

Untersuchungen über Druckfestigkeit
und Rohdichte von
Kaminauskleidungsmaterial im Hinblick
auf die Schaffung eines Prüfverfahrens
gemäß den "Technischen Richtlinien"

T 1428

T 1428

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

T 1428: Untersuchungen über Druckfestigkeit und Rohdichte von Kaminauskleidungs-
material im Hinblick auf die Schaffung eines Prüfverfahrens gemäß den
"Technischen Richtlinien".

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

"Untersuchungen über Druckfestigkeit und Rohdichte von Kaminauskleidungsmaterial
im Hinblick auf die Schaffung eines Prüfverfahrens gemäß den
< Technischen Richtlinien >"

durchgeführt im Auftrag des
Instituts für Bautechnik Berlin

von
K. Möhler und P. Müller
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Universität (TH) Karlsruhe
Abt. Baukonstruktionen
1984

1. Vorbemerkungen

Im Jahre 1971 wurden von der Fachkommission "Bauaufsicht" der Arbeitsgemeinschaft der für das Bau-, Wohnungs- und Siedlungswesen zuständigen Minister der Länder (ARGE-Bau) die "Technischen Richtlinien für Querschnittsveränderungen und Innenabdichtungen von Schornsteinen" ausgearbeitet und in der Fassung April 1971 zwischenzeitlich nach den verschiedenen Landesbauordnungen als Richtlinien baurechtlich eingeführt.

In diesen "Technischen Richtlinien" werden in Abschnitt 1.4 die Querschnittsverminderungen durch Innenauskleidung der Schornsteine mit Leichtbeton geregelt. Dabei sind in den zugehörigen Unterabschnitten die Anforderungen an den Leichtbeton wie folgt festgelegt:

- 1.4.1 "Die Innenauskleidung eines Schornsteins mit Leichtbeton muß gegen Beanspruchung durch die Kehrarbeit und die Beheizung dauerhaft beständig sein und eine ausreichende Dichtheit gewährleisten. Dies ist durch einen Kehrversuch nach Nr. 3.4 dieser Richtlinien sowie eine Temperaturbeanspruchung nach Nr. 3.3 dieser Richtlinien nachzuweisen.
- 1.4.2 Für die Innenauskleidung der Schornsteine mit Leichtbeton dürfen nur Zuschlagstoffe nach DIN 18 150 Abschnitt 2.1 bis 2.3 oder andere gleichwertige Zuschlagstoffe verwendet werden.
- 1.4.3 Kornzusammensetzung, Zementgehalt und die Steife der Mischung sind so zu wählen, daß nach entsprechender Verdichtung beim Einbringen Beton mit geschlossenem Gefüge entsteht. Die Schornsteininnenfläche muß möglichst glatt und rissefrei sein.
- 1.4.4 Der Mittelwert der Rohdichte des bei + 105° C getrockneten Betons darf 1,7 kg/dm³ nicht überschreiten. Kein Einzelwert darf größer als 1,8 kg/dm³ sein. Die mittlere Druckfestigkeit des Betons muß mindestens 50 kp/cm² betragen, wobei kein Einzelwert unter 40 kp/cm² zulässig ist. Dies ist mit dem in Nr. 3.2 dieser Richtlinien beschriebenen Prüfverfahren nachzuweisen."

Nach Abschnitt 3.2 ist die Druckfestigkeit und die Rohdichte folgendermaßen zu ermitteln:

"Zum Nachweis der geforderten Druckfestigkeit und Rohdichte sind mindestens 3 Würfel mit 10 cm Kantenlänge nach DIN 1048 - Bestimmungen für Beton für Bauwerke aus Beton und Stahlbeton - herzustellen, zu behandeln und im Alter von 28 Tagen zu prüfen"

In DIN 1048 Blatt 1 sind nähere Angaben in Abschnitt 4 über die Prüfung des Festbetons an Probekörpern, die in Formen hergestellt sind, gemacht. Der Unterabschnitt 4.1.4 regelt die Herstellung der Probekörper. Die ersten beiden Abschnitte lauten wie folgt:

"Vor dem Einbringen des Betons sind die Innenflächen der Formen leicht zu fetten, zu ölen oder mit Entschalungsmitteln zu behandeln und der Aufsatzrahmen aufzusetzen. Stets muß so viel Beton eingefüllt werden, daß er nach dem Verdichten noch 2 bis 3 cm über die Form übersteht. Für das Verdichten durch Rütteln ist der Beton etwa bis zum oberen Rand des auf die Form gesetzten Aufsatzrahmens einzufüllen. Für das Verdichten durch Stampfen oder Stochern ist der Beton in möglichst gleichdicken Schichten einzufüllen, die nach dem Verdichten höchstens 15 cm dick sein sollen. Der Beton der Probekörper ist, möglichst in gleicher Weise wie der Beton des Bauteils, vollständig zu verdichten, z.B. durch Rütteln, Stochern oder Stampfen. Beton, dem Luftporenbildende Zusatzmittel beigegeben sind, darf nicht mit Innenrüttlern verdichtet werden. Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge darf nur durch Rütteln oder Stochern, Leichtbeton mit offenem Gefüge nur durch Stochern und nur so weit verdichtet werden, daß keine größere Rohdichte als im Bauwerk entsteht.

Beim Verdichten durch Stampfen oder Stochern ist nach dem Einfüllen einer jeden Schicht an den Wandungen der Form mit dem Spatel hinunterzustecken. Sodann ist mit dem Stab so zu stochern oder mit dem Stampfer so zu stampfen, daß der Beton ein gleichmäßig dichtes Gefüge erlangt. Vor dem Aufbringen jeder neuen Schicht ist die vorhergehende mit dem Spatel aufzurauen."

In den "Technischen Richtlinien" ist im Abschnitt 3 "Prüfungen" der Temperaturversuch für Innenauskleidungen mit Leichtbeton detailliert beschrieben.

Hiernach dient als Versuchskörper ein 4,5 m hoher, aus Vollziegeln Mz 150 (DIN 105) gemauerter Schornstein mit einer Wangendicke von 11,5 cm und einem lichten Querschnitt von 26 cm x 26 cm. Beim Aufmauern des Versuchskörpers werden die Stoßfugen zwischen den Mauersteinen im mittleren Drittel des Schornsteins nicht mit Mörtel versehen. In diesem Versuchskörper sind die zu prüfenden Innenauskleidungen praxisgerecht so einzubauen, daß der verbleibende Restquerschnitt des Schornsteins noch 16 cm im Durchmesser beträgt.

Für den Temperaturversuch ist nach Abs. 3.3.1 folgendes festgelegt:

"Der Versuchsschornstein wird einem sechsstündigen Heizversuch nach DIN 18 160 Bl. 6 ausgesetzt. Abweichend von dieser Norm werden Schornsteine, die unter Verwendung mineralischer Bindemittel hergestellt sind, bereits im Alter von 28 Tagen dem Heizversuch unterworfen. Der Versuchsschornstein muß vor und nach dieser Beanspruchung sowie nach dem anschließenden Keherversuch die Anforderungen an die Gasdichtheit nach DIN 18 160 Blatt 6 Abschnitt 2.2 erfüllen. Während der Beheizung und während des Kehrens darf eine wesentliche Beschädigung der inneren Oberfläche nicht auftreten. Der Abrieb darf 5 kg nicht überschreiten. Einzelstücke dürfen höchstens 35 g wiegen."

Für den Kehrversuch ist Abs. 3.4 maßgebend, der wie folgt lautet:

"Im Anschluß an den Temperatur- bzw. Korrosionsversuch ist ein Kehrversuch entsprechend DIN 18 160 Blatt 6 durchzuführen. Abweichend von dieser Norm ist der Kehrbesen 100 mal auf- und abwärts zu bewegen. Nach je 20 Auf- und Abwärtsbewegungen ist das Kehrgut zu entnehmen und zu begutachten".

Bereits im Jahre 1972 hat das staatliche Materialprüfamt Nordrhein-Westfalen mit Schreiben vom 7.12.1972 an das Institut für Bautechnik darauf hingewiesen, daß sich bei einer dort durchgeführten Prüfung ergeben hat, daß die Bestimmung der Druckfestigkeit und Rohdichte an Würfeln mit 10 cm Kantenlänge keine hinreichende Beurteilungsmöglichkeit der Druckfestigkeit und Rohdichte des in die Schornsteine eingebrachten Leichtbetons bietet. Es wurde vorgeschlagen, bei weiteren Prüfungen neben der Untersuchung an Würfeln die Druckfestigkeit und Rohdichte an Bohrkernen aus einem zusätzlich aufgebauten und ausgekleideten Schornstein bzw. Schornsteinabschnitt zu untersuchen.

Auf seiner 5. Sitzung hat sich der Sachverständigenausschuß "Feuerungsanlagen" im Mai 1973 mit dieser Frage beschäftigt. Von Seiten der "Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine" der Universität (TH) Karlsruhe wurde bestätigt, daß die Druckfestigkeit von Würfeln, die aus der Auskleidungsschale der Schornsteine selbst gewonnen wurden, teilweise nur ca. 10 % derjenigen der 10 cm-Würfel beträgt. Dies sei wohl auf die geringere Verdichtung - vor allen Dingen in den Eckzonen - der Auskleidung gegenüber der hiervon völlig abweichenden Ausführung der Würfel nach DIN 1048 zurückzuführen.

Im Juni 1973 wurde dem Fachverband Hausschornsteine e.V. in Bonn der Vorschlag des SVA "Feuerungsanlagen" unterbreitet, anstelle der 3 nach den "Technischen Richtlinien" parallel hergestellten Würfel je 3 Würfel mit sehr geringer, mit mittlerer und mit hoher Verdichtung herzustellen, wobei an allen 9 Würfeln sowohl die Rohdichte als auch die Druckfestigkeit festgestellt werden soll. Aus den Ergebnissen dieser Prüfungen sollte dann

eine Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte des Auskleidungsmaterials abgeschätzt werden, so daß hierdurch aufgrund der tatsächlichen Rohdichte des Auskleidungsmaterials im Schornstein Aussagen über die Druckfestigkeit der Innenauskleidung möglich werden.

Im Fachverband Hausschornsteine bestand für diesen Vorschlag keine Einigkeit; es wurde vielmehr das Ergebnis des Kehrversuchs als Kriterium für die Güte der Auskleidungsmasse in den Vordergrund gestellt. Es wurde daher eine weitere mündliche Erörterung dieses Problems vorgeschlagen.

Auf Veranlassung des Instituts für Bautechnik wurde für den 24.06.1974 ein kleiner Arbeitskreis zu einer Besprechung des vorher angesprochenen Problems eingeladen. Als Diskussionsgrundlage diente eine Zusammenstellung von Prüfergebnissen über Rohdichte und Druckfestigkeit, die an Leichtbetonwürfeln von 9 verschiedenen Antragstellern in der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität (TH) Karlsruhe ermittelt worden waren. Dabei handelte es sich sowohl um die Ergebnisse von Würfeln mit 10 cm Kantenlänge in 3 verschiedenen Verdichtungsintensitäten als auch um Würfel, die einerseits aus der Leichtbetoninnenschale eines zusätzlich aufgebauten Schornsteinabschnittes von ca. 1 m Höhe, andererseits aus dem Prüfschornstein selbst nach Abschluß der Brandprüfungen herausgesägt wurden. Des weiteren wurden für die Diskussion 5 Diagramme von Materialien früherer Prüfungen (vor Einführung der "Technischen Richtlinien") vorgelegt, wobei Rohdichte und Druckfestigkeit in Abhängigkeit von verschieden hohen Temperaturbeanspruchungen aufgetragen waren.

In dieser Sitzung wurde - wie auch in der Niederschrift festgehalten - nochmals eingehend auf die bisher durchgeführten Prüfungen Bezug genommen und festgestellt, daß die in der vorliegenden Fassung der "Technischen Richtlinien" aufgeführten Prüfmethode keine ausreichende Beurteilung der tatsächlich eingebrachten Schornsteinauskleidungsmasse zulassen. Durch

die Ermittlung von Rohdichte und Druckfestigkeit sollte bei der Aufstellung der "Technischen Richtlinien" die betontechnologischen Eigenschaften des Materials definiert werden, was auch insbesondere im Hinblick auf eine evtl. vorzunehmende Güteüberwachung von Wichtigkeit sein könnte. Der Kehrversuch würde hierfür keinen Ersatz bieten. Eine Diskussion der Versuchsergebnisse der in der "Versuchsanstalt" durchgeführten Prüfungen führte zu dem Ergebnis, daß künftig die Aufmauerung eines weiteren Schornsteins oder Schornsteinabschnittes zur Entnahme von Proben entfallen könne, daß jedoch die Druckfestigkeitsprüfung am 10 cm-Würfel und am Material, welches im Anschluß an den Heizversuch aus der Leichtbetonröhre des Schornsteins in Würfelform gewonnen wird, erhalten bleiben müsse.

Wichtig erschien dem Arbeitskreis auch die Höhe des Festigkeitsabfalles, welcher durch die Erhitzung des Materials in Kauf genommen werden darf, wobei auf den entsprechenden Abschnitt der DIN 18 160 Teil 6 verwiesen wurde, worin eine Festigkeitsminderung nach den Brandprüfungen von 30 % zugestanden wird. Dieser Frage wurde ja auch in früheren, sogenannten "Hitzebeständigkeitsprüfungen" in der "Versuchsanstalt" nachgegangen, bei welchen kleine Proben der Auskleidungsmasse (Würfel mit Kantenlängen von 4 cm) verschiedenen Temperaturstufen (105°, 350°, 500° und 750° C) in einem Glühofen ausgesetzt und nach dem Erhitzen deren Rohdichte und Druckfestigkeit ermittelt wurde. Es bestand jedoch die Neigung, einen Ausgangs-Druckfestigkeitswert von 5 N/mm² weiterhin beizubehalten, welcher sich nach der Erhitzung gegebenenfalls um 30 %, d.h. auf 3,5 N/mm², reduzieren darf. Für eine spätere Gütesicherung wird immer die Ausgangsfestigkeit des Materials maßgebend bleiben, während für die Eignung als Auskleidungsmasse die Festigkeit auch nach der Erhitzung von Bedeutung ist. Es wurde daher beschlossen, auch die Würfel mit 10 cm Kantenlänge, welche separat hergestellt werden, bei Raumtemperatur und jeweils einen davon nach Erhitzung auf 500° C zu prüfen. Zur weiteren Abklärung der Thematik wurde empfohlen, daß Professor Möhler einen Forschungsantrag beim Institut für Bautechnik stellen soll, um die Probleme der Druckfestigkeit und Rohdichte von Kaminauskleidungsmaterial zu klären.

2. Ziel der Forschungsarbeit

Bei der Beurteilung von Kaminauskleidungsmaterial nach der Fassung der "Technischen Richtlinien für Querschnittsveränderungen und Innenabdichtungen von Schornsteinen" vom April 1971 besteht eine erhebliche Schwierigkeit darin, daß der Verdichtungsgrad der Auskleidungsmasse über den Schornsteinquerschnitt stark schwankt, was sowohl von der Querschnittsform als auch vom angewandten Einbringungs- und Verdichtungsverfahren abhängig ist. Damit liegen aber auch entsprechende Schwankungen der Druckfestigkeit und Rohdichte innerhalb des Schornsteins vor.

Andererseits ergeben sich bei den in Anlehnung an DIN 1048 hergestellten Vergleichswürfeln infolge der unterschiedlichen Verdichtung nicht reproduzierbare Verhältnisse. Das bisher angewandte Prüfverfahren müßte daher für eine objektive Beurteilung des Auskleidungsmaterials und das angewandte Einbringungsverfahren abgeändert werden, zumal die als zulässig angegebene Kehrgutmenge in den "Technischen Richtlinien" mit 5 kg viel zu hoch angesetzt wurde und nicht den an einen ausgekleideten Schornstein zu stellenden Anforderungen entspricht.

Die Forschungsarbeit sollte klären, in welchem Maße die Temperaturbeständigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Kehrbeanspruchung von der Rohdichte und Druckfestigkeit der Auskleidungsmaterialien abhängig ist und welches Prüfverfahren für die Feststellung der Eignung von Kaminauskleidungsmaterial, das in bestimmten Verfahren eingebracht wurde, für die Überprüfung durch den Heizversuch und - gegebenenfalls auch im Hinblick auf eine spätere Gütesicherung - durch Einzelversuche an Probenwürfeln zur Anwendung empfohlen werden kann.

3. Auswertung vorhandener Untersuchungen

Die zum Zeitpunkt der Beantragung des Forschungsvorhabens bereits in der "Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine" der Universität (TH) Karlsruhe nach den bisher in den "Technischen Richtlinien" festgelegten Verfahren durchgeführten Prüfungen sowie die vor dem Inkrafttreten der "Technischen Richtlinien" durchgeführten Versuche wurden ausgewertet.

Die Ergebnisse der früheren Untersuchungen gehen aus den Bildern 1-5 (Anlagen 1-5) hervor. Sie zeigen den Einfluß einer ca. 6 Stunden dauernden Temperatureinwirkung von 100° C, 350° C, 500° C, 750° C und 1000° C auf die Rohdichte und die Druckfestigkeit von 5 von den Antragstellern angelieferten Kaminauskleidungsmaterialien (Proben A bis E). Die Prüfungen wurden an Würfeln mit 4 cm Kantenlänge, welche aus Prismen (4 x 4 x 16 cm) geschnitten wurden, durchgeführt. Zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen waren noch keine Prüfungen am Schornstein gefordert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, daß in der Rohdichte durch die Temperaturbehandlung relativ geringfügige Veränderungen eintreten, daß jedoch die Festigkeit mit steigender Temperatur erheblich abnimmt und insbesondere bei Überschreiten von 500° C starke Festigkeitseinbußen festgestellt wurden. Zu bemerken ist, daß diese Proben der allseitigen Temperatureinwirkung jeweils 6 Stunden im Glühofen (Muffelofen) ausgesetzt waren und nach dem Erkalten bei Raumtemperatur geprüft wurden.

Wie in den Vorbemerkungen bereits erläutert, standen nach der Einführung der "Technischen Richtlinien" im Jahre 1971 insgesamt 9 Prüfdurchgänge nach dem darin festgelegten Prüfverfahren zur Verfügung, die ebenfalls ausgewertet wurden, wobei sowohl Unterschiede im Herstellungsverfahren (Rütteln oder Pressen) als auch Unterschiede bei den Zuschlagstoffen und auch im Mischungsverhältnis vorlagen.

