

Versuche über die Rotationsfähigkeit von Kalksandsteinmauerwerk

Working Paper

Author(s):

Furler, René; Thürlimann, Bruno

Publication date:

1980

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000216143>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich 7502(2)

**Versuche über die Rotationsfähigkeit
von Kalksandsteinmauerwerk**

René Furler
Bruno Thürlimann

September 1980
Bericht Nr. 7502-2

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Furler, René:

Versuche über die Rotationsfähigkeit von Kalksandstein-
mauerwerk / von René Furler; Bruno Thürlimann.

Basel, Boston, Stuttgart: Birkhäuser, 1980.

(Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion

ETH - Zürich; Nr. 7502-2)

ISBN 3-7643-1227-0

NE: Thürlimann, Bruno:

Nachdruck verboten.

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen und
der Reproduktion auf photostatischem Wege oder durch Mikrofilm,
vorbehalten.

© Birkhäuser Verlag Basel, 1980

ISBN 3-7643-1227-0

Versuche über die Rotationsfähigkeit von Kalksandsteinmauerwerk

von

Dipl. Ing. René Furler
Prof. Dr. Bruno Thürlimann

Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zürich
September 1980

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Versuchsprogramm	1
2. VERSUCHSKOERPER	3
2.1 Beschreibung	3
2.2 Baustoffe	3
2.2.1 Mauersteine	3
2.2.2 Mörtel	3
3. VERSUCHSDURCHFUEHRUNG	4
3.1 Versuchsanlage	4
3.1.1 Statische Verhältnisse	4
3.1.2 Messgenauigkeit	5
3.1.3 Ungenauigkeiten beim Einbau des Versuchskörpers	5
3.2 Versuchsablauf	5
3.2.1 Einbau des Versuchskörpers	5
3.2.2 Belastung und Verdrehung	5
3.2.3 Beobachtungen	5
4. VERSUCHSRESULTATE	7
4.1 Trag- und Bruchverhalten	7
4.2 Exzentrizität-Verdrehungs-Kurven ($e_B - \vartheta_B$)	8
4.3 Horizontale Ausbiegung und Exzentrizität	8
4.4 Exzentrizität-Krümmungs-Kurven ($e - \phi$)	9
4.5 Einfluss des Steinfabrikates	9
4.6 Einfluss der Mörtelart	10
4.7 Einfluss des Steinformates	10
4.8 Einfluss der Axiallast	10
ZUSAMMENFASSUNG	11
RESUME	12
SUMMARY	13
VERDANKUNGEN	14
BEZEICHNUNGEN	15
LITERATURVERZEICHNIS	16
TABELLEN 1-3	17
BILDER	19

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsprojektes "Rotationsfähigkeit von Mauerwerk" wurde das Tragverhalten von Mauerwerkswänden unter Druck und Biegung theoretisch [2] und experimentell [1] untersucht. Diese Arbeiten dienten als Grundlage für die Ausarbeitung eines Bemessungsverfahrens für solche Mauerwerkswände [3], welches eine gesonderte Bemessung auf den Grenzzustand der Gebrauchsfähigkeit (Beschränkung der Risse) und den Grenzzustand der Bruchsicherheit ermöglicht.

Die bisher durchgeführten experimentellen Arbeiten beschränkten sich ausschliesslich auf Backsteinmauerwerk. Es handelte sich dabei um insgesamt 38 Versuche an stockwerkshohen Backsteinwänden [1]. Die im Bemessungsvorschlag enthaltenen Bemessungsdiagramme waren nur für Backsteinmauerwerk ausgearbeitet worden. Um das Bemessungsverfahren auf Kalksandsteinwände zu erweitern, wurden analoge experimentelle Untersuchungen an Kalksandsteinwänden erforderlich. Sie sollten einerseits Materialkennwerte (Verformungsverhalten) und andererseits eine Basis für den Vergleich mit theoretisch ermittelten Werten liefern.

Die Zielsetzung des vorliegenden Versuchsprogramms besteht demnach darin, das Verformungsverhalten von Kalksandsteinmauerwerk zu ermitteln und den Einfluss einiger wesentlicher Parameter zu untersuchen und damit die Grundlage für die Bestimmung von Bemessungsdiagrammen für Kalksandsteinmauerwerk zu schaffen.

Die Versuchsanlage sowie die Durchführung der Versuche wurden gegenüber den Versuchen am Backsteinmauerwerk nicht verändert. Der vorliegende Bericht ist somit eine Ergänzung zu [1]. Damit der Bericht jedoch unabhängig gelesen werden kann, sind die Versuchsanlage sowie der Versuchsablauf (Belastung, Beobachtungen, usw.) wiederum detailliert beschrieben.

1.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasste insgesamt 16 Versuche an stockwerkshohen Kalksandsteinwänden und ist in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Im Gegensatz zum Backstein ist beim Kalksandstein das Angebot an verschiedenen Fabrikaten in der Schweiz sehr beschränkt. Die beiden für den Aufbau der Versuchswände verwendeten Steinfabrikate werden in der Schweiz am häufigsten verwendet. Sie sind in diesem Bericht als Fabrikate A und B bezeichnet. Da der Zementmörtel (ZM) und der Verlängerte Mörtel (VM) im Kalksandstein-Mauerwerksbau sehr gebräuchlich sind, wurden diese beiden Mörtelarten auch in den Versuchen verwendet.

Bei der Zusammenstellung des Versuchsprogramms wurde das Ziel verfolgt, den Einfluss der folgenden Parameter auf das Verformungsverhalten abzuklären:

- Fabrikat
- Steinformat
- Mörtelart
- Axiallast

Zur Abklärung des Einflusses des Steinformates und des Steinfabrikates wurde für alle drei verwendeten Formate (12, 14.5 und 18 cm) mindestens je eine Wand aus Steinen der Fabrikate A und B bei jeweils gleicher Axiallast untersucht. Der Einfluss der Mörtelart

wurde jedoch nur an 14.5 cm starken Wänden abgeklärt. Es wurden dabei insgesamt sechs Versuche an je drei Wänden mit ZM und VM mit drei verschiedenen Axiallasten (150, 400 und 550 kN) durchgeführt. Mit den gleichen Versuchen konnte gleichzeitig der Einfluss der Axiallast ermittelt werden.

2. VERSUCHSKÖRPER

2.1 Beschreibung

Die Kalksandsteinwände wurden am Prüf- und Forschungsinstitut des Verbandes schweizerischer Ziegel- und Steinfabrikanten (VSZS) in Sursee erstellt und bis zum Versuch während ca. 28 Tagen bei rund 20 °C Raumtemperatur gelagert. Aus betriebstechnischen Gründen ergaben sich gegenüber dem angestrebten Prüfalter von 28 Tagen in einigen Fällen Abweichungen (vgl. Tabelle 1). Die Wände wurden auf einer 16 cm starken, leicht armierten Betonplatte errichtet (Bild 1). In der Höhe bestanden die Wände aus 17 Steinlagen. Die Steinhöhe betrug in allen Fällen 13.5 cm und die Mörtelfuge wies eine Stärke von ca. 1 cm auf. Es ergab sich somit eine Wandhöhe von ca. 247 cm. Die Wandbreite betrug ungefähr 102 cm (vier Steine mit Stossfugen). Die Wanddicke ergab sich aus den Steinformaten (vgl. Tabelle 1). Sie betrug 12, 14.5 und 18 cm.

Die Maurerarbeit musste als sehr gut bezeichnet werden. In der Baupraxis kann kaum mit einer ähnlichen Verarbeitungsqualität gerechnet werden.

Um die Rissentwicklung möglichst gut verfolgen zu können, wurden die Wände vor dem Einbau jeweils mit weisser Dispersionsfarbe bestrichen.

2.2 Baustoffe

Die verwendeten Kalksandsteine und Mörtel wurden den Prüfungen gemäss Norm SIA 177 [4] unterzogen.

2.2.1 Mauersteine

In der Tabelle 2 sind die Resultate der Normenprüfung zusammengestellt. Die angegebenen Werte stellen Mittelwerte aus je 10 geprüften Steinen dar. Die Lochungen der Steine vom Fabrikat A sind im Bild 3, jene vom Fabrikat B im Bild 4 dargestellt.

Sämtliche untersuchten Steine erfüllten die Qualitätsanforderungen hochwertiger Kalksandsteine und werden daher als KH bezeichnet. Die Saugfähigkeit lag in gewissen Fällen mit $s = 5.0 \text{ g/dm}^2 \text{ min}$ an der unteren Grenze.

2.2.2 Mörtel

Die Resultate der Normenprüfung sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. Die angegebenen Werte stellen Mittelwerte aus je sechs Mörtelprismen bzw. zwölf Prismenhälften dar. Die Biegezugfestigkeit wurde an Prismen, die Mörteldruckfestigkeit an Prismenhälften ermittelt.

Die Dosierung beider Mörtelarten (ZM und VM) entsprach den Anforderungen der Norm SIA 177, Art. 4 514. Der Zementmörtel erreichte nur bei HWK 11, 13 und 16 die vorgeschriebene Druckfestigkeit von 20 N/mm². Demgegenüber erfüllten alle Proben des Verlängerten Mörtels die vorgeschriebene Druckfestigkeit von 3.5 N/mm².

3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

3.1 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage ist in den Bildern 5 und 6 dargestellt. Im Bild 8 sind die genauen Abmessungen der Wand sowie die Lage der Messuhren angegeben. Die Angaben beziehen sich auf den Versuch HWK 2. Für die anderen Versuche waren die Verhältnisse mit kleinen Abweichungen gleich.

Die Axiallast wurde am unteren und oberen Wandende mittels Linienkipplager und Stahlplatte zentrisch eingeleitet. Die Betonplatte als "Fundament" der Versuchswand lag auf der unteren Stahlplatte. Fest verbunden mit dieser Stahlplatte war ein Stahlrahmen, über den mittels eines Spannschlusses die Stahlplatte bzw. die daraufliegende Betonplatte verdreht werden konnte. Der horizontale Abstand des Spannschlusses bis zum Linienkipplager betrug 90 cm. Die beiden im Spannschluss mittels eines Links- und Rechtsgewindes geführten Gewindestangen waren mit je einem Gelenkkopf (Kugellager) am Stahlrahmen bzw. am Presstisch angeschlossen. Bei einer Verdrehung des Spannschlusses wurden die beiden Gewindestangen auseinandergetrieben bzw. zusammengezogen. Die dabei im Spannschluss auftretende Kraft P_2 wurde mittels Dehnmessstreifen gemessen. Die Verdrehungsvorrichtung ist aus Bild 7 ersichtlich.

Die Verdrehung der Betonplatte wurde mit einem Klinometer gemessen. Eine zusätzliche Messuhr diente zur Kontrolle.

Die axialen Deformationen der Wand wurden mit paarweise beidseits der Mauer angeordneten Messuhren (VV, VH) beobachtet. Die Messbasis erstreckte sich über je eine Mörtelfuge und zwei Steinhälften (Bild 10).

Die horizontalen Auslenkungen w wurden mit 13 Uhren (H) gemessen. Ausgangsbasis für diese Messung bildete dabei eine ca. 4 m von der Versuchsanlage entfernte Gebäudewand.

3.1.1 Statische Verhältnisse (Bild 9)

Bei unverdrehtem Stahlrahmen entsprach die Axiallast P der Kraft P_1 im Linienkipplager. Bei einer Verdrehung stellte sich die Axiallast exzentrisch ein, und im Spannschluss trat die Kraft P_2 auf. Da P während des ganzen Versuchs konstant gehalten wurde (vgl. Abschnitt 3.2.2), war die Summe von P_1 und P_2 ebenfalls konstant und gleich P :

$$P_1 + P_2 = \text{konst.} = P \quad . \quad (1)$$

Bezüglich des unteren Linienkipplagers (Punkt B) kann die folgende Gleichgewichtsbedingung formuliert werden:

$$e_B \cdot P = a \cdot P_2 \quad , \quad (2)$$

womit die Exzentrizität e_B der Axiallast P auf der Höhe des unteren Linienkipplagers bestimmt ist

$$e_B = a \cdot \frac{P_2}{P} \quad . \quad (3)$$

Stellt man wiederum bezüglich B eine Gleichgewichtsbedingung auf

$$H \cdot h = P \cdot e_B \quad , \quad (4)$$

kann die Horizontallast H bzw. die Querkraft Q in der Wand ermittelt werden:

$$H = Q = P \cdot \frac{e_B}{h} \quad . \quad (5)$$

3.1.2 Messgenauigkeit

Klinometer : $\pm 0.5 \cdot 10^{-5}$ rad
 Messuhren : ± 0.005 mm
 Pressenskala: $\pm 1\%$ (Werksangabe)
 Kraft P_2 : ± 45 N

3.1.3 Ungenauigkeiten beim Einbau des Versuchskörpers

Der Versuchskörper konnte auf ± 2 mm zentriert werden.

3.2 Versuchsablauf

3.2.1 Einbau des Versuchskörpers

Da die Unterfläche der Betonplatte plan ausgebildet war, konnte auf eine Gipsausgleichsschicht zwischen Stahlplatte und Betonplatte verzichtet werden. Am oberen Wandende wurde hingegen zwischen Kalksandsteinwand und Stahlplatte zur Vermeidung von lokalen Spannungskonzentrationen eine Gipsausgleichsschicht eingebracht.

Wie bereits erwähnt, wurden die Wände vor dem Einbau mit weisser Dispersionsfarbe bestrichen. Die Rissentwicklung konnte dadurch wesentlich besser verfolgt werden.

3.2.2 Belastung und Verdrehung (Bild 2)

Zu Beginn des Versuchs wurde eine zentrische Last P von 50 kN aufgebracht und eine "Nullablesung" durchgeführt. Hernach wurde die Axiallast P auf das vorgesehene Niveau (vgl. Tabelle 1) gesteigert und eine weitere Ablesung durchgeführt. Anschliessend wurde P während des ganzen Versuchs konstant gehalten. Die weitere Beanspruchung der Wand bestand dann in einer ihr aufgezwungenen schrittweisen Verdrehung δ_B der Betonplatte bis zum Bruch der Wand. Entsprechend der Verdrehung ergab sich eine Exzentrizität der Axiallast (vgl. Gl. (3)). Der Belastungsablauf war in dieser Phase also verformungsgesteuert und durch Konstanthalten der Verdrehung während den Ablesungen gekennzeichnet. Die dabei sich einstellende Relaxation zeigte sich im Abfallen der Kraft P_2 im Spannschloss und somit der Exzentrizität e_B vom Anfangswert e_{Ba} auf den Endwert e_{Be} . Der gesamte Belastungsablauf ist im Bild 2 dargestellt.

3.2.3 Beobachtungen

Nach jeder Laststufe bzw. schrittweisen Verdrehung um $\Delta\delta_B$ wurden folgende Ablesungen durchgeführt:

a) Axiallast P

Die Axiallast P wurde an der Pressenskala laufend beobachtet und konstant gehalten. Schwankungen ergaben sich vor allem während der Verdrehungsphasen.

b) Verdrehung δ_B

Die Verdrehung δ_B wurde mit einem auf der Stahlplatte liegenden Klinometer gemessen. Ein Skalenteil entsprach $0.514 \cdot 10^{-5}$ rad. Zusätzlich wurde die Verdrehung mit einer seitlich an der Stahlplatte angebrachten Messuhr (K) überprüft (Bilder 5 und 8).

c) Exzentrizität e_B

Die Exzentrizität e_B wurde indirekt mit der Messung von P_2 im Spannschloss und hernach mit der Gl. (3) ermittelt.

d) Axiale Deformationen

Die axialen Deformationen wurden mit den paarweise beidseits der Wand angebrachten Messuhren beobachtet. Gemessen wurden die Deformationen über je eine Mörtelschicht und zwei Steinhälften (Bild 10).

e) Horizontale Auslenkungen

Die horizontalen Auslenkungen w wurden an Messuhren abgelesen. Bedingt durch die sich einstellende Querkraft Q in der Wand, ergaben sich an den Linienkipplagern horizontale Reaktionskräfte (Gl. (5)), die ihrerseits eine Verformung der ganzen Versuchsanlage bewirkten. Demzufolge wurden die horizontalen Auslenkungen der Linienkipplager ebenfalls beobachtet (Uhren H1 und H13).

f) Risse, Steinabsplitterungen

Die Risse, die sich bei der Verdrehung der Betonplatte in der Regel in den horizontalen Lagerfugen bzw. in der Fuge zwischen Wand und Betonplatte bildeten, wurden mit einer Risslupe beobachtet. Die Rissgrößen konnten auf ± 0.05 mm eingeschätzt werden. Abbröckelungen der Mörtelfugen bzw. Absplitterungen von Steinplättchen sind auf grosse Randstauchungen zurückzuführen. Diese Erscheinungen wurden mit SS (Steinsplitter) bezeichnet.

4. VERSUCHSRESULTATE

Aus den im Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Messwerten wurden für jeden Versuch die folgenden Beziehungen ermittelt und im vorliegenden Bericht teilweise dargestellt:

- Exzentrizitäts-Verdrehungs-Kurven ($e_B - \vartheta_B$)
- Verlauf der horizontalen Auslenkung w der Wand
- Verlauf der Exzentrizität e der Axiallast entlang der Wandaxe
- Exzentrizität-Krümmungs-Kurven ($e - \phi$)
- Axiallast-Verdrehungen ($P - \vartheta_B$), bei denen sich:
 - a) in den Fugen maximale Risse von 0.05 und 0.2 mm bildeten,
 - b) auf der Wanddruckseite Steinsplinter lösten,
 - c) der Wandbruch einstellte.

4.1 Trag- und Bruchverhalten

In qualitativer Hinsicht entsprach das beobachtete Tragverhalten demjenigen der Backsteinwandversuche [1].

Unter konstanter Axiallast ergaben sich bei der Verdrehung der Betonplatte im unteren Wandbereich bzw. zwischen Wand und Betonplatte horizontale Risse in den Lagerfugen. Bei kleiner Axiallast weiteten sich diese Risse mit zunehmender Verdrehung aus, und in einer der untersten Fugen bildete sich ein klaffender Riss. Entsprechend wies auch die Ausbiegungskurve auf der Höhe dieses markanten Risses einen starken Knick auf (z.B. HWK 7: Bild 8, $P = 150$ kN). Demgegenüber traten unter grösserer Axiallast anstelle des einen klaffenden Risses mehrere ungefähr gleich grosse Risse auf, und die Ausbiegungskurve wies die Form einer "Gelenkkette" auf (Bild 57). Zudem bildeten sich die ersten Risse mit zunehmender Axiallast bei ebenfalls zunehmenden Verdrehungen der Betonplatte.

Nebst diesen Rissbildungen setzten auf der Wanddruckseite zuerst feine und bei grösserer Verdrehung stärkere Absplitterungen von Stein- und Mörtelteilen ein. Bei grosser Axiallast trat diese Erscheinung in der Regel bei geringerer Verdrehung auf als bei kleiner Axiallast. Bei den Backsteinwänden waren Spannungsumlagerungen im Wandinnern akustisch wahrnehmbar. Demgegenüber waren sie in den Kalksandsteinwänden nur in wenigen Fällen von akustischen Signalen begleitet. Der Wandbruch trat jeweils fast "lautlos" ein. Im Gegensatz zum "spröden" Bruchverhalten von Backsteinmauerwerk handelte es sich beim Kalksandsteinmauerwerk um ein "weiches", durch plastische Verformungen gekennzeichnetes Bruchverhalten.

Vertikales Aufreissen und Abplatzungen ganzer Steinplatten, ein für Backsteinmauerwerk unter hoher Axiallast übliches Bruchbild, traten beim Kalksandsteinmauerwerk nicht auf. Im Bruch lösten sich in der Regel beidseits der Mörtelfuge keilförmige Steinteile heraus. Im Schnitt waren diese Körper dreieckförmig.

Die Bruchverdrehung war bei grosser Axiallast wesentlich geringer als bei kleiner Axiallast.

4.2 Exzentrizität-Verdrehungs-Kurven (e_B - ϑ_B)

Die in der nachfolgenden Zusammenstellung angegebenen Bilder zeigen den Zusammenhang zwischen der Exzentrizität e_B und der Verdrehung ϑ_B der Betonplatte (vgl. Absch. 3.2.3):

- HWK 1-4 : Bild 15
- HWK 5-7 : Bild 20
- HWK 8-10 : Bild 25
- HWK 11, 12: Bild 30
- HWK 13-16 : Bild 35

Beim Auftreten des ersten horizontalen Risses in einer Mörtelfuge flacht der anfänglich lineare Kurvenast ab. Nach dem Ueberschreiten einer maximalen Exzentrizität stellt sich der Bruch der Wand in der Regel im Bereich des abfallenden Kurvenastes ein.

Der Einfluss der Axiallast ist aus den oben aufgeführten Bildern klar ersichtlich. Bei wachsender Axiallast nimmt die Steigung der e_B - ϑ_B -Kurven im Ursprung ab, und die maximale Exzentrizität sowie die Verdrehung der Betonplatte beim Bruch der Wand werden kleiner. Die Steigung der Kurven im Ursprung ist durch die nachfolgende Gleichung gegeben:

$$\tan\alpha = \frac{e_B}{\vartheta_B} = \frac{3 \cdot EI}{P \cdot h} \quad . \quad (6)$$

Bei kleinen Axiallasten (z.B. HWK 1: $P = 100$ kN, Bild 15) reichte die durch die Versuchseinrichtung beschränkte Verdrehung des Stahlrahmens und damit der Betonplatte nicht aus, um in der Wand einen Bruch zu erzielen. Die maximale Verdrehung war durch die Länge des Spannschlusses gegeben und betrug ca. 0.10 rad. In solchen Fällen wurde die Axiallast bei gleichbleibender Verdrehung bis zum Bruch der Wand erhöht.

Die den e_B - ϑ_B -Kurven eingefügten Photos sind durch Laststufen gekennzeichnet. Sie entsprechen den Laststufen in den e_B - ϑ_B -Kurven.

4.3 Horizontale Ausbiegung und Exzentrizität

Die Exzentrizität e der Axiallast setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, einem Anteil infolge der horizontalen Ausbiegung w und einem linear zur Höhe abnehmenden Anteil infolge der einseitig exzentrischen Einleitung der Axiallast P , $e_B \cdot x/h$. Der Zusammenhang ist im Bild 11 dargestellt. Die Exzentrizität e_x in einem Schnitt x - x beträgt somit:

$$e_x = w + e_B \cdot \frac{x}{h} \quad . \quad (7)$$

Die horizontalen Ausbiegungen ergeben Anteile 2. Ordnung. Die Kurven in den Bildern 57 und 58 der Versuche HWK 5 und HWK 7 zeigen, dass sich der Ausbiegungsbauch mit zunehmender Axiallast gegen die Wandmitte hin bewegt. Ebenso zeigt sich, dass sich der Punkt maximaler Exzentrizität mit grösser werdender Axiallast aus dem gleichen Grund vom unteren Wandende entfernt.

