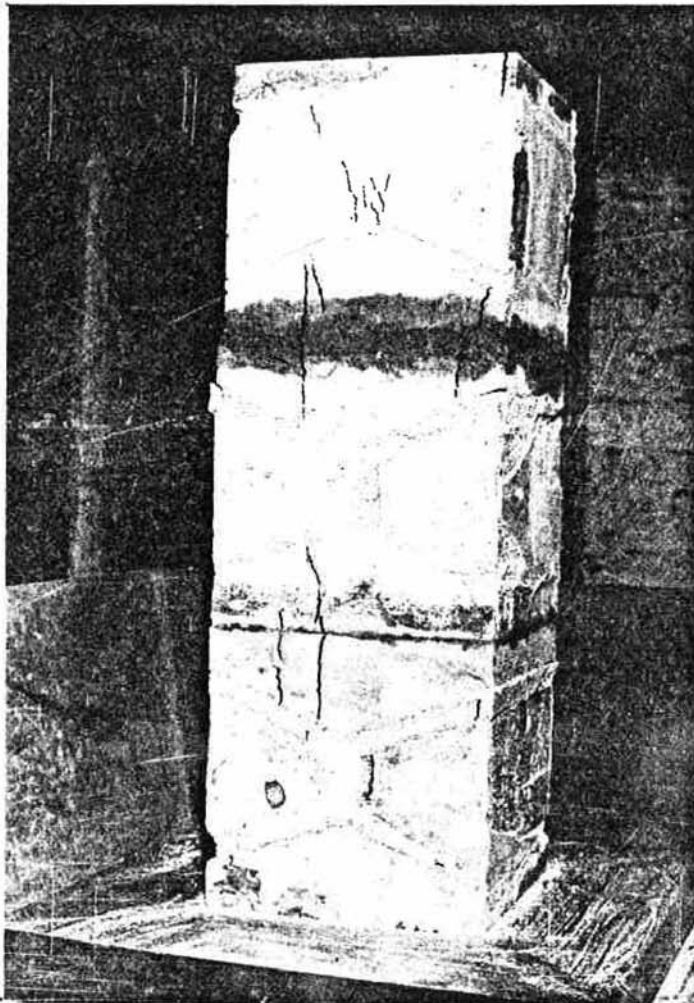


BILD 30 :

Säulen - Prüfkörper S (M)