Bei den Prüfungen nach Tabelle 1 (Anlage 6) wurden die in den "Technischen Richtlinien" für den Nachweis der Leichtbetonrohddichte und Druckfestigkeit in Abschn. 3.2 geforderten Würfel von 10 cm Kantenlänge verwendet. Gemäß der Empfehlung des SVA "Feuerungsanlagen" wurden bei den weiteren Prüfungen nach Tabelle 2 (Anlage 7) je 3 Würfel von 10 cm Kantenlänge in 3 verschiedenen Verdichtungsintensitäten durch Variation der Einfüllmenge und der Anzahl der Stampfbewegungen hergestellt und nach 28 Tagen Rohddichte und Druckfestigkeit ermittelt. Die Verdichtungsweise dieser Würfel von 10 cm Kantenlänge ist nachfolgend beschrieben:

- GERING: 1. halbe Höhe einfüllen
 2. 4 x stampfen (Stampfer 5 x 5 cm)
 3. volle Höhe einfüllen
 4. 4 x stampfen
-

- MITTEL: 1. 1/3 einfüllen
 2. 8 x stampfen
 3. 1/3 einfüllen (2/3 der Höhe)
 4. 8 x stampfen
 5. 1/3 einfüllen (volle Höhe)
 6. 8 x stampfen
-

- STARK : 1. 1/4 einfüllen
 2. 12 x stampfen
 3. 1/4 einfüllen (halbe Höhe)
 4. 12 x stampfen
 5. 1/4 einfüllen
 6. 12 x stampfen
 7. 1/4 einfüllen (volle Höhe)
 8. 12 x stampfen
-

Vergleichend hierzu wurden die Rohddichte und Druckfestigkeit sowohl an Würfeln, die aus der Leichtbetoninnenschale eines zusätzlich aufgebauten Schornsteinabschnittes von ca. 1 m Höhe herausgesägt wurden, als auch an Würfeln, die aus dem Prüfschornstein selbst nach Abschluß des Heizversuches herausgeschnitten wurden, bestimmt. Dabei wurden - zwecks Erfassung der

tatsächlichen Verdichtung - Proben aus dem Bereich um die Öffnung (lichter Durchmesser) als auch aus dem Eckbereich in jeweils zwei Horizonten oberhalb des Meßquerschnittes 1 entnommen. Entsprechend der Lage des lichten Querschnitts - beim Rüttel- oder Preßvorgang kann es vorkommen, daß die Glocke nicht zentrisch durchgezogen wird - schwankte die Kantenlänge dieser Würfel zwischen 35 und 83 mm.

Für die auf den Tabellen 1 und 2 (Anlagen 6 und 7) aufgeführte Zusammenstellung von Versuchsergebnissen von insgesamt neun Antragstellern haben in der Spalte "Würfelherkunft" die angegebenen Buchstaben folgende Bedeutung:

- W : Würfel nach DIN 1048
- W-g : Würfel nach DIN 1048 - geringe Verdichtung
- W-m : Würfel nach DIN 1048 - mittlere Verdichtung
- W-s : Würfel nach DIN 1048 - starke Verdichtung
- A-D : Würfel aus Abschnitt - Öffnungsbereich
- A-E : Würfel aus Abschnitt - Eckbereich
- S-D : Würfel aus geprüftem Schornstein - Öffnungsbereich
- S-E : Würfel aus geprüftem Schornstein - Eckbereich

Die für die Rohdichte und Druckfestigkeit angegebenen Werte sind Mittelwerte; in Klammer ist jeweils der Streubereich angegeben.

In der Spalte 2 der Tabellen ist neben dem Herstellungsverfahren auch die Kehrgutmenge enthalten.

Die Zusammenstellung der Ergebnisse zeigt, daß sowohl bei der Kehrgutmenge erhebliche Unterschiede bestehen, welche von 10 g bis 3366 g reichen, als auch die Tatsache, daß Rohdichte und Festigkeit der Auskleidungsmasse im Schornstein bzw. im zusätzlich hergestellten Abschnitt teilweise erheblich von den an den Würfeln von 10 cm Kantenlänge gewonnenen Ergebnissen abweichen.

Vor der endgültigen Erteilung des Forschungsvorhabens standen in der "Versuchsanstalt" weitere 4 ausgekleidete Schornsteine (Prüfdurchgang I bis IV) zur Prüfung an, an denen das empfohlene Verfahren, nämlich 3 unterschiedlich verdichtete Würfelreihen herzustellen, ebenfalls angewandt wurde. Hierbei wurde außerdem entsprechend den Empfehlungen des in den Vorbemerkungen erwähnten Arbeitskreises jeweils ein Würfel aus der "Dreierreihe" einer 6-stündigen allseitigen Temperatureinwirkung von 500° C ausgesetzt. Rohdichte und Druckfestigkeit bei 105° C und nach der Erhitzung auf 500° C sind in den Tabellen 3a und 3b (Anlage 8) zusammengestellt. Hieraus geht hervor, daß die Festigkeit nach der Temperatursteigerung von +105° C auf 500° C bei geringem und mittlerem Verdichtungsgrad in 3 Fällen unter 60 % der Festigkeit bei 105° C abgefallen ist.

4. Weitere Prüfungen

Wie in der Leistungsbeschreibung zum Forschungsvorhaben aufgeführt, wurden aus den restlichen sowie weiteren beim Abbau einzelner Prüfschornsteine entnommenen Abschnitte der Auskleidungsröhre Würfelproben nach einem bestimmten Plan über den Querschnitt entnommen und die Rohdichten sowie die Festigkeiten der einzelnen Bereiche festgestellt. Außerdem wurde die Temperaturbeständigkeit (Änderung der Rohdichte, der Druckfestigkeit und der Gefügebearbeitbarkeit) nach einer 6-stündigen Temperaturbeanspruchung bei verschiedenen Temperaturen zwischen 105° C und 1000° C beurteilt. Parallel hierzu sollten die Ergebnisse des Kehrversuchs, welcher an den dem Heizversuch unterworfenen Schornsteinen durchgeführt wurde, als Vergleichskriterium herangezogen werden.

Aus den im Laufe der folgenden Monate und Jahre bearbeiteten Prüfanträgen sowie aus den bereits erwähnten vorhergegangenen Prüfungen wurden für diese zusätzlichen Arbeiten insgesamt 14 Leichtbetonmischungen (Prüfdurchgang 10 bis 23) ausgewählt, welche sowohl die verschiedenen Verfahren als auch die verwendeten Zuschlagstoffe und Bindemittel weitgehend abdeckten. Ein weiterer Parameter war die Anzahl der Arbeitsgänge und das angewandte Mischungsverhältnis:Zuschlagstoff/Bindemittel.

Bei den angewandten Auskleidungsverfahren wird die Verdichtung entweder durch das Rüttelverfahren oder das Preßverfahren erreicht. Während beim Rüttelverfahren der Leichtbeton erdfeucht eingebracht und mit einer Rüttelglocke verdichtet wird, arbeitet das Preßverfahren mit plastischem Material, wobei die Verdichtung durch Keilwirkung des verwendeten Preßgerätes erfolgt. Dabei ist zu beachten, daß die Verdichtung von der runden Rüttelglocke nach den Seiten erfolgt und somit die Verdichtung des eingebrachten Materials nach außen hin abnimmt. Im Falle der Verpreßung ist die Verdichtung vom Grad der Keilförmigkeit des Gerätes, von der Plastizität des Materials und der Auflast oberhalb des Gerätes abhängig.

Bei den Zuschlagstoffen lag der Schwerpunkt bei Hochofenschlacke bzw. bei Lavazuschlägen. Die übrigen verwendeten Zuschlagstoffe waren von untergeordneter Bedeutung. Als Bindemittel wurden in der Hauptsache Portlandzemente 35 F verwendet, in Einzelfällen auch Portlandzement PZ 45 F, Eisenportlandzement EPZ 35 F und Traßzement. Eine Übersicht über die vorerwähnten Parameter beinhaltet Tabelle 4 (Anlage 9).

4.1 Durchführung der Prüfungen

Aus den Leichtbetonröhren, die aus dem Bereich der offenen Stoßfugen der Schornsteine, welche nach den "Technischen Richtlinien" geprüft wurden, stammten, wurden nach einem bestimmten Schnittplan soweit möglich 6 "Scheiben" mit einer Höhe von ca. 6-7 cm herausgetrennt. Aus diesen Scheiben wurden, wiederum soweit möglich, 4 Würfel unmittelbar aus dem Öffnungsbereich und 4 Würfel aus dem Eckbereich herausgesägt. Diese Proben waren für die Temperaturversuche bestimmt.

In den Bildern 1 bis 10 (Anlagen 10 bis 13) sind sowohl Auskleidungsabschnitte als auch aus diesen Abschnitten entnommene Proben wiedergegeben. Aus diesen Bildern gehen typische Merkmale bezüglich der Verdichtung und der inneren Oberflächenbeschaffenheit hervor. Diese Proben wurden bei

Raumtemperatur zuerst gemessen und gewogen und anschließend im Muffelofen einer 6-stündigen allseitigen Temperaturbeanspruchung von 105°, 350°, 500°, 750° und - soweit möglich - 1000° C ausgesetzt. Danach wurden die Proben über 3 bis 4 Stunden bei Raumtemperatur abgekühlt, wiederum gewogen und sodann dem Druckversuch unterworfen. Hierzu ist zu bemerken, daß im Gegensatz zu den separat hergestellten Würfeln mit 10 cm Kantenlänge, bei denen die Druckrichtung gemäß Norm senkrecht zur Einfüll- und Stampfrichtung erfolgt, bei den Würfeln, welche aus der Schornsteinauskleidung gewonnen wurden, die Druckrichtung parallel der Einfüllrichtung festgelegt wurde, während die Verdichtung durch die Preß- oder Rüttelglocke senkrecht dazu erfolgte.

4.2 Ergebnisse der Prüfungen

Abgesehen von einer Rohdichte- und Festigkeitsänderung nach Temperaturbehandlung waren auch bei einigen Mischungen sowohl farbliche Veränderungen festzustellen als auch Struktur- und Gefügeumwandlungen, die bis zum völligen Zerfall der Würfel reichten; dabei ist zu bemerken, daß diesem teilweise ein starkes Absanden vorausging und bei einer Probe, die schließlich bei 1000° C zerfiel, eine gewisse "Festigkeit" unmittelbar nach Temperaturbehandlung noch vorhanden war, jedoch einige Zeit später diese vorbeschriebene Zerfallerscheinung auftrat.

In den Tabellen 5 und 6 (Anlagen 14 und 15) ist für die separat hergestellten Würfel mit geringem, mittlerem und starkem Verdichtungsgrad die Rohdichte ρ (g/cm³) bzw. die Druckfestigkeit σ_D (N/mm²) nach Temperatureinwirkung von 105° C und 500° C sowie die jeweilige Restfestigkeit in % für die 14 ausgewählten Leichtbetonmischungen zusammengestellt.

Für die aus den Schornsteinen entnommenen Proben enthalten die Tabellen 7 und 8 (Anlagen 16 und 17) die Änderung der Rohdichte und der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Werte der beiden Tabellen sind in den Bildern 11 und 12 (Anlagen 18 und 19) auch graphisch ausgewertet.

Die Restfestigkeit sowie die Festigkeitsabnahme für die einer Temperaturbeanspruchung von 500°, 750° und 1000° C ausgesetzten Würfel bezogen auf die bei 105° C ermittelten Festigkeiten enthalten die Tabellen 9 bis 11 (Anlagen 20 bis 22). Hierbei ist zu bemerken, daß einige Werte nicht feststellbar waren, da nicht genügend Proben aus den Leichtbetonröhren gewonnen werden konnten. In diesen Fällen wurde die Bezeichnung "n.f." in der Tabelle angegeben.

Die bereits erwähnte Tabelle 4 (Anlage 9) zeigt eine Gesamtübersicht für die 14 ausgewählten Leichtbetonmischungen. Darin sind die nach dem Heizversuch des Schornsteins festgestellten Kehrgutmengen, die an den 10 cm-Würfeln erreichten Rohdichten und Festigkeiten sowohl für 105° C als auch für 500° C, sowie die an den Scheiben aus dem Schornstein im Eck- und Öffnungsbereich erzielten Rohdichten und Festigkeiten ebenfalls für 105° C als auch für 500° C aufgeführt. Für die Würfel von 10 cm Kantenlänge wurden in diese Tabelle die Werte desjenigen Verdichtungsgrades aufgenommen, welche annähernd den im Öffnungsbereich erzielten Würfelrohndichten aus dem Schornstein entsprachen.

5. Auswertung

In den Bildern 13 bis 15 (Anlagen 23 bis 25) wurde eine Auswertung dahingehend vorgenommen, daß man einerseits die Abhängigkeit der Anfangsdruckfestigkeit der Würfel von 10 cm Kantenlänge von der ermittelten Kehrgutmenge aufgetragen hat, andererseits die Abhängigkeit zwischen der Restfestigkeit und der Festigkeitsabnahme von Würfeln aus dem Öffnungsbereich nach Temperaturbehandlung von 500° C von der Kehrgutmenge dargestellt hat.

Wenn man eine maximal zulässige Kehrgutmenge von ca. 500 bis 600 g zugrunde legt, liegen die Festigkeitsabnahmen - von 3 Fällen abgesehen - unter 30 %. In Bild 13 (Anlage 23) zeigt sich, daß auch bei einer Kehrgutmenge bis 500 g die Druckfestigkeiten der 10 cm-Würfel (von einer Probe abgesehen) einen mittleren Wert von mindestens 2,5 N/mm² aufweisen.

Die Bilder 16 bis 19 (Anlagen 26 bis 29) zeigen den unmittelbaren Vergleich der Druckfestigkeiten der 10 cm-Würfel mit den Werten der Würfel aus den Schornsteinscheiben im Eckbereich bzw. Öffnungsbereich nach einer Temperaturbehandlung von 105° C sowie von 500° C.

Bei Zugrundelegung einer Kehrgutmenge von 500 g würden für die ausgewählten 14 Auskleidungsmassen lediglich drei über diesem Grenzwert liegen. Dabei würde sich die im Würfel mit 10 cm Kantenlänge erreichte Festigkeit bei 2,5 N/mm² oder mehr bewegen. Die Festigkeitsabnahme nach einer Temperaturbehandlung von 500° C würde den in DIN 18 160 Blatt 6 festgelegten Grenzwert von 30 % nicht überschreiten.

6. Vorschlag für die Neufassung der "Technischen Richtlinien"

Bei der Novellierung der "Technischen Richtlinien" sollten folgende Erkenntnisse berücksichtigt werden bzw. folgende Vorschläge Eingang finden:

1. Die zulässige Kehrgutmenge sollte von bisher 5000 g auf 500 g reduziert werden.
2. Der Zustand der Oberfläche der Leichtbetonröhre nach einer Temperaturbelastung von 500° C (Heizversuch) und dem Kehrversuch sollte nach wie vor Gegenstand der Beurteilung bleiben.
3. Die mittlere Ausgangsdruckfestigkeit des Leichtbetons oder Leichtmörtels sollte mindestens 3,0 N/mm² betragen, wobei kein Einzelwert unter 2,4 N/mm² liegen darf. Die Beibehaltung einer Druckfestigkeit wie bisher von 5,0 N/mm² scheint nicht erforderlich, da dieser Wert im Falle des Schornsteinauskleidungsmaterials nicht an die Norm für Schornsteinformstücke angeglichen sein muß. Im übrigen wird durch die Reduktion der Kehrgutmenge dem Umstand Rechnung getragen, daß die Leichtbetonröhre selbst eine ausreichende Festigkeit aufweisen muß.

Die maximale Rohdichte sollte mit $\rho = 1,75 \text{ kg/dm}^3$ (Mittelwert) und $\rho = 1,85 \text{ kg/dm}^3$ (größter Einzelwert) den Bestimmungen für die Leichtbetonrohddichte nach DIN 18 150 Teil 1 entsprechen.

4. In Anlehnung an DIN 18 160 Blatt 6 sollte die mittlere Druckfestigkeit der Innenauskleidung nach einer Temperaturbelastung von 500° C nicht weniger als 60 % der Ausgangsfestigkeit nach Trocknung auf Massenkonzanz betragen. Die Reduzierung von 70 auf 60 % gegenüber DIN 18 160 Blatt 6 scheint vertretbar, weil die Beanspruchung des Würfels mit 10 cm Kantenlänge bei der Temperaturbelastung im Muffelofen allseitig erfolgt und nicht ungleichmäßig wie im Schornstein selbst.
5. Wie bereits in den bisherigen Prüfungen durchgeführt, sollten mindestens 9 Würfel (besser wären 15) von 10 cm Kantenlänge mit unterschiedlicher Verdichtung hergestellt werden, wobei der Verdichtungsgrad mit "gering", "mittel" und "stark" entsprechend der im Abschnitt 3 beschriebenen Weise zu wählen ist. Für die Herstellung, Behandlung und Prüfung der Probekörper gilt im übrigen DIN 1048 Teil 1. Jeweils 2 (3) dieser Würfel je Verdichtungsgrad sind 28 Tage nach der Herstellung bei 105° C bis zur Massenkonzanz zu trocknen, unmittelbar danach sind ihre Rohdichte und Druckfestigkeit zu ermitteln. Ein weiterer (2) Würfel je Verdichtungsgrad ist ebenfalls 28 Tage nach der Herstellung einer 6-stündigen allseitigen Temperaturbelastung von 500° C im Muffelofen auszusetzen; unmittelbar danach sind ihre Rohdichte und Druckfestigkeit zu ermitteln.
6. Um einen Vergleich mit den tatsächlich im Schornstein vorliegenden Verhältnissen herzustellen, sind zur Feststellung der tatsächlichen Verdichtung der Auskleidung beim Abbau des Prüfschornsteins nach der Beanspruchung im Heizversuch und Kehrversuch Proben aus der Auskleidung zu entnehmen, und zwar aus mindestens 2 unterschiedlichen Höhen. Dabei sind jeweils 2 Probestücke aus den Eckbereichen und 2 aus den Seitenmitten des Schornsteins herauszuschneiden. Aus den Probestücken sind Würfel zu sägen und nach Trocknung bei 105° C bis

zur Massenkonzanz sowie nach 6-stündiger allseitiger Temperaturbelastung von 500° C im Muffelofen sind die Rohdichten zu bestimmen. Von einer Ermittlung der Druckfestigkeit an diesen Proben kann abgesehen werden, zumal die Würfel an sich durch den Schneid- und Sägevorgang relativ uneben und gefügestört sein können und somit die Festigkeitsergebnisse weitgehend von Zufällen abhängig wären.

Maßgebend für die Beurteilung der Einhaltung der vorgenannten Anforderungen bezüglich Rohdichte, Druckfestigkeit und Festigkeitsänderung durch Temperaturbelastung sind die Ergebnisse der Prüfungen an den 10 cm-Würfeln mit Verdichtung nach Ziffer 5, deren Rohdichte am besten mit der Rohdichte der Würfel nach Ziffer 6 übereinstimmt; dabei sind jeweils die Mittelwerte zugrunde zu legen.