Der Wandbruch stellte sich jeweils im Bereich der grössten Exzentrizität ein.

4.4 Exzentrizität-Krümmungs-Kurven ($e-\phi$)

Aus den im Abschnitt 3.2.3 beschriebenen vertikalen Deformationsmessungen (vgl. Bild 10) konnte die Krümmung ϕ bestimmt werden:

$$\phi = \frac{\frac{\Delta l_v}{l_v} - \frac{\Delta l_h}{l_h}}{\bar{d}} \quad (8)$$

Die Messbasis betrug l_v und l_h und erstreckte sich über eine Mörtelfuge und je zwei Steinhälften. Die Verformungen wurden in einem Abstand d_v und d_h von der Wand mit der Dicke d gemessen; \bar{d} entspricht somit dem Abstand der beiden Messachsen und beträgt:

$$\bar{d} = d + d_v + d_h \quad (9)$$

Ordnet man den Krümmungen ϕ die entsprechenden Exzentrizitäten auf der Höhe der Mörtelfuge im jeweiligen Messbereich zu, so erhält man die Exzentrizität-Krümmungs-Kurven. Diese Beziehungen wurden für jeden Versuch in den Bildern 41 (HWK 1) bis 56 (HWK 16) getrennt dargestellt.

Für jede der sechs Messstellen ergab sich eine $e-\phi$ -Kurve. Bedingt durch die einseitig exzentrische Axiallast und die horizontalen Auslenkungen waren die Exzentrizitäten und Krümmungen an den sechs Messstellen jeweils ungleich gross. Infolge von Streuungen in den Materialeigenschaften und Messungenauigkeiten verlaufen die Kurven nicht deckungsgleich.

In den Kurven wurden die im jeweiligen Messbereich beobachteten Rissweiten sowie Absplitterungen (SS) eingetragen. Die Rissweiten wurden in Zehntelmillimetern angegeben. Haarrisse ($r \leq 0.05$ mm) wurden mit einem H bezeichnet. Trat innerhalb eines Messbereichs ein Bruch ein, so wurde dieser in der entsprechenden $e-\phi$ -Kurve mit einem Kreuz (x) gekennzeichnet.

Die $e-\phi$ -Kurven weisen anfänglich einen praktisch linearen Verlauf auf. Aus der Steigung der Tangente im Nullpunkt kann die homogene elastische Biegesteifigkeit des idealisierten Querschnittes Kalksandstein/Mörtel bestimmt werden:

$$EI = \frac{e \cdot P}{\phi} = P \cdot \tan \phi \quad (10)$$

Nach dem Auftreten der ersten Risse in den Lagerfugen (innerhalb des jeweiligen Messbereichs) flachen die Kurven ab. Risse gleicher Grösse ergeben sich bei grossen Axiallasten unter grösseren Krümmungen als bei kleinen Axiallasten. Die Bruchkrümmungen hingegen nehmen mit zunehmender Axiallast ab.

In den $e-\phi$ -Kurven der Versuche HWK 1 und 3 (Bilder 41 und 43) sind die Exzentrizitäten teilweise grösser als die halbe Querschnittsbreite. Solche Werte sind physikalisch (Gleichgewicht) nicht möglich, sie haben sich wahrscheinlich durch einen exzentrischen Einbau des Versuchskörpers ergeben. Die Ungenauigkeiten beim Einbau des Versuchskörpers (vgl. Abschn. 3.1.3) waren damit überschritten worden.

4.5 Einfluss des Steinfabrikates

Der Einfluss der Steinfabrikate wurde mit den Versuchen HWK 1-4 (12 cm, ZM) und HWK 13-16 (18 cm, ZM) abgeklärt. Pro Steinformat wurden je zwei Versuche mit den Fabrikaten A und B bei jeweils gleicher Axiallast durchgeführt. Bei den 12 cm-Steinen betrug die Axiallast P 100 und 300 kN und bei den 18 cm-Steinen betrug diese 300 und 600 kN. Diese Axiallasten ergaben Bruttospannungen σ_m von 0.81 und 2.45 bzw. 1.63 und 3.27 N/mm². Im Ver-

lauf der Exzentrizität-Verdrehungs-Kurven (Bilder 15 und 35) für die Fabrikate A und B zeigen sich keine grossen Abweichungen. Entsprechend den praktisch gleich grossen Lochflächenanteilen der beiden Fabrikate sind die Wandsteifigkeiten (Gl. (6)) ungefähr gleich gross.

Die Darstellung im Bild 39 zeigt, dass das Steinfabrikat auf das Rissverhalten keinen Einfluss hat. Die Bruchverdrehungen hingegen weichen bei den 18 cm-Steinen ziemlich stark voneinander ab. Beim Steinfabrikat B ist die Bruchverdrehung bei 300 kN 46% und bei 600 kN 11% grösser als beim Steinfabrikat A.

4.6 Einfluss der Mörtelart

Der Einfluss der Mörtelart wurde an insgesamt acht Versuchswänden aus 14.5 cm Steinen abgeklärt (vgl. Tabelle 1).

Die Gegenüberstellung von je drei Exzentrizität-Verdrehungs-Kurven im Bild 37 für Versuche mit dem Steinfabrikat A und Zementmörtel bzw. Verlängertem Mörtel und unter Axiallasten von 150, 400 und 550 kN zeigt keine grossen Unterschiede im Kurvenverlauf. Ebenso verlaufen die entsprechenden zwei Kurven der Versuche mit dem Steinfabrikat B fast gleich (Bild 30). Die Neigungen der Kurven im Ursprung sind beim Verlängerten Mörtel tendenziell geringer als beim Zementmörtel.

Im Riss- und Bruchverhalten (Bild 38) zeigen sich praktisch keine Unterschiede. Die Risse von 0.05 und 0.20 mm traten bei beiden Mörteln unter gleicher Last bei ungefähr den gleichen Verdrehungen auf. Ebenso wiesen die Bruchverdrehungen keine grossen Unterschiede auf.

4.7 Einfluss des Steinformates

Das Steinformat ist für den Verlauf der Exzentrizität-Krümmungs-Kurven und der Exzentrizität-Verdrehungs-Kurven von Bedeutung. Entsprechend den verschiedenen Querschnittsabmessungen (12, 14.5 und 18 cm) weichen die Steifigkeiten (nach den Gleichungen (6) und (10)) sowie die Grösse der Exzentrizitäten deutlich voneinander ab.

Im Bild 40 ist der Einfluss des Steinformates auf das Riss- und Bruchverhalten dargestellt. Anstelle der Axiallasten wurden auf der Ordinate die Bruttospannungen σ_m angegeben. Je gedrungenere die Wand, desto geringer sind unter konstantem σ_m die Verdrehungen, bei denen sich Risse von 0.05 und 0.20 mm bildeten.

4.8 Einfluss der Axiallast

Der Einfluss der Axiallast wurde bei der Erläuterung der verschiedenen, in diesem Bericht dargestellten Beziehungen in den Abschnitten 4.2, 4.3 und 4.4 beschrieben.

ZUSAMMENFASSUNG

Als Ergänzung zu den bisherigen theoretischen und experimentellen Untersuchungen [1], [2], [3] im Rahmen des Forschungsprojektes "Rotationsfähigkeit von Mauerwerk" wurden Versuche an insgesamt 16 stockwerkshohen Kalksandsteinwänden durchgeführt. Hauptparameter der Versuchsreihe waren die Axiallast, das Format des Kalksandsteins und die Mörtelart. Es wurden zwei verschiedene Steinfabrikate (Provenienzen) verwendet, die in der Schweiz am häufigsten verwendet werden, untersucht (Tabelle 1). Unter konstanter Axiallast wurde das untere Ende der oben zentrisch gelagerten Wände schrittweise bis zum Bruch verdreht. Aus den Messwerten wurden die nachfolgenden Beziehungen ermittelt und im vorliegenden Bericht teilweise dargestellt:

- Exzentrizität-Verdrehungs-Kurven
(Exzentrizität auf der Höhe des unteren Linienkipplagers)
- Horizontale Ausbiegungen der Wandaxe
- Exzentrizität der Axiallast entlang der Wandaxe
- Exzentrizität-Krümmungs-Kurven

Die Ergebnisse dieser Versuche können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei der Verdrehung der Betonplatte am unteren Ende ergaben sich in den Lagerfugen horizontale Risse, und auf der Wanddruckseite traten Absplitterungen der Steine und des Mörtels auf. Je grösser die Axiallast, desto grösser war auch die Verdrehung bei Rissbeginn. Demgegenüber wurde die Verdrehung bei Beginn der Absplitterung bzw. beim Wandbruch (Bruchverdrehung) mit zunehmender Axiallast kleiner.
- Aus den dargestellten Beziehungen (Bilder 15, 35, 39) konnte kein deutlicher Einfluss des Steinfabrikates festgestellt werden.
- Die Mörtelart spielt für das Riss- und Bruchverhalten keine Rolle (Bild 38). Beim Zementmörtel verlaufen die e_B - δ_B -Kurven im Ursprung tendenziell steiler als bei verlängertem Mörtel (Bild 37).

RÉSUMÉ

Pour compléter les études théoriques et expérimentales [1], [2], [3] déjà effectuées dans le cadre du projet de recherche sur le comportement des murs en maçonnerie, on a expérimenté 16 parois en brique silico-calcaire de 260 cm de haut. L'effort axial, le format des briques et le mortier constituaient les paramètres principaux. On a testé les deux types de briques silico-calcaire qui sont le plus utilisés en Suisse (Table 1). Pour un niveau de charge donné, on a imposé au pied de la paroi, qui était articulée à son autre extrémité, une rotation croissante jusqu'au moment de la rupture. Les mesures effectuées lors des essais nous ont permis d'obtenir les résultats suivants:

- la relation entre l'excentricité mesurée à la hauteur de l'appui linéaire inférieur et la rotation imposée
- la déformée de l'axe vertical de la paroi
- l'excentricité de la ligne d'action de la charge par rapport à l'axe de la paroi
- la relation entre l'excentricité et la courbure de la paroi.

Toutes ces relations sont partiellement reproduites dans le présent rapport.

Les essais ont également montré que:

- La rotation imposée au pied de la paroi provoquait une fissure horizontale dans le joint situé immédiatement sur l'appui ainsi qu'un effritement de la brique et du mortier sur l'autre côté du joint. La rotation au commencement de la fissuration augmentait avec la charge axiale. Au contraire, la grandeur de la rotation au moment de la rupture respectivement de l'effritement de la brique diminuait au fur et à mesure que le niveau de la charge axiale augmentait.
- Les relations représentées dans les figures 15, 35 et 39 font ressortir que les deux types de briques silico-calcaire ne montraient pas une différence appréciable.
- Le type de mortier ne joue aucun rôle sur le comportement de la paroi à la fissuration et à la rupture (fig. 38). Les courbes $e_B - \vartheta_B$ du mortier de ciment sont plus inclinées à l'origine que celles du mortier bâtard (fig. 37).

SUMMARY

The theoretical and experimental investigation [1], [2], [3] on the "Rotation Capacity of Masonry Walls" has been extended with tests on 16 walls of one story height made with calcium-silicate bricks. The main parameters were the axial load, the format of the brick and the mortar. Two different products of brick, used most frequently in Switzerland, were tested (Table 1). Under constant axial load, the bottom end of the wall was rotated by increments up to collapse. The relations resulting from the measurements have been presented partially in this report:

- Eccentricity-Rotation-Curves
(Eccentricity at the elevation of the lower end)
- Horizontal Deflection of the Wall
- Eccentricity of the Axial Load with respect to the Axis of the Wall
- Eccentricity-Curvature-Curves

The results of these tests may be summarized as follows:

- With increasing rotation of the concrete slab at the bottom end, the mortar joints cracked horizontally. On the compression face of the wall, the bricks and the mortar splintered off. With increasing axial load, the rotation at first cracking increases. On the contrary at the beginning of splintering, i.e. at the collapse of the wall, the rotation decreases with increasing axial load.
- The resulting relations (figures 15, 35, 39) showed no marked influence between the two types of bricks.
- The mortar quality did not influence the cracking and the failure behavior (figure 38). For cement mortar, the $e_B - \delta_B$ -curves are steeper at the origin than for lime-cement mortar (figure 37).

VERDANKUNGEN

Der vorliegende Bericht wurde als Ergänzung zum Forschungsprojekt "Rotationsfähigkeit von Mauerwerk" am Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, ausgearbeitet. Für die grosszügige finanzielle Unterstützung möchten die Verfasser den Firmen

Hunziker & Cie, Baustoff-Fabriken
Zürcher Ziegeleien AG

aufrichtig danken.

Der experimentelle Teil der Untersuchungen wurde im Prüf- und Forschungsinstitut des VSZS in Sursee durchgeführt. Die Verfasser möchten Herrn H. Gubler, dipl. Ing., Leiter des P + F, Herrn R. Porubsky, Versuchsleiter in Sursee, sowie den übrigen an der Versuchsdurchführung beteiligten Mitarbeitern des P + F für ihr Entgegenkommen und ihre Mitarbeit bestens danken.

Die Gestaltung des Berichtes oblag Herrn L. Sieger und Frl. S. Burki schrieb die Druckbogen. Herr M. Baumann, dipl. Ing., hat die messtechnischen Probleme bearbeitet. Für ihre Mitarbeit sei den Genannten bestens gedankt.

BEZEICHNUNGEN

Geometrische Grössen

A	Bruttoquerschnittsfläche
a	Abstand des Spannschlusses von Linienkipplager
d	Wanddicke
d_v	Abstand der Messaxe von Wand (auf Wandvorderseite)
d_h	Abstand der Messaxe von Wand (auf Wandhinterseite)
d	Abstand der Messaxen
e	Exzentrizität der Axiallast
e_B	Exzentrizität der Axiallast auf der Höhe des unteren Linienkipplagers
e_{Ba}	e_B bei Messbeginn
e_{Be}	e_B nach Abschluss der Messung (nach Relaxation)
h	Wandhöhe
l_v	Messbasis auf Wandvorderseite
l_h	Messbasis auf Wandhinterseite
Δl_v	axiale Deformation (auf Wandvorderseite)
Δl_h	axiale Deformation (auf Wandhinterseite)
w	horizontale Ausbiegung
x	Koordinate
ϑ_B	Verdrehung der Betonplatte
ϕ	Krümmung (Mittelwert)

Kraft- und Spannungsgrössen

P	Axiallast
P	zentrischer Anteil von P
P	Kraft im Spannschloss
H	Horizontalkraft
Q	Querkraft
σ_m	mittlere Bruttospannung ($\sigma_m = P/A$)

Verhältnisgrössen

$\tan\alpha$	Steigung der Tangente im Ursprung der e_B - ϑ_B -Kurven
$\tan\phi$	Steigung der Tangente im Ursprung der e - ϕ -Kurven

Allgemeine Bezeichnungen

HK	Hydraulischer Kalk
KH	hochwertiger Kalksandstein (vgl. SIA 177 4)
PC	Portland Zement
HWK	<u>W</u> andversuche im <u>H</u> auptprogramm mit <u>K</u> alksandsteinen
t	Zeit

Materialkennwerte

β_q	Querzugfestigkeit
β_s	Steindruckfestigkeit
s	Saugfähigkeit
EI	Biegesteifigkeit des ungerissenen homogenen Querschnittes

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] R. Furler, B. Thürlimann: "Versuche über die Rotationsfähigkeit von Backstein-Mauerwerk", Bericht Nr. 7502-1, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart, 1977.
- [2] R. Furler: "Tragverhalten von Mauerwerkswänden unter Druck und Biegung". Bericht in Vorbereitung.
- [3] Vernehmlassungsentwurf (1980) der Richtlinie 1 der Norm SIA 177, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Zürich.
- [4] Norm SIA 177 (1980) "Mauerwerk" (Backstein, Kalksandstein, Zementstein, Gasbetonstein), Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Zürich.

Versuchs - Nr.	Stein	Steinformat	Mörtel	Axiallast P [kN]	mittlere Druck- spannung [MN/m ²]	Prüfalter in Tagen
HWK 1	A	12 x 25 x 13,5	ZM	100	0,81	28
HWK 2	B			300	2,45	29
HWK 3	A	14,5 x 25 x 13,5		150	1,01	28
HWK 4	B			300	2,45	29
HWK 5	A	18 x 25 x 13,5	VM	400	2,70	28
HWK 6				550	3,71	29
HWK 7			ZM	150	1,01	28
HWK 8			VM	400	2,70	29
HWK 9	B		ZM	150	1,01	28
HWK 10			VM	550	3,71	29
HWK 11	A		ZM	300	1,63	28
HWK 12	B		VM	150	1,01	29
HWK 13	A		ZM	600	3,26	29
HWK 14				300	1,63	30
HWK 15				600	3,26	31

Tabelle 1: Versuchsprogramm

Legende: A : Steinfabrikat A (vgl. 2.2.1)
 B : Steinfabrikat B (vgl. 2.2.1)
 ZM : Zementmörtel (vgl. 2.2.2)
 VM : Verlängerter Mörtel (vgl. 2.2.2)

1. Format	Fabrikat A			Fabrikat B		
	12/25/13,5	14,5/25/13,5	18/25/13,5	12/25/13,5	14,5/25/13,5	18/25/13,5
2. Lochung						
- Lochfläche in cm ²	54	62	77	45	65	81
- Lochflächenanteil in %	18	17	17	15	18	18
3. Steingewicht [kg]	6.48	7.83	10.08	7.04	8.12	9.44
4. Raumgewicht [kg/dm ³]	1.61	1.61	1.67	1.74	1.65	1.54
5. Saugfähigkeit [g/dm ² · min]	5.0	5.0	5.0	8.0	5.0	5.0
6. Steindruckfestigkeit [N/mm ²]	33.38	32.15	34.28	34.69	32.36	33.42
7. Querkzugfestigkeit [N/mm ²]	19.91	18.19	18.15	17.64	15.95	15.85

* Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus je 10 Steinproben

Tabelle 2 : Resultate der Normenprüfung der Kalksandsteine

Mörtel zu Versuch	Alter bei Prüfung	Dosierung	Raumgewicht d. frischen Mört.	Raumgew. des erhärteten Mört.	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
	in Tagen	N/m ³	N/cm ³	N/cm ³	N/mm ²	N/mm ²
HWK 1	28	3660 PC	21.73	20.62	3.7	17.3
HWK 2	28	3660 PC	21.73	20.62	3.7	17.3
HWK 3	28	3660 PC	21.73	20.62	3.7	17.3
HWK 4	28	3650 PC	21.70	20.83	4.0	18.6
HWK 5	28	3650 PC	21.69	20.80	4.4	18.9
HWK 6	28	3650 PC	21.69	20.80	4.4	18.9
HWK 7	28	3650 PC	21.69	20.80	4.4	18.9
HWK 8	28	3650 (PC+HK)	21.36	20.0	2.6	8.5
HWK 9	28	3650 (PC+HK)	21.36	20.0	2.6	8.5
HWK 10	28	3650 (PC+HK)	21.36	20.0	2.6	8.5
HWK 11	28	4030 PC	22.00	20.94	7.2	31.8
HWK 12	28	3580 (PC+HK)	21.54	19.84	2.5	8.0
HWK 13	28	3650 PC	21.92	20.51	5.2	22.0
HWK 14	28	3630 PC	21.78	20.27	4.5	16.9
HWK 15	28	3300 PC	19.81	18.55	3.1	10.3
HWK 16	28	3650 PC	21.87	20.39	5.1	21.3