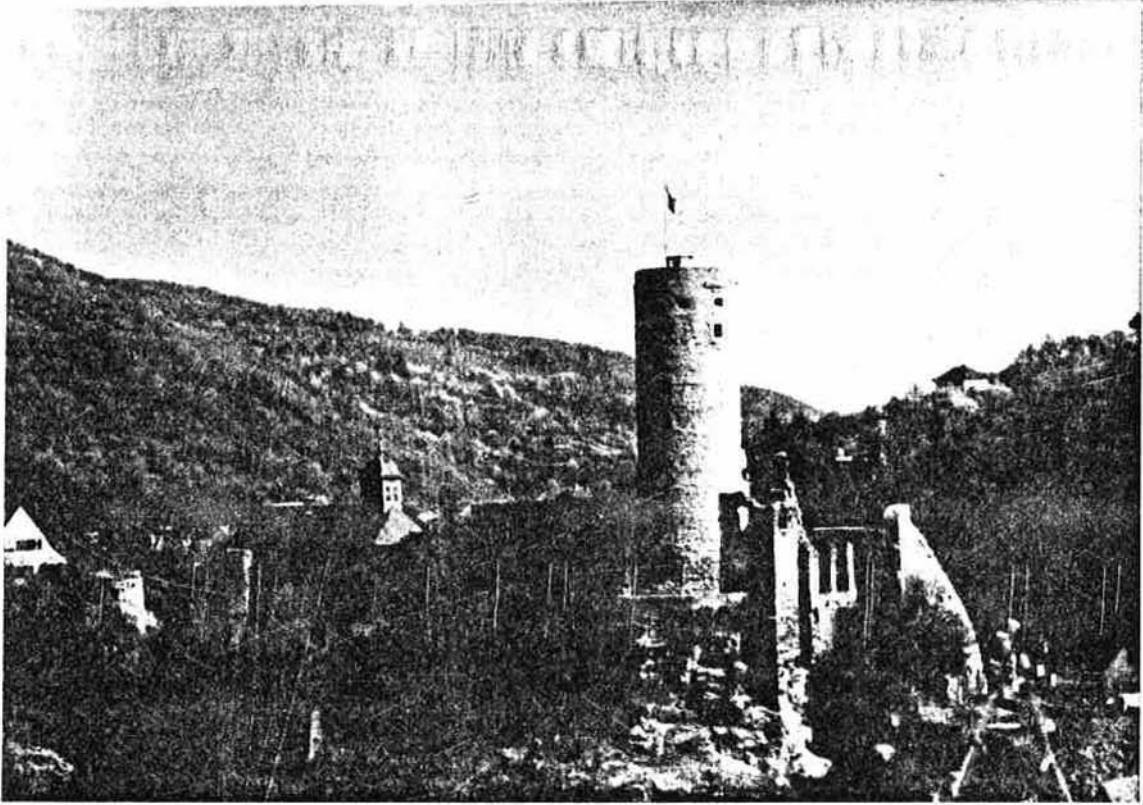


BILD 31 : Burg Eppstein – Gesamtansicht von Südwesten



BILD 32 : Burg Eppstein – Burgtor zum Innenhof

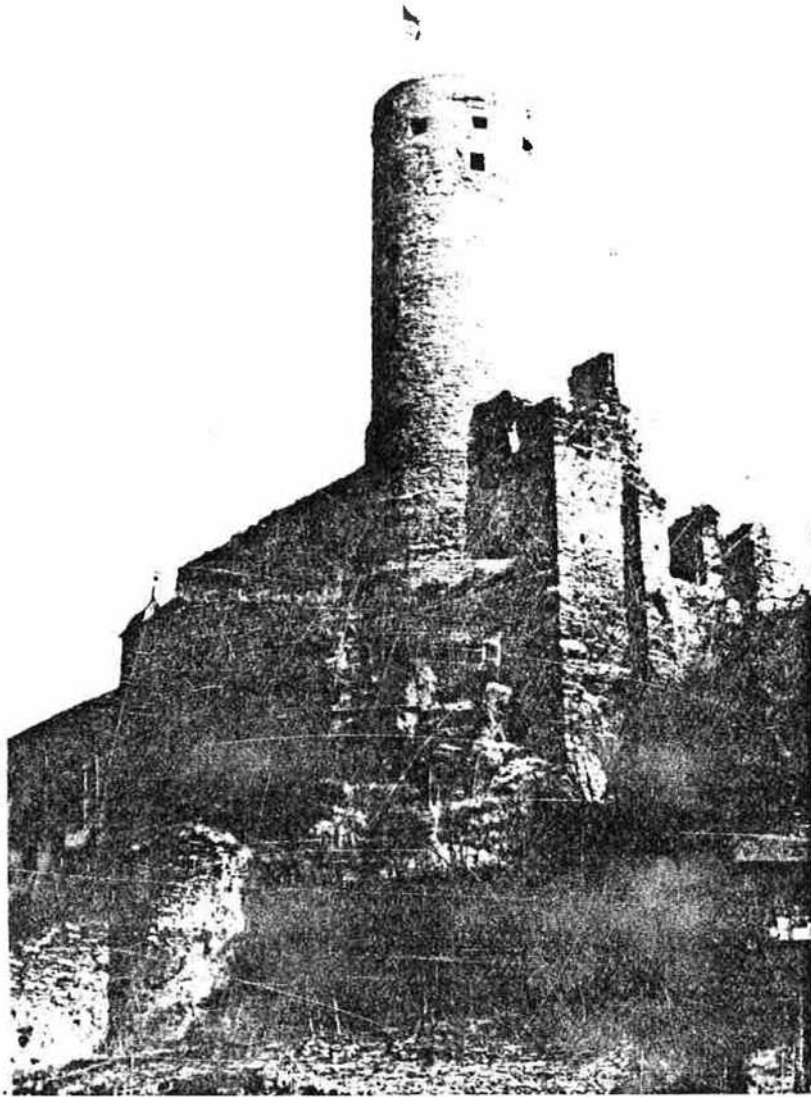


BILD 33 : Burg Eppstein – Bergfried von Südwesten

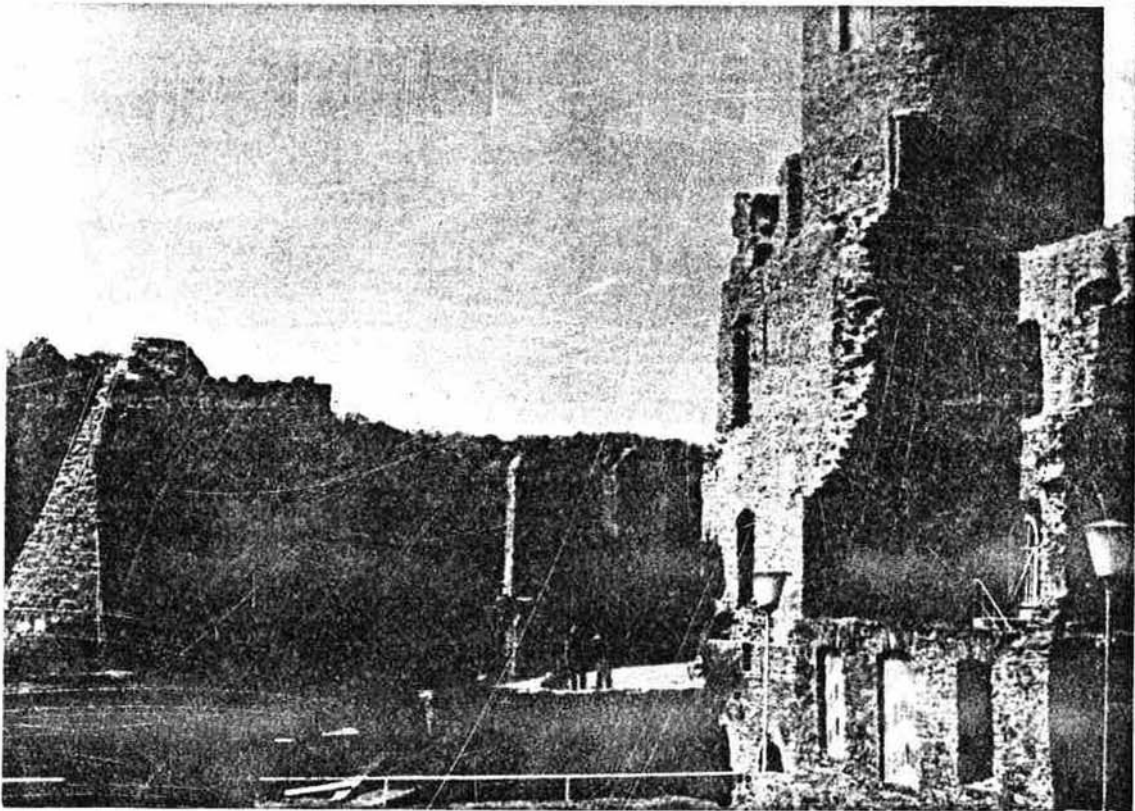


BILD 34 : Burg Eppstein – Innenhof mit Bergfried

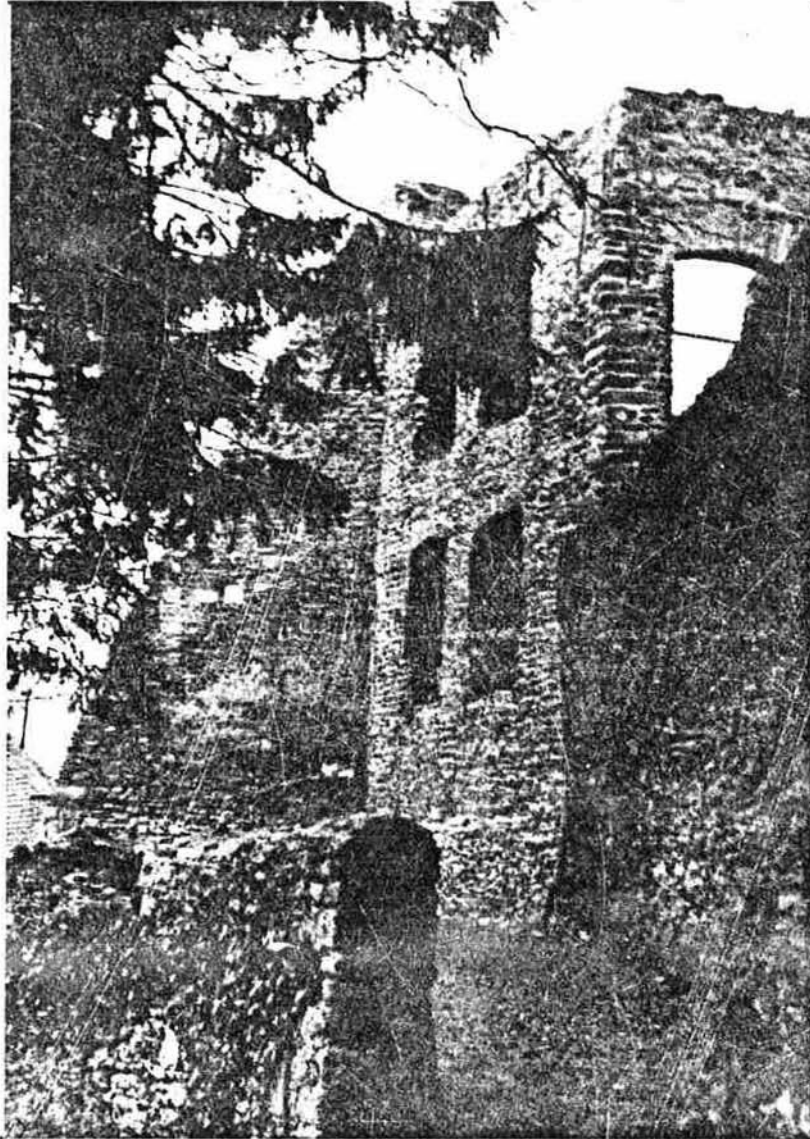


BILD 35 : Burg Eppstein – Palassüdmauer

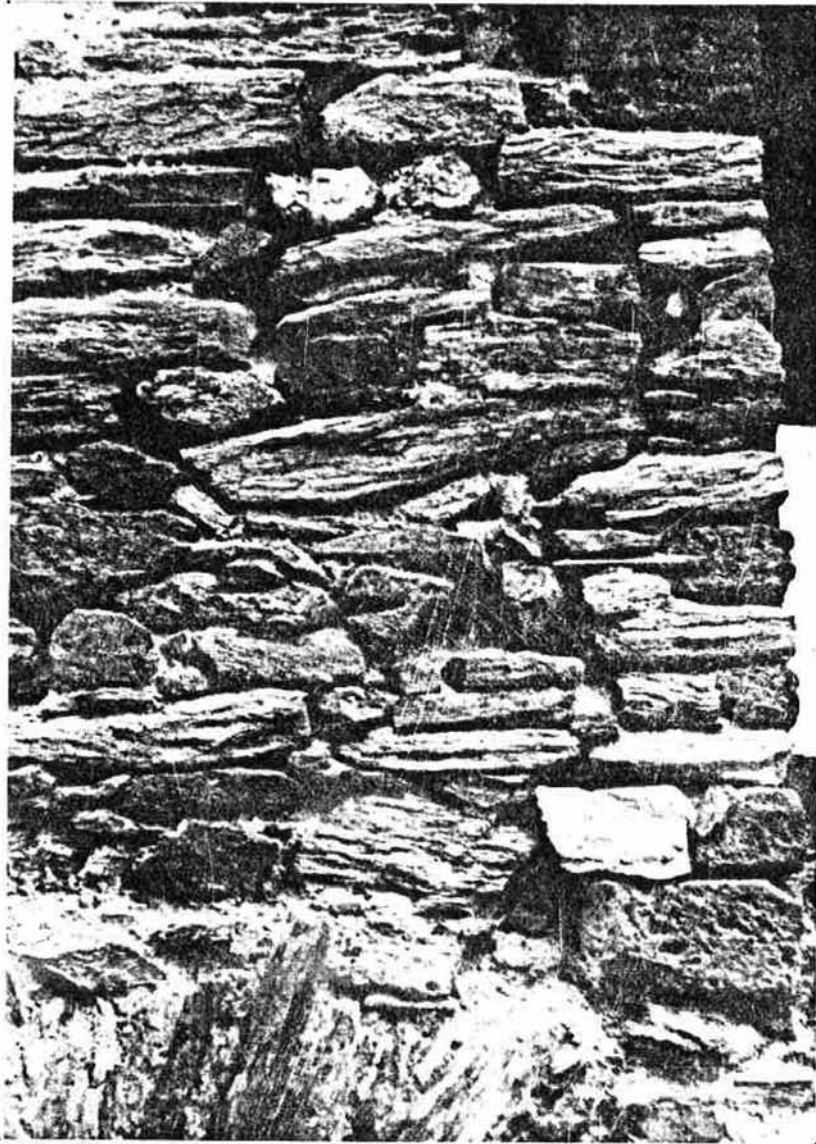


BILD 36 : Burg Eppstein – Bruchsteinmauerwerk aus Taunusquarzit