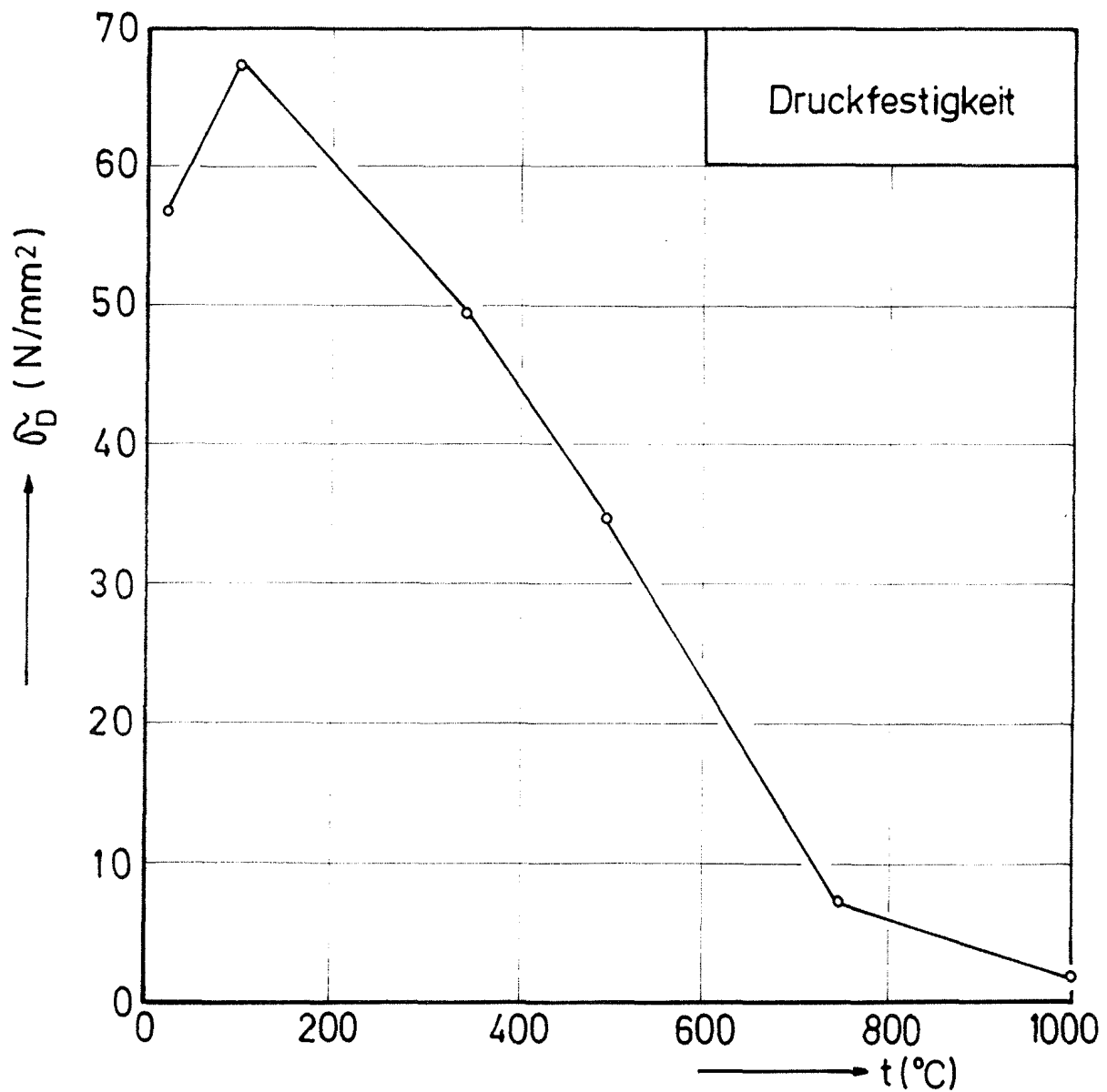
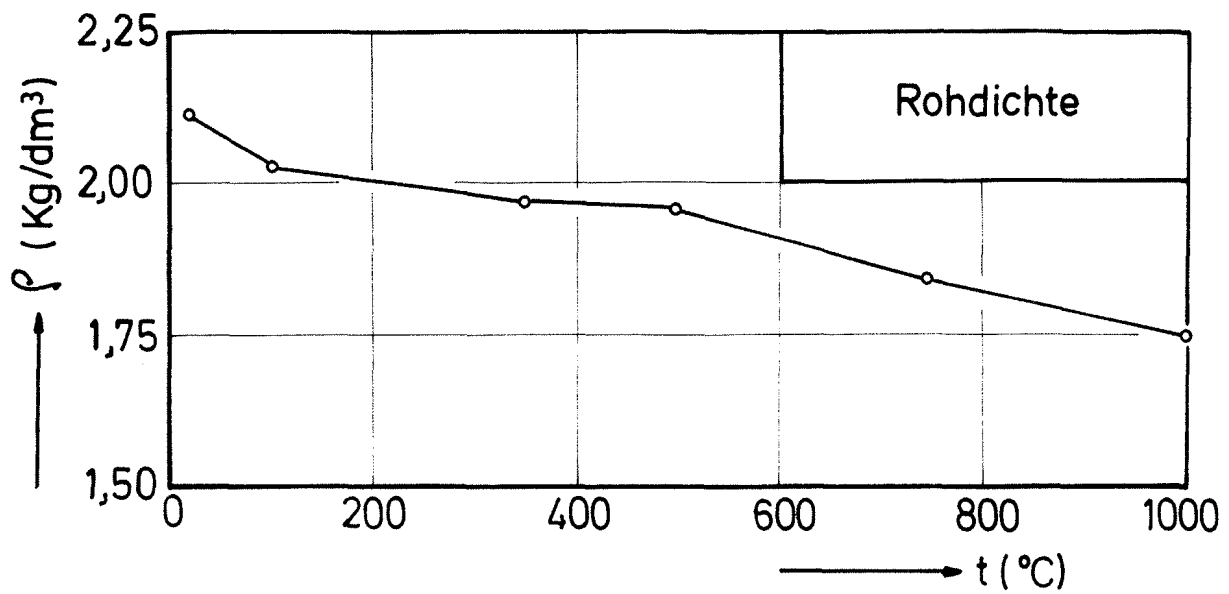


Bild 1 : Rohdichte und Druckfestigkeit des Kaminauskleidungsmaterials A nach Erhitzung bis 1000°C

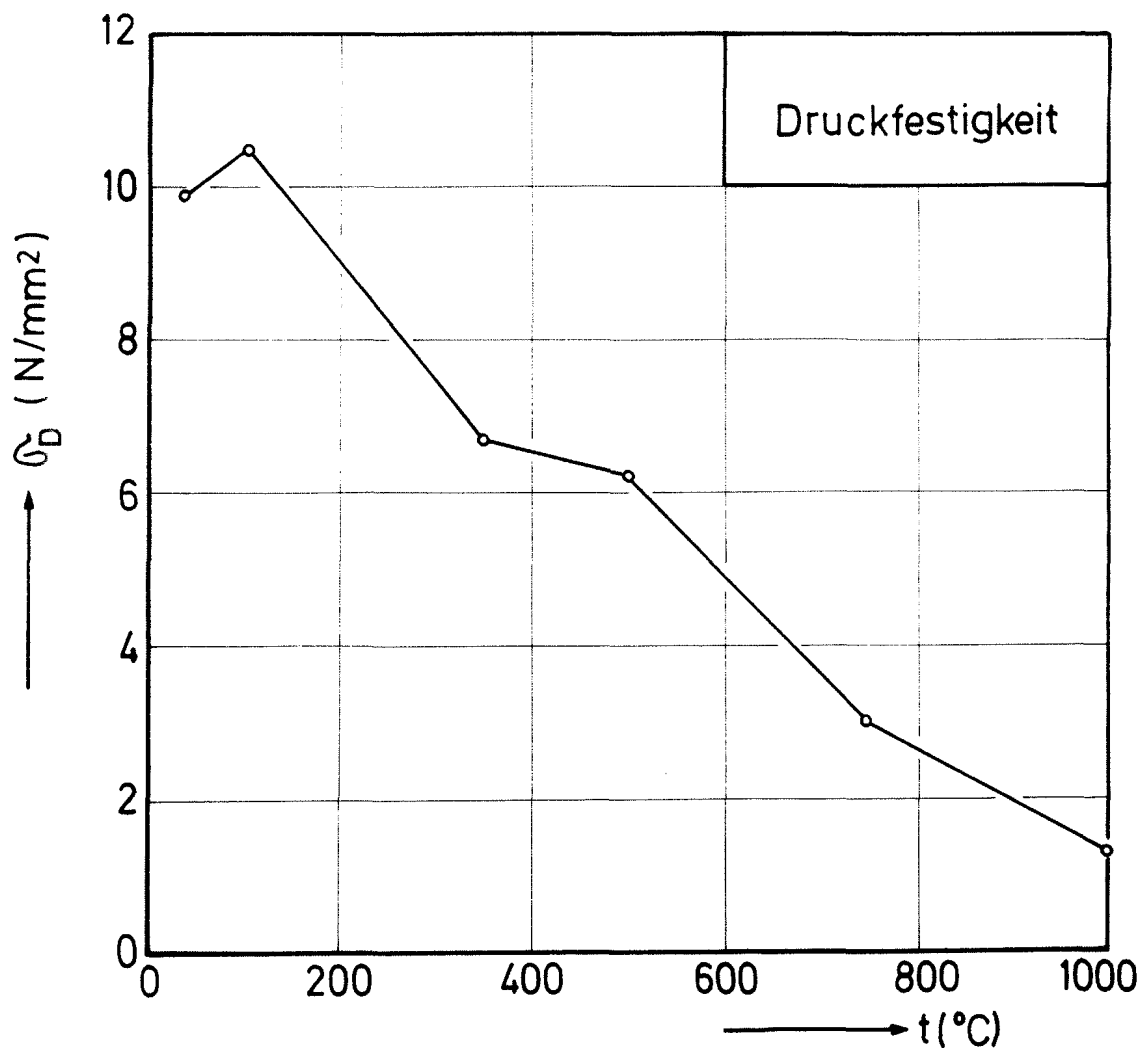
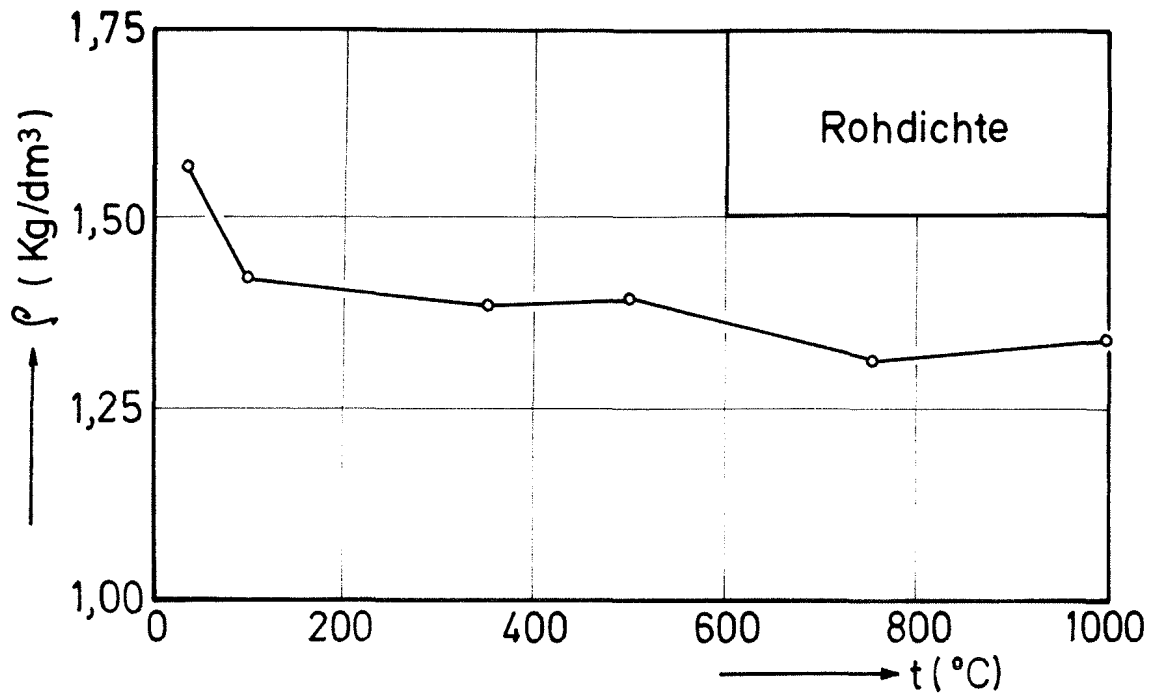


Bild 2: Rohdichte und Druckfestigkeit des Kaminauskleidungsmaterials B nach Erhitzung bis 1000°C

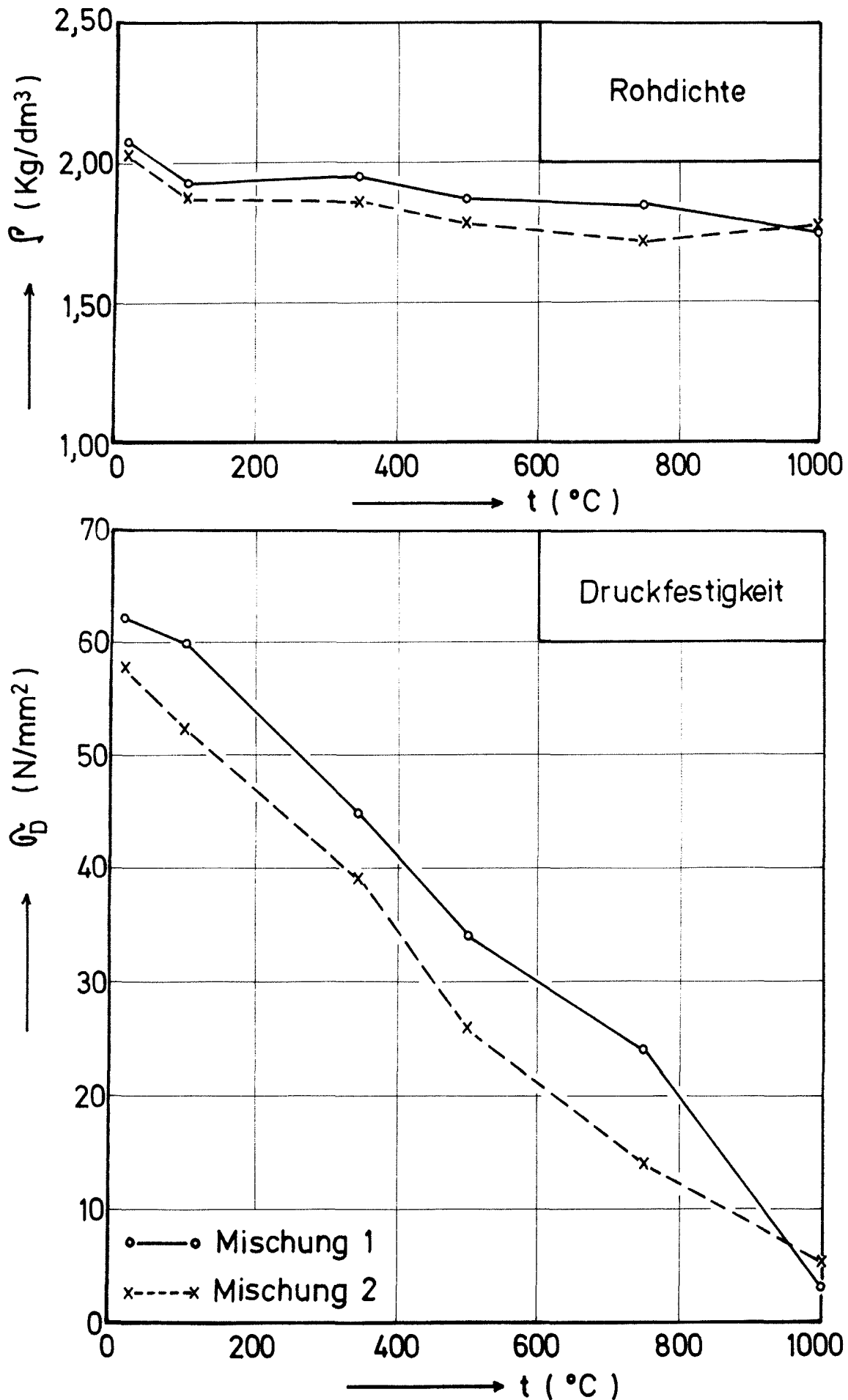


Bild 3 : Rohdichte und Druckfestigkeit des Kaminauskleidungs-
materials C nach Erhitzung bis 1000°C

