

DYNAMISCHE VERDICHTUNGSKONTROLLE UNGEBUNDENER FOUNDATIONSSCHICHTEN MITTELS SCHWINGUNGSMESSUNGEN

- MESSMETHODE
- EIGNUNG DES GERÄTES
- PRAKTISCHE ANWENDBARKEIT

R. Rüegger, Geotest AG, Lukasstrasse 17, 9008 St.Gallen

Forschungsauftrag 10/74 der
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute,
Seefeldstrasse 9, 8008 Zürich

April 1980

ZUSAMMENFASSUNG

A - E

LITERATURVERZEICHNIS

F

SCHLUSSBERICHT

1.	Einleitung	1
2.	Zielsetzung der Untersuchungen	3
3.	Die herkömmlichen Verfahren der Qualitätsprüfung verdichteter Foundationsschichten	4
3.1	Raumgewichtsbestimmungen	4
3.2	Plattendruckversuche	7
3.3	Statische Deflektionsmessungen	8
3.4	Folgerungen	10
4.	Das für die dynamischen Messungen verwendete Gerät	10
4.1	Technische Daten des OGI-Schwingers	12
4.2	Die Messung der Einsenkung	12
4.3	Das Messen	14
5.	Mit dem Schwinger durchgeführte und ausgewertete Versuche	17
6.	Laborversuche	18
6.1	Zielsetzung	18
6.2	Versuchsdurchführung	19
6.3	Tiefenwirkung	20
6.4	Seitenwirkung	22
7.	Korrelation zwischen Raumgewicht und Schwingereinsenkung	24
7.1	Laborversuche	24
7.2	Feldversuche	25
8.	Korrelation Schwingungsmessungen - Plattendruckversuche	27
8.1	Ziel der Versuche	27
8.2	Definition der statischen und der dynamischen Zusammendrückungsmoduli	29
8.2.1	Der statische Zusammendrückungsmodul MEP	29
8.2.2	Der dynamische Zusammendrückungsmodul MES	30
8.3	Die Versuchsserien	31
8.4	Auswertung der Resultate	33
8.4.1	Rechenansatz für die Auswertung	33
8.4.2	Statistische Auswertung der Messresultate	34

Inhaltsverzeichnis (Fortsetzung)

	<u>Seite</u>
8.5 Ergebnisse der Auswertung der Messresultate	35
8.5.1 Näherungskurven	35
8.5.2 Auswertung der statistischen Analysen	39
8.5.3 Einfluss der Material-Charakteristiken auf die Abhängigkeit zwischen dynamischen und statischen Messwerten	39
8.6 Das Verhältnis des dynamischen zum statischen Zusammendrückungsmodul (MES/MEP) in Funktion des statischen Zusammendrückungsmoduls MEP	42
9. Folgerungen aus den Versuchsauswertungen	43
9.1 Separate Erfassung der Streuung der statischen und der dynamischen Messwerte	44
9.2 Systembedingte Streuung	44
9.3 Vorschläge zur Verbesserung der systembedingten Streuungen	45
10. Eignung des bestehenden Gerätes für die Qualitätsprüfung von ungebundenem Fundationskies	46
10.1 Zielvorstellung	46
10.2 Möglichkeiten unter der Berücksichtigung der Streuung der Messwerte	47
10.3 Folgerungen für die praktische Anwendbarkeit	49
11. Ausblick	49

A N H A N G

Messreihen

48 Blätter

ZUSAMMENFASSUNG

Die konventionellen Methoden zur Qualitätsprüfung von ungebundenen Oberbaumaterialien - Plattendruckversuche, Raumgewichtsmessungen - befriedigen nicht immer. Sie sind im allgemeinen zeitaufwendig, in ihrer Aussage problematisch, oder entsprechen nur schlecht den vorwiegend dynamischen Beanspruchungen aus dem Strassenverkehr.

Es bestand daher ein Bedürfnis nach einer Methode, die

- den dynamischen Beanspruchungen aus dem Strassenverkehr besser entspricht

- einfach und rasch in der Anwendung ist und dadurch vor allem auch Homogenitätsuntersuchungen erlaubt.

Vor allem für die Ueberwachung der Alterung von Fahrbahnbelägen waren bereits seit längerer Zeit Verfahren mit dynamischer Lastaufbringung bekannt und erprobt worden.

Das Ziel der vorliegenden und von der Kommission 3 der Vereinigung Schweiz. Strassenfachleute (VSS) angeregten und unterstützten Untersuchungen bestand nun darin:

- ein geeignetes Gerät für die dynamische Qualitätsprüfung zu suchen
- die praktische Anwendbarkeit eines solchen Gerätes für die Qualitätsprüfung zu testen und wenn möglich Prüfungskriterien aufzustellen.