HWK 8 - 10, 12 : VM Verlängerter Mörtel PC 100 + HK 250

übrige Versuche : ZM Zementmörtel PC 350

Tabelle 3 : Resultate der Normenprüfung des Mörtel

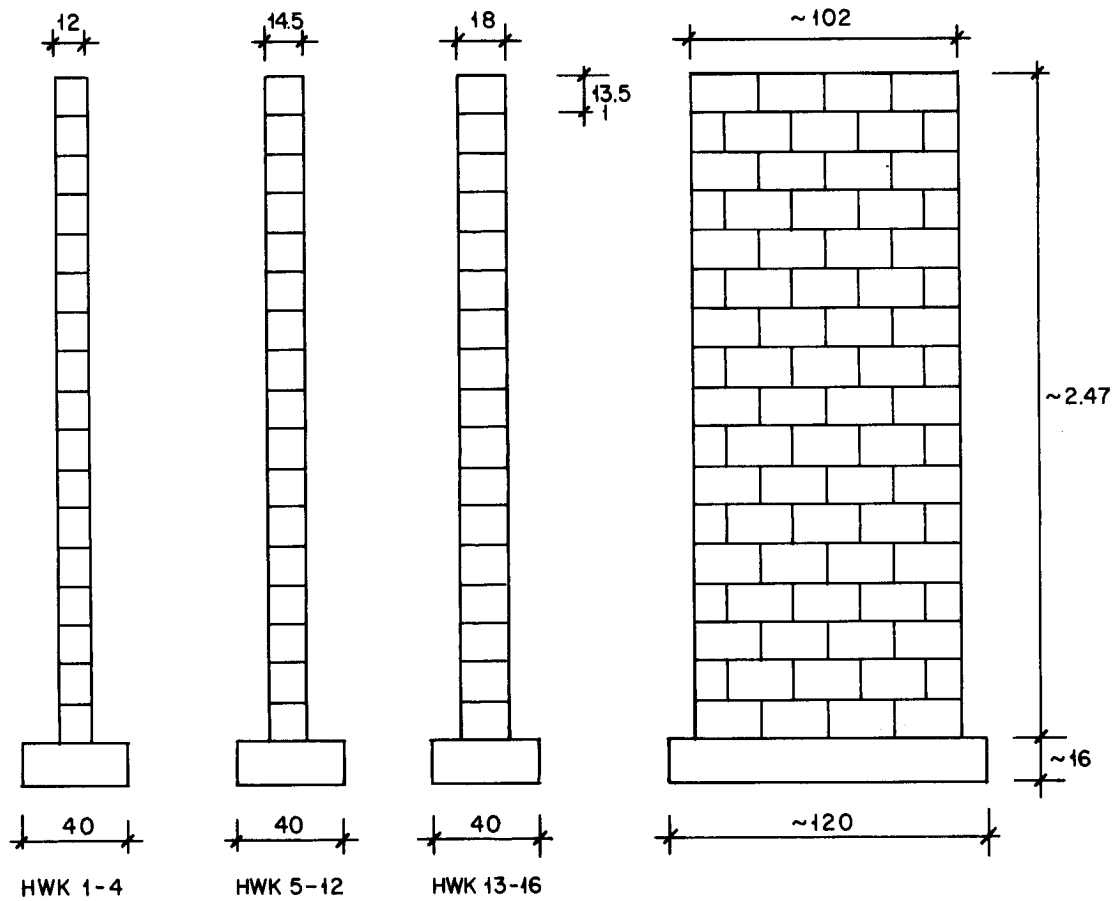


Bild 1: Aufbau und Abmessungen der Versuchskörper

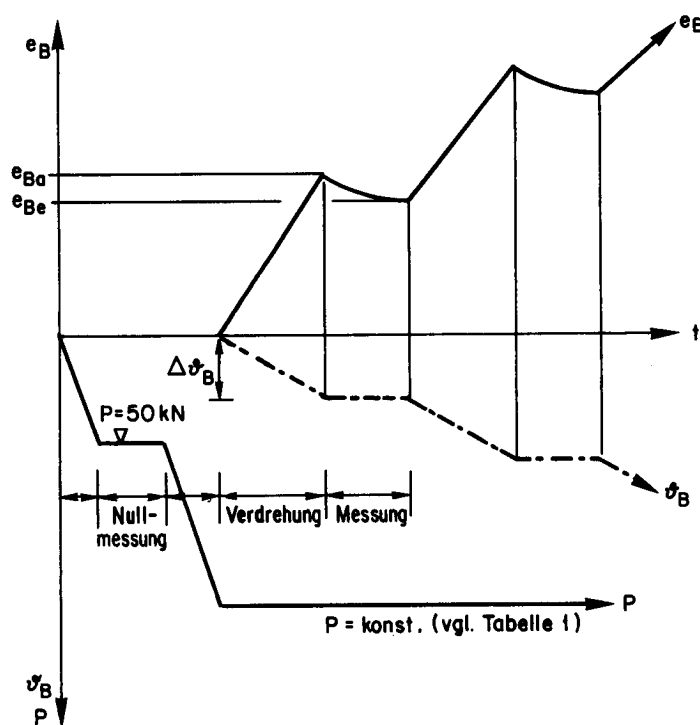
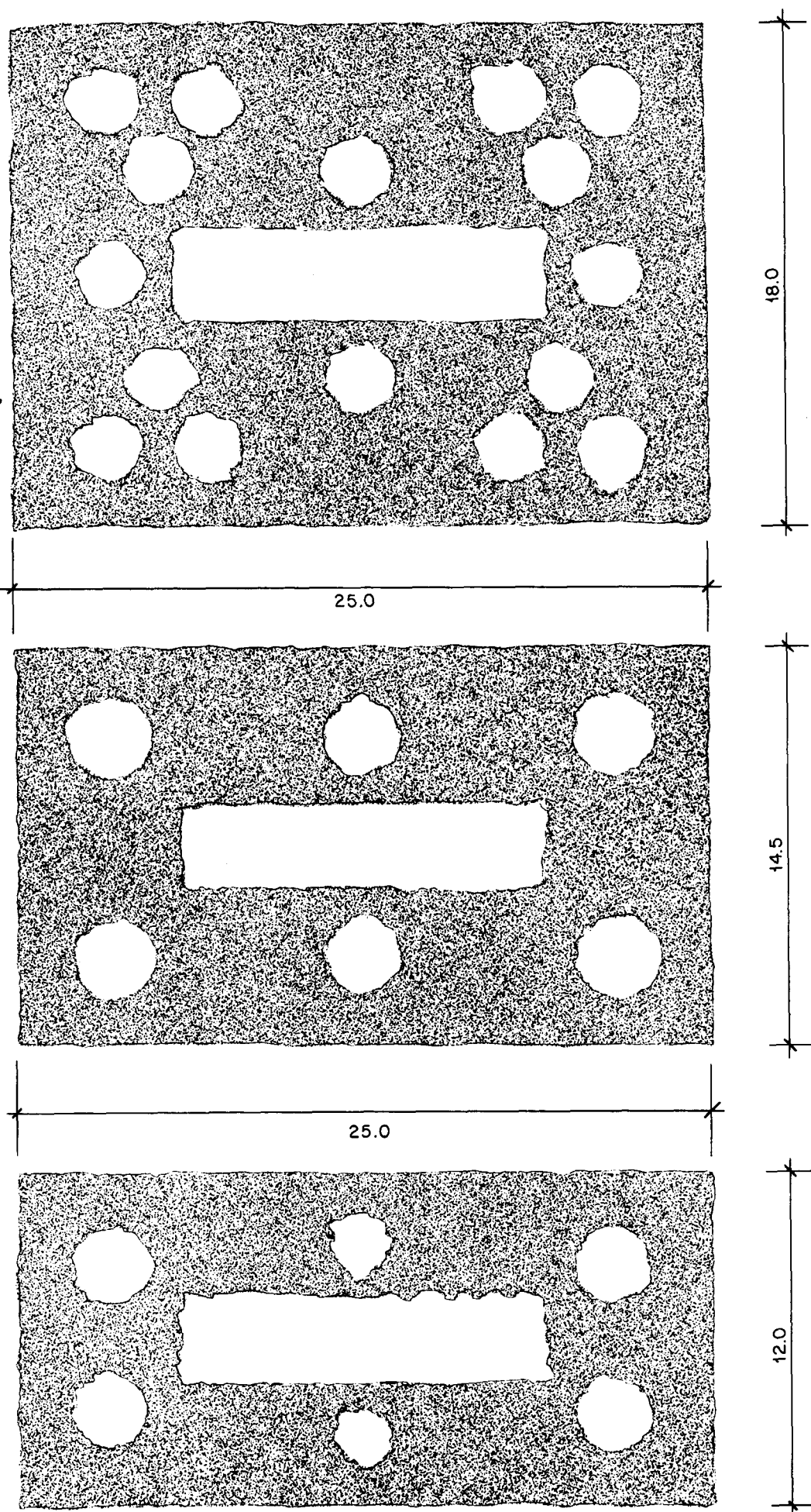


Bild 2: Belastungsablauf



a) Format 25 / 12 / 13.5

b) Format 25 / 14.5 / 13.5

c) Format 25 / 18 / 13.5

Bild 3 : Steinlochungen Fabrikat A

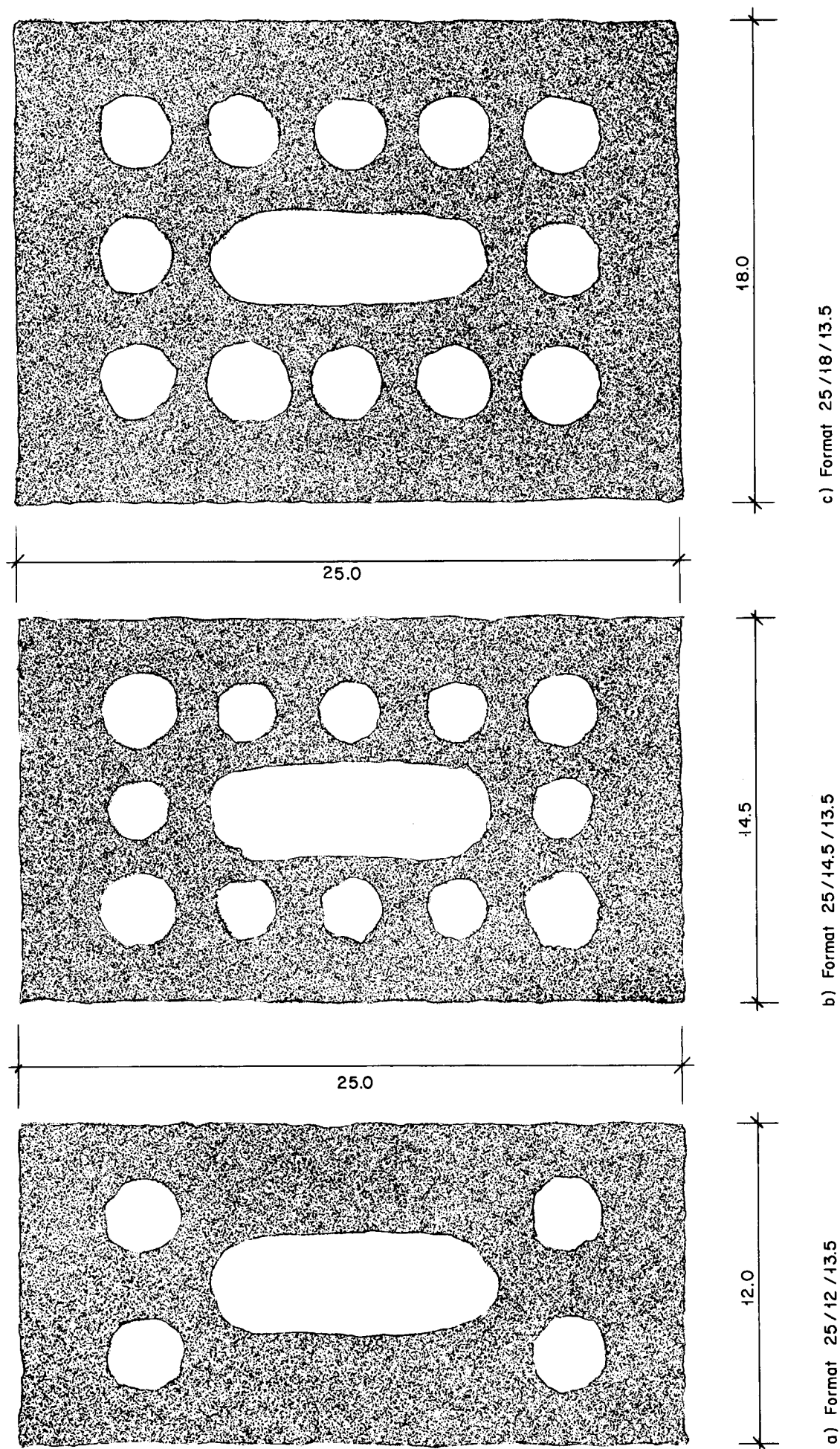


Bild 4: Steinlochungen Fabrikat B

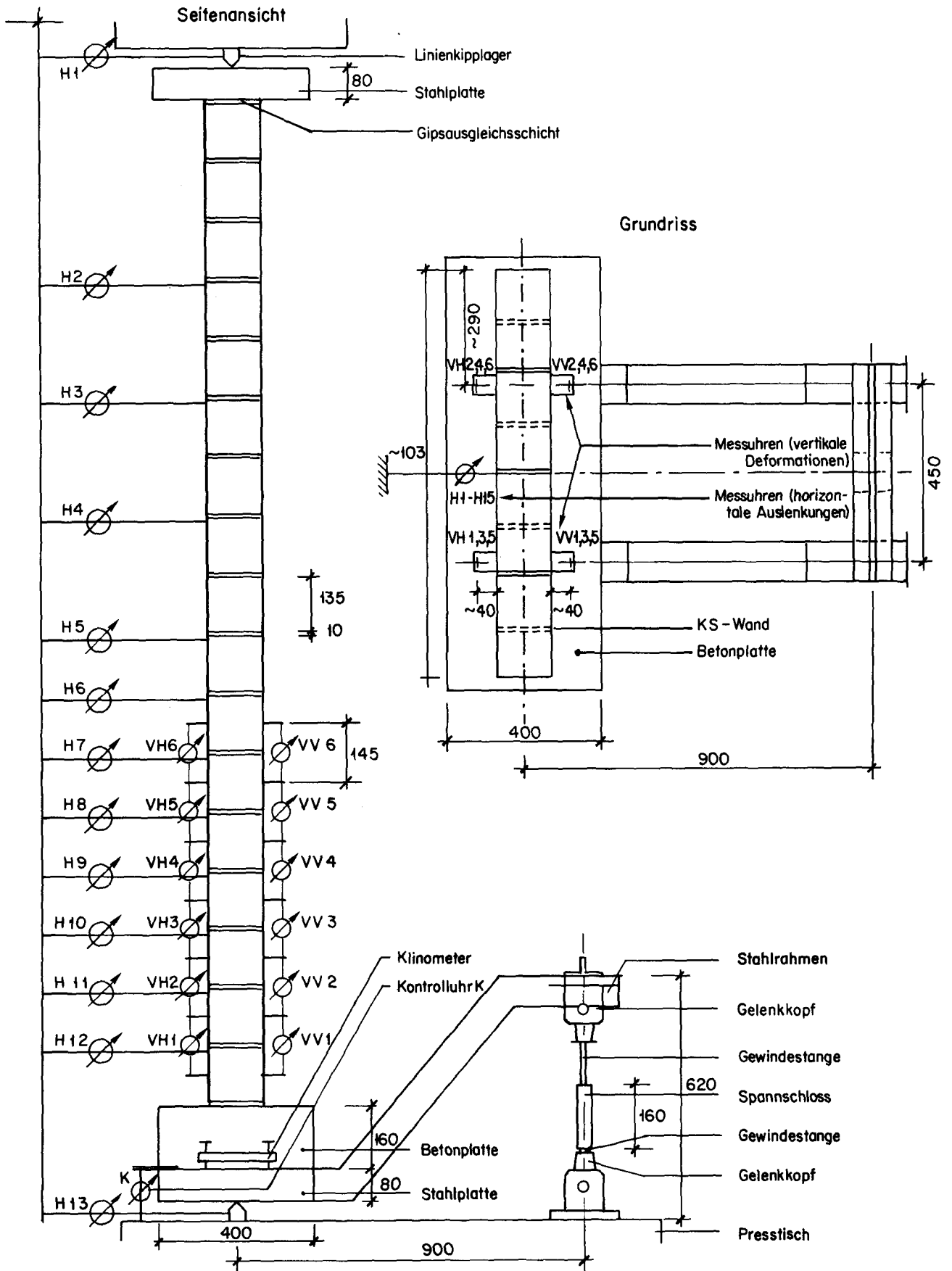


Bild 5 : Versuchsanlage

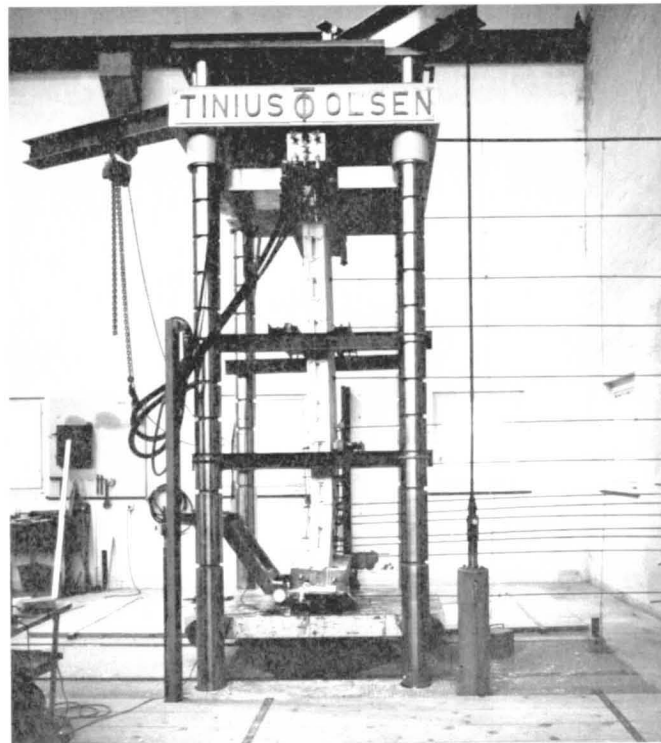


Bild 6 : Versuchsanlage

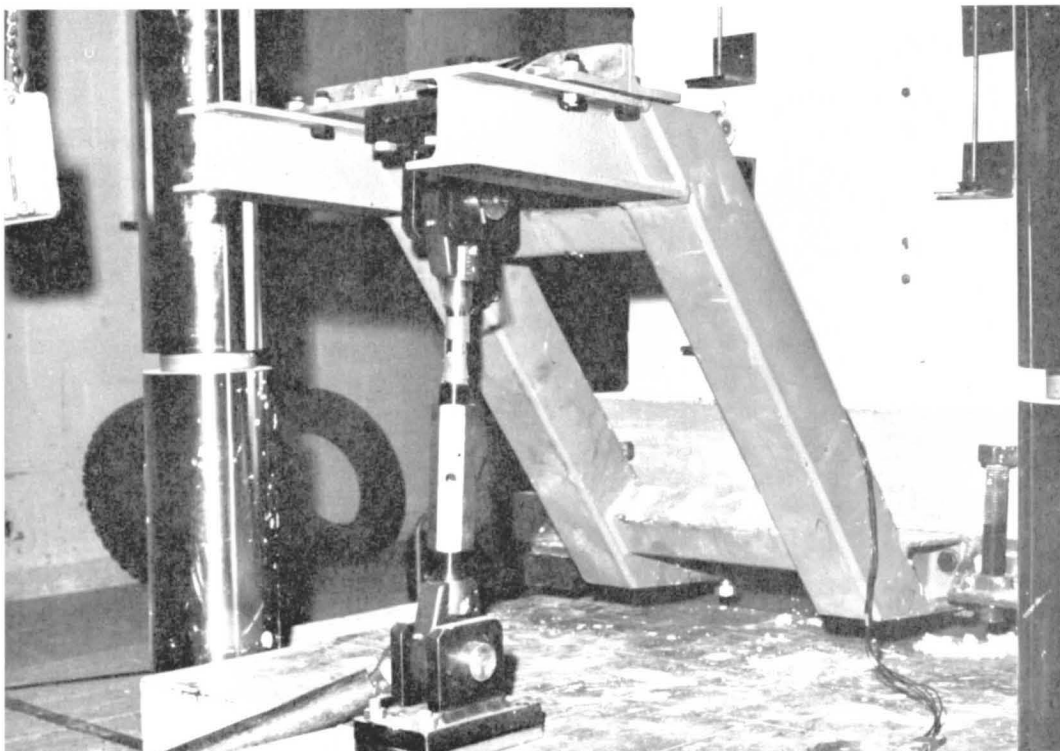
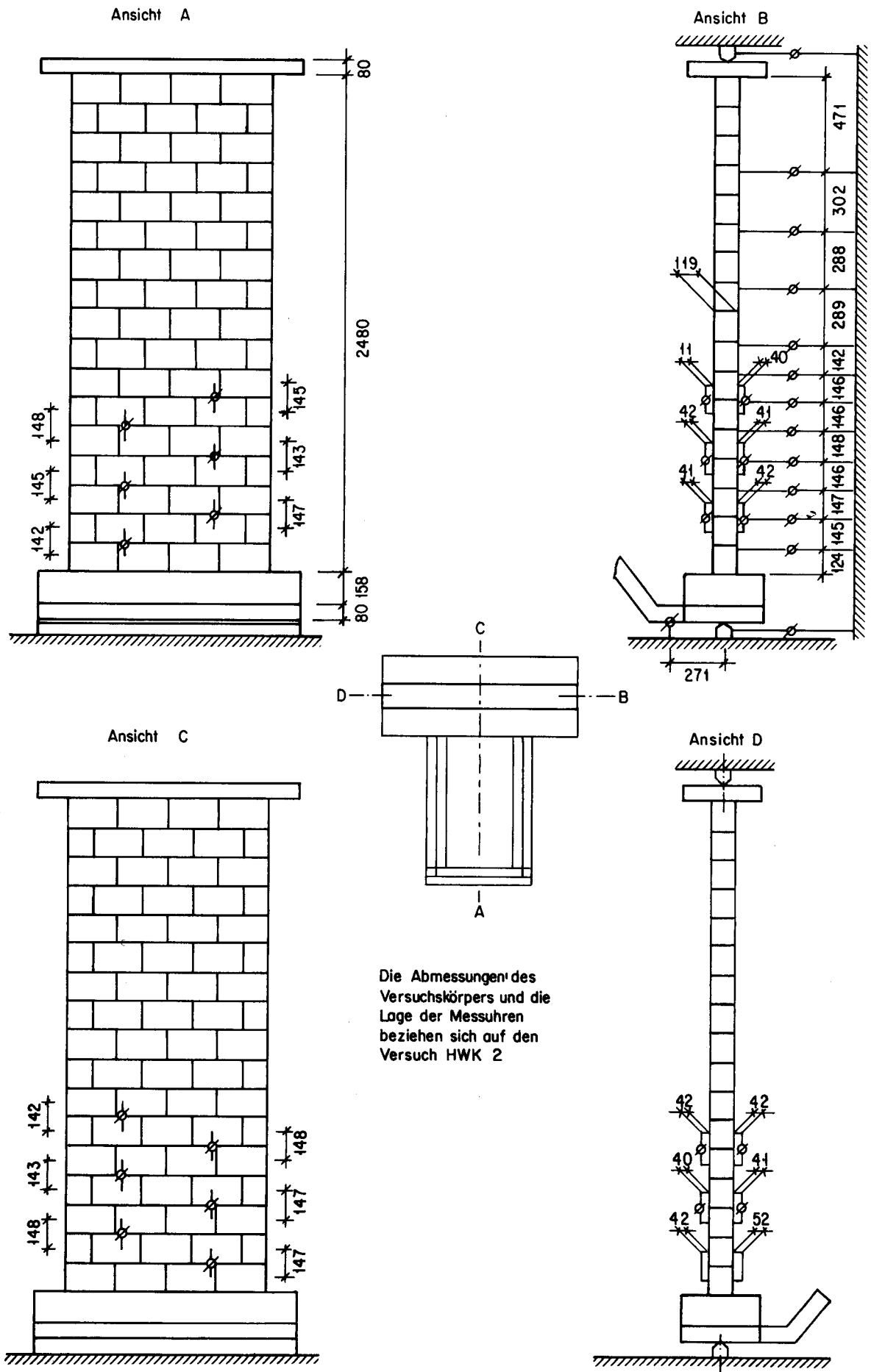


Bild 7 : Verdrehungsvorrichtung



Die Abmessungen des Versuchskörpers und die Lage der Messuhren beziehen sich auf den Versuch HWK 2