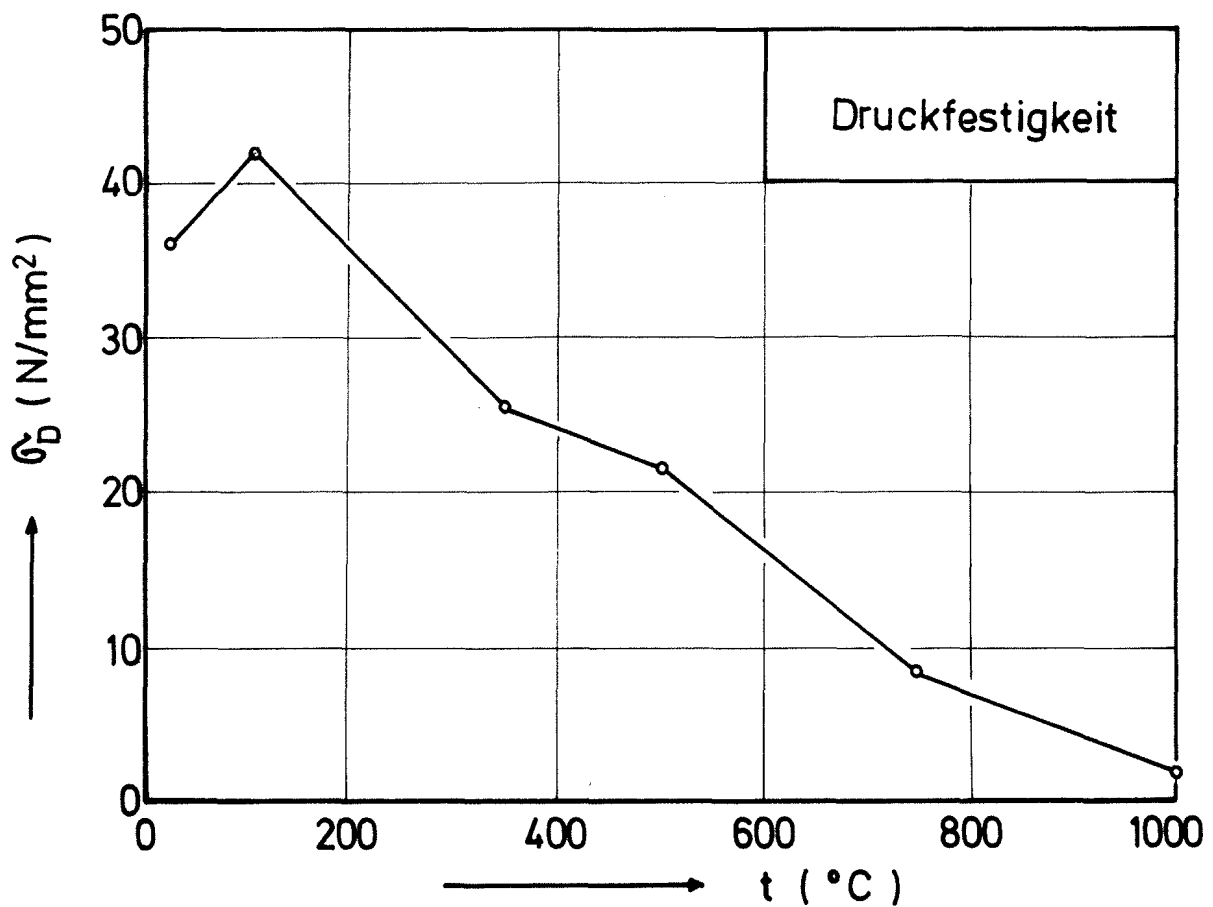
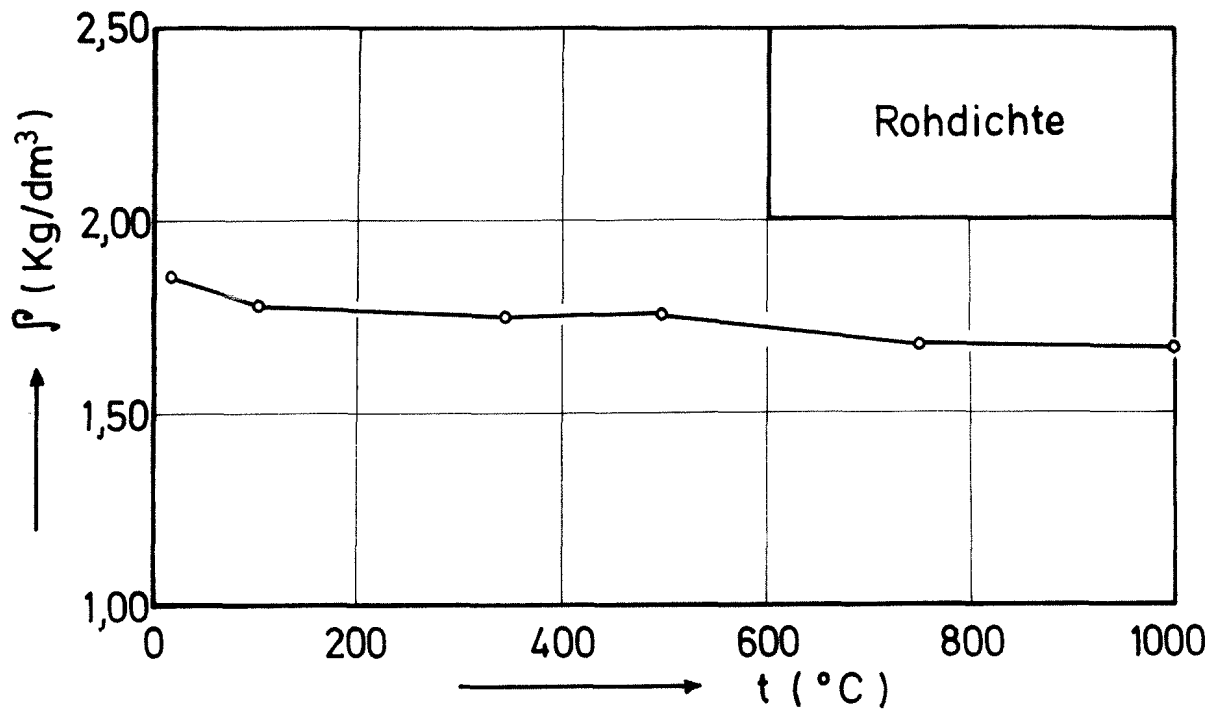


Bild 4 : Rohdichte und Druckfestigkeit des Kaminauskleidungsmaterials D nach Erhitzung bis 1000°C

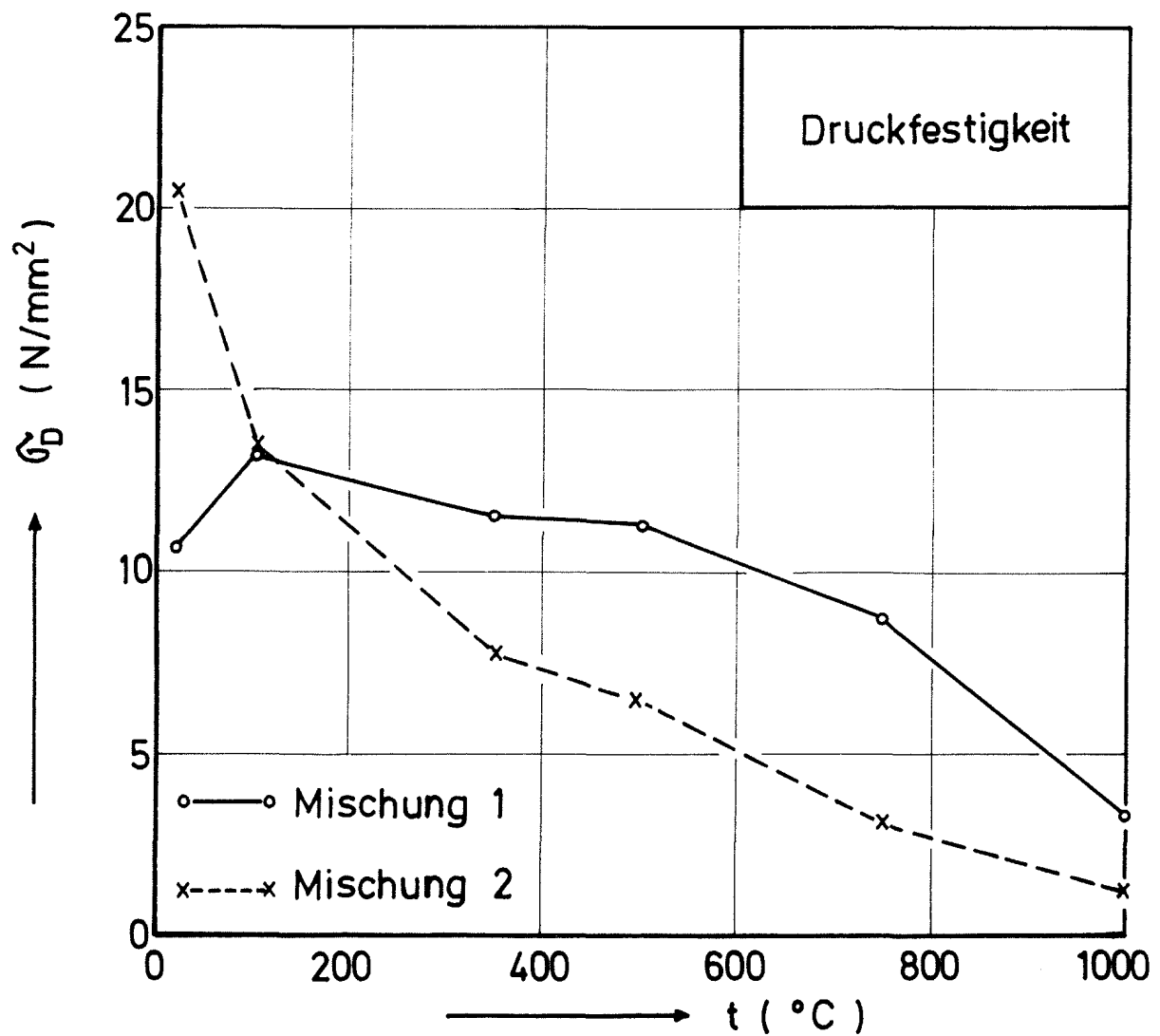
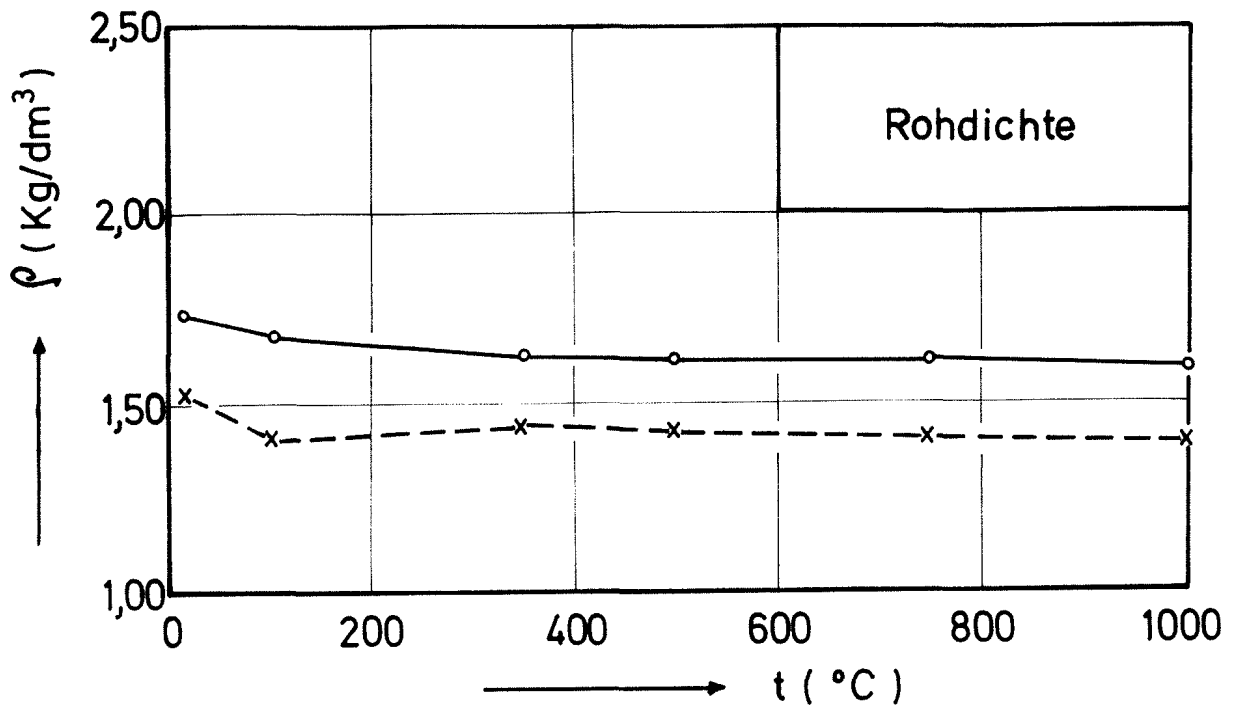


Bild 5 : Rohdichte und Druckfestigkeit des Kaminauskleidungs-
materials E nach Erhitzung bis 1000°C

Tabelle 1: Rohdichte und Druckfestigkeit von Kaminauskleidungsmaterial
- Prüfdurchgang 1 bis 5 -

Prüf- durch- gang Nr.	Verfahren	Anzahl der Arbeits- gänge	Zuschlagstoffe	Mischungs- verhält- nis	Würfel- herkunft	Kanten- länge (mm)	Rohdichte ρ (kg/dm ³)	Druckfestigkeit σ_D (N/mm ²)
	Kehrgutmenge							
1	rütteln	2	Industrieerde	2	W	100	1,54 (1,51-1,57)	7,0 (5,8-8,8)
	1548 g		Granulat	0,2	A-D	-	-	-
2	rütteln	2	PZ 35 F	1	A-E	60	1,17 (1,13-1,20)	1,8 (1,5-1,9)
	1475 g		Hartbetonstoff		S-D	36-41	1,11 (1,01-1,19)	5,6 (3,5-8,4)
3	rütteln	2	Industrieerde	2	W	100	1,63 (1,61-1,67)	10,4 (7,9-12,8)
	1125 g		PZ 35 F	1	A-D	-	-	-
4	rütteln	1	Hartbetonstoff		A-E	60	1,28 (1,25-1,33)	2,7 (1,8-3,5)
	3366 g				S-D	36-44	1,16 (1,13-1,18)	6,6 (5,5-9,2)
5	rütteln	1	gran. Hochofenschlacke	1	S-D	47	1,01 (0,96-1,07)	1,9 (1,3-2,6)
	17 g		EPZ 35 F	1	S-E	62	1,01 (0,99-1,03)	1,7 (1,3-2,0)
6	rütteln	1	Anstrich durch Zement-Schlämme		W	100	1,26 (1,24-1,29)	3,2 (3,0-3,4)
	3366 g		gran. Hochofenschlacke hell	0,5	A-D	-	-	-
7	rütteln	1	gran. Hochofenschlacke dunkel	0,5	A-E	62	1,15 (1,14-1,17)	1,9 (1,5-2,5)
	3366 g		EPZ 35 F	1	S-D	46	1,01 (0,96-1,07)	1,9 (1,3-2,6)
8	rütteln	1	Anstrich durch Zement-Schlämme		S-E	61	1,01 (0,99-1,03)	1,7 (1,3-2,0)
	3366 g		Leichtschamotte	0,1	W	100	1,06 (1,05-1,08)	1,2 (0,8-1,5)
9	rütteln	1	Schamotte	0,54	A-D	51	1,06 (1,05-1,08)	1,2 (0,8-1,5)
	3366 g		Schamottemehl	0,1	A-E	61	1,11 (1,04-1,16)	1,1 (0,9-1,4)
10	rütteln	1	Tonerdeschmelzzement	0,26	S-D	52	0,98 (0,95-1,01)	1,8 (1,6-2,1)
	17 g		Anstrich durch Säure- mörtel		S-E	72	0,94 (0,93-0,96)	1,0 (0,8-1,3)

Tabelle 2: Rohdichte und Druckfestigkeit von Kaminauskleidungsmaterial
 - Prüfdurchgang 6 bis 9 -

Prüf- durch- gang Nr.	Verfahren	Anzahl der Arbeits- gänge	Zuschlagstoffe	Mischungs- verhält- nis	Würfel- herkunft	Kanten- länge (mm)	Rohdichte ρ (kg/dm ³)	Druckfestigkeit σ_D (N/mm ²)
	Kehrgutmenge							
6	pressen	2 \varnothing 20 + \varnothing 16	gran. Hochofenschlacke PZ 45 F	3 : 1	W-g W-m W-s A-D A-E S-D S-E	100 100 100 35-62 62-83 41-46 56-72	1,53 (1,53-1,54) 1,53 (1,52-1,53) 1,57 (1,55-1,58) 1,62 (1,59-1,64) 1,54 (1,52-1,57) 1,56 (1,52-1,60) 1,54 (1,51-1,56)	5,7 (5,0-6,1) 6,2 (5,6-6,7) 7,3 (7,0-7,5) 14,1 (10,7-17,4) 12,0 (10,6-13,5) 8,8 (6,9-13,2) 9,5 (4,5-14,1)
	101 g							
7	pressen	2 \varnothing 20 + \varnothing 16	gran. Hochofenschlacke PZ 45 F	3 : 1	W-g W-m W-S A-D A-E S-D S-E	100 100 100 35-47 61-72 41-76 40-81	1,53 (1,53-1,54) 1,53 (1,52-1,53) 1,57 (1,55-1,58) 1,62 (1,58-1,65) 1,59 (1,57-1,60) 1,58 (1,53-1,61) 1,54 (1,52-1,56)	5,7 (5,0-6,1) 6,2 (5,6-6,7) 7,3 (7,0-7,5) 15,8 (9,6-19,7) 16,6 (12,1-21,9) 8,6 (6,7-14,8) 9,1 (5,2-12,2)
	139 g							
8	rütteln	1	roter Schlackensand gran. Hochofenschlacke PZ 45 F	1,5 : 1,5 : 1	W-g W-m W-s A-D A-E S-D S-E	100 100 100 35-50 61-71 36-61 55-71	1,42 (1,40-1,44) 1,56 (1,55-1,57) 1,68 (1,68-1,69) 1,61 (1,54-1,70) 1,51 (1,43-1,60) 1,22 (1,17-1,32) 1,19 (1,13-1,22)	7,4 (5,7-8,3) 15,1 (14,2-16,9) 24,7 (23,1-27,6) 22,7 (15,7-27,5) 15,0 (10,1-24,0) 1,8 (1,3-2,9) 1,8 (1,5-2,1)
	588 g							
9	rütteln	1	Quarzsand Mauersand PZ 35 F Kompakta Cerosit	1 : 1 : 1 : 1	W-g W-m W-s A-D A-E S-D S-E	100 100 100 35-45 64-71 35-46 61-71	1,90 (1,87-1,93) 1,99 (1,98-2,00) 2,02 (2,00-2,04) 1,72 (1,68-1,76) 1,68 (1,64-1,72) 1,70 (1,67-1,72) 1,72 (1,69-1,75)	31,8 (30,0-34,1) 49,5 (47,9-50,9) 52,4 (46,4-56,9) 14,9 (12,1-20,7) 12,3 (8,9-16,0) 13,5 (11,1-15,3) 14,8 (10,8-18,2)
	10 g							

Prüf- durch- gang	Verdichtungsgrad									Kehrgutmenge bei Schornsteinversuch
	gering			mittel			stark			
	ρ (g/cm ³) nach Temp.beh.bei		Min- derung auf	ρ (g/cm ³) nach Temp.beh.bei		Min- derung auf	ρ (g/cm ³) nach Temp.beh.bei		Min- derung auf	
	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	g
I	1,15 (1,14 - 1,16)	1,12	97	1,23 (1,22 - 1,24)	1,19	97	1,28 (1,27 - 1,29)	1,25	98	328
II	1,32 (1,31 - 1,33)	1,30	98	1,47 (1,47 - 1,48)	1,43	97	1,69 (1,69 - 1,70)	1,64	97	85
III	1,49 (1,47 - 1,51)	1,45	97	1,64 (1,62 - 1,65)	1,59	97	1,84 (1,82 - 1,87)	1,82	99	433
IV	1,28 (1,25 - 1,33)	1,25	98	1,42 (1,42 - 1,43)	1,39	98	1,53 (1,51 - 1,56)	1,51	99	3698

1) Mittelwert und Streubereich aus 3 Versuchen

2) Einzelwert

Tabelle 3a: Rohdichte ρ (g/cm³) nach Temperaturbehandlung von 105°C und 500°C in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad sowie die jeweilige Minderung der Rohdichte auf (%) am Würfel mit 10 cm Kantenlänge ermittelt.