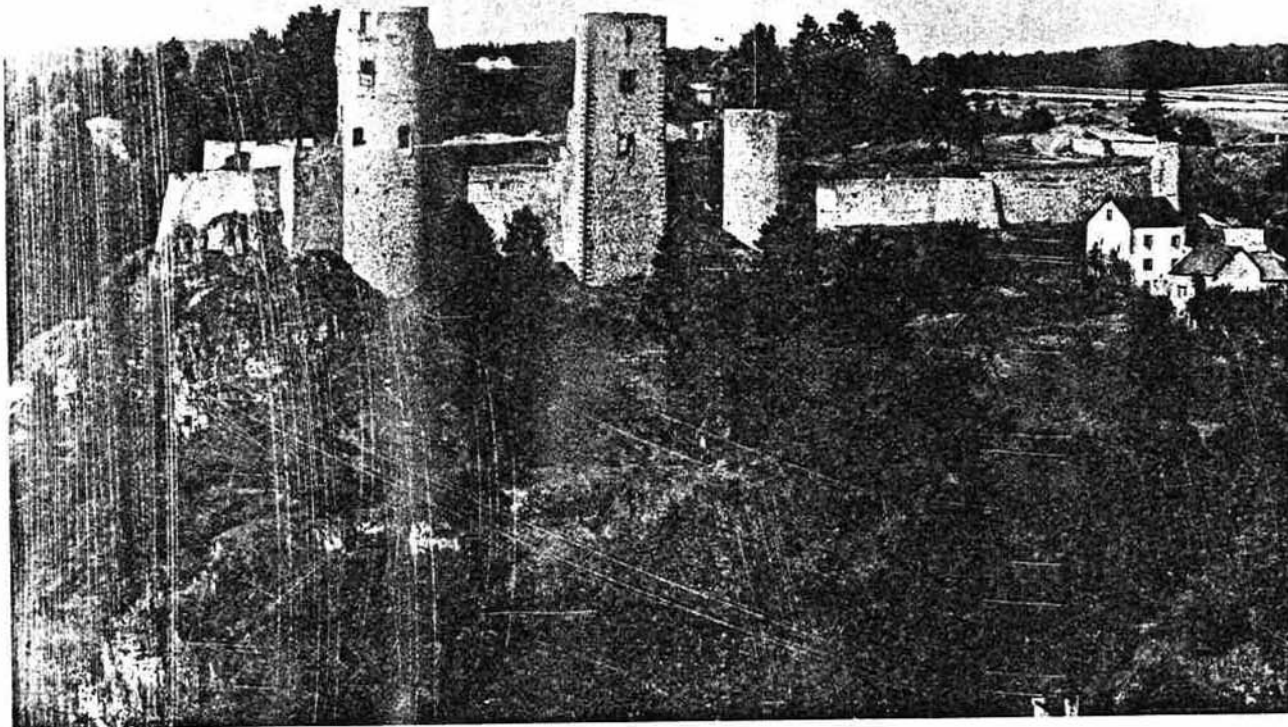


BILD 37 : Burg Schönecken – Gesamtansicht von Südwesten

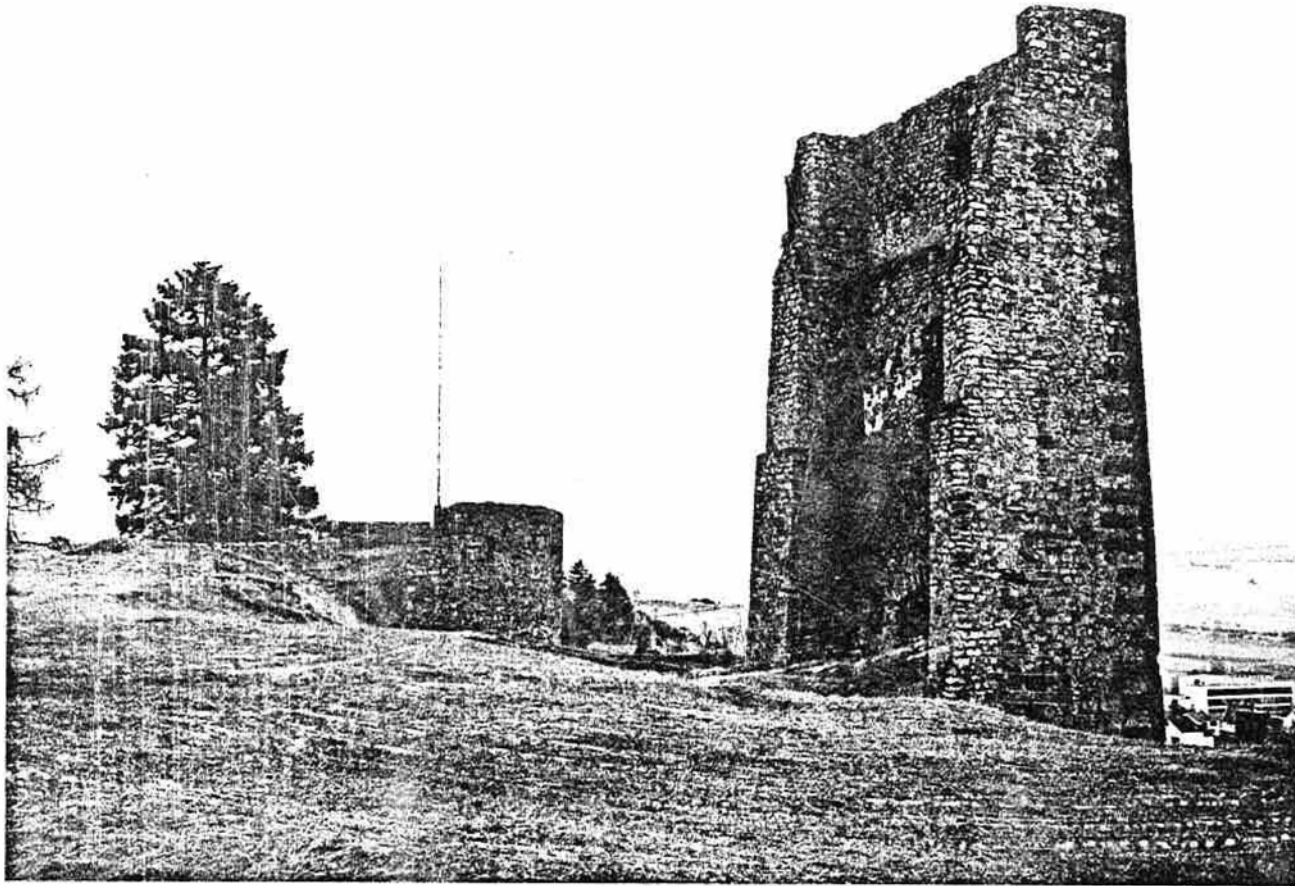


BILD 38 : Burg Schönecken — Turmruine

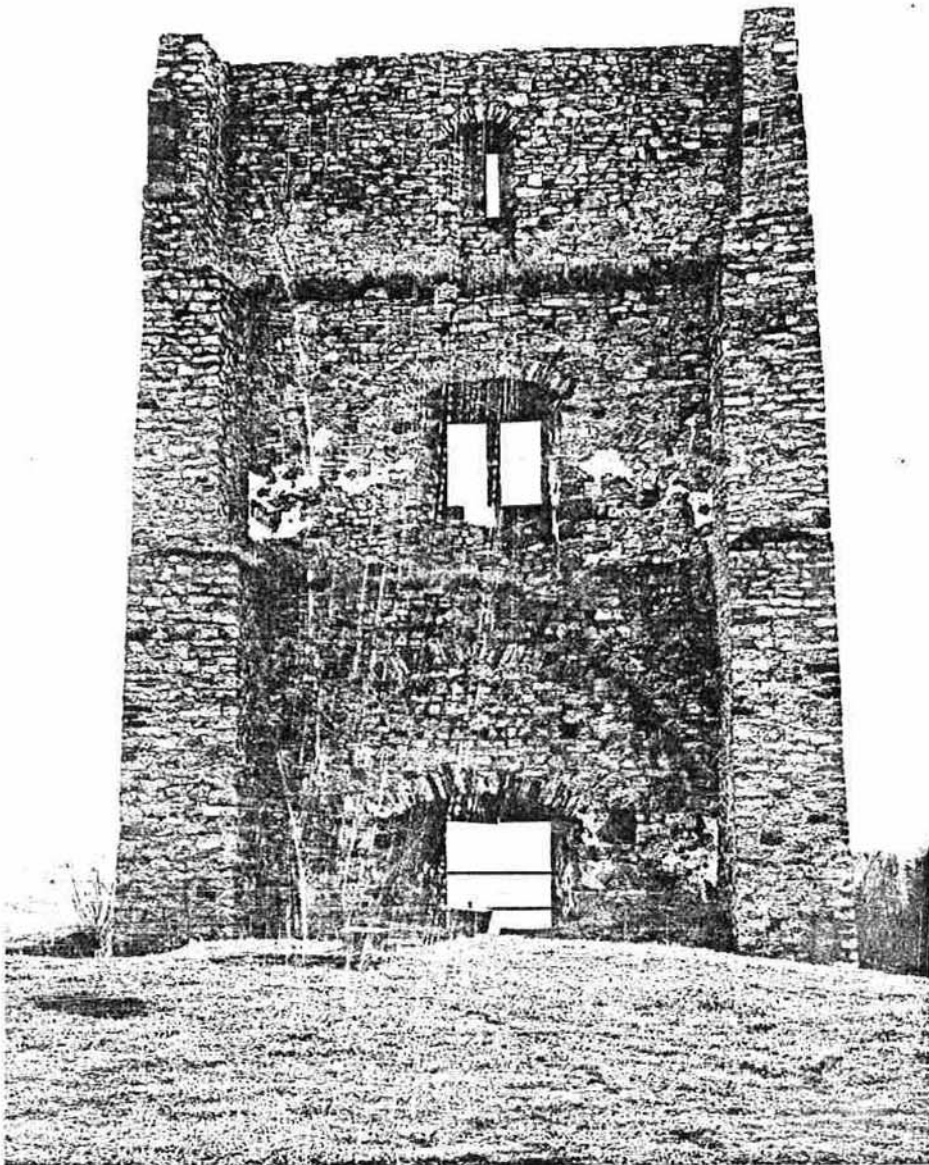


BILD 39 : Burg Schönecken — Turmruine

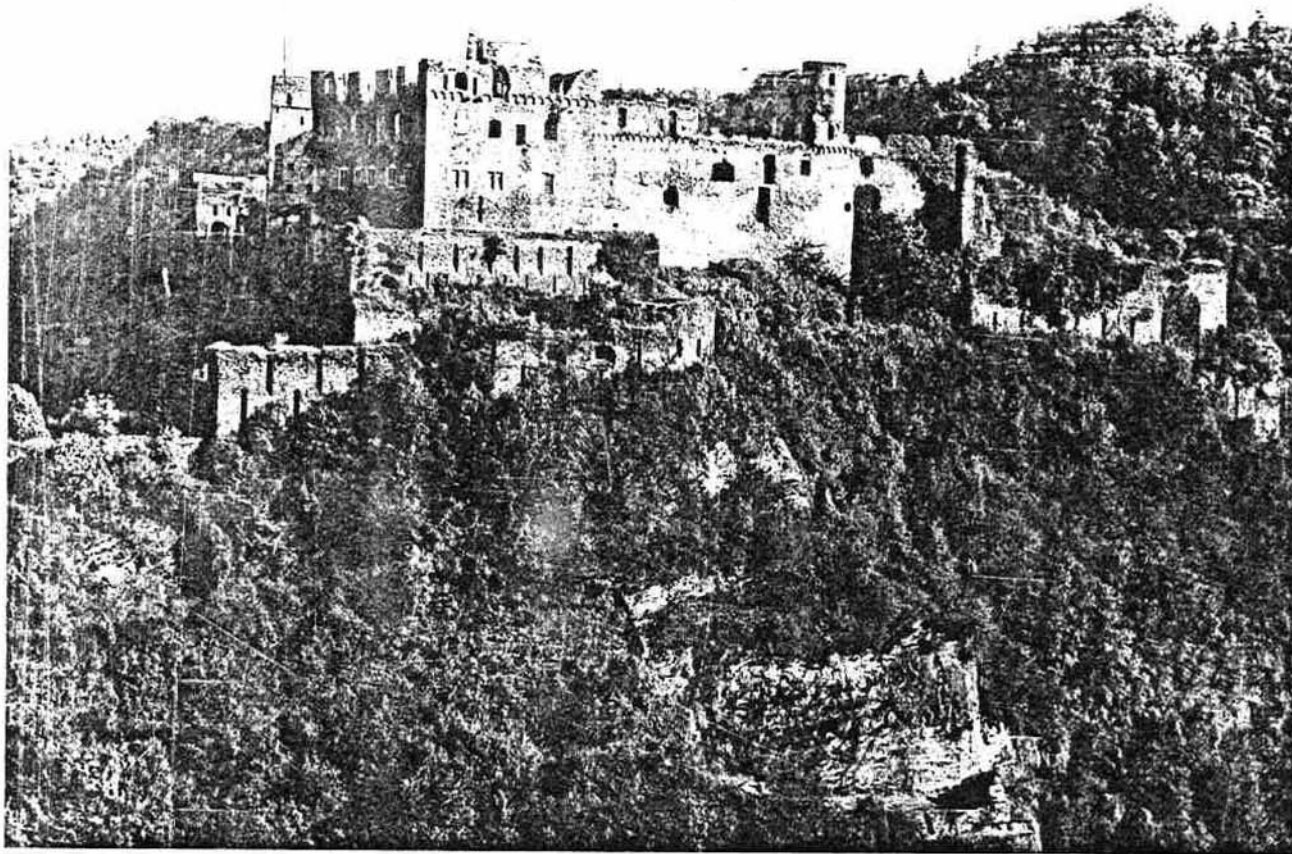


BILD 4) : Burg Rheinfels — Gesamtansicht von Norden



BILD 41 : Burg Rheinfels — Frauenbau vom inneren Burghof

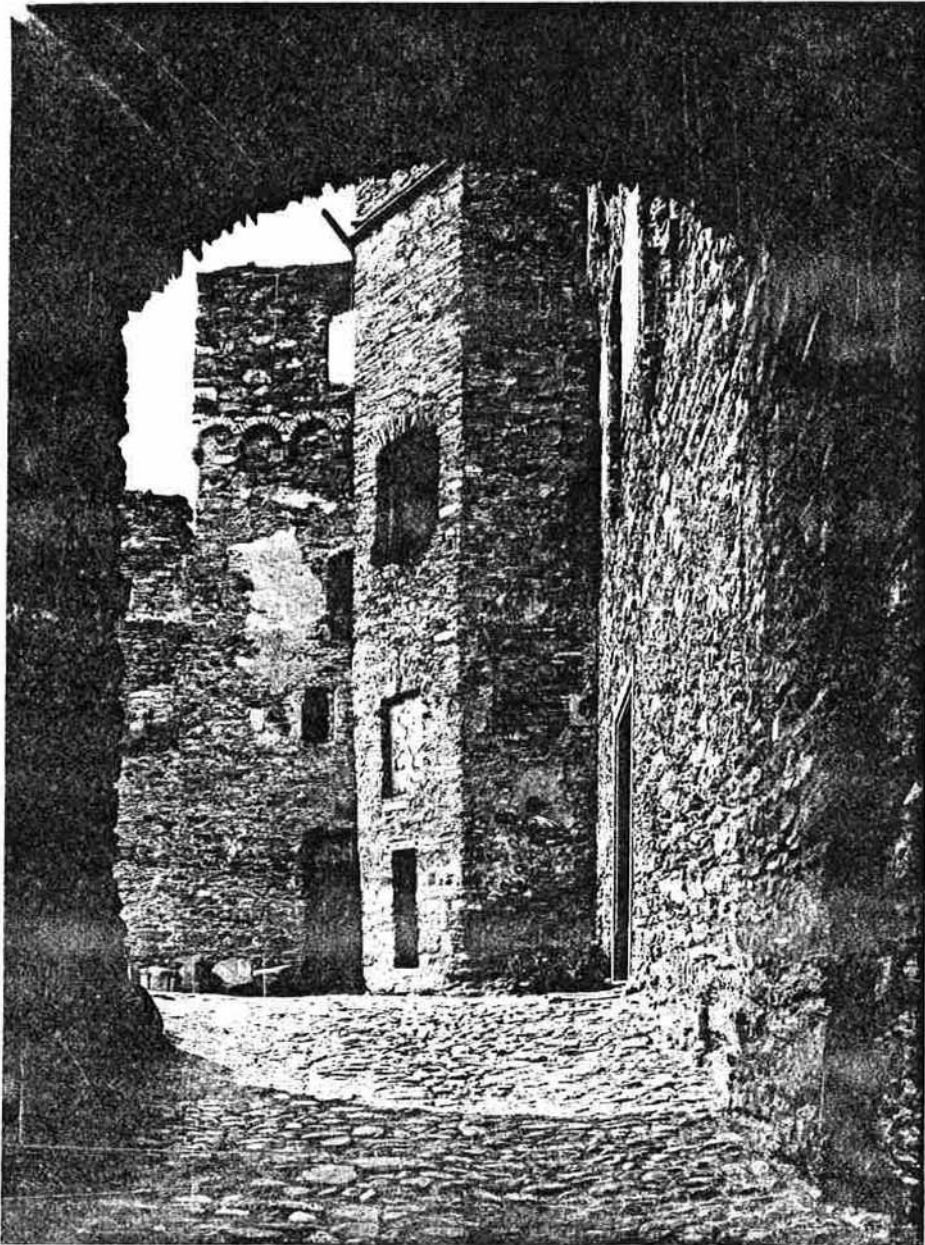


BILD 42 : Burg Rheinfels — Frauenbau aus dem Burgtor

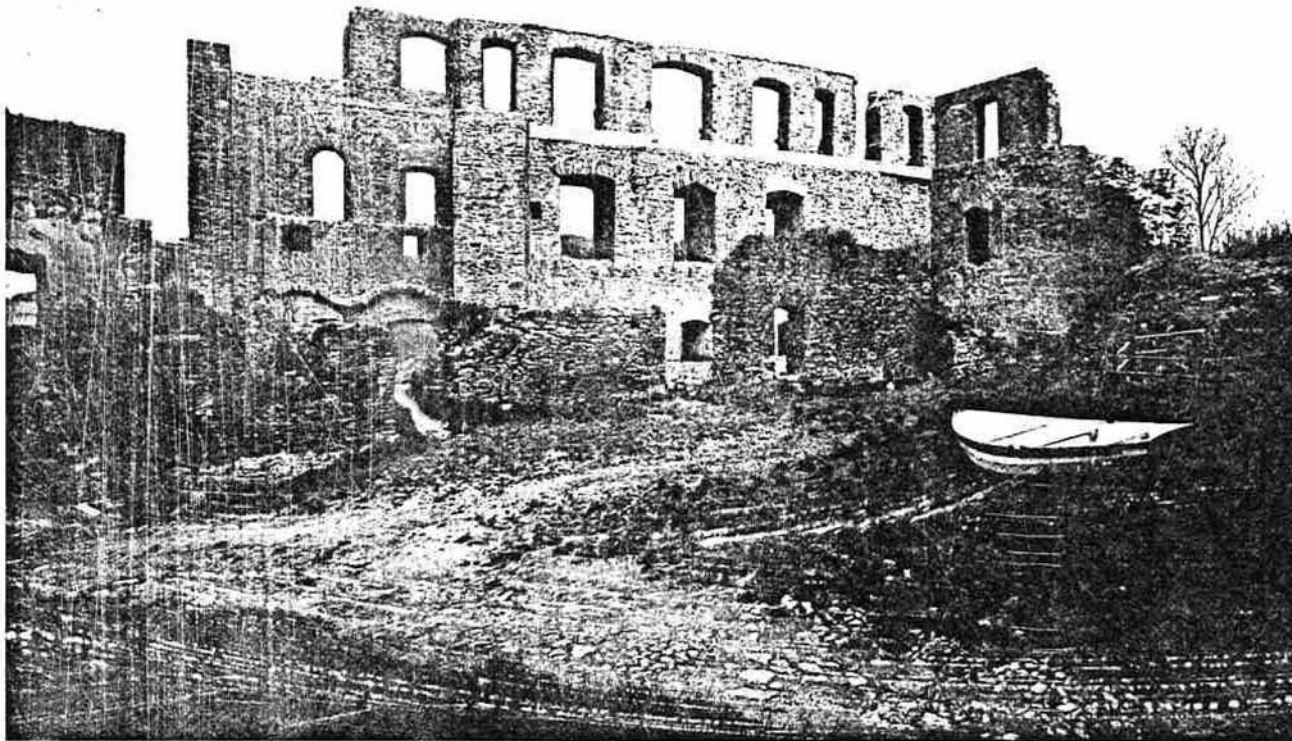