Bild 8: Lage der Messuhren, Abmessungen des Versuchskörpers (HWK 2), Masse in mm

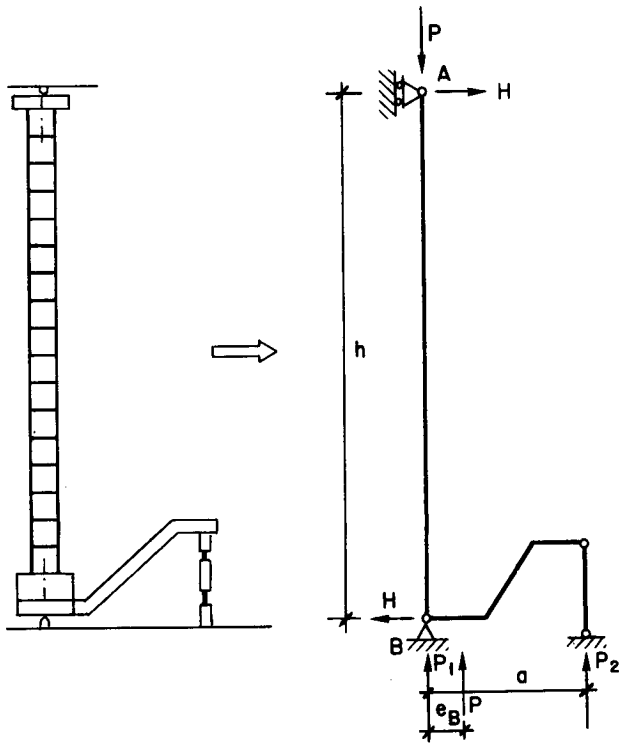


Bild 9: Statische Verhältnisse der Versuchsanlage

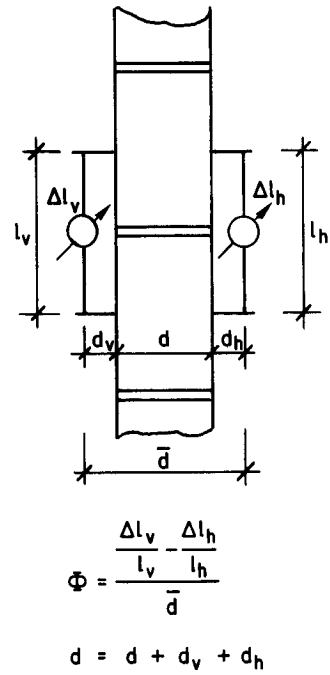


Bild 10: Messung der axialen Deformationen

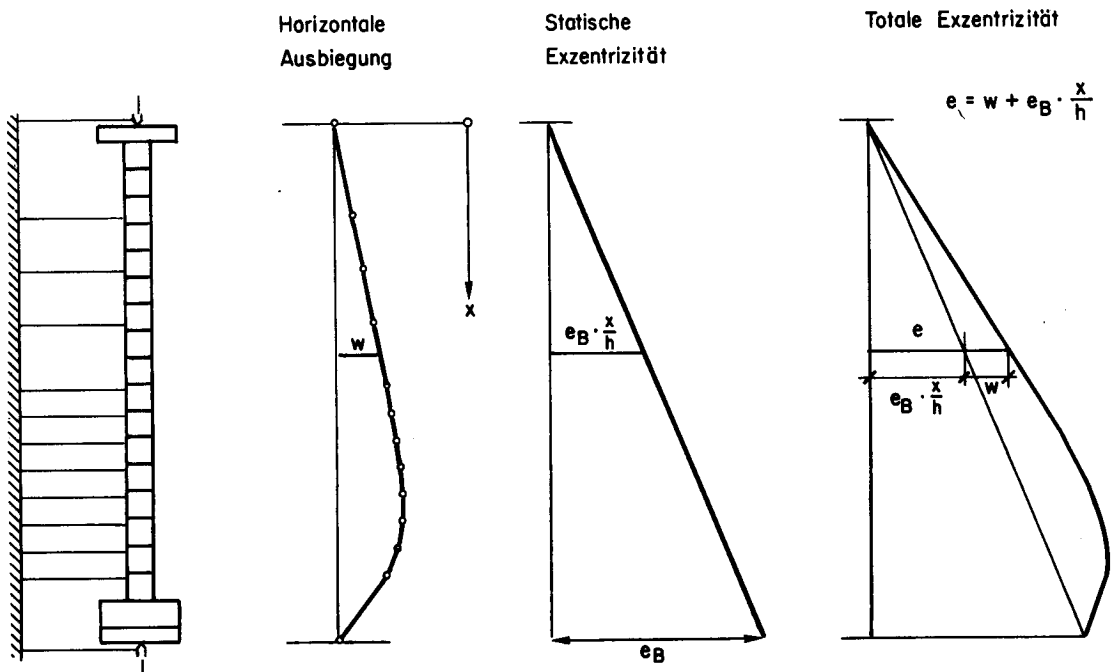
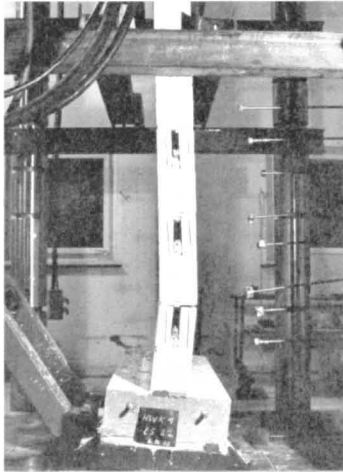
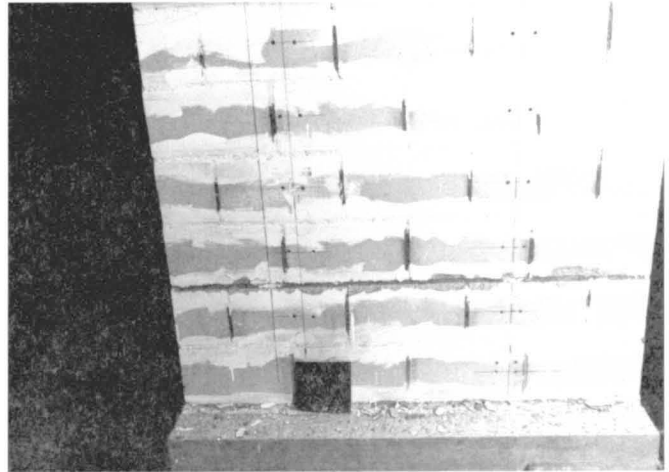


Bild 11: Horizontale Ausbiegung und Exzentrizität

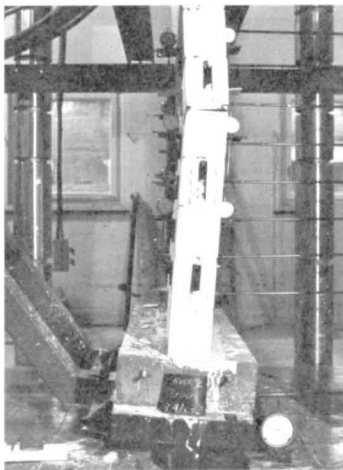


a) Klaffender Riss

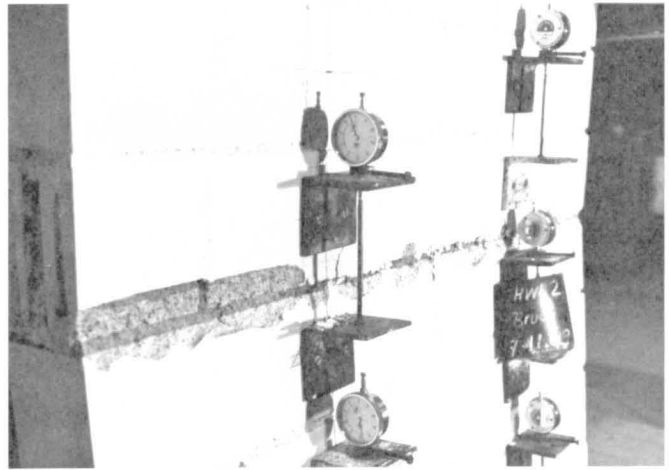


b) Steinabspliterungen

Bild 12 : HWK 1 P = 100 kN , Laststufe 22 : $\vartheta_B = 0.114$

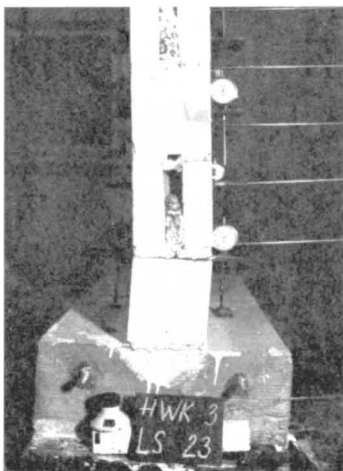


a) Bruch in 5./6. Steinlage

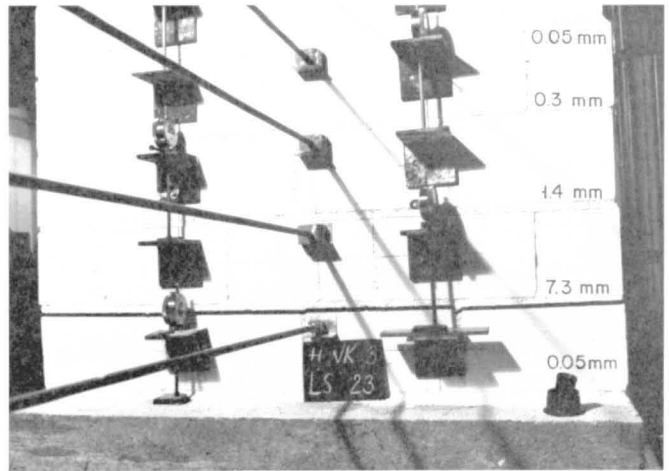


b) Bruchbild

Bild 13 : HWK 2 P = 300 kN , Laststufe 16 (Bruch) : $\vartheta_B = 0.052$



a) deutlicher Knick



b) Klaffender Riss, Rissverteilung

Bild 14 : HWK 3 P = 100 kN , Laststufe 23 : $\vartheta_B = 0.073$

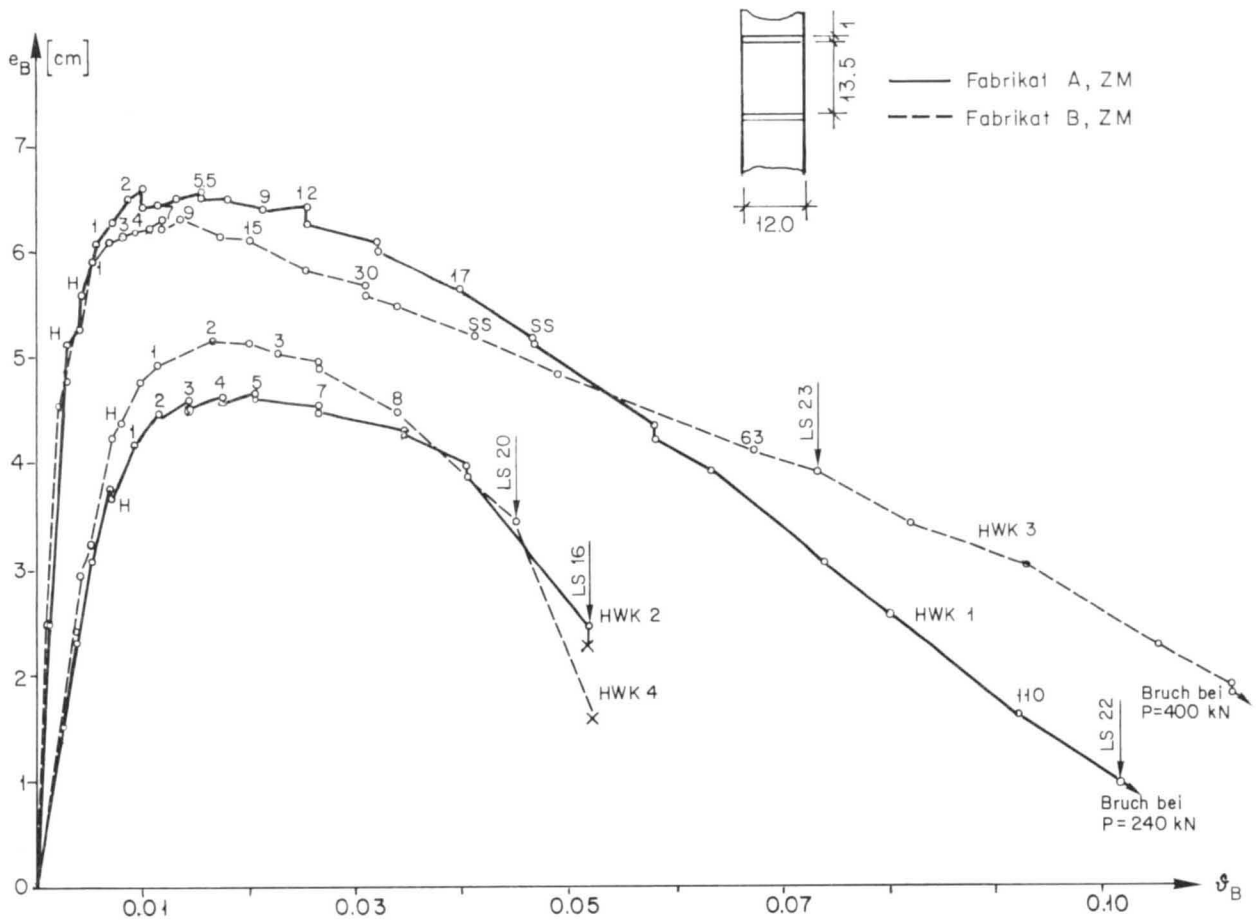
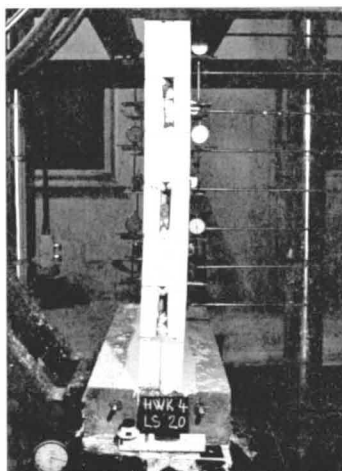
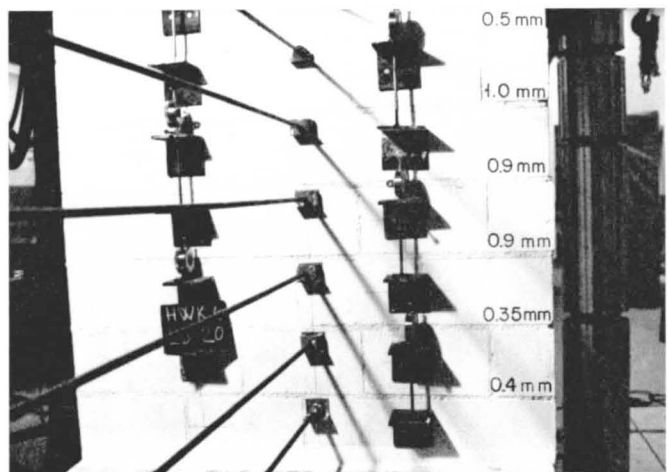


Bild 15: Exzentrizität - Verdrehung: $e_B - \varphi_B$ (HWK 1- 4)



a) kein ausgeprägter Knick



b) Rissverteilung

Bild 16: HWK 4 $P=300$ kN, Laststufe 20 $\varphi_B=0.045$

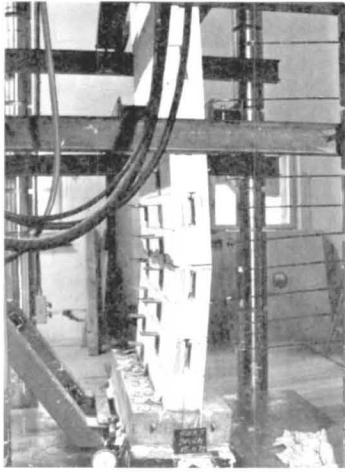
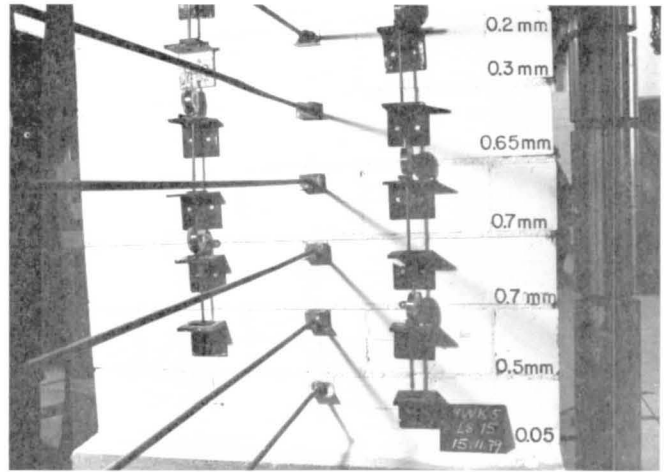
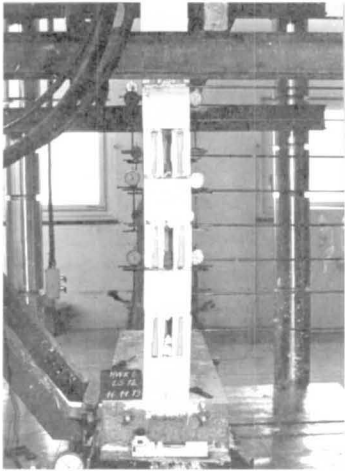
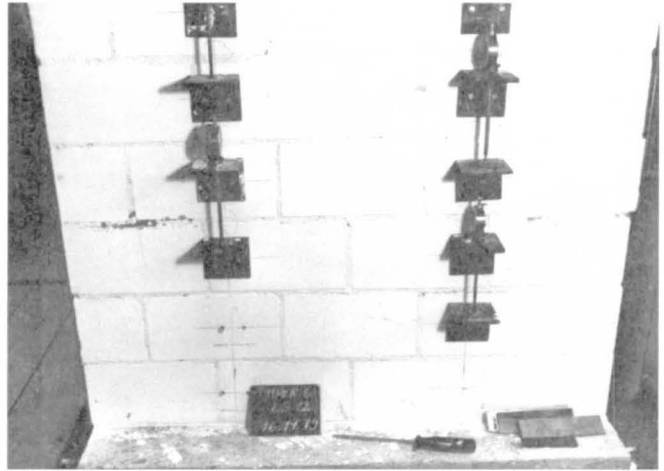
a) Laststufe 18 (Bruch) $\vartheta_B = 0.057$

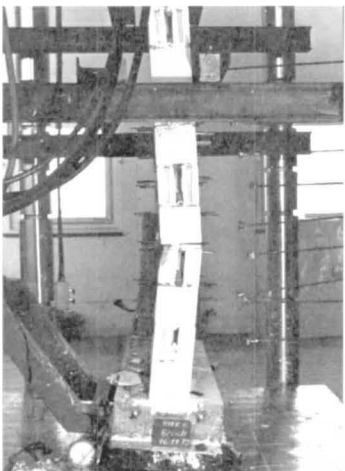
Bild 17: HWK 5 P = 400 kN

b) Laststufe 15: $\vartheta_B = 0.038$ 

a) "verteilte" Krümmung



b) leichte Steinabsplitterungen

Bild 18: HWK 6 P = 550 kN, Laststufe 12: $\vartheta_B = 0.031$ 

a) Bruch in 4.-6. Steinlage



b) Starke Abplatzungen

Bild 19: HWK 6 P = 550 kN, Laststufe 15 (Bruch): $\vartheta_B = 0.047$

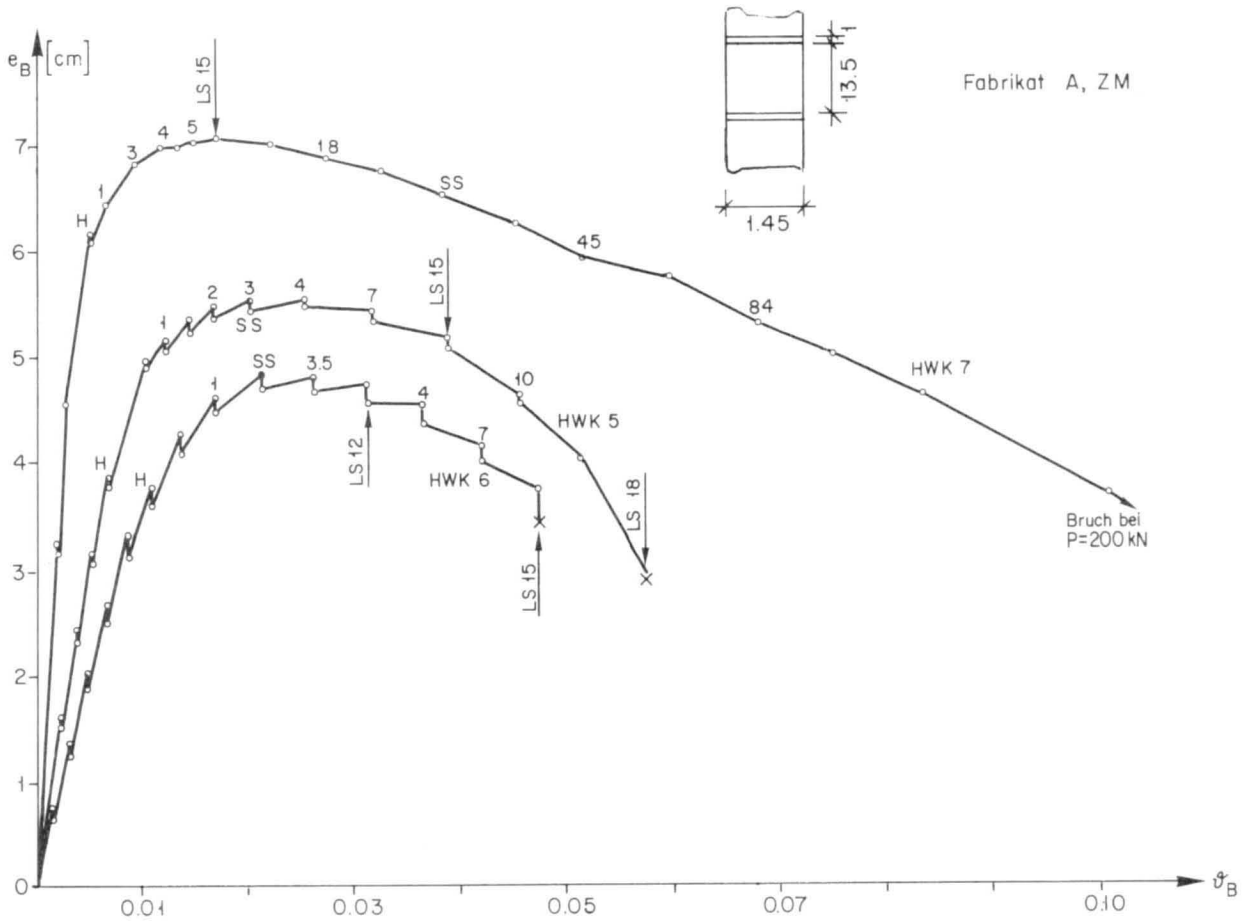
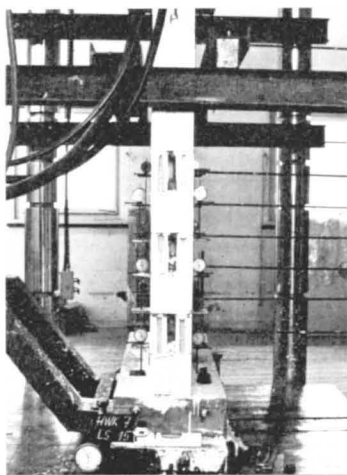
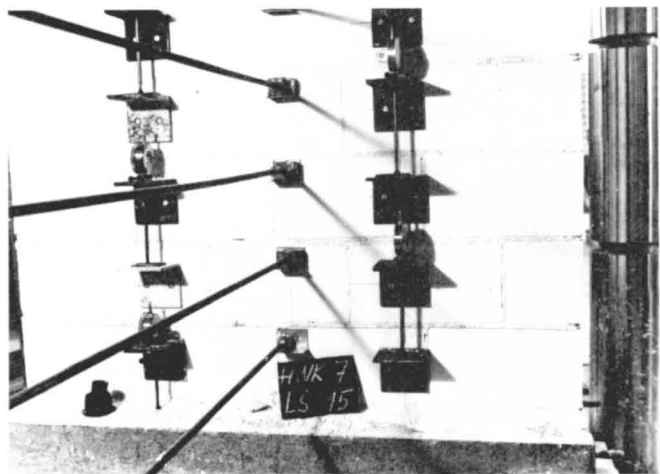