Prüf- durch- gang	Verdichtungsgrad									Kehrgutmenge bei Schornsteinversuch
	gering			mittel			stark			
	σ_D (N/mm ²) nach Temp.beh.bei		Rest- festig- keit	σ_D (N/mm ²) nach Temp.beh.bei		Rest- festig- keit	σ_D (N/mm ²) nach Temp.beh.bei		Rest- festig- keit	
	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	g
I	1,8 (1,7 + 1,9)	1,1	61	2,9 (3,1 + 2,7)	1,6	55	4,0 (4,1 + 3,8)	2,6	65	328
II	4,1 (4,0 + 4,2)	2,4	58	9,9 (10,2 + 9,6)	5,9	60	25,4 (26,3 + 24,4)	17,6	69	85
III	5,9 (5,8 + 6,0)	2,6	44	9,5 (8,8 + 10,2)	6,4	67	22,2 (21,3 + 23,0)	15,0	68	433
IV	1,3 (1,1 + 1,5)	0,8	62	2,8 (2,5 + 3,1)	1,7	61	4,4 (4,6 + 4,3)	3,7	84	3698

1) Mittelwert aus 2 Versuchen

2) Einzelwert

Tabelle 3b: Druckfestigkeit σ_D (N/mm²) nach Temperaturbehandlung von 105°C und 500°C in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad sowie die jeweilige Restfestigkeit in (%) am Würfel mit 10 cm Kantenlänge ermittelt.

Prüf- durch- gang	Verfahren	Zahl der Arbeits- gänge 8)	LEICHTBETON			WORFEL Kantenlänge 10 cm					
			Binde- mittel	Zuschläge	Mischungs- verhältnisse 4)	Rohdichte ρ (g/cm ³)			Druckfestigkeit σ_D (N/mm ²)		
						\bar{x}	Streuung	1) 500°	\bar{x}	Streuung	1) 500°
10	R	1	PZ 35	Lavalit	1:5	1,50	1,50-1,51	1,48	3,9	3,8 + 4,0	3,0
11	R	1 + 1	EPZ 35	HO ⁹⁾	1:1 *)	1,15	1,14-1,16	1,12	1,8	1,8 + 1,9	1,1
12	R	1	PZ 35	Blähton	1:4	1,05	1,05-1,06	1,02	5,3	5,2 + 5,3	3,4
13	R	1 + 1	TrZ 35	HO ⁹⁾	1:2 *)	1,55	1,53-1,57	-	12,4	10,5 + 14,2	7,5
14	R	2	TrZ 35	Lavalit	1:3	1,48	1,45-1,50	1,48	3,4	2,8 + 3,9	2,7
15	P	1	PZ 35	Akalith:Tz ³⁾	2:2:0,3 *)	1,74	1,70-1,77	1,60	29,0	25,7 - 31,1	19,5
16	P	2	PZ 45	HO ⁹⁾	1:4	1,53	1,52-1,53	-	6,2	5,6 - 6,7	-
17	P	1	PZ 35	Lavalit	3:4 *)	1,52	1,49-1,55	1,47	15,2	14,1 - 16,2	11,2
18	R	1 + 1	PZ 35	HO ⁹⁾	2:4,6 *)	1,52	1,51-1,55	1,47	5,4	5,0 + 5,9	3,7
19	P	1 + 1	PZ 35	HO ⁹⁾	1:1 *)	1,14	1,10-1,23	1,18	1,2	1,1 - 1,2	-
20	R	1	PZ 35	Sand:Pe ⁵⁾	13:24:1 *)	1,35	1,34-1,36	-	2,5	1,3 - 3,4	-
21	R	1	PZ 35	Lt:Ca:Sj ⁶⁾	8:20:1:1	1,58	1,57-1,59	1,55	4,6	4,5 + 4,7	3,4
22	R	1	PZ 45	HO:Ps ⁷⁾	4:9:3	1,22	1,21-1,24	1,20	3,2	3,0 + 3,3	1,7
23	P	1 + 1	PZ 35	Rheinsand	1:3	1,73	1,72-1,74	-	12,6	12,5 + 12,8	5,7

1) Einzelwert nach Temperaturbehandlung bei 500°C

2) Mittelwert nach Temperaturbehandlung bei 500°C

3) Tz = Tonerdeschmelzzement (Lafarge)

4) Mischungsverhältnisse in Raumteilen; *) in Gewichtsteilen

Tabelle 4: ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Kehrgut- menge	SCHEIBEN AUS SCHÖRNSTEIN											
	Eckbereich						Öffnungsbereich					
	Rohdichte ρ (g/cm ³)			Druckfestigkeit σ_D (N/mm ²)			Rohdichte ρ (g/cm ³)			Druckfestigkeit σ_D (N/mm ²)		
	g	\bar{x}	Streuung	²⁾ 500°	\bar{x}	Streuung	²⁾ 500°	\bar{x}	Streuung	²⁾ 500°	\bar{x}	Streuung
454	1,53	1,48-1,58	1,48	5,9	4,7 - 7,7	5,4	1,53	1,50-1,56	1,49	6,2	4,9 - 7,3	4,9
329	1,09	1,04-1,13	1,09	1,5	1,0 - 1,8	1,1	1,12	1,09-1,15	1,10	1,2	0,6 - 1,5	1,1
248	1,05	1,01-1,08	0,99	3,4	3,2 - 3,9	2,4	1,06	1,03-1,08	1,01	3,1	2,7 - 3,3	2,4
274	1,48	1,43-1,52	1,40	~ 6,1	5,6 + 6,7	~5,1	1,47	1,47-1,51	1,50	5,8	4,7 - 7,2	8,8
94	1,40	1,39-1,43	1,33	3,5	2,3 - 4,3	2,7	1,43	1,39-1,50	1,36	3,5	2,9 - 4,6	2,7
220	1,79	1,77-1,88	1,64	39,0	17,7 - 41,7	~24,5	1,77	1,75-1,79	1,66	28,7	18,8 - 36,1	23,9
101	1,61	1,60-1,61	1,54	15,6	11,9 - 18,5	11,3	1,65	1,63-1,68	1,58	17,3	11,5 - 22,4	13,1
118	1,50	1,46-1,52	1,37	8,0	7,0 - 9,0	4,4	1,52	1,50-1,53	1,44	7,2	6,3 - 12,6	6,1
380	1,49	1,49-1,53	1,49	5,5	5,1 - 6,2	4,7	1,55	1,50-1,57	1,53	7,5	5,8 - 8,7	7,7
4547	1,10	1,06-1,11	1,00	1,4	1,2 - 1,6	0,7	1,13	1,12-1,15	1,03	1,5	1,3 - 1,7	0,6
468	1,37	1,34-1,40	1,29	3,1	2,4 - 3,9	1,7	1,38	1,35-1,41	1,33	2,3	1,7 - 2,7	1,6
1130	1,53	1,30-1,67	1,40	8,7	5,1 - 12,4	2,2	1,60	1,53-1,65	1,45	8,8	5,6 - 11,4	2,9
1875	1,11	1,07-1,15	1,00	1,8	1,2 - 2,3	0,7	1,15	1,11-1,19	1,02	1,8	1,2 - 2,7	0,7
16	1,65	1,62-1,67	1,62	10,0	8,2 - 11,4	8,6	1,67	1,66-1,68	1,63	11,2	9,6 - 14,5	8,2

5) Pe = Perlite

6) Lt : Ca : SJ = Lavalit : Kompakta : SJ 407

7) Ps = Pulverschlacke

8) 1 + 1 = Querschnittsveringerung + zusätzliche Oberflächenbehandlung

9) H0 = Hochofenschlacke

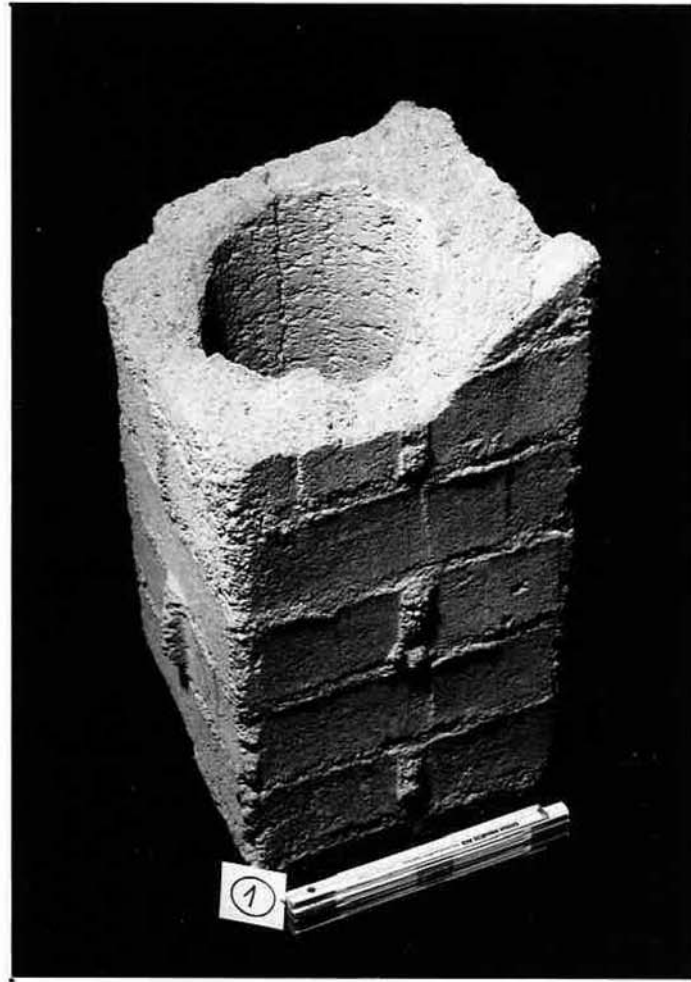
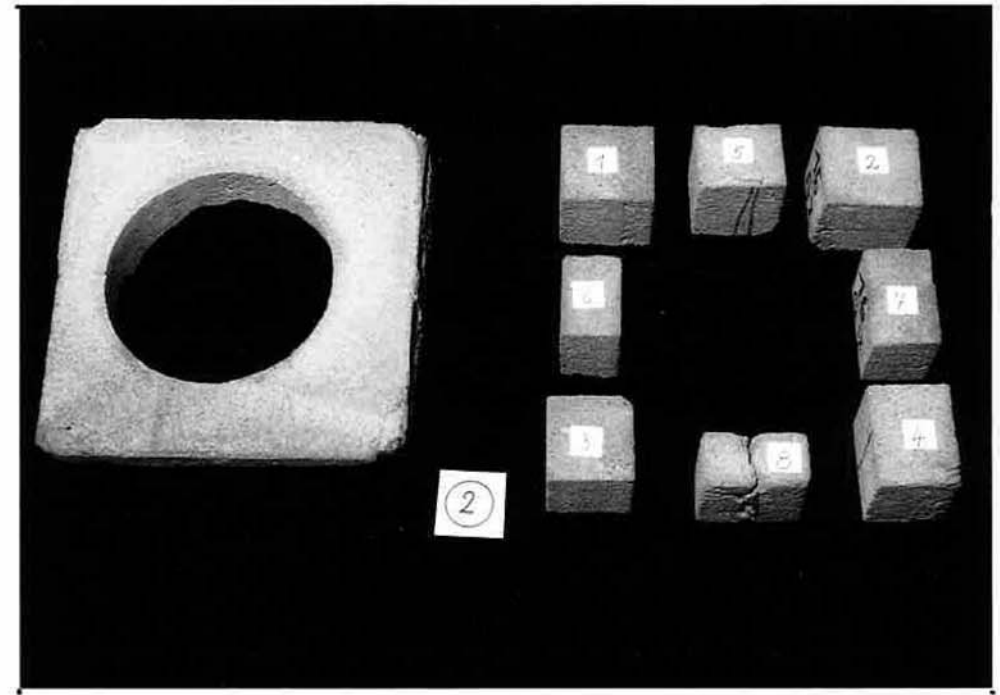


Bild 1: Ansicht eines Auskleidungsstückes nach dem Abbau der Schornsteinwangen



a) Scheibe aus Auskleidungsstück
 b) aus der Scheibe herausgesägte Probekörper (lagerichtig)