Nach Vorversuchen übernahm das Institut für Strassenbau der ETH Zürich ein vom Otto-Graf-Institut (OGI) in Stuttgart entwickeltes Gerät. Dieses ist in einen Personenwagenanhänger mit einem Eigengewicht von 4.5 kN integriert. Mit einem Elektromotor angetriebene Exzenter scheiben erzeugen eine sinusförmige Vertikallast von ± 2 kN, die auf einen Stempel von 220 mm Durchmesser und über diesen auf den Untergrund übertragen wird.

Die Einsenkung des Stempels unter der dynamischen Belastung wird mittels eines Geophons gemessen, das in einer Oeffnung mit $\varnothing$ 76 mm in der Mitte des Stempels eingesetzt ist.

Das elektronische Registriergerät gibt dabei in digitaler Anzeige direkt einen zur Einsenkung proportionalen Wert.

Mit Hilfe von Versuchen unter Laborbedingungen konnte für Fundationskies eine Tiefenwirkung von ca. 30-40 cm entsprechend ca. dem 1.5 - 2.0-fachen Stempeldurchmesser gemessen werden. Die Seitenwirkung - dynamische Einsenkungsmulde - beträgt ca. 40-50 cm. Beide Ergebnisse sind mit denjenigen des Plattendruckversuches vergleichbar. Bereits bei diesen Laborversuchen unter kontrollierten Bedingungen wurde klar, dass die grosse Streuung der Messergebnisse ein Handicap für die praktische Anwendbarkeit des Schwingers sein würde.

Ueber die Korrelation der mit dem Schwinger gemessenen dynamischen Einsenkungen oder der daraus berechneten dynamischen Zusammendrückungsmoduli mit den Messergebnissen anderer, konventioneller Qualitätsprüfmethoden sollte sowohl die praktische Anwendbarkeit auf ungebundenen Foundationsschichten geprüft, sowie nach Möglichkeit eine Eichung der Messwerte vorgenommen werden. Damit wollte man schliesslich zulässige Grenzwerte für die praktische Qualitätsprüfung festlegen.

Zwischen Schwingereinsenkung und Raumgewicht konnte kaum ein signifikanter Zusammenhang beobachtet werden. Dies mag damit zusammenhängen, dass einerseits Raumgewichtsbestimmungen in grobkörnigen Böden vor allem mit der Sandersatz- oder Ballonmethode ohnehin problematisch sind und andererseits geringste Aenderungen im Raumgewicht bereits einen deutlichen Unterschied in der Tragfähigkeit bzw. Zusammendrückbarkeit der geprüften Schicht signalisieren können.

Die Auswertung musste sich daher schliesslich auf die Korrelation zwischen den Ergebnissen von Schwinger- und Plattendruckversuchen beschränken.

Auf verschiedenen Versuchsstrecken - meist auf Fundationskies der Klasse Kiessand I - wurden insgesamt 279 Messungen mit dem Plattendruckgerät und für die Korrelation an der gleichen Stelle mit dem Schwinger ausgeführt.

Die Auswertung zeigte, dass ein nicht linearer Zusammenhang zwischen den gemessenen Einsenkungen der beiden Versuchsarten oder den jeweils daraus berechneten statischen oder dynamischen Elastizitätsmoduli besteht. Erschwerend für die Auswertung war die generell grosse Streuung der Messergebnisse.

Die Bandbreite des Vertrauensintervalles beträgt für die 68% Wahrscheinlichkeit -31% bis 45% (~ Standardabweichung) für die Voraussage eines dynamischen Zusammendrückungsmoduls über eine statische Messung mit dem Plattendruckgerät und -42% bis +72% für die Voraussage eines statischen Zusammendrückungsmoduls über eine dynamische Schwingermessung bezüglich der durch die Näherungskurven gegebenen Mittelwerte.

Diese Streuungen der Messergebnisse dürften vor allem von folgenden, kaum beeinflussbaren Faktoren abhängen:

- Oberflächenstörungen der zu prüfenden Schicht. Diese werden beim hydraulisch direkt aufgesetzten Stempel nicht durch eine Ausgleichsschicht aus Sand oder Gips homogenisiert wie beim Plattendruckversuch.
- Der Stempel kann auf wenigen Einzelkörnern aufsetzen. Dies führt zu Spannungskonzentrationen, die unter Umständen zu einer grösseren Einsenkung führen, als aufgrund der Qualität der Prüfschicht zu erwarten wäre. Den gleichen Effekt einer zu grossen Einsenkung kann eine Auflockerung der obersten Schicht bewirken, die z.B. durch Witterungseinflüsse oder Baustellen - verkehr entstanden ist.