Bild 20: Exzentrizität - Verdrehung: $e_B - \varphi_B$ (HWK 5-7)

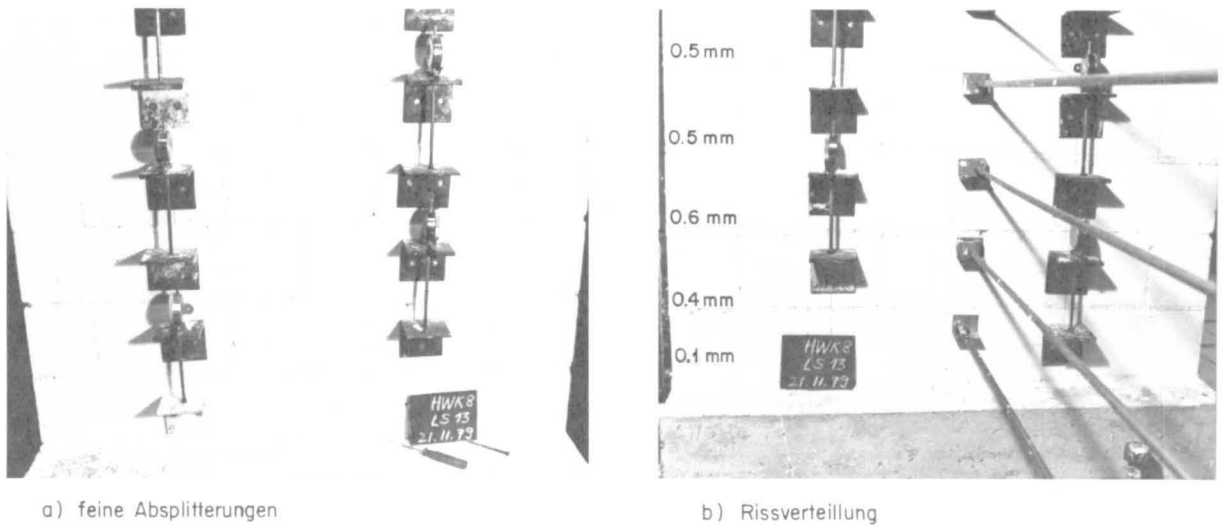


a) Seitenansicht



b) Rissverteilung

Bild 21: HWK 7 $P = 150\text{ kN}$, Laststufe 15: $\varphi_B = 0.017$



a) feine Absplitterungen

b) Rissverteilung

Bild 22: HWK 8 P = 550 kN, Laststufe 13 : $\vartheta_B = 0.036$



a) Bruch in 4./5. Steinlage

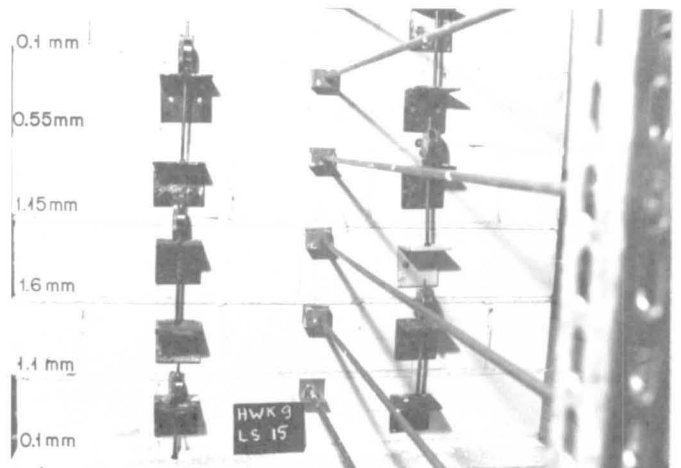


b) Bruch durch Abplatzungen

Bild 23: HWK 8 P = 550 kN, Laststufe 17 (Bruch): $\vartheta_B = 0.066$



a) Laststufe 19 (Bruch): $\vartheta_B = 0.088$



b) Laststufe 15 : $\vartheta_B = 0.0395$

Bild 24: HWK 9 P = 150 kN

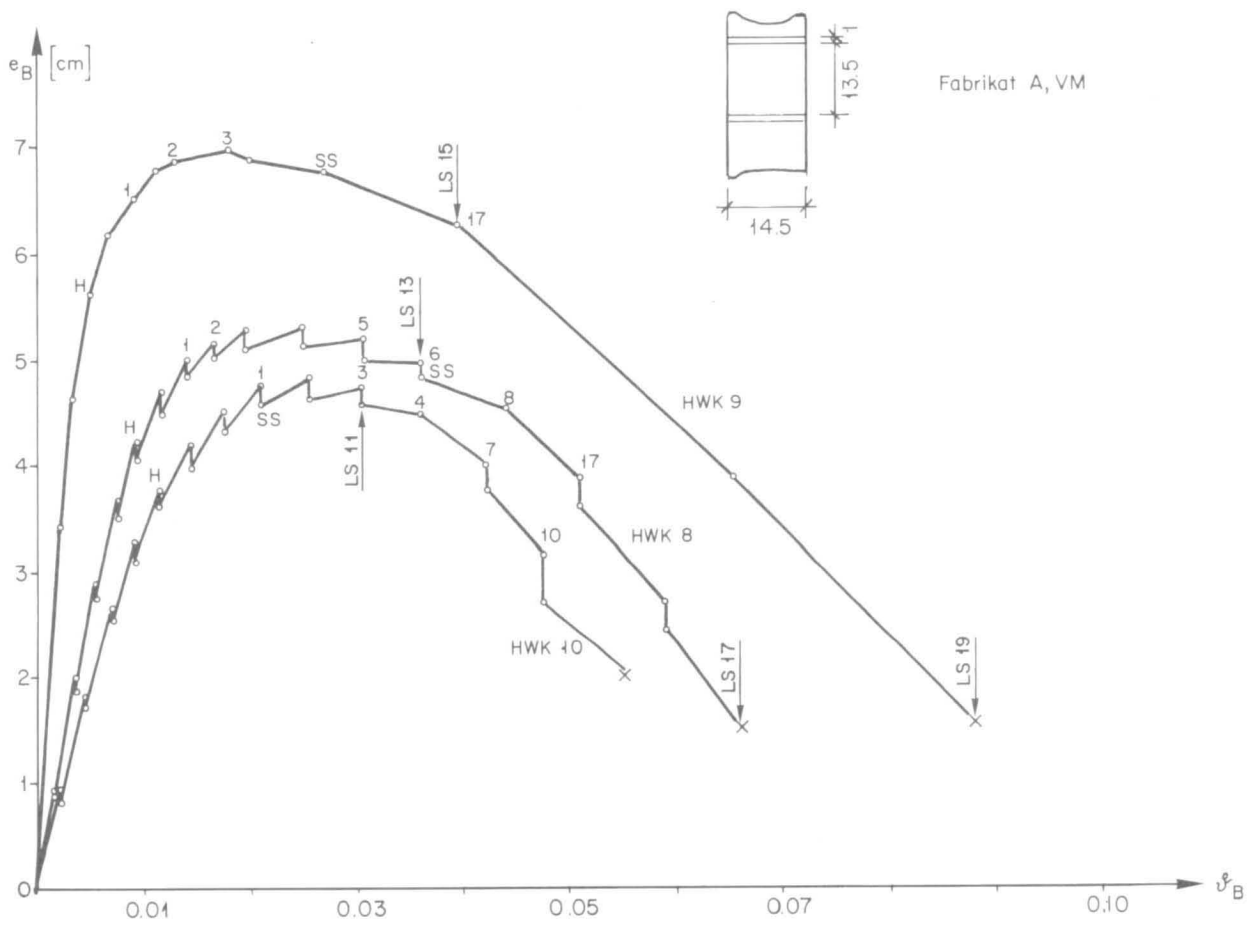
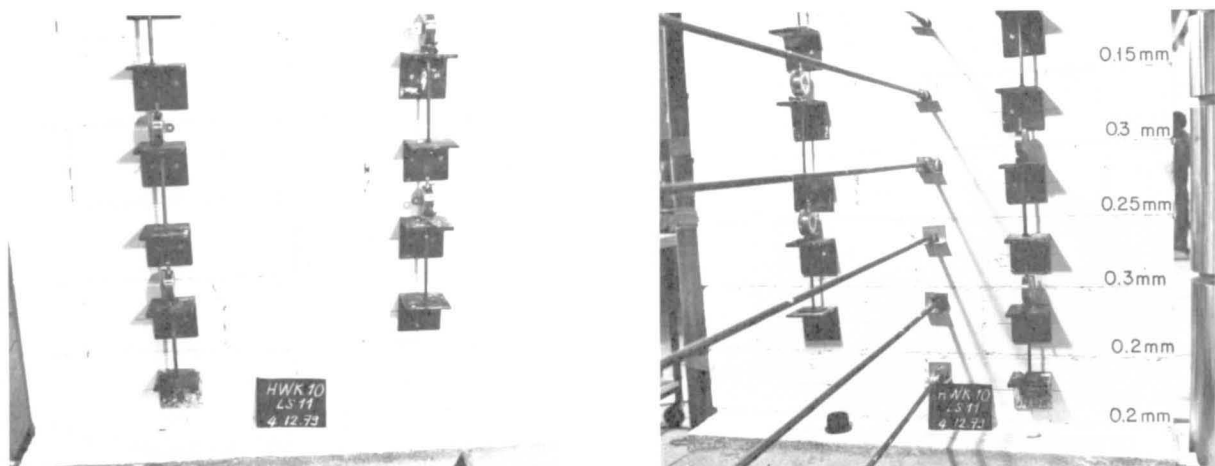


Bild 25: Exzentrizität - Verdrehung: $e_B - \vartheta_B$ (HWK 8-10)



a) Leichte Absplitterungen auf Druckseite

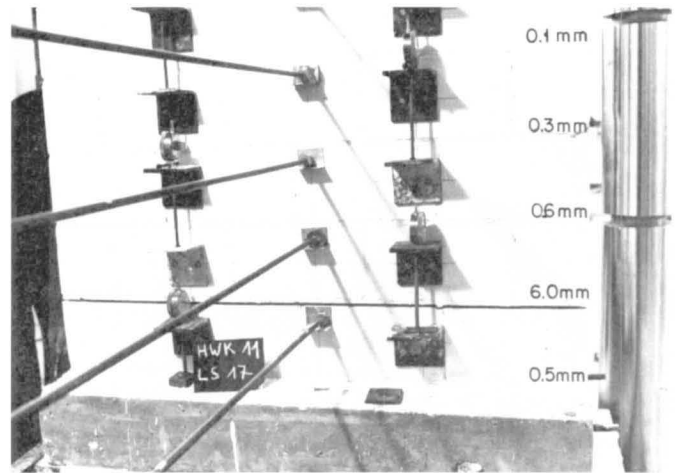
b) Rissverteilung

Bild 26: HWK 10 P = 550 kN, Laststufe 11:

$\vartheta_B = 0.0305$



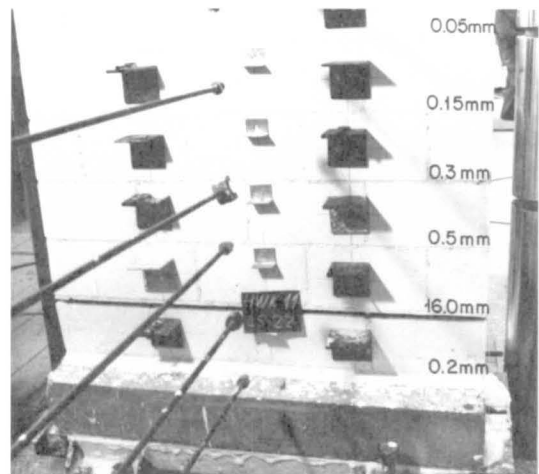
a) Klaffender Riss



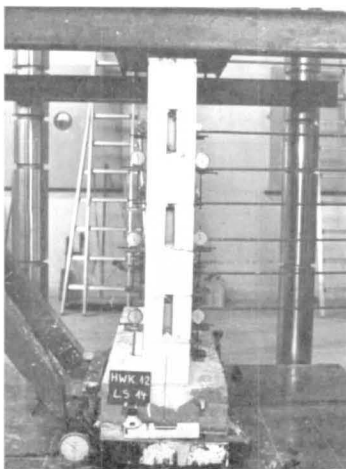
b) Rissverteilung

Bild 27: HWK 11 P = 150 kN, Laststufe 17: $\vartheta_B = 0.0665$ 

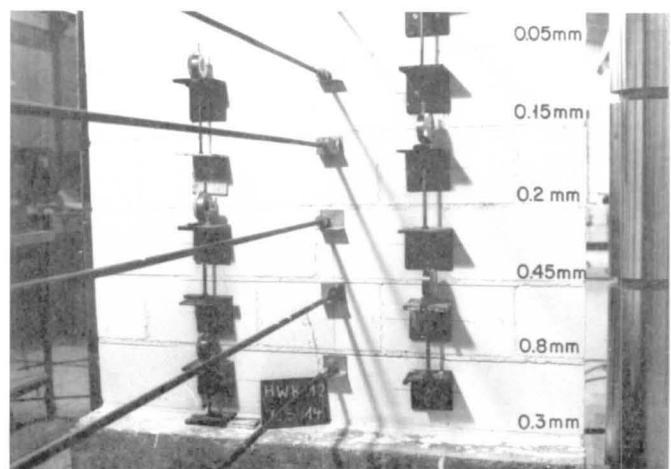
a) stärkere Steinabsplitterungen (kein Bruch)



b) Rissverteilung

Bild 28: HWK 11 P = 150 kN, Laststufe 22: $\vartheta_B = 0.1150$ 

a) Riss int. Fuge sichtbar



b) Rissverteilung

Bild 29: HWK 12 P = 150 kN, Laststufe 14: $\vartheta_B = 0.032$

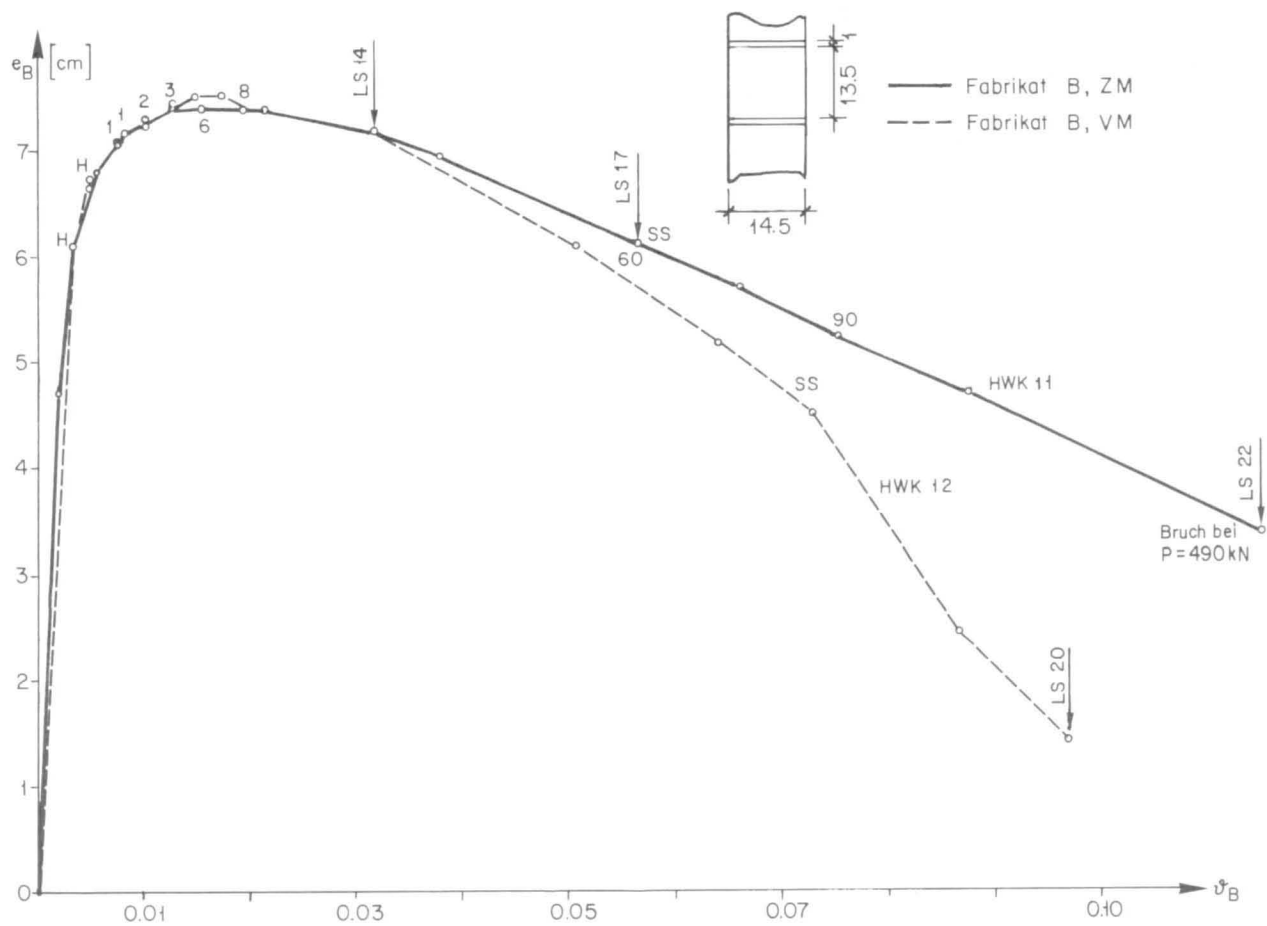
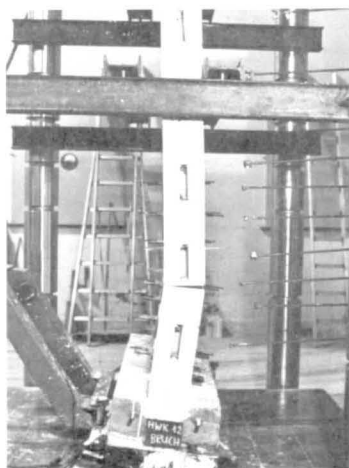


Bild 30: Exzentrizität - Verdrehung: $e_B - \varphi_B$ (HWK 11-12)