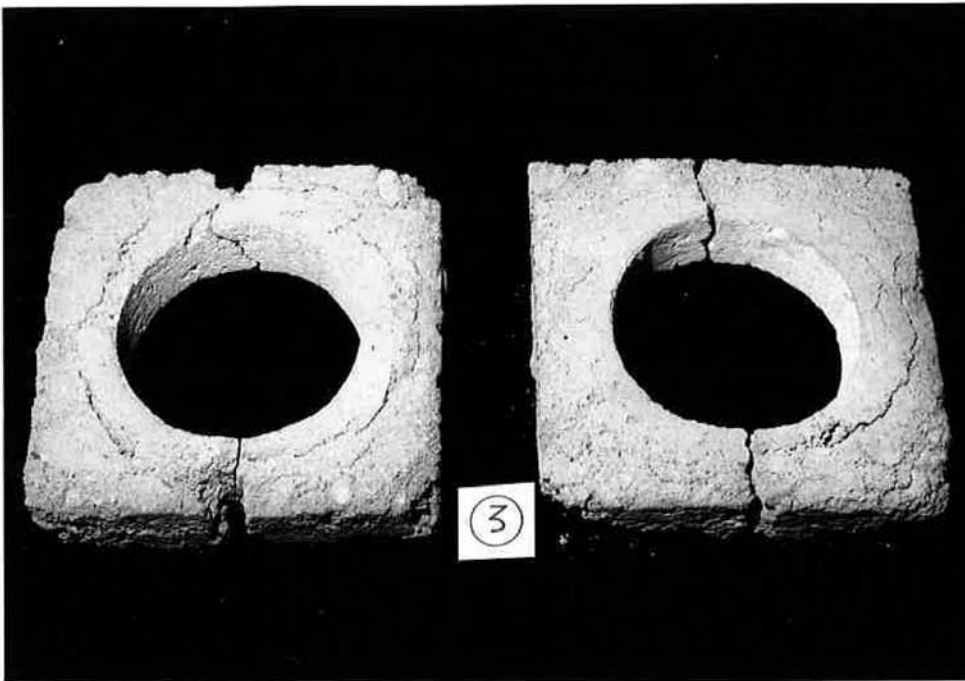


Bild 3:
ungleichmäßige
Verdichtung
einer Scheibe



Bild 5:
zwei Hälften eines
Auskleidungsstückes

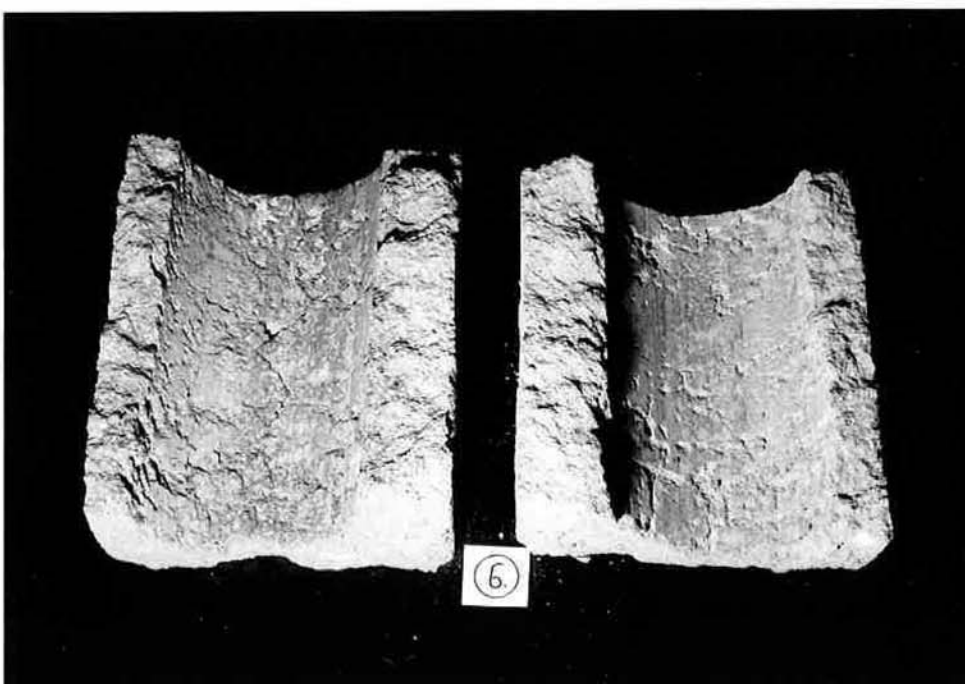


Bild 6:
Ansicht einer
Auskleidung mit
geringer Verdichtung

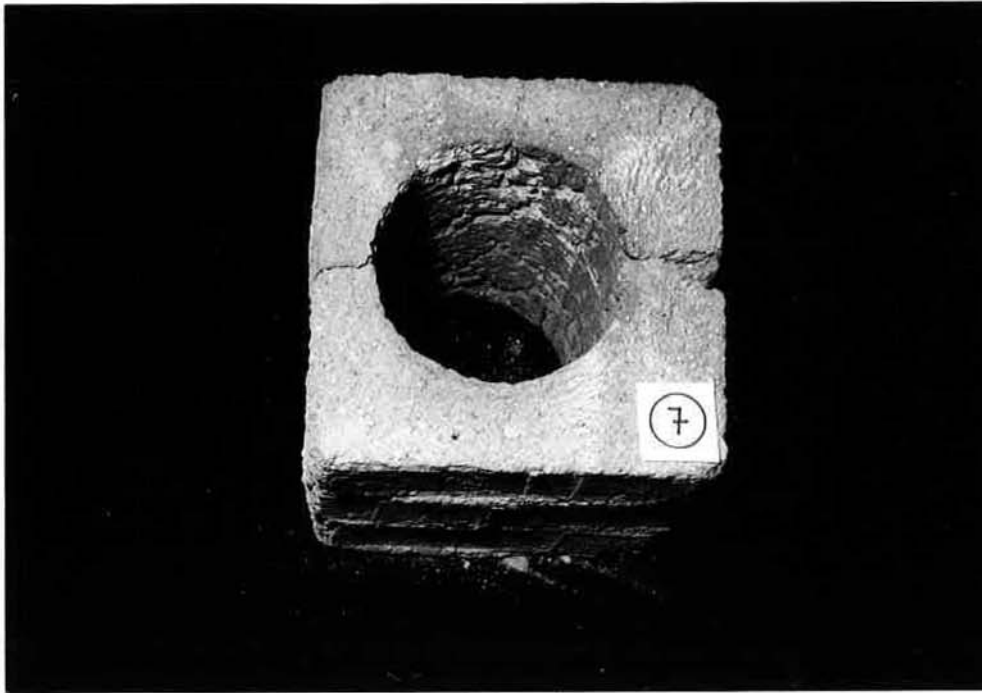


Bild 7: Schalen von Bild 6 zusammengesetzt

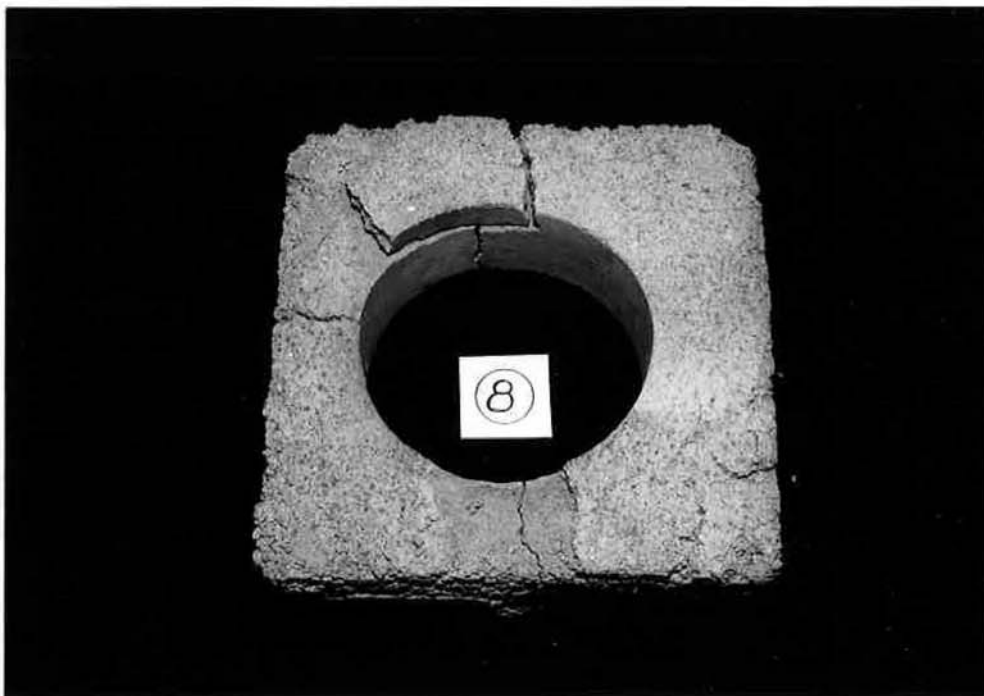


Bild 8: Horizontale Schichtbildung
innerhalb einer Leichtbetonröhre

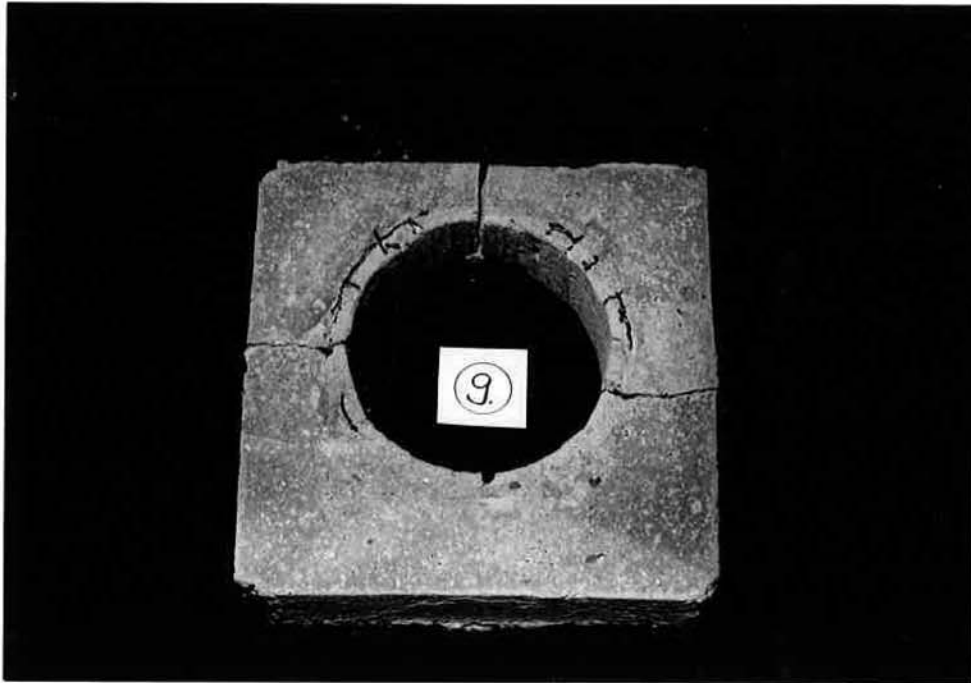


Bild 9: Röhrenabschnitt aus hartem Auskleidungsmaterial mit Zonen verschiedener Verdichtung

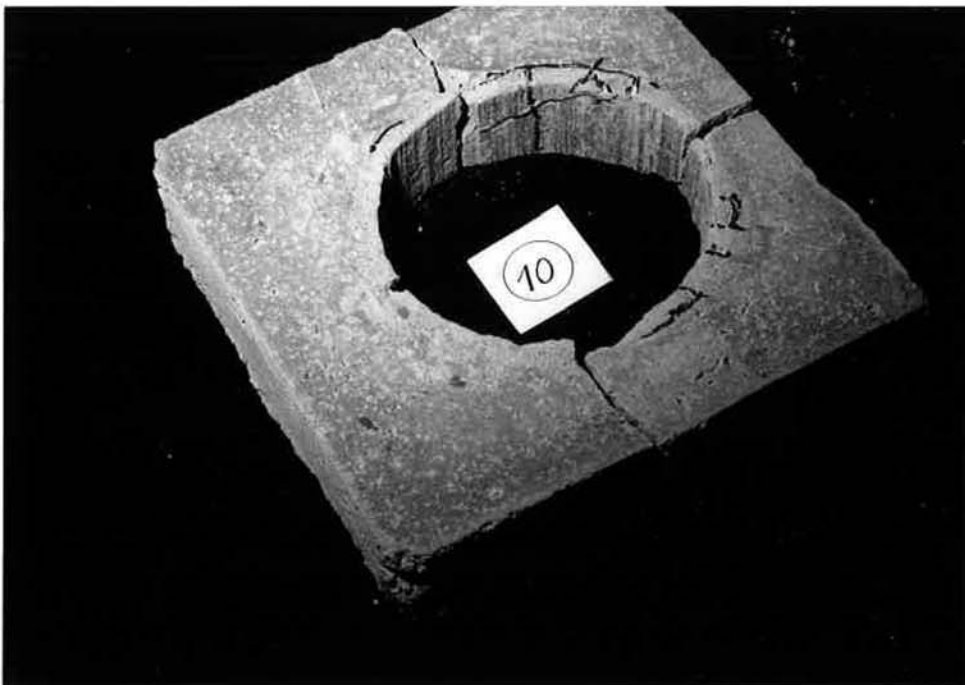


Bild 10: Schrägansicht von Bild 9

Prüf- durch- gang	Verdichtungsgrad								
	gering			mittel			stark		
	ρ (g/cm ³) nach Temp.beh.bei		Min- derung auf	ρ (g/cm ³) nach Temp.beh.bei		Min- derung auf	ρ (g/cm ³) nach Temp.beh.bei		Min- derung auf
Nr.	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%
10	1,41 (1,40 - 1,41)	1,39	99	1,50 (1,50 - 1,51)	1,48	99	1,62 (1,60 - 1,64)	1,58	98
11	1,15 (1,14 - 1,16)	1,12	97	1,23 (1,22 - 1,24)	1,19	97	1,28 (1,27 - 1,29)	1,25	98
12	1,05 (1,05 - 1,06)	1,02	97	1,13 (1,12 - 1,14)	1,10	97	1,20 (1,18 - 1,22)	1,17	98
13	1,20 (1,18 - 1,21)	1,15	96	1,41 (1,39 - 1,43)	1,37	97	1,55 (1,53 - 1,57)	1,53	99
14	1,48 (1,45 - 1,50)	1,48	100	1,64 (1,63 - 1,64)	1,62	99	1,76 (1,75 - 1,78)	1,72	98
15				1,74 (1,70 - 1,77)	1,60 (1,59 - 1,60)	92	nur ein Verdichtungsgrad		
16	1,53 (1,53 - 1,54)	-	-	1,53 (1,52 - 1,53)	-	-	1,57 (1,55 - 1,58)	-	-
17	1,38 (1,37 - 1,40)	1,33	96	1,52 (1,49 - 1,55)	1,47	97	1,62 (1,59 - 1,64)	1,55	96
18	1,52 (1,51 - 1,55)	1,47	97	1,74 (1,70 - 1,77)	1,65	95	1,81 (1,80 - 1,81)	1,76	97
19	1,02 (1,01 - 1,04)	0,98	96	1,15 (1,10 - 1,23)	1,18	102	1,26 (1,20 + 1,31)	1,15	91
20	1,28 (1,27 - 1,29)	-	-	1,35 (1,34 - 1,36)	-	-	1,55 (1,54 - 1,55)	-	-
21	1,44 (1,44)	1,39	97	1,54 (1,53 - 1,55)	1,51	98	1,58 (1,57 - 1,59)	1,55	98
22	1,03 (1,02 - 1,04)	0,99	96	1,22 (1,21 - 1,24)	1,20	98	1,36 (1,35 - 1,36)	1,32	97
23	1,45 (1,42 - 1,47)	1,43	99	1,73 (1,72 - 1,74)	1,68	97	1,86 (1,85 - 1,86)	1,81	97

¹⁾ Mittelwert und Streubereich aus 3 Versuchen ²⁾ Einzelwert

Tabelle 5: Rohdichte ρ (g/cm³) nach Temperaturbehandlung von 105° C und 500° C in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad sowie die jeweilige Minderung der Rohdichte auf (%) am Würfel mit 10 cm Kantenlänge ermittelt.

Prüf- durch- gang	Verdichtungsgrad								
	gering			mittel			stark		
	σ_D (N/mm ²) nach Temp.beh.bei		Rest- festig- keit	σ_D (N/mm ²) nach Temp.beh.bei		Rest- festig- keit	σ_D (N/mm ²) nach Temp.beh.bei		Rest- festig- keit
Nr.	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%	105°C ¹⁾	500°C ²⁾	%
10	2,5 (2,4 + 2,6)	1,8	72	3,9 (3,8 + 4,0)	3,0	77	6,9 (6,8 + 6,9)	4,2	61
11	1,8 (1,8 + 1,9)	1,1	60	2,9 (2,7 + 3,1)	1,6	55	4,0 (3,8 + 4,1)	2,6	65
12	5,3 (5,2 + 5,3)	3,4	64	8,7 (8,2 + 9,2)	5,8	67	13,2 (11,8 + 14,6)	8,8	67
13	3,0 (2,8 + 3,2)	1,0	33	6,5 (6,1 + 6,8)	3,1	48	12,4 (10,5 + 14,2)	7,5	60
14	3,4 (2,8 + 3,9)	2,7	79	6,7 (6,6 + 6,7)	6,3	94	12,8 (12,4 + 13,2)	12,0	94
15				29,0 (25,7 - 31,1)	19,4 (17,5 - 22,0)	67	nur ein Verdichtungsgrad		
16	5,7 (5,0 - 6,1)	-	-	6,2 (5,6 - 6,7)	-	-	7,3 (7,0 - 7,5)	-	-
17	8,4 (8,0 + 8,7)	5,1	61	15,2 (14,1 + 16,2)	11,2	74	24,2 (22,5 + 25,8)	14,6	60
18	5,5 (5,0 + 5,9)	3,7	67	16,5 (15,8 + 17,1)	10,5	64	23,2 (21,8 + 24,6)	15,5	67
19	0,73 (0,60 + 0,85)	0,49	67	1,18 (1,12 + 1,23)	1,14	97	2,34 (Einzelwert)	1,51	65
20	1,8 (1,0 - 2,2)	-	-	2,5 (1,3 - 3,4)	-	-	7,5 (5,2 - 9,0)	-	-
21	2,2 (2,15 + 2,17)	1,0	46	3,6 (2,95 + 4,28)	2,3	64	4,6 (4,56 + 4,74)	3,4	74
22	0,9 (0,8 + 0,9)	0,5	56	3,2 (3,1 + 3,3)	1,7	53	7,1 (6,8 + 7,3)	3,5	49
23	3,3 (3,2 + 3,4)	1,4	42	12,7 (12,5 + 12,8)	5,7	45	20,0 (19,8 + 20,1)	11,3	57

¹⁾ Mittelwert und Streubereich bzw. Einzelwerte ²⁾ Einzelwert

Tabelle 6: Druckfestigkeit σ_D (N/mm²) nach Temperaturbehandlung von 105° C und 500° C in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad sowie die jeweilige Restfestigkeit in (%) am Würfel mit 10 cm Kantenlänge ermittelt.

Prüf- durchgang Nr.	Entnahme- stelle	Ofentemperatur (°C)					
		20°	105°	350°	500°	750°	1000°
10	E	1,55	1,53	1,50	1,48	1,43	1,43
	Ö	1,55	1,53	1,50	1,49	1,44	1,43
11	E	1,10	1,09	1,09	1,09	0,99	0,99
	Ö	1,14	1,12	1,12	1,10	1,02	1,02
12	E	1,07	1,05	1,06	0,99	0,97	0,92
	Ö	1,08	1,06	1,03	1,01	0,98	0,96
13	E	-	~1,48	-	~1,40	-	-
	Ö	-	1,47	-	1,50	-	-
14	E	1,43	1,40	1,31	1,33	1,31	1,22
	Ö	1,46	1,43	1,35	1,36	1,34	1,29
15	E	-	1,79	-	1,64	-	-
	Ö	-	1,77	-	1,66	-	-
16	E	-	1,61	-	1,54	-	1,53
	Ö	-	1,65	-	1,58	-	1,56
17	E	1,54	1,50	1,37	1,37	1,31	1,30
	Ö	1,54	1,52	1,41	1,44	1,33	1,32
18	E	1,54	1,49	~ 1,49	1,49	1,40	1,41
	Ö	1,56	1,55	~ 1,46	1,53	1,47	1,46
19	E	1,08	1,10	1,06	1,00	0,99	0,98
	Ö	1,13	1,13	1,09	1,03	1,03	1,00
20	E	1,38	1,37	1,35	1,29	1,26	1,21
	Ö	1,42	1,38	1,34	1,33	1,28	1,26
21	E	1,51	1,53	1,51	1,40	1,41	1,40
	Ö	1,60	1,60	1,49	1,45	1,43	1,39
22	E	1,13	1,11	1,04	1,00	0,88	-
	Ö	1,19	1,15	1,09	1,02	0,89	-
23	E	1,67	1,65	1,65	1,62	1,54	1,53
	Ö	1,68	1,67	1,67	1,63	1,56	1,63

E : Eckbereich
 Ö : Öffnungsbereich

"-": nicht genügend Probenmaterial vorhanden
 "~": falls nur 1 oder 2 Einzelwerte vorlagen

Tabelle 7: Änderung der Rohdichte ρ (g/cm³) nach der Temperaturbehandlung

Prüf- durchgang Nr.	Entnahme- stelle	Ofentemperatur (°C)					
		20°	105°	350°	500°	750°	1000°
10	E Ö	7,2* 6,0	5,9 6,2	5,2 5,3	5,4 4,9	1,7 1,6	0,4 0,3
11	E Ö	1,4 1,1	1,5 1,2*	0,9 1,0	1,1 1,1	0,5 0,5	0,2 0,3
12	E Ö	3,7 3,2	3,4 3,1	2,7* 2,6	2,4* 2,4	1,8 2,0	1,0 1,0
13	E Ö	- -	~ 6,1 5,8	- -	~ 5,1 8,8*	- -	- -
14	E Ö	4,0 4,2*	3,5* 3,5*	2,9* 2,4*	2,7* 2,7	1,3 1,2	0,4 0,2*
15	E Ö	- -	39,0* 28,7*	- -	~ 24,5 23,9	- -	- -
16	E Ö	- -	15,6* 17,3*	- -	11,3 13,1*	- -	1,7 1,9
17	E Ö	8,5 9,0*	8,0 7,2*	5,2 5,9	4,4 6,1*	2,5* 2,8	2,1 1,7
18	E Ö	5,9* 6,5	5,5 7,5	~ 6,1 ~ 6,1	4,7* 7,7	1,6 2,3	0,2 0,2
19	E Ö	1,2 1,5	1,4 1,5	0,8 0,7	0,7 0,6	~ 0,2 0,1	0 0
20	E Ö	3,7 3,0	3,1 2,3	2,4 1,9*	1,7* 1,6*	0,5 0,5*	0,3 0,2
21	E Ö	4,6 7,5	8,7* 8,8*	4,5 4,4	2,2 2,9	~ 2,0 1,6*	0 0
22	E Ö	1,5* 2,1	1,8 1,8	1,0 1,3	0,7* 0,7	0,3 0,3	- -
23	E Ö	9,4 11,7*	10,0 11,2	9,5 8,8	8,6 8,2	1,9 2,7	0,8 1,0

E : Eckbereich
 Ö : Öffnungsbereich

"-": nicht genügend Probenmaterial vorhanden
 "0": Proben sind nach d. Temp.behandlung zerfallen
 * : Einzelwerte streuen relativ stark
 ~ : falls nur 1 oder 2 Einzelwerte vorlagen

Tabelle 8: Änderung der Druckfestigkeit σ_D (N/mm²) nach der Temperaturbehandlung

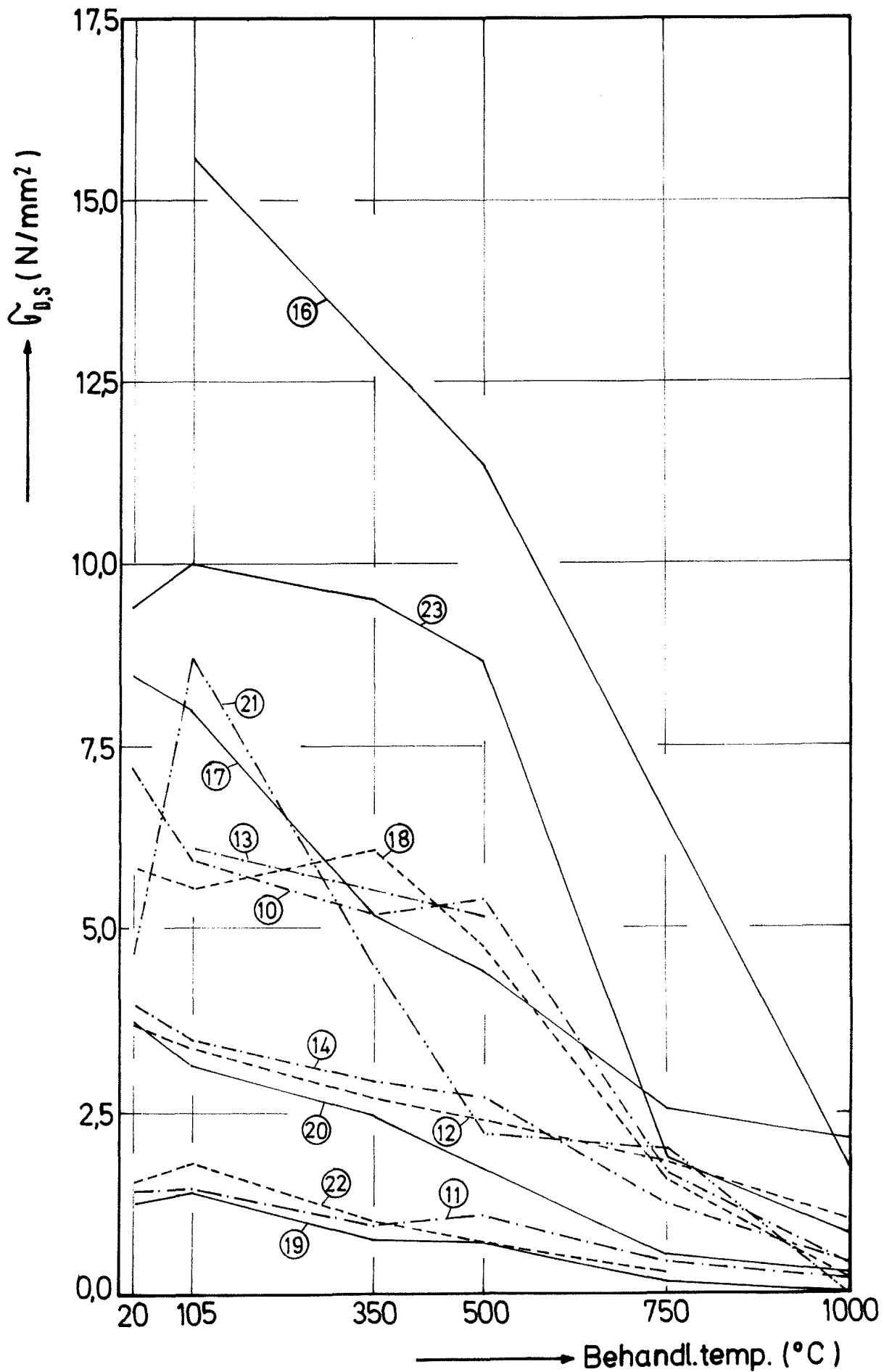


Bild 11: Verlauf der Druckfestigkeit σ_D in Abhängigkeit von der Temperatur für Proben aus dem Eckbereich