BILD 43 : Burg Rheinfels — Darmstädter Bau vom inneren Berghof

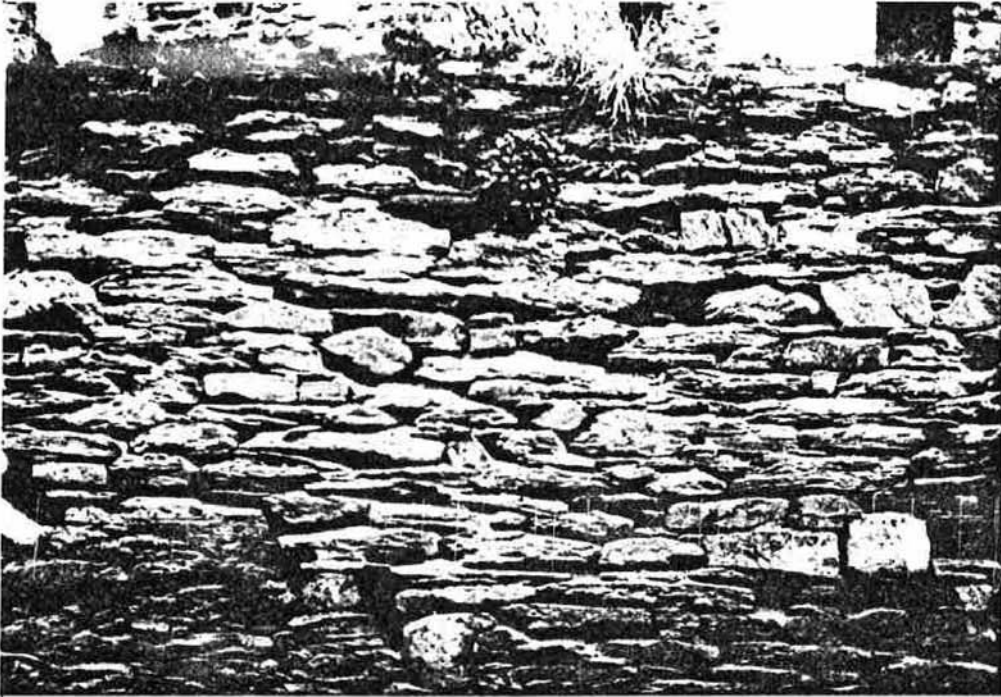


BILD 44 : Burg Rheinfels – Ansicht einer Bruchsteinmauer

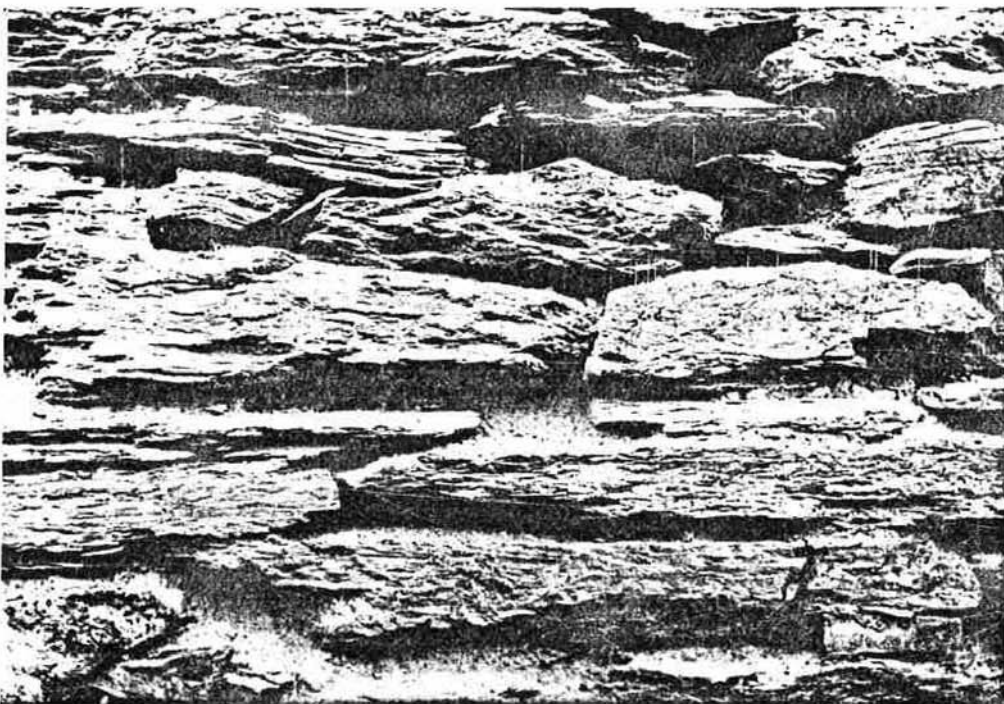


BILD 45 : Burg Rheinfels – Ausschnitt des Mauerwerksverbandes

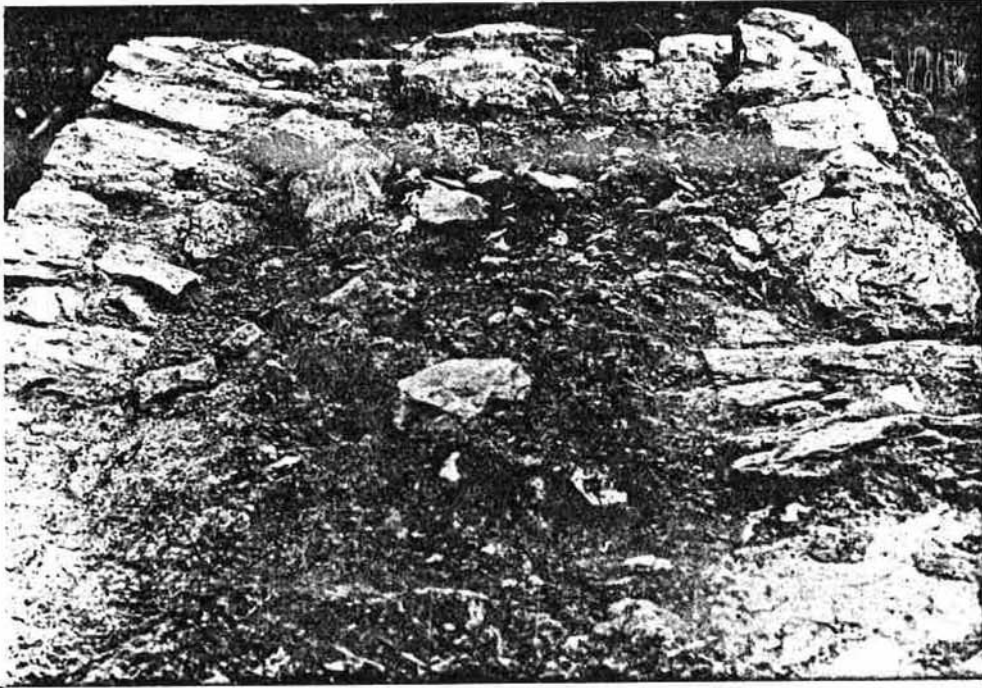


BILD 46 : Burg Rheinfels – Abgetragene Mauerkrone einer zweischaligen Wand

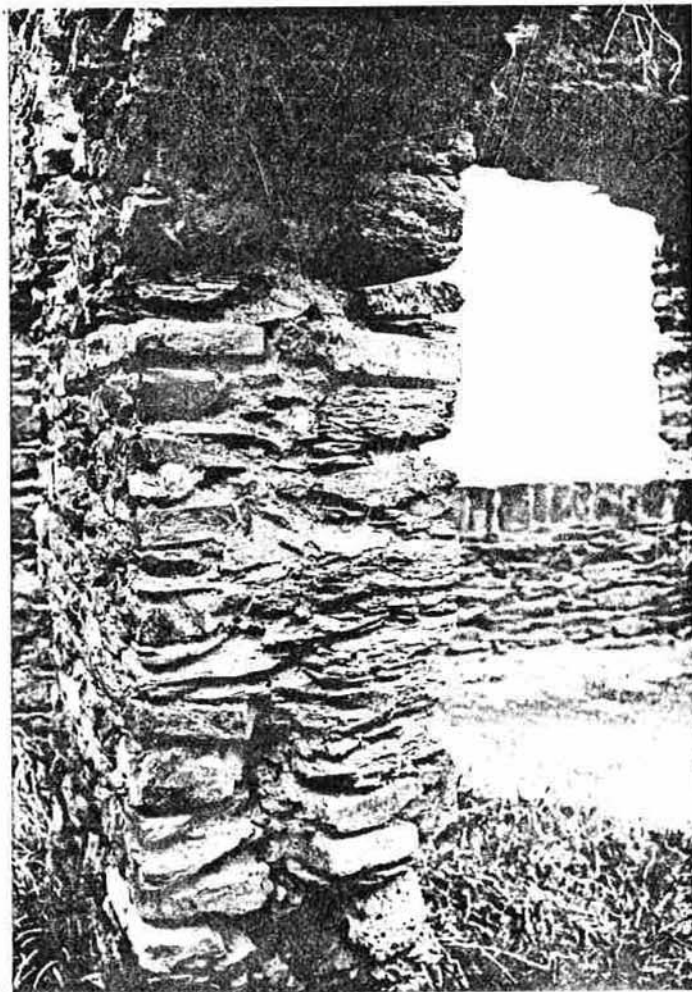


BILD 47 : Burg Rheinfels – Zweischaliges Mauerwerk

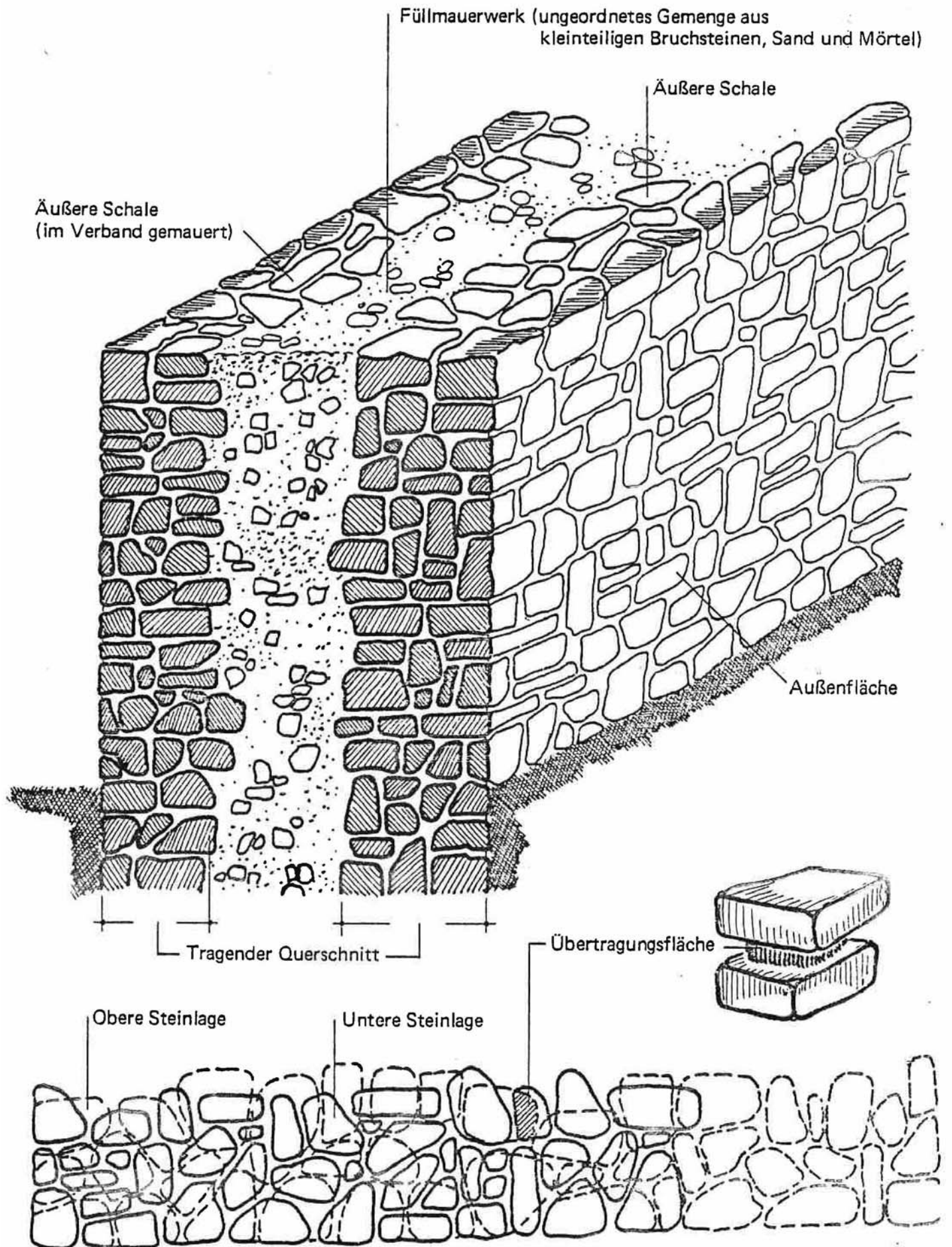