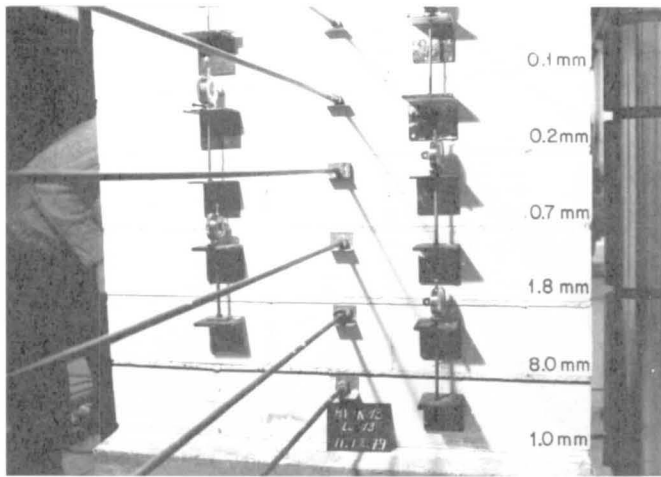


a) Bruch in 3/4. Steinlage



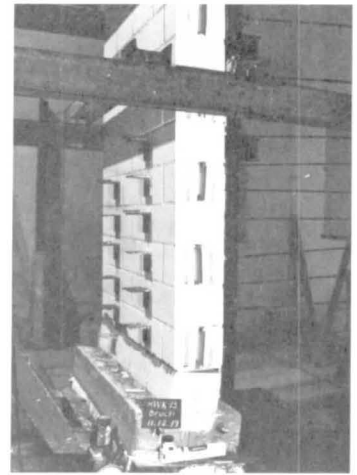
b) leichte Abplatzungen

Bild 31: HWK 12 P = 150 kN, Laststufe 20(Bruch) $\varphi_B = 0.097$

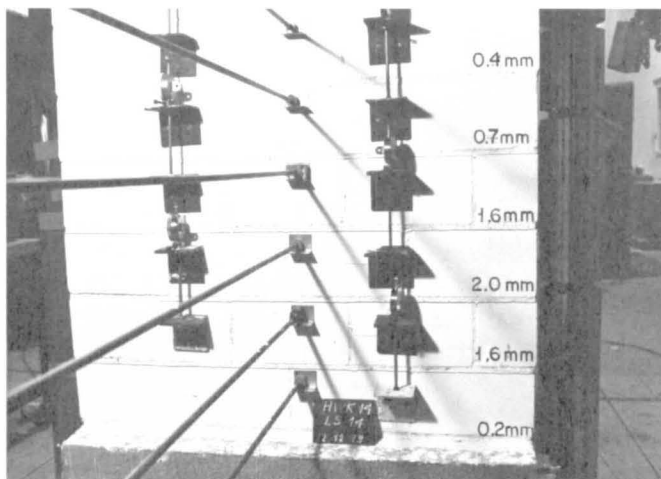


a) Laststufe 13: $\psi_B = 0.0695$, Rissverteilung

Bild 32: HWK 13 P = 300 kN

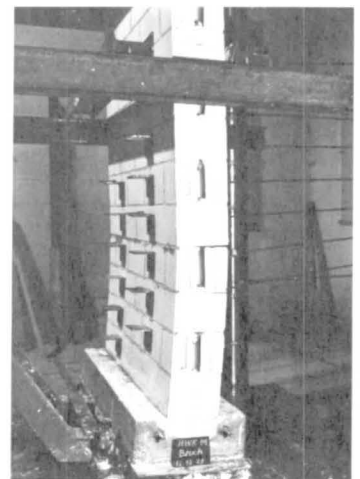


b) Laststufe 16 (Bruch): $\psi_B = 0.106$

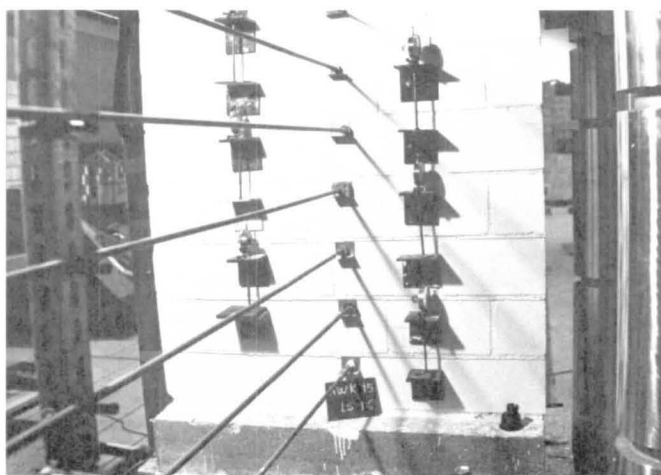


a) Laststufe 14: $\psi_B = 0.0510$, Rissverteilung

Bild 33: HWK 14 P = 600 kN

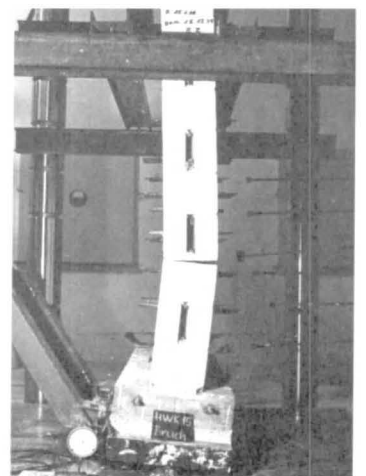


b) Laststufe 16 (Bruch): $\psi_B = 0.065$



a) Laststufe 16: $\psi_B = 0.043$

Bild 34: HWK 15 P = 300 kN



b) Laststufe 19 (Bruch): $\psi_B = 0.072$

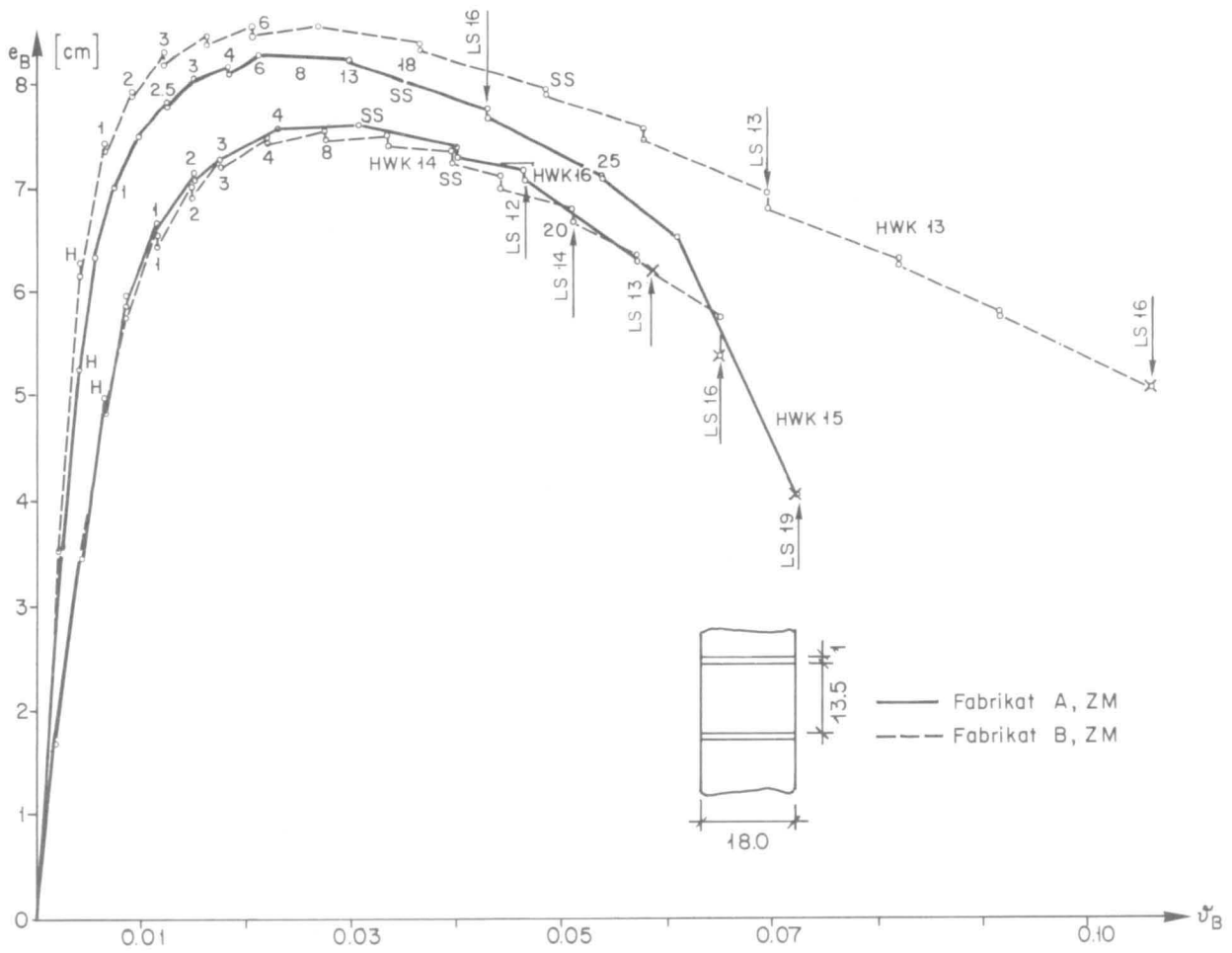
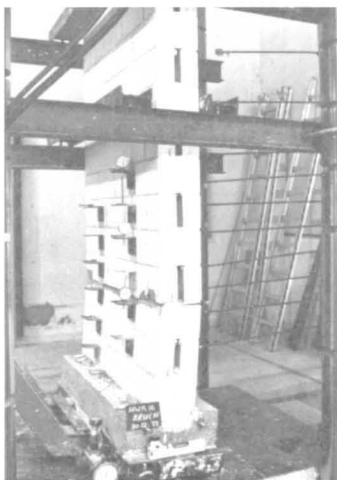
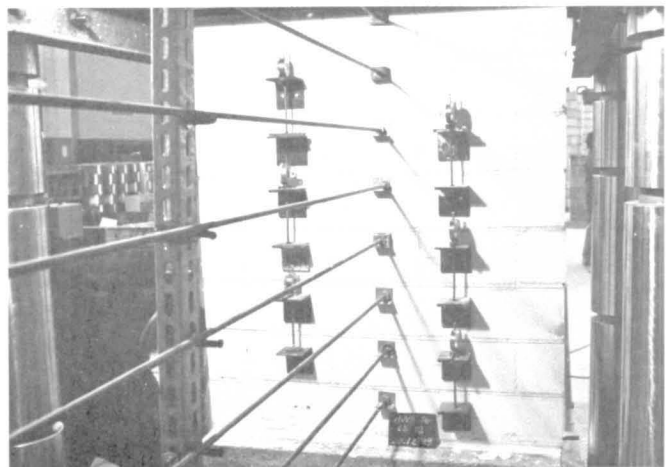


Bild 35: Exzentrizität - Verdrehung: $e_B - v_B$ (HWK 13-16)



a) Laststufe 13 (Bruch): $v_B = 0.058$



b) Laststufe 12: $v_B = 0.046$

Bild 36: HWK 16 P = 600 kN,

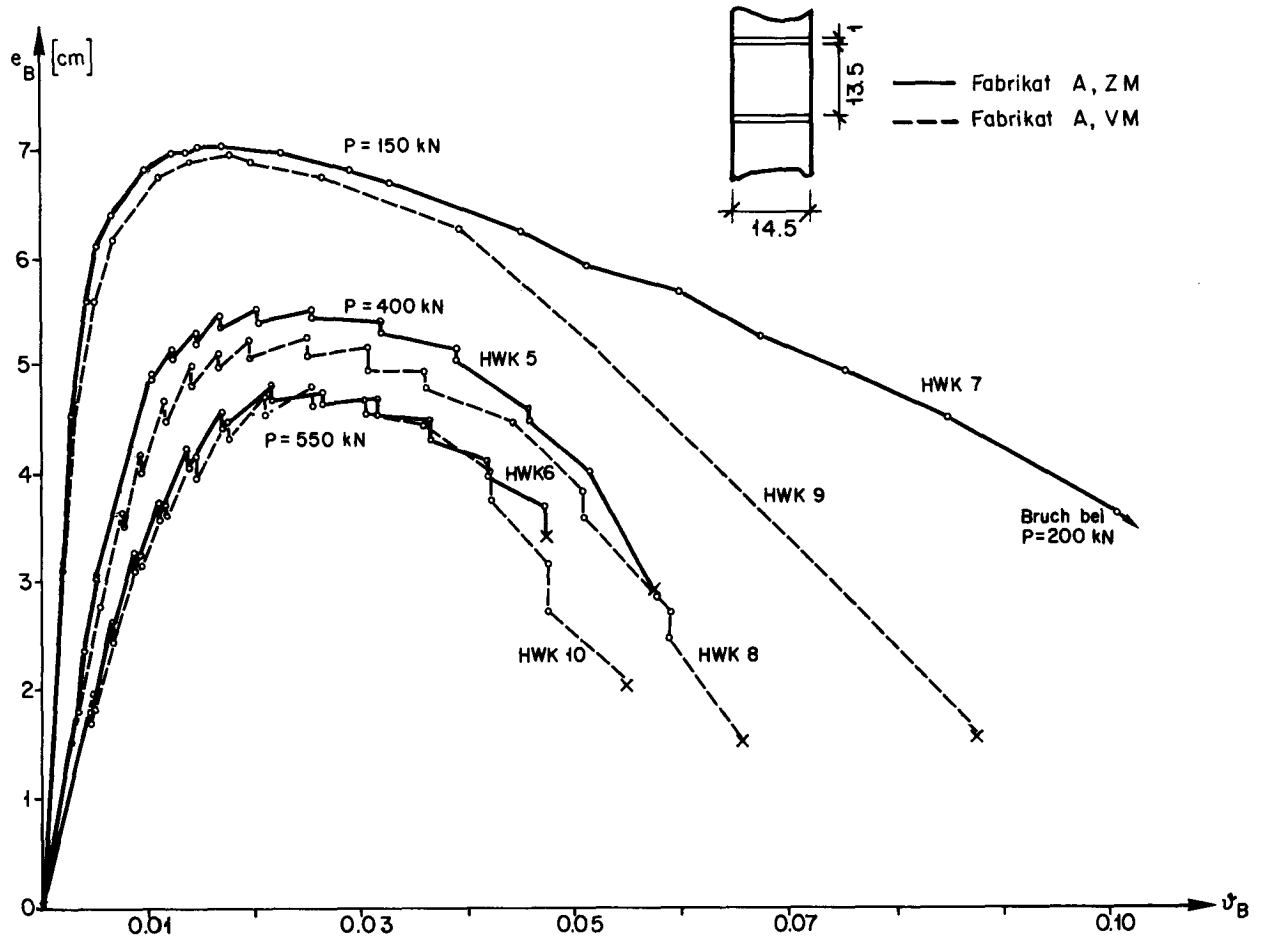


Bild 37: Exzentrizität - Verdrehung: $e_B - \psi_B$ (Einfluss der Mörtelart)

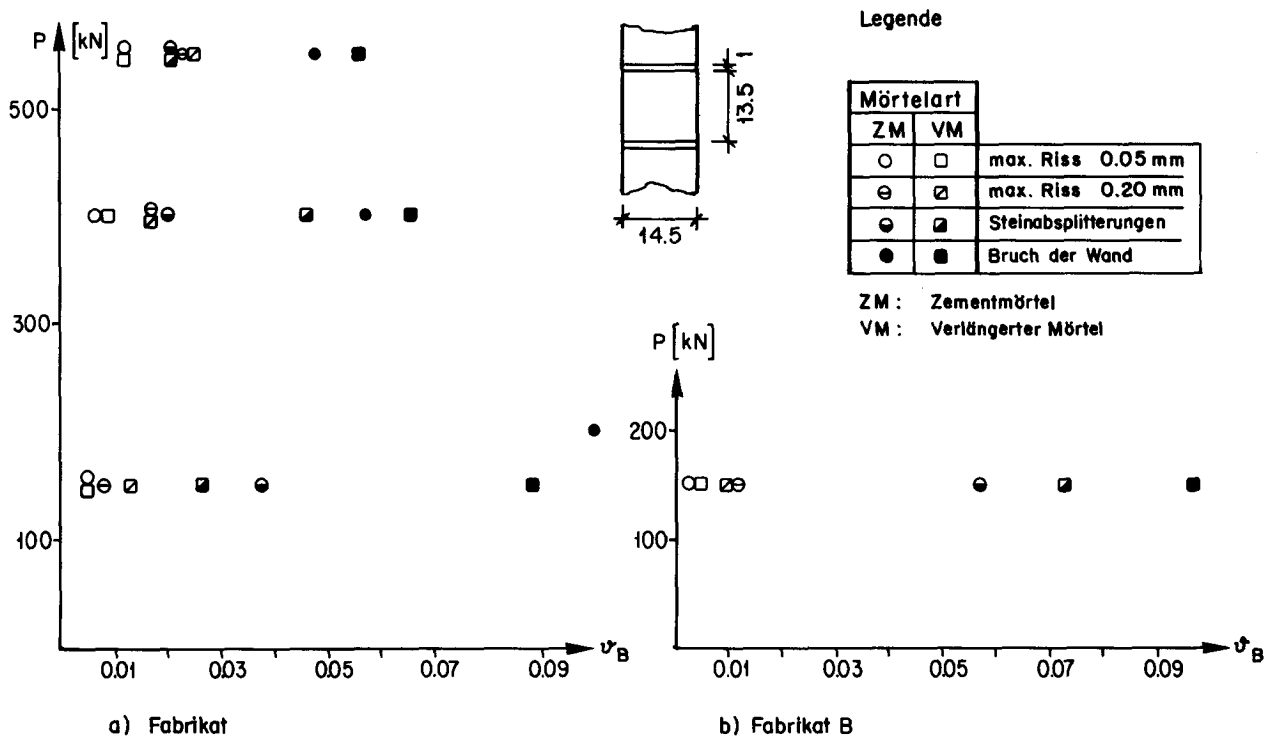


Bild 38: Axiallast - Verdrehung $P - \psi_B$ (Einfluss der Mörtelart, Axiallast)

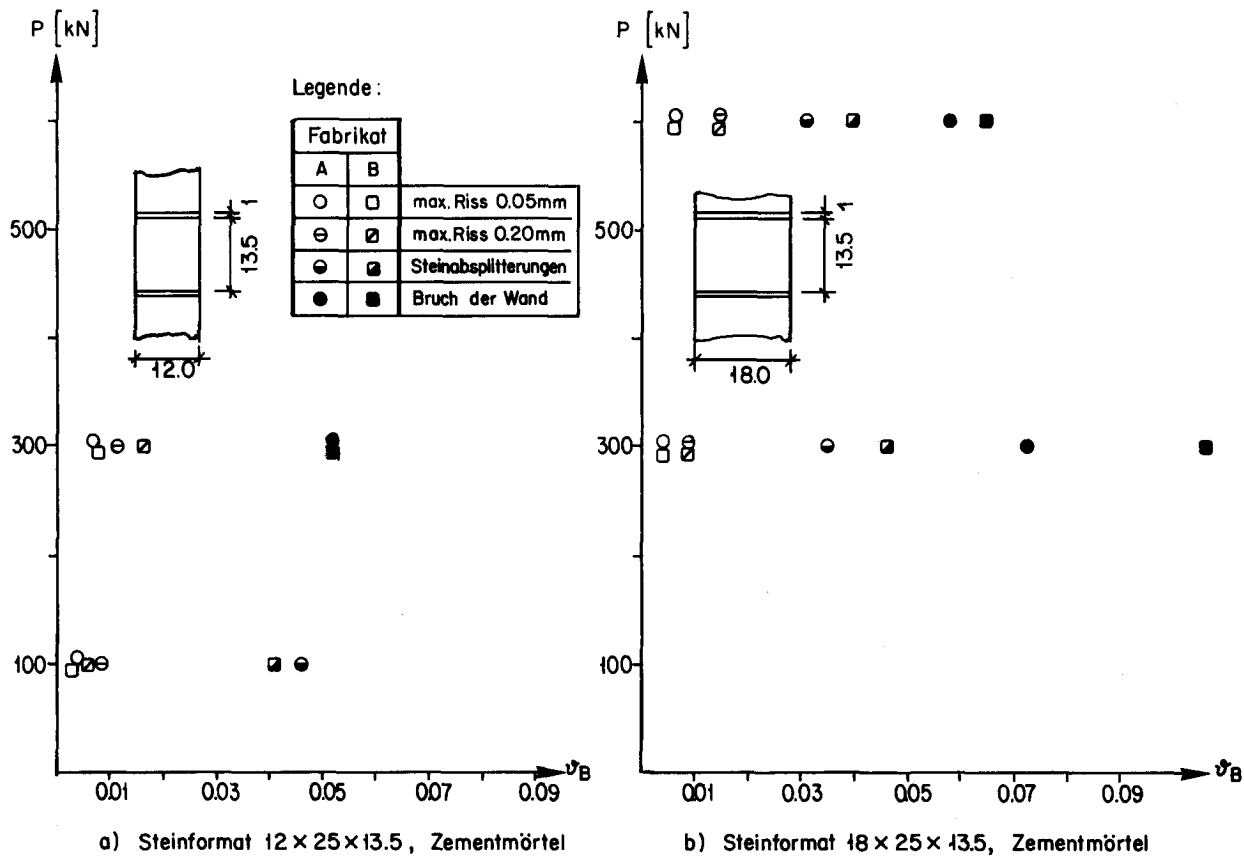


Bild 39: Axiallast-Verdrehung: P-ϑ (Einfluss des Steinfabrikates)

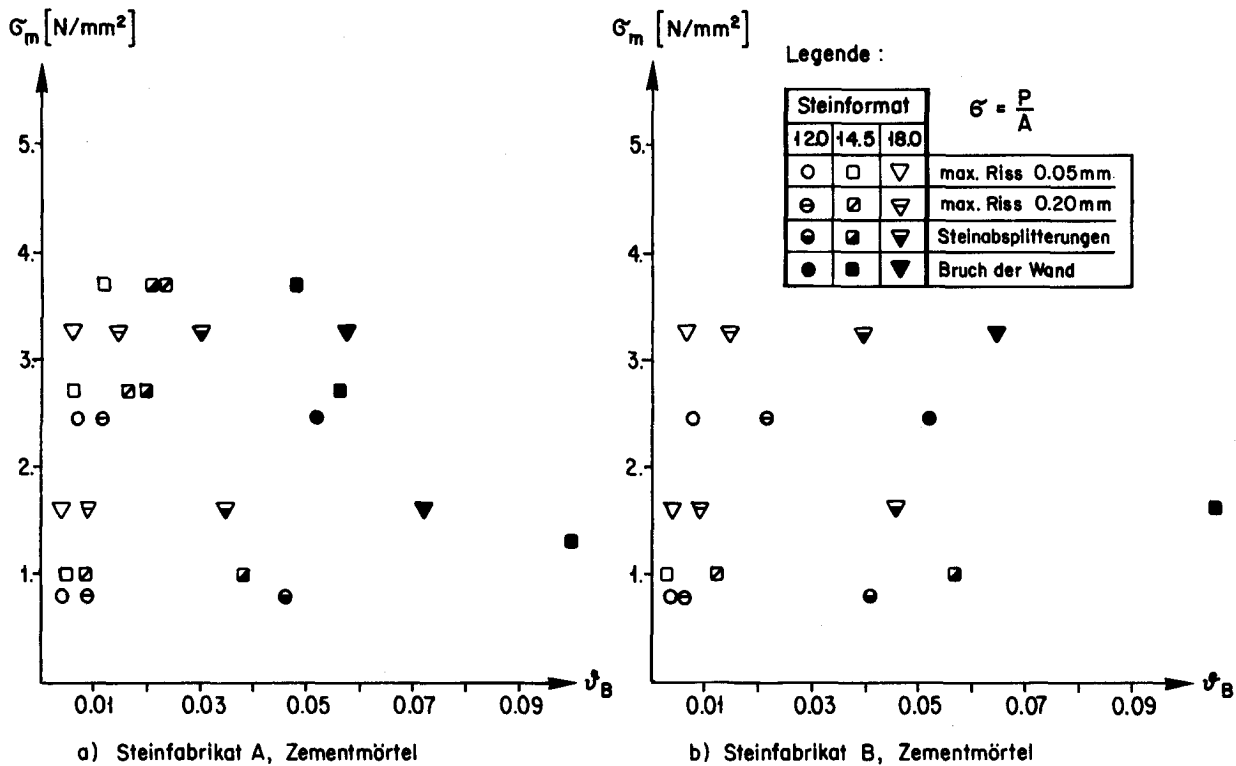


Bild 40: Bruttospannung-Verdrehung: σ - ϑ (Einfluss des Steinformats)

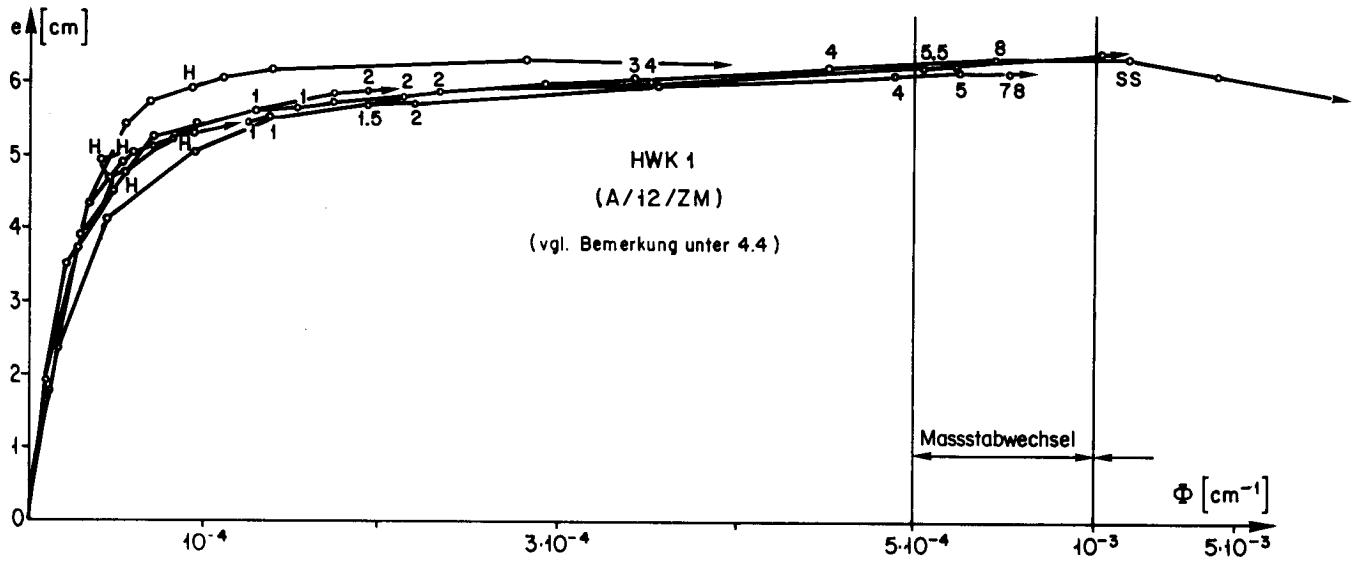


Bild 41: Exzentrizität - Krümmung: $e - \Phi$ ($P = 100$ kN)