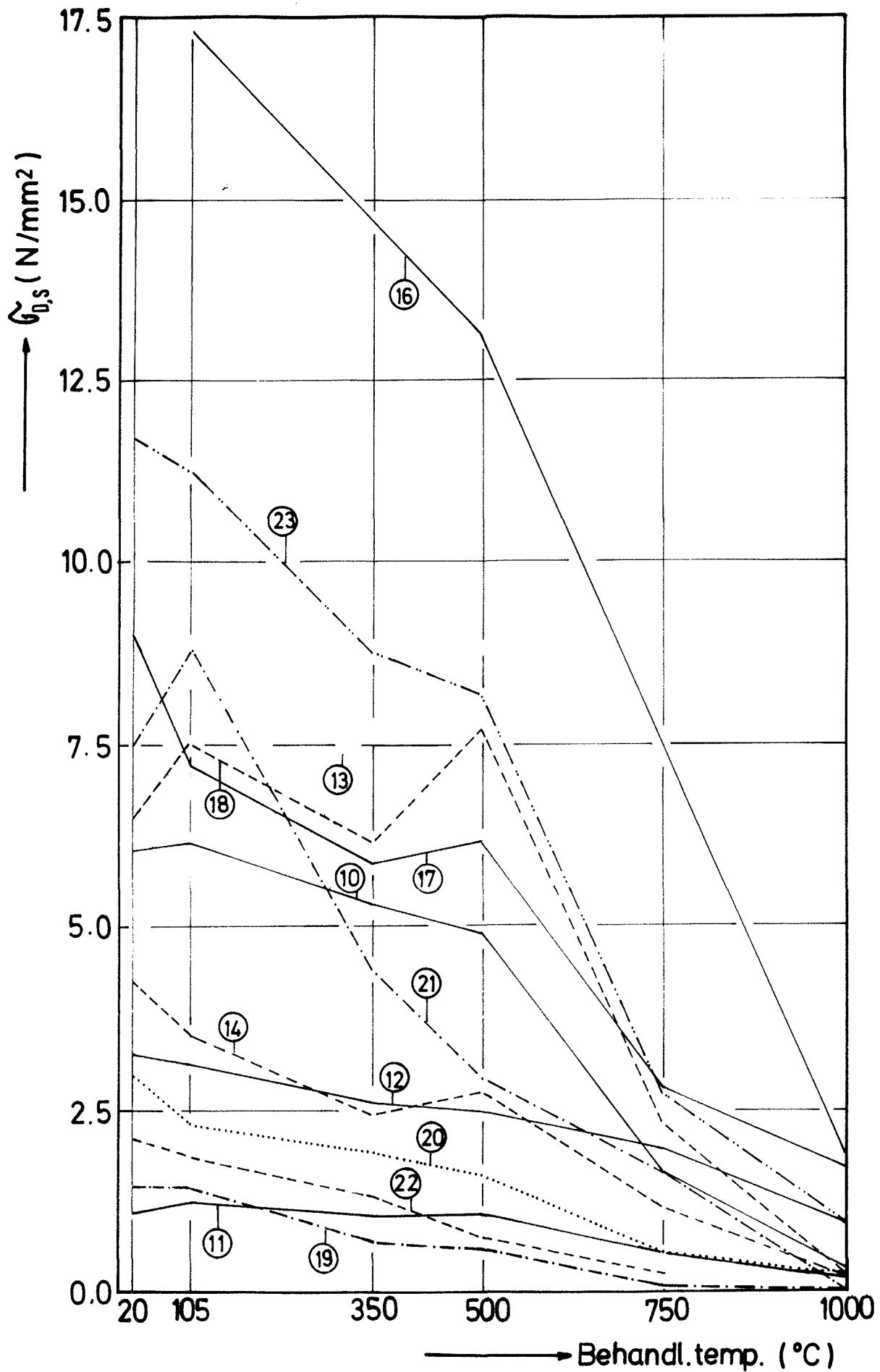


Bild 12: Verlauf der Druckfestigkeit σ_D in Abhängigkeit von der Temp. für Proben aus dem Öffnungsbereich

Prüf- durchgang Nr.	Ent- nahme- stelle	σ_D (N/mm ²)		Rest- festigkeit %	Festigkeits- abnahme %
		nach Temp.beh.bei 105° C	500° C		
10	E Ö	5,9	5,4	92 79	8 21
		6,2	4,9		
11	E Ö	1,5	1,1	73 92	27 8
		1,2	1,1		
12	E Ö	3,4	2,4	70 77	30 23
		3,1	2,4		
13	E Ö	~ 6,1	~ 5,1	84 (152)	16 -
		5,8	(8,8)		
14	E Ö	3,5	2,7	77 77	23 23
		3,5	2,7		
15	E Ö	39,0	~ 24,5	63 82	37 18
		28,7	23,9		
16	E Ö	15,6	11,3	73 76	27 24
		17,3	13,1		
17	E Ö	8,0	4,4	55 85	45 15
		7,2	6,1		
18	E Ö	5,5	4,7	85 ~100	15 ~ 0
		7,5	7,7		
19	E Ö	1,4	0,7	50 40	50 60
		1,5	0,6		
20	E Ö	3,1	1,7	55 70	45 30
		2,3	1,6		
21	E Ö	8,7	2,2	25 33	75 67
		8,8	2,9		
22	E Ö	1,8	0,7	39 39	61 61
		1,8	0,7		
23	E Ö	10,0	8,6	86 73	14 27
		11,2	8,2		

Tabelle 9: Druckfestigkeit σ_D (N/mm²), Restfestigkeit (%) und Festigkeitsabnahme (%) durch Temperaturbehandlung bei 500°C für die Proben aus den Leichtbetonröhren.

Prüf- durchgang Nr.	Ent- nahme- stelle	σ_D (N/mm ²)		Rest- festigkeit %	Festigkeits- abnahme %
		nach Temp.beh. bei			
		105° C	750° C		
10	E Ö	5,9	1,7	29	71
		6,2	1,6	26	74
11	E Ö	1,5	0,5	33	67
		1,2	0,5	42	58
12	E Ö	3,4	1,8	53	47
		3,1	2,0	65	35
13	E Ö	~ 6,1	-	n.f.	n.f.
		5,8	-	n.f.	n.f.
14	E Ö	3,5	1,3	37	63
		3,5	1,2	34	66
15	E Ö	39,0	-	n.f.	n.f.
		28,7	-	n.f.	n.f.
16	E Ö	15,6	-	n.f.	n.f.
		17,3	-	n.f.	n.f.
17	E Ö	8,0	2,5	31	69
		7,2	2,8	39	61
18	E Ö	5,5	1,6	29	71
		7,5	2,3	31	69
19	E Ö	1,4	~ 0,2	14	86
		1,5	0,1	7	93
20	E Ö	3,1	0,5	16	84
		2,3	0,5	22	78
21	E Ö	8,7	~ 2,0	23	77
		8,8	1,6	18	82
22	E Ö	1,8	0,3	17	83
		1,8	0,3	17	83
23	E Ö	10,0	1,9	19	81
		11,2	2,7	24	76

"n.f." = nicht feststellbar, da nicht genügend Probenmaterial vorhanden

Tabelle 10: Druckfestigkeit σ_D (N/mm²), Restfestigkeit (%) und Festigkeits-
abnahme (%) durch Temperaturbehandlung bei 750°C für die Proben
aus den Leichtbetonröhren.

Prüf- durchgang Nr.	Ent- nahme- stelle	σ_D (N/mm ²)		Rest- festigkeit %	Festigkeits- abnahme %
		nach Temp.beh. bei			
		105° C	1000° C		
10	E	5,9	0,4	7	93
	Ö	6,2	0,3	5	95
11	E	1,5	0,2	13	87
	Ö	1,2	0,3	25	75
12	E	3,4	1,0	29	71
	Ö	3,1	1,0	32	68
13	E	~ 6,1	-	n.f.	n.f.
	Ö	5,8	-	n.f.	n.f.
14	E	3,5	0,4	11	89
	Ö	3,5	0,2	6	94
15	E	39,0	-	n.f.	n.f.
	Ö	28,7	-	n.f.	n.f.
16	E	15,6	1,7	11	89
	Ö	17,3	1,9	11	89
17	E	8,0	2,1	26	74
	Ö	7,2	1,7	24	76
18	E	5,5	0,2	4	96
	Ö	7,5	0,2	3	97
19	E	1,4	0	0	100
	Ö	1,5	0	0	100
20	E	3,1	0,3	10	90
	Ö	2,3	0,2	9	91
21	E	8,7	0	0	100
	Ö	8,8	0	0	100
22	E	1,8	-	n.f.	n.f.
	Ö	1,8	-	n.f.	n.f.
23	E	10,0	0,8	8	92
	Ö	11,2	1,0	9	91

"n.f." = nicht feststellbar, da nicht genügend Probenmaterial vorhanden

Tabelle 11: Druckfestigkeit σ_D (N/mm²), Restfestigkeit (%) und Festigkeitsabnahme (%) durch Temperaturbehandlung bei 1000° C für die Proben aus den Leichtbetonröhren.

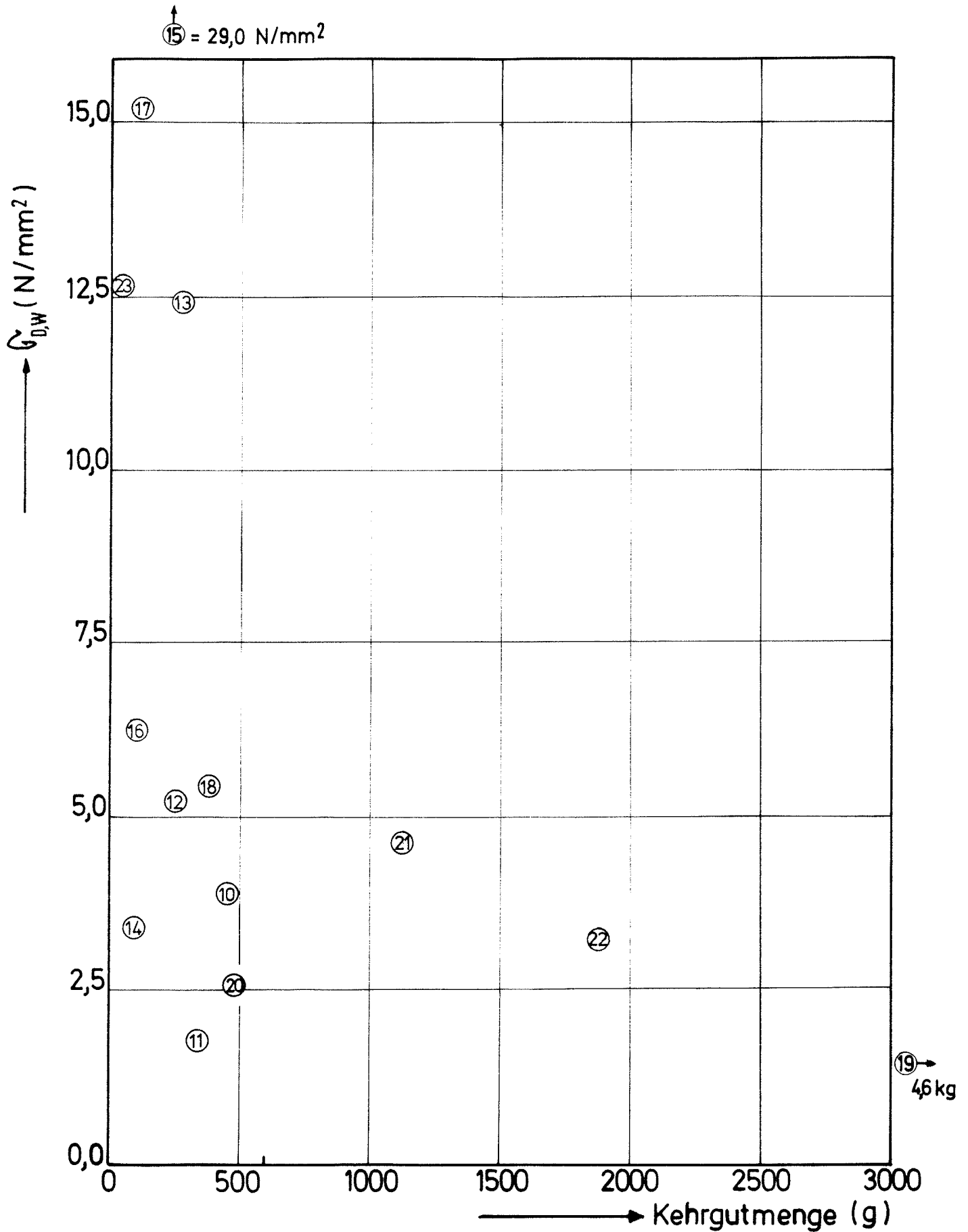


Bild 13: Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit $G_{0,W}$ (10 cm Kantenlänge) und Kehrgutmenge

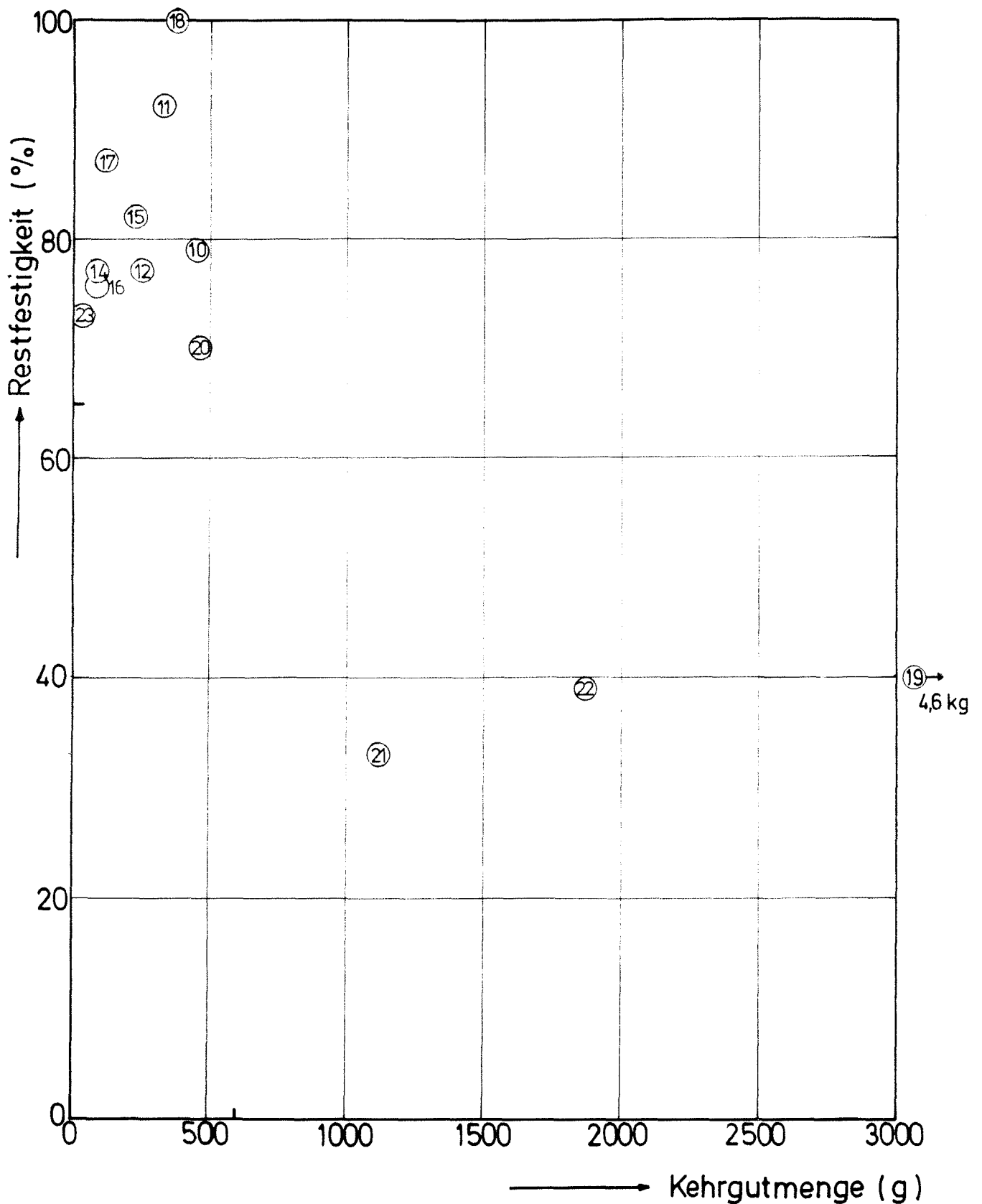


Bild 14: Abhängigkeit zwischen Restfestigkeit $\sigma_{D,S}$ (Öffnungsbereich) nach Temp.behandlung von 500°C und Kehrgutmenge