BILD 48 : Isometrie und Grundriß einer tragenden Außenschale eines zweischaligen Bruchsteinmauerwerks

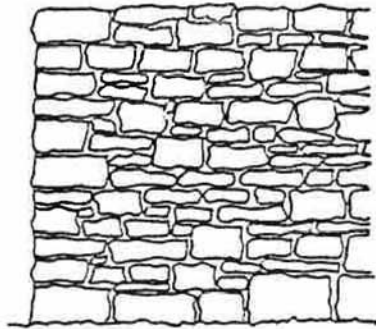


BILD 49 : Bruchsteinmauerwerk nach Bild 13, DIN 1053 Bl. 1

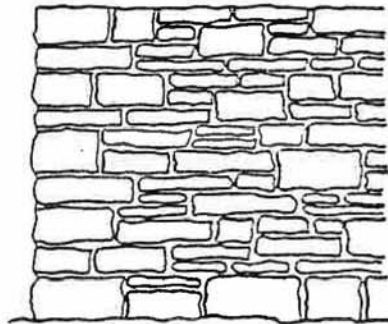


BILD 50 : Hammerrechtes Schichtenmauerwerk nach Bild 14, DIN 1053 Bl. 1

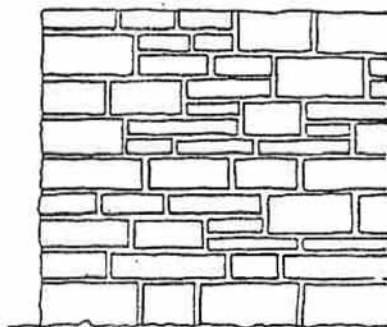


BILD 51 : Unregelmäßiges Schichtenmauerwerk nach Bild 15, DIN 1053 Bl. 1

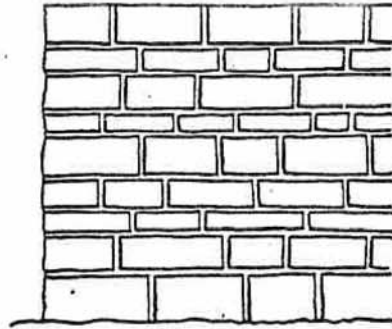


BILD 52 : Regelmäßiges Schichtenmauerwerk nach Bild 16, DIN 1053 Bl. 1