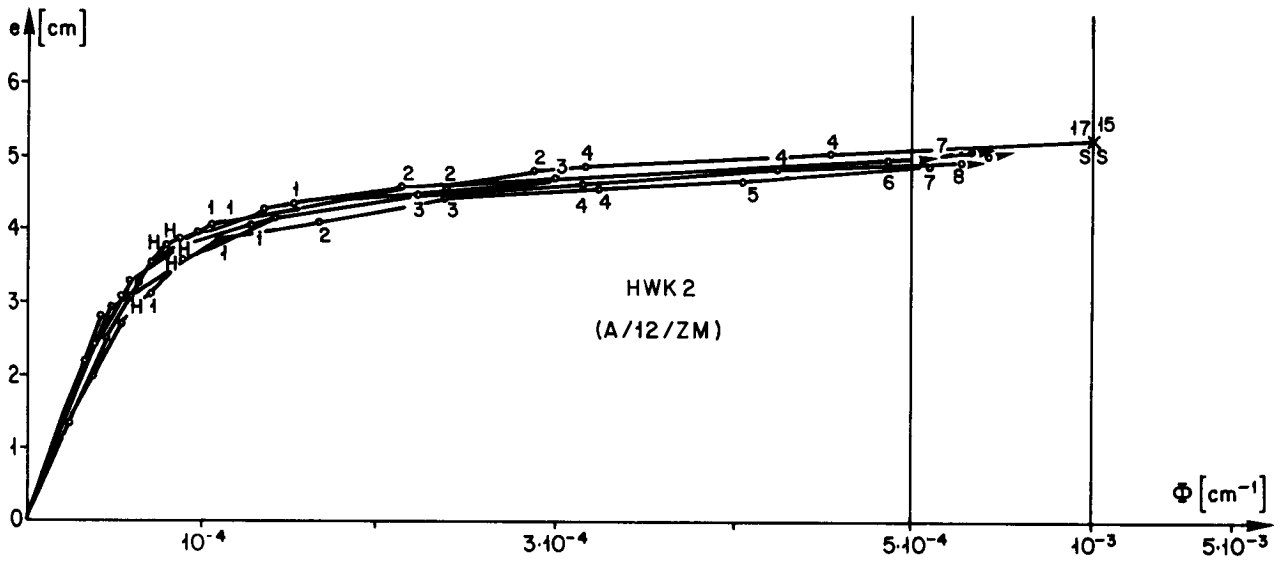


Bild 42: Exzentrizität - Krümmung ($P = 300$ kN)

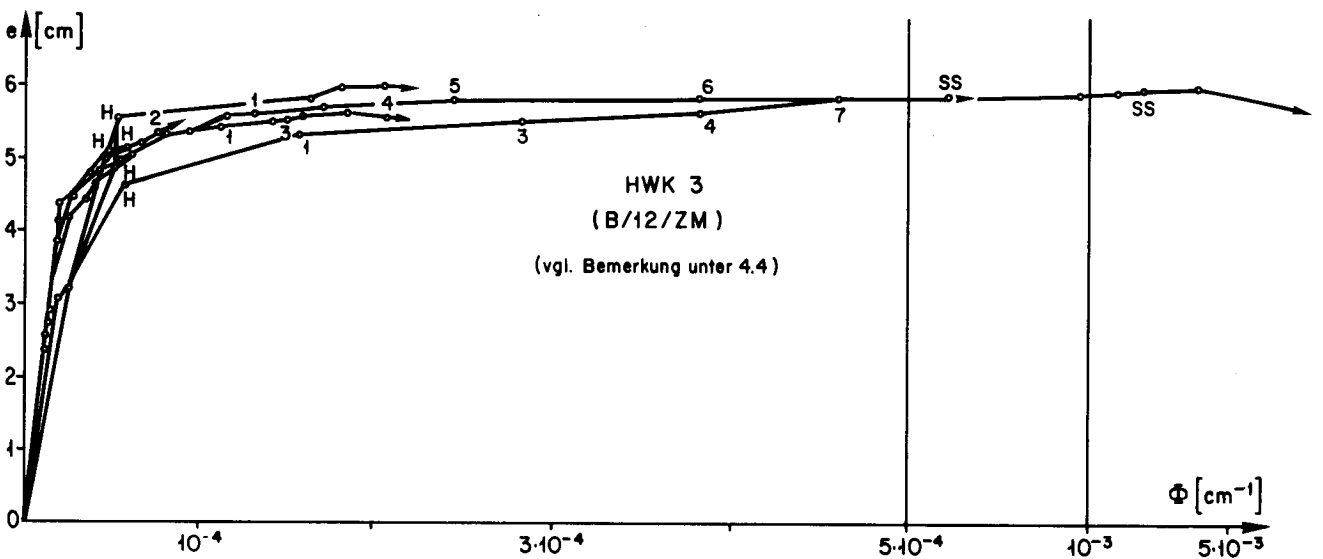
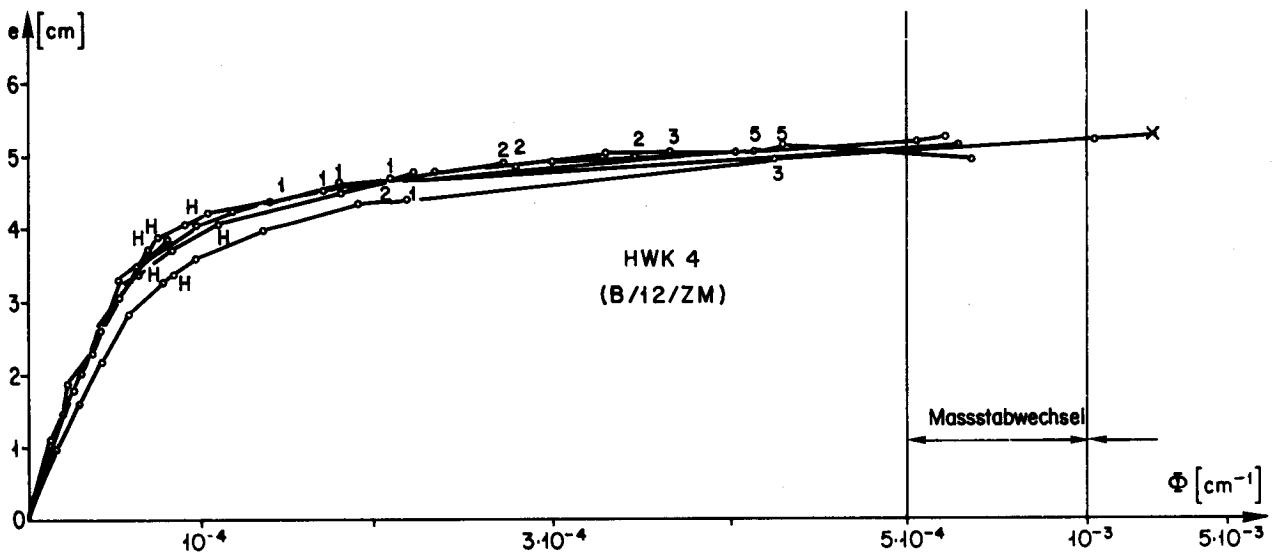
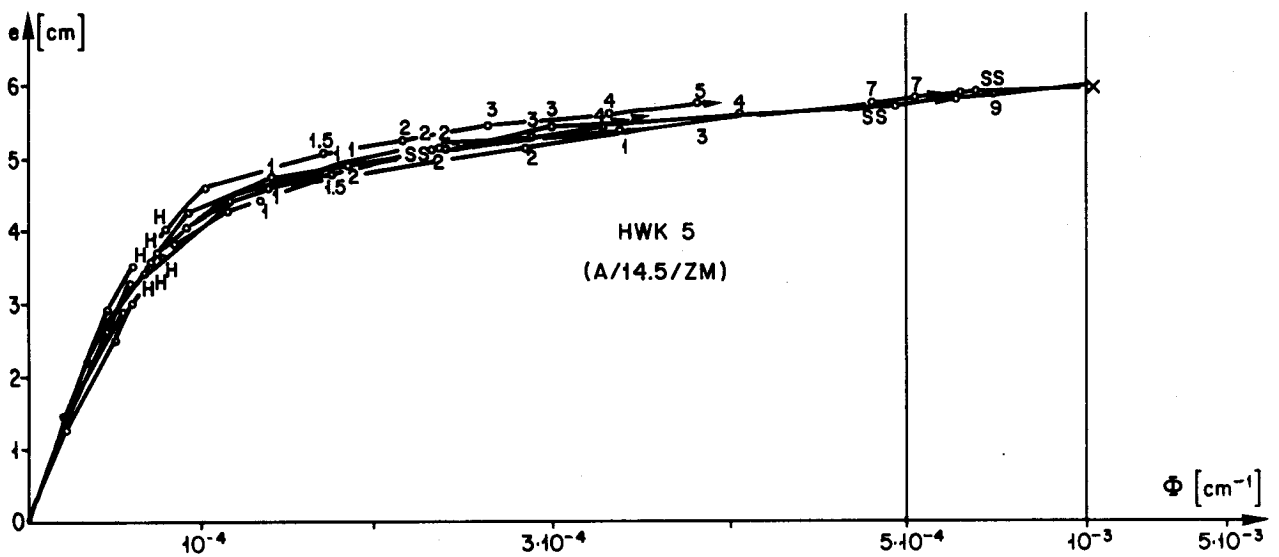
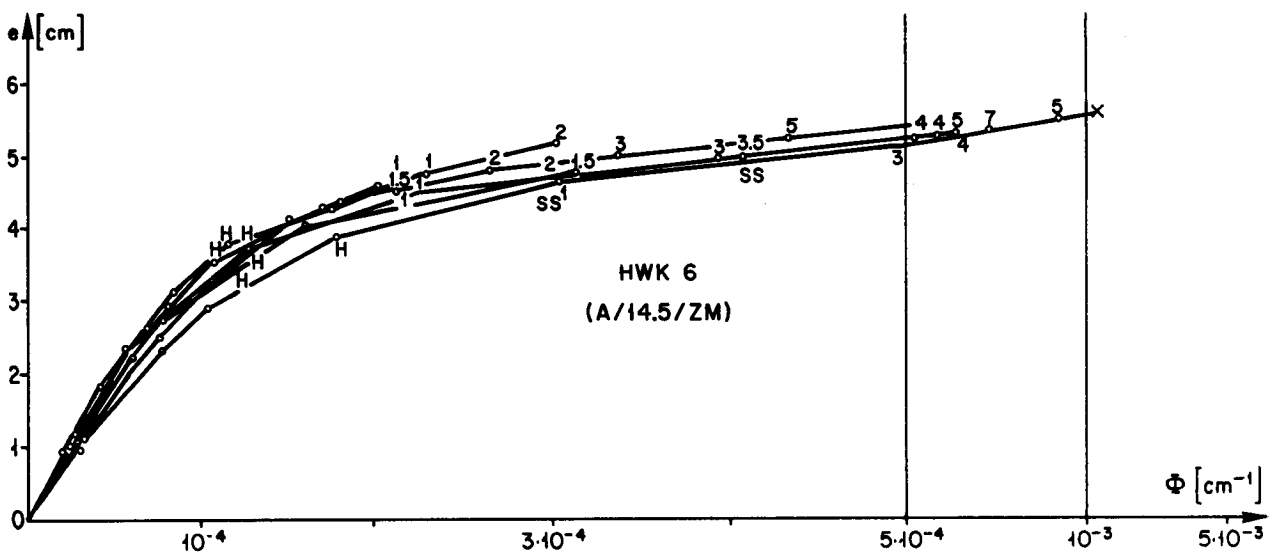


Bild 43: Exzentrizität - Krümmung ($P = 100$ kN)

Bild 44: Exzentrizität - Krümmung ($P = 300$ kN)Bild 45: Exzentrizität - Krümmung ($P = 400$ kN)Bild 46: Exzentrizität - Krümmung ($P = 550$ kN)

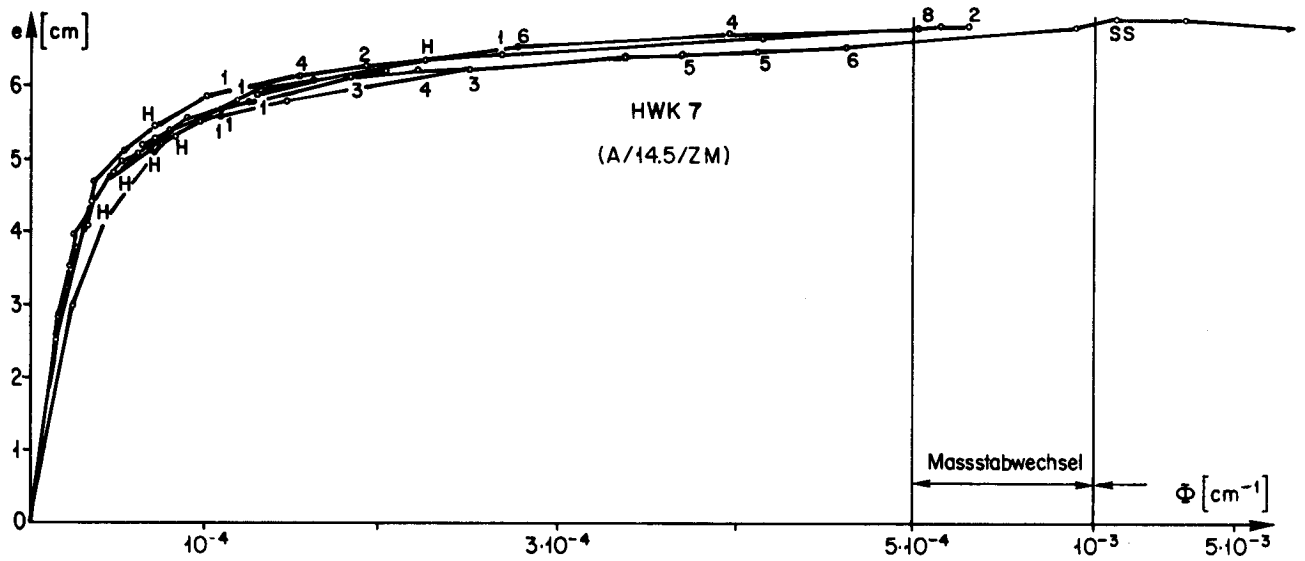


Bild 47: Exzentrizität - Krümmung ($P = 150$ kN)

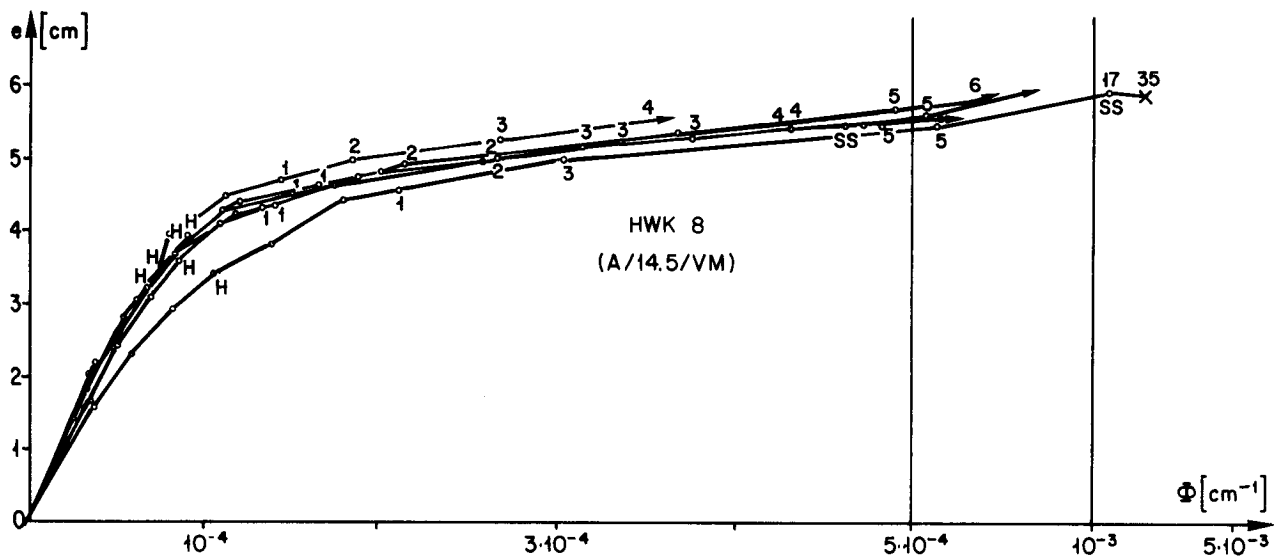


Bild 48: Exzentrizität - Krümmung ($P = 400$ kN)

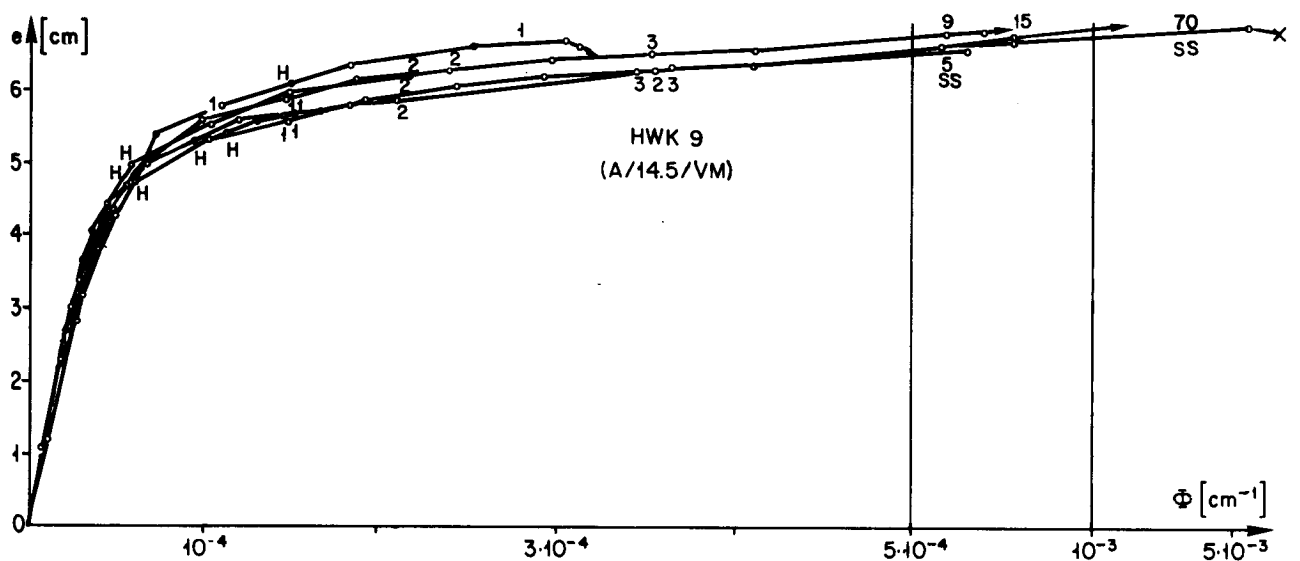


Bild 49: Exzentrizität - Krümmung ($P = 150$ kN)

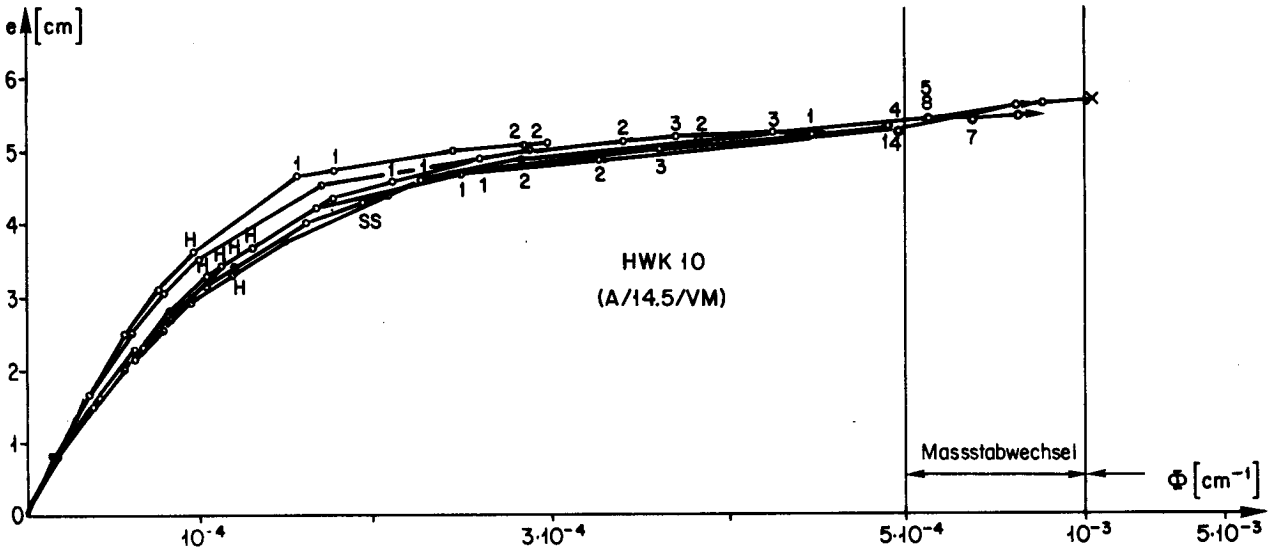


Bild 50: Exzentrizität - Krümmung ($P = 550$ kN)