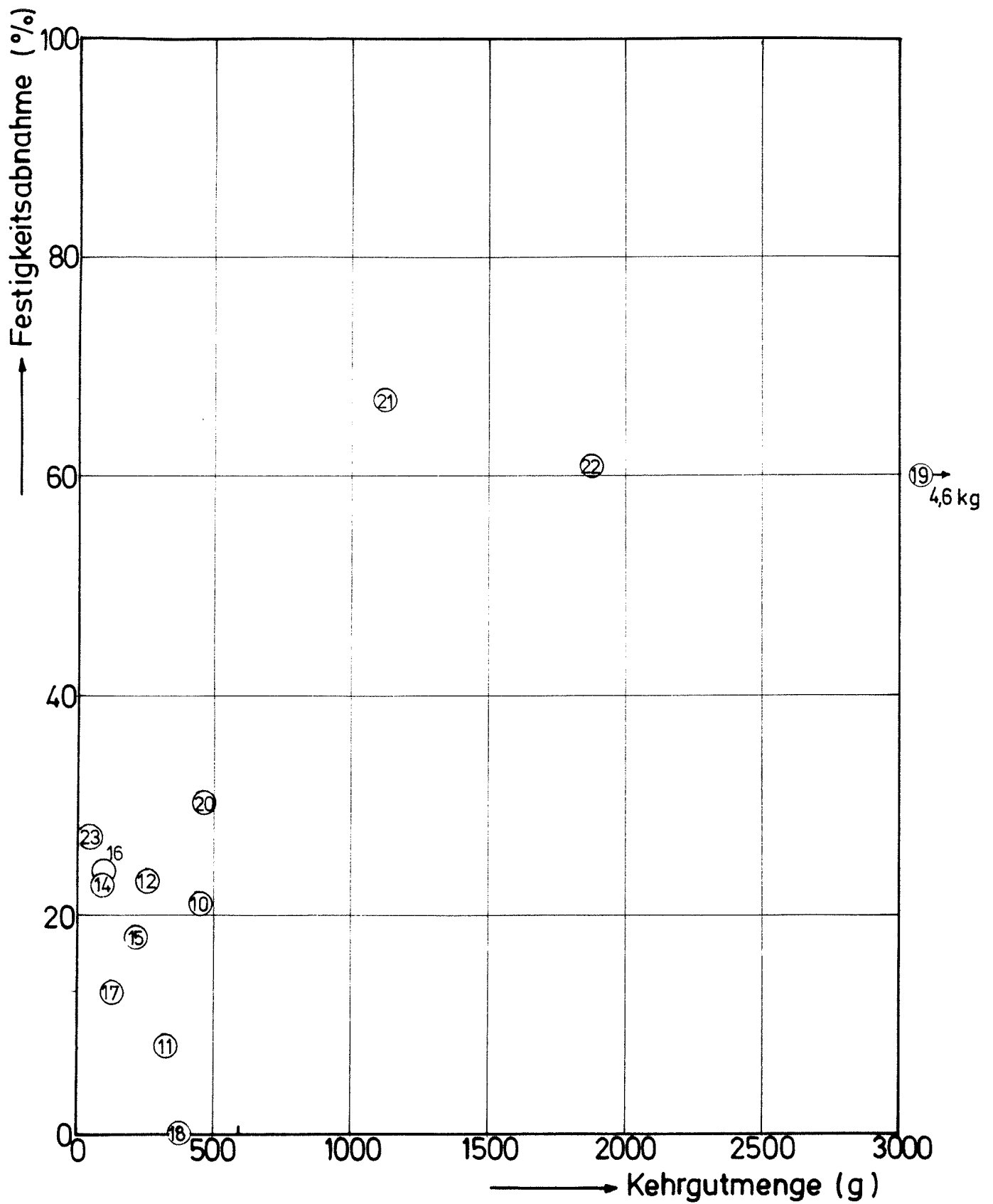


Bild 15: Abhängigkeit zwischen Festigkeitsabnahme (Öffnungsbereich) nach Temp.behandlung von 500°C und Kehrgutmenge

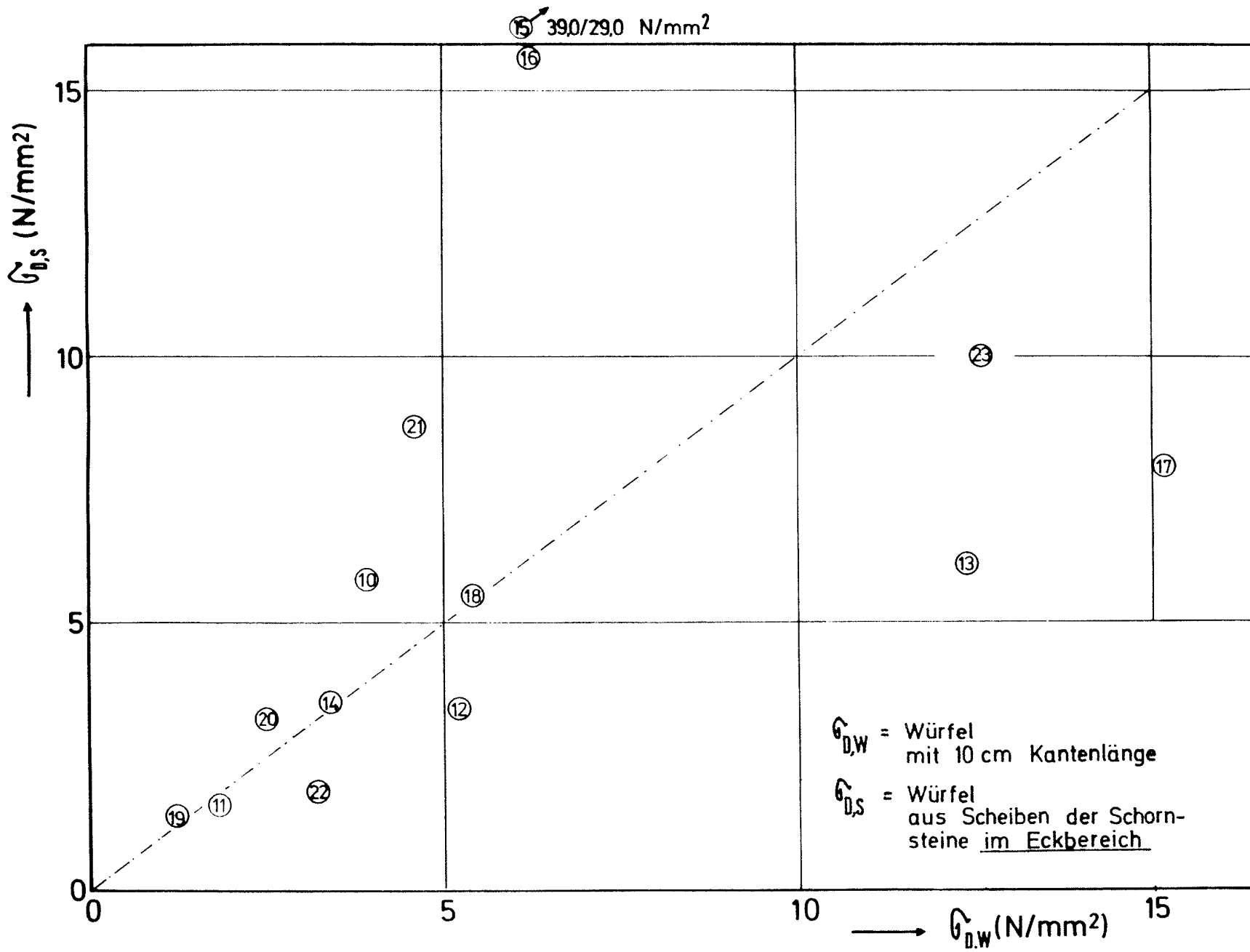


Bild 16 : Vergleich der Druckfestigkeiten $\sigma_{D,W}$ und $\sigma_{D,S}$ nach Temp.behandlung von 105 °C

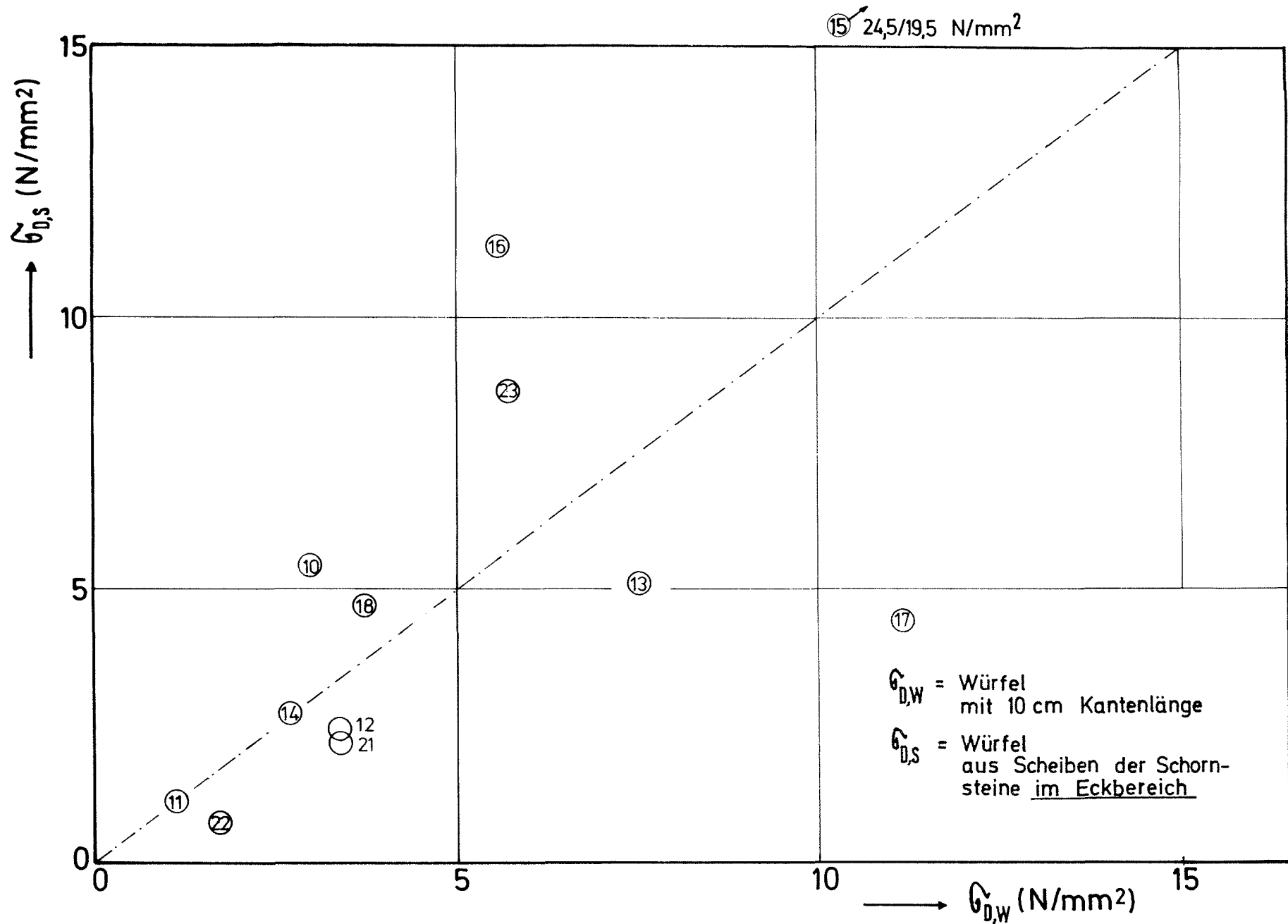


Bild 17: Vergleich der Druckfestigkeiten $\sigma_{D,W}$ und $\sigma_{D,S}$ nach Temp.behandlung von 500 °C

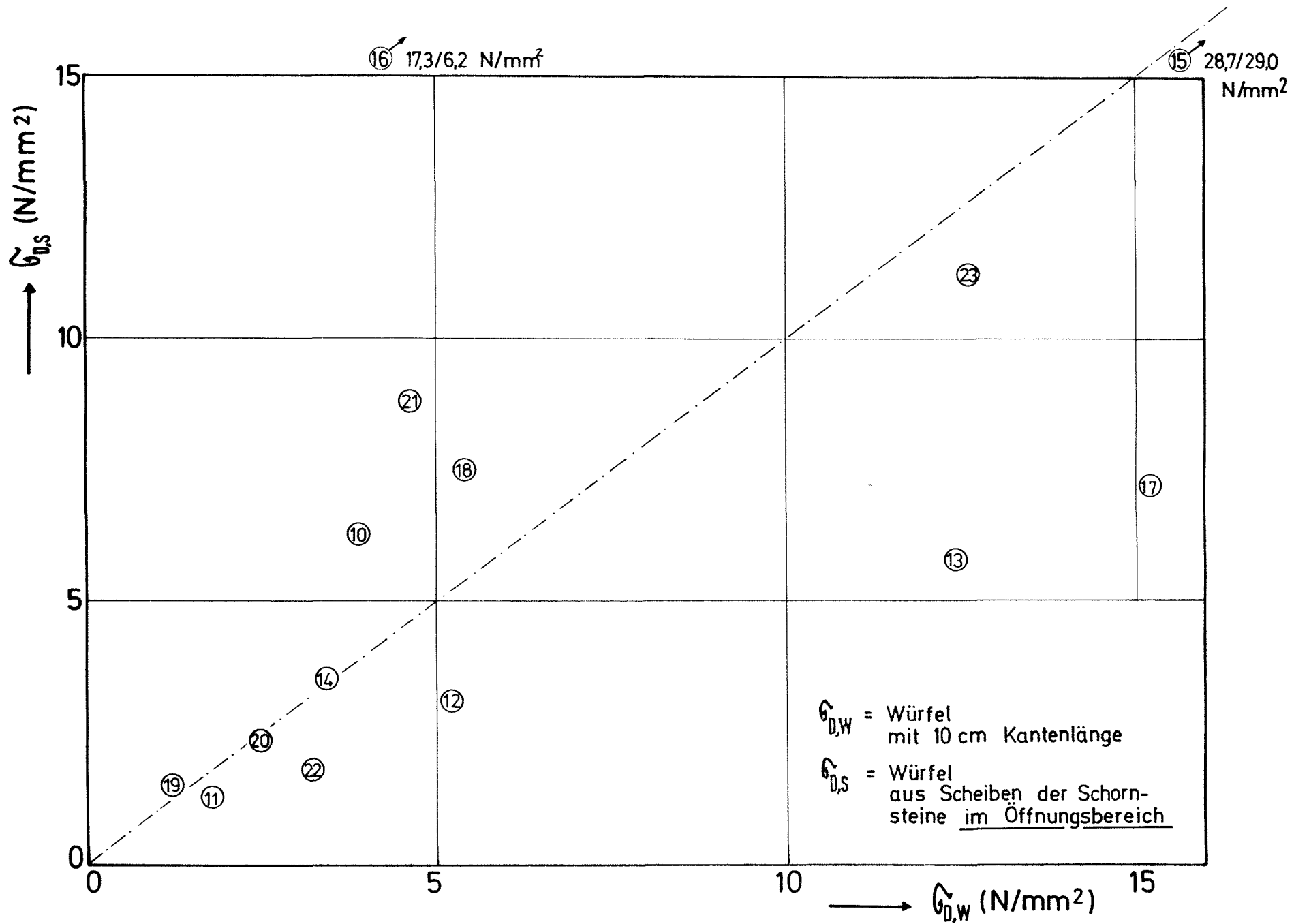


Bild 18 : Vergleich der Druckfestigkeiten $\sigma_{D,W}$ und $\sigma_{D,S}$ nach Temp.behandlung von 105 °C

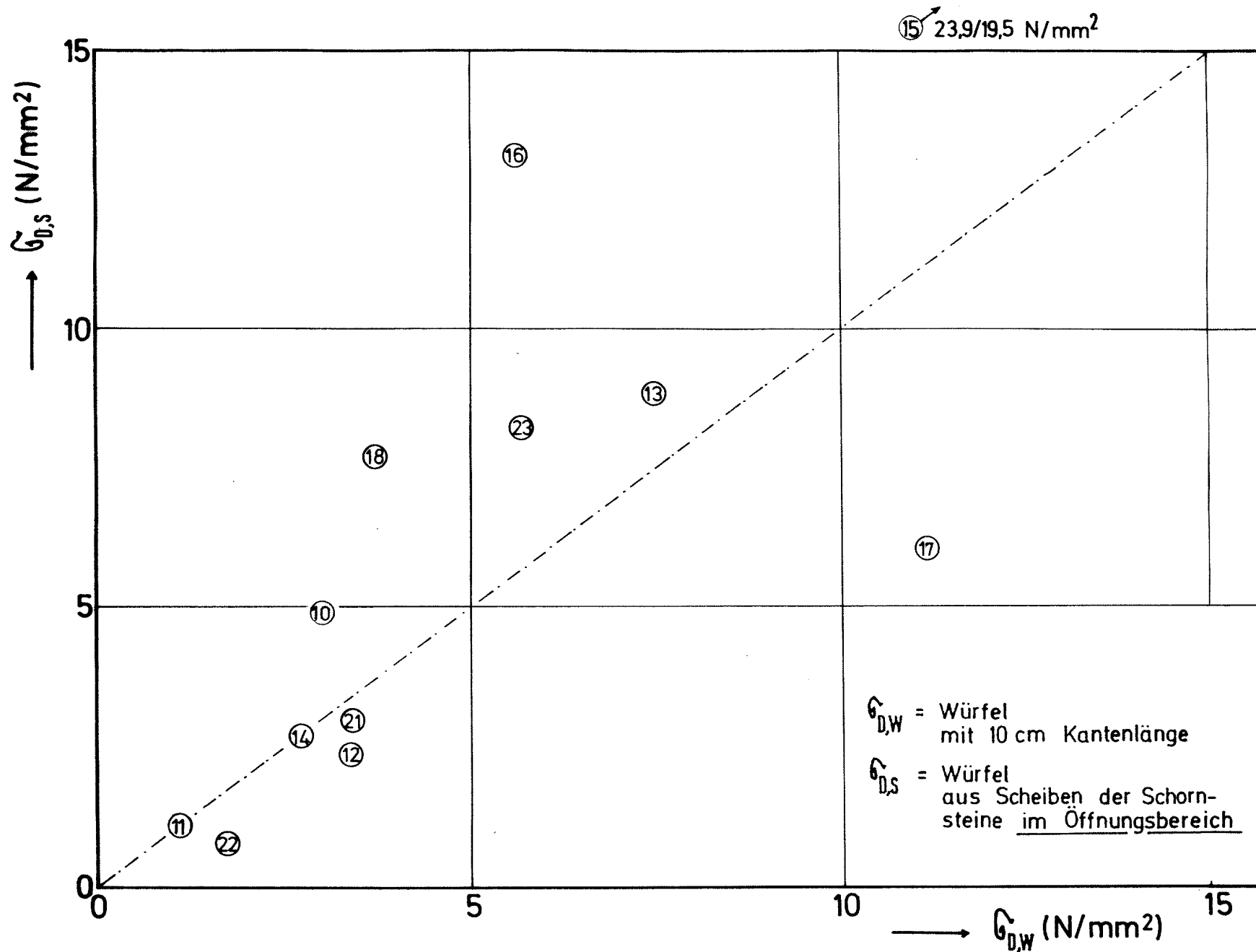


Bild 19: Vergleich der Druckfestigkeiten $\hat{G}_{D,W}$ und $\hat{G}_{D,S}$ nach Temp.behandlung von 500 °C