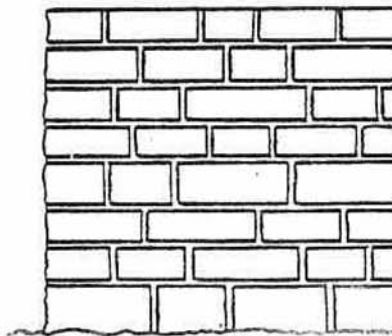


BILD 53 : Quadermauerwerk nach Bild 17, DIN 1053 Bl. 1

Teil IV: Zusammenfassung

Aufgrund der Ergebnisse der Bruchtheorie und der Versuche, die in befriedigendem Maße übereinstimmten, können folgende Erkenntnisse zur Beurteilung der Druckfestigkeit von Natursteinmauerwerk formuliert werden:

1. Die Druckfestigkeit des Mauerwerks ist in erster Linie von der Festigkeit der Mörtelfuge abhängig.
2. Die Festigkeit der Mörtelfuge hängt von der Druckfestigkeit des Mörtels und von der Form und Neigung der Fuge ab. Die Festigkeit wird gesteigert, wenn die Fugendicke klein und die Übertragungsfläche von Stein zu Stein groß, die Schlankheit der Fuge also klein ist.
3. Am wirkungsvollsten sind horizontale Fugen; die Fugenfestigkeit verringert sich mit zunehmender Fugenneigung.
4. Die Festigkeit der Steine hat bei Bruchsteinmauerwerk im Regelfall keinen Einfluß, da zuvor das Fugenversagen eintritt. Lediglich bei Quadermauerwerk und hoher Mörtelgüte können die aus der Querdehnungsbehinderung entstehenden Zugspannungen im Stein auf einen ähnlichen Bruchmechanismus führen, wie er bei Mauerwerk aus künstlichen Steinen die Regel ist. Grenzfälle sind in Teil II, Abschnitt 7, abgeleitet.

Die vorliegende Arbeit erleichtert die Bestimmung der Drucktragfähigkeit von bestehendem Mauerwerk durch Abschätzen der am Bauwerk vorhandenen Parameter, nämlich Fugenschlankheit, Fugenneigung, Übertragungsfaktor und Mörtelfestigkeit. Die Mauerwerksfestigkeit läßt sich entweder aus den theoretischen Überlegungen nach Teil II oder aus den Versuchsergebnissen nach Teil III abschätzen.