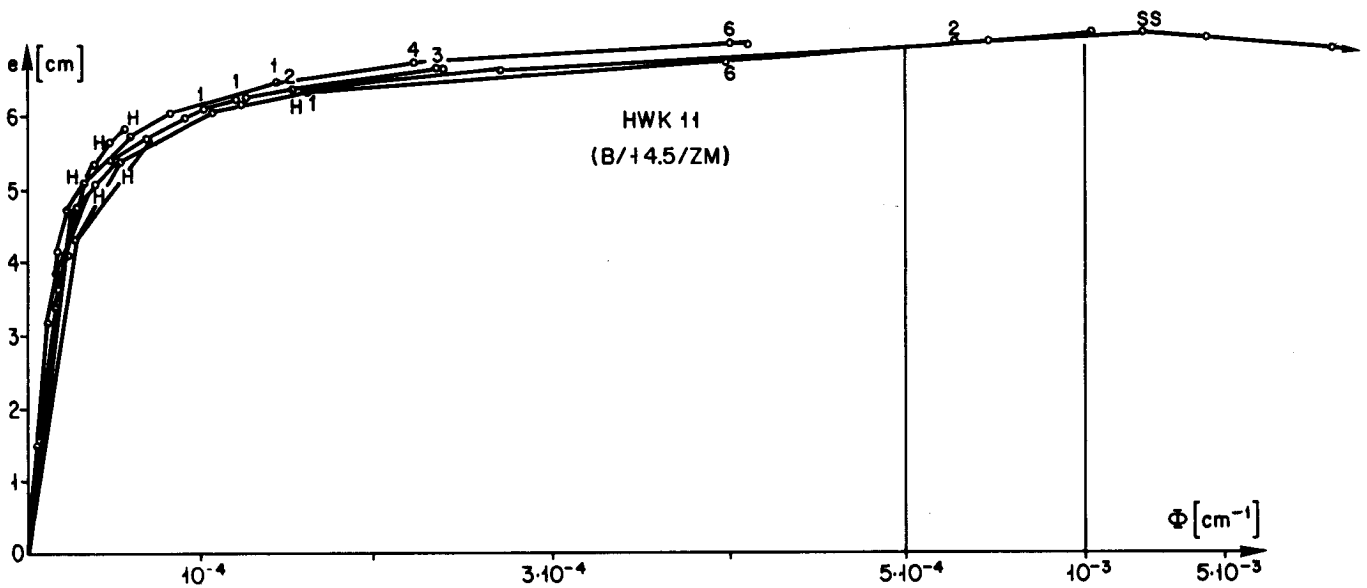


Bild 51: Exzentrizität - Krümmung ($P = 150$ kN)

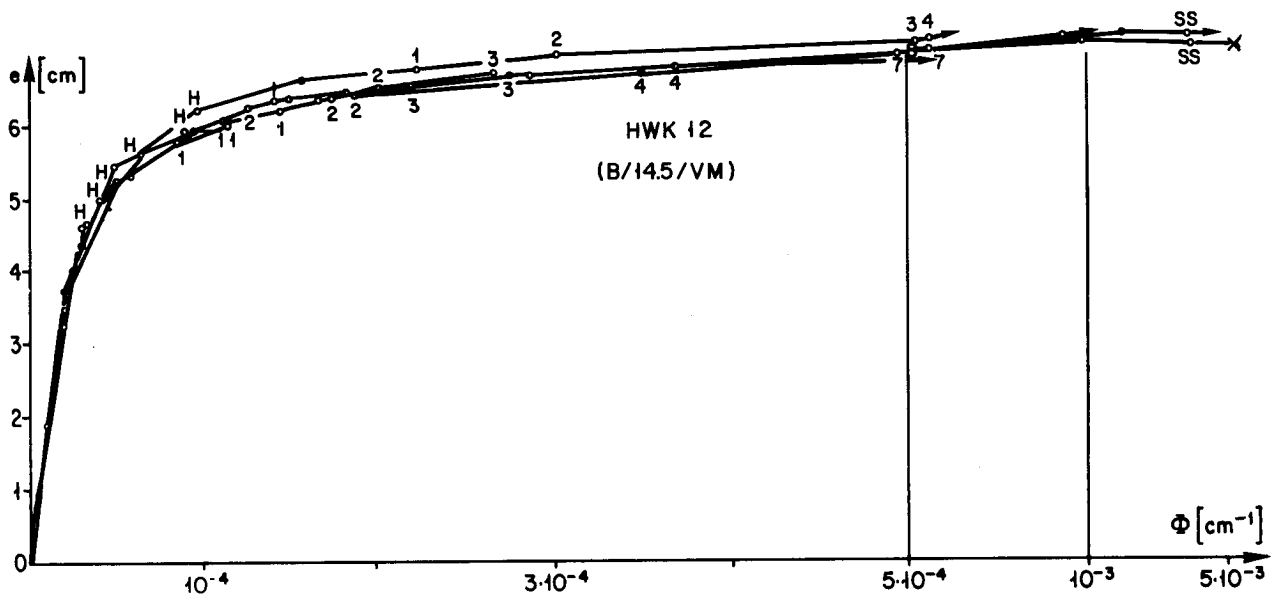
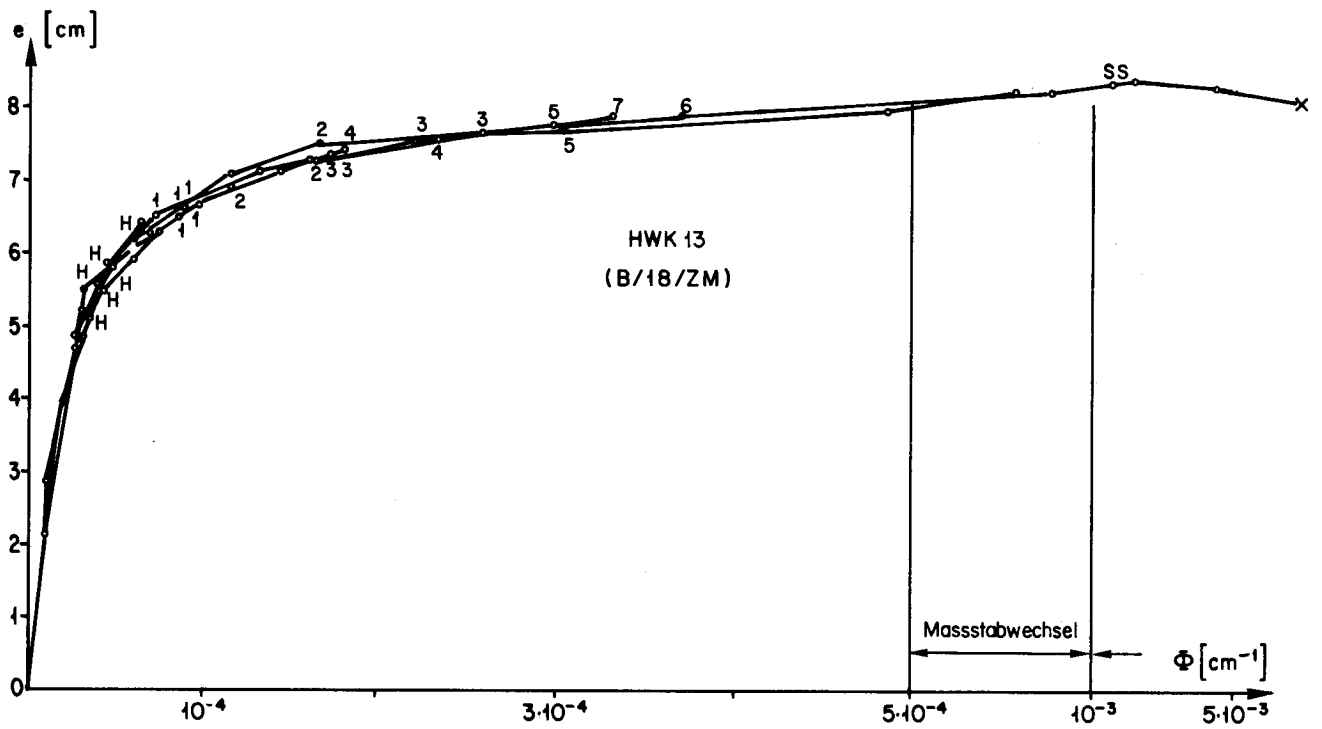
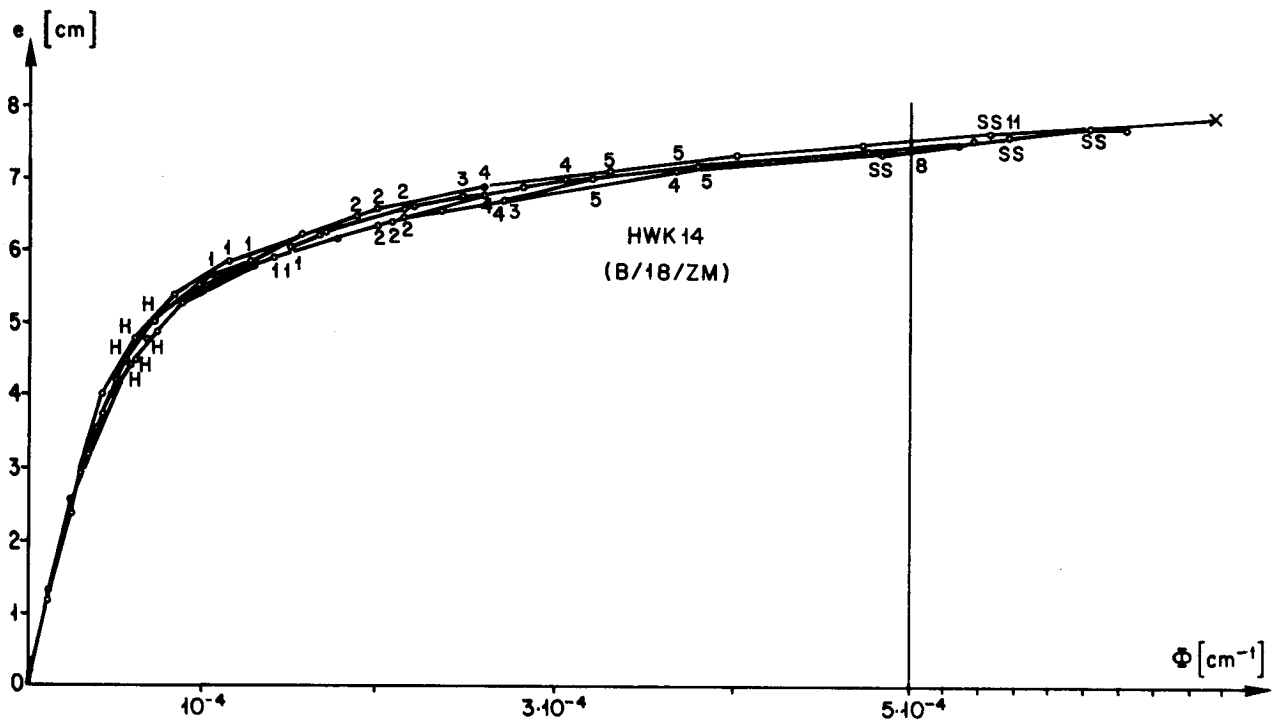


Bild 52: Exzentrizität - Krümmung ($P = 150$ kN)

Bild 53: Exzentrizität - Krümmung ($P = 300$ kN)Bild 54: Exzentrizität - Krümmung ($P = 600$ kN)

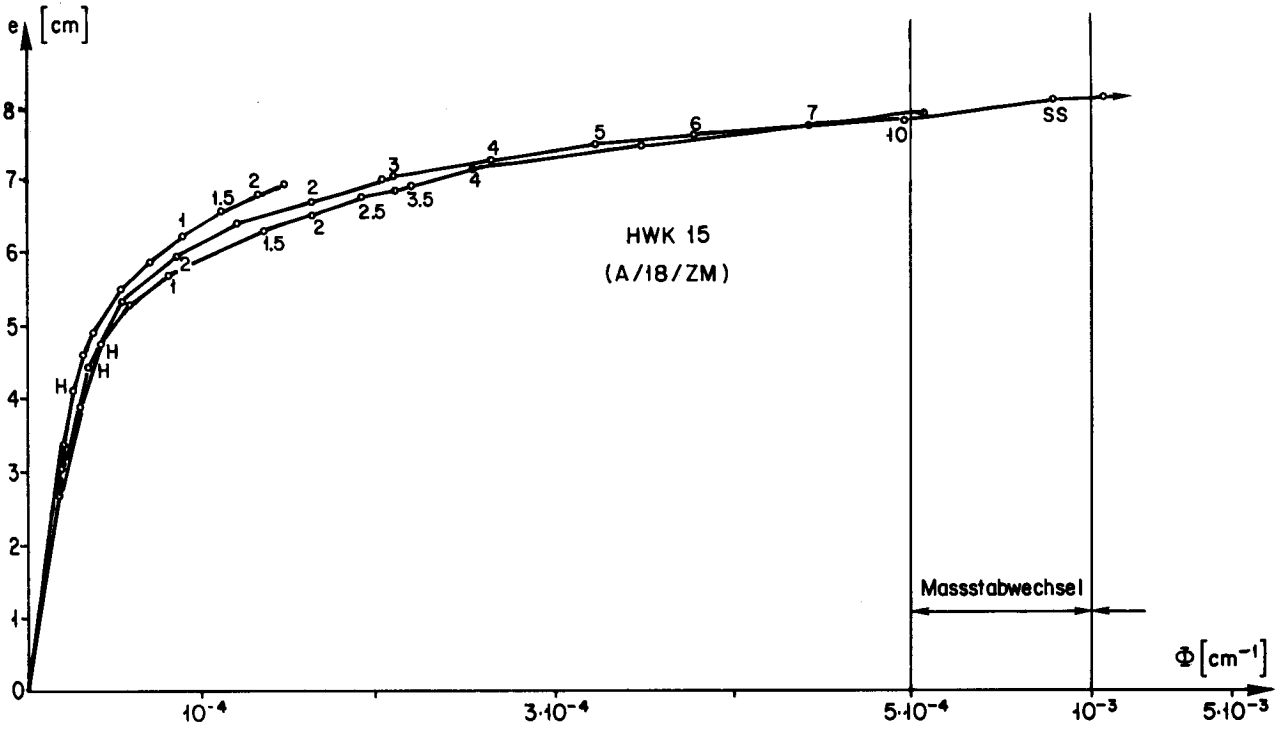


Bild 55: Exzentrizität - Krümmung ($P = 300$ kN)

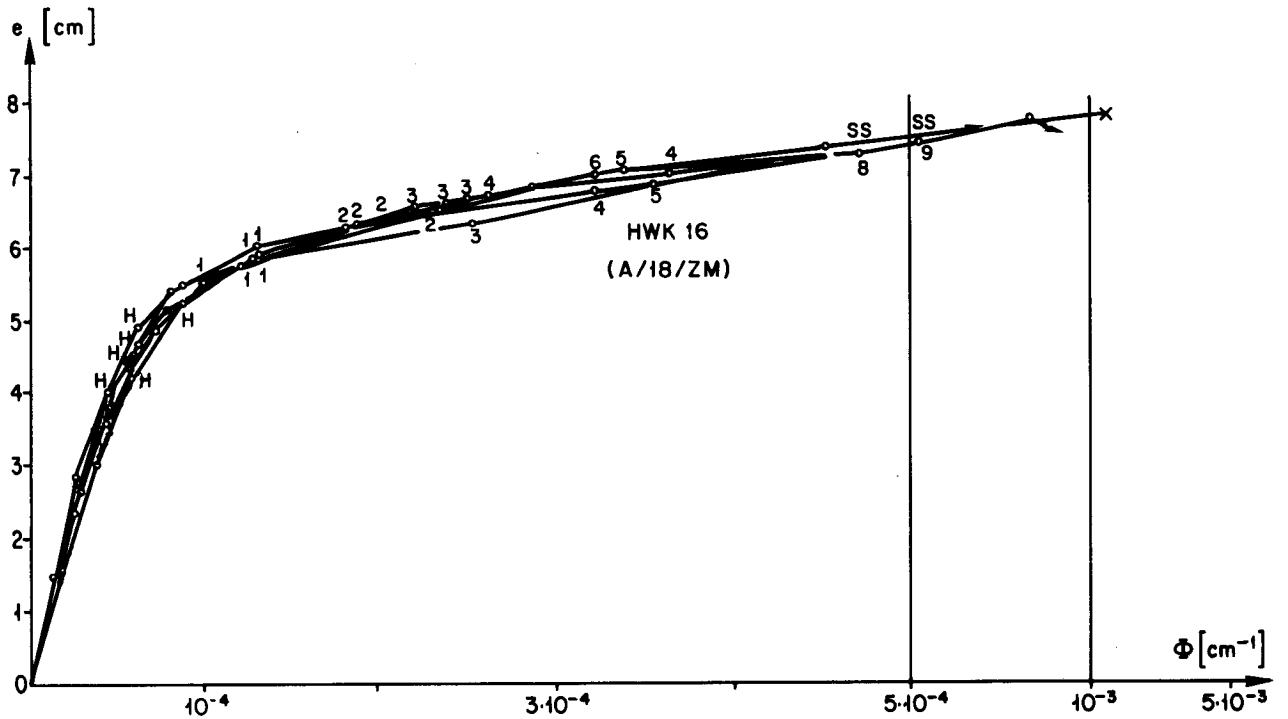


Bild 56: Exzentrizität - Krümmung ($P = 600$ kN)

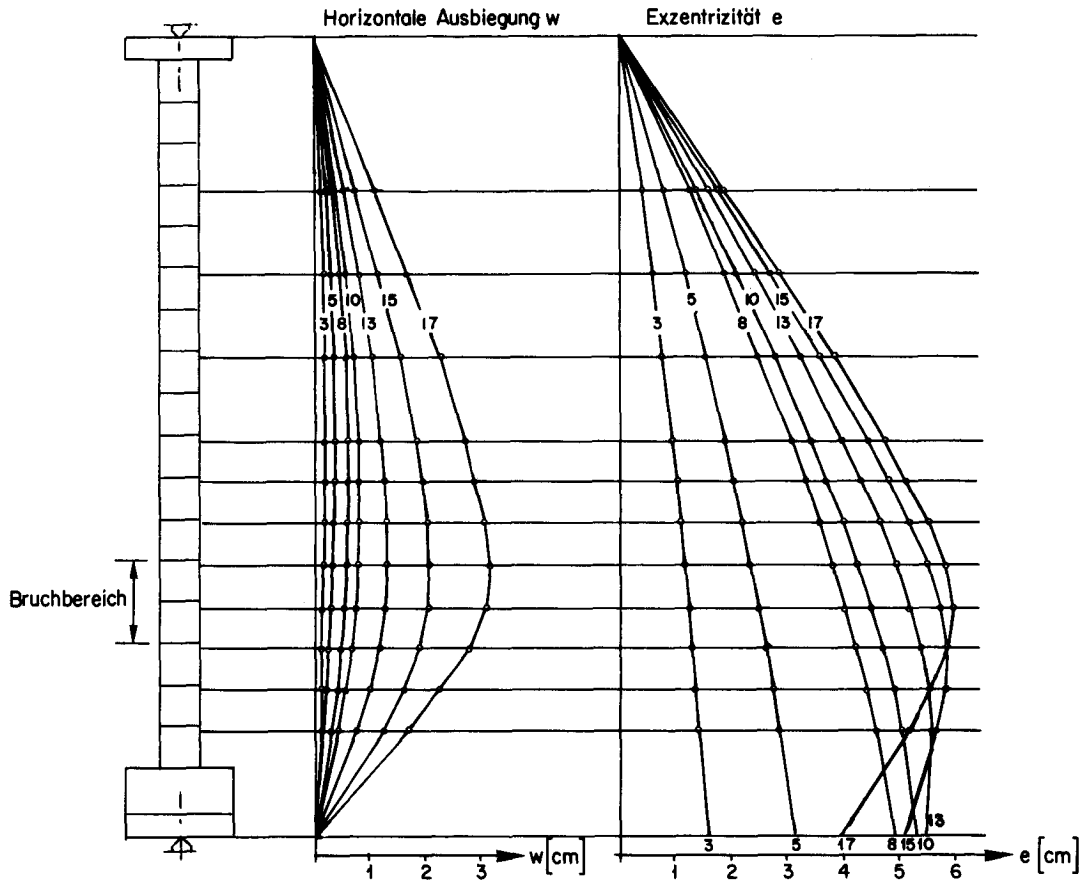


Bild 57 : Horizontale Ausbiegungen w und Exzentrizitäten e HWK 5, P = 400 kN

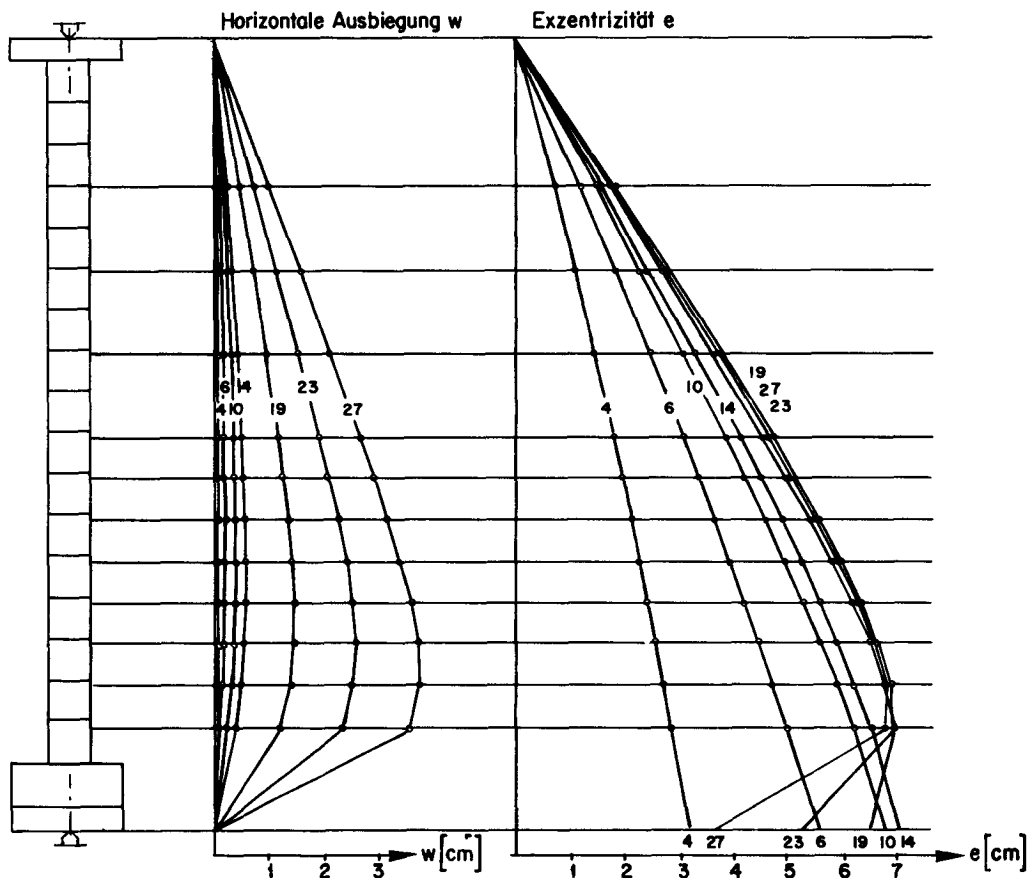


Bild 58 : Horizontale Ausbiegungen w und Exzentrizitäten e HWK 7, P = 150 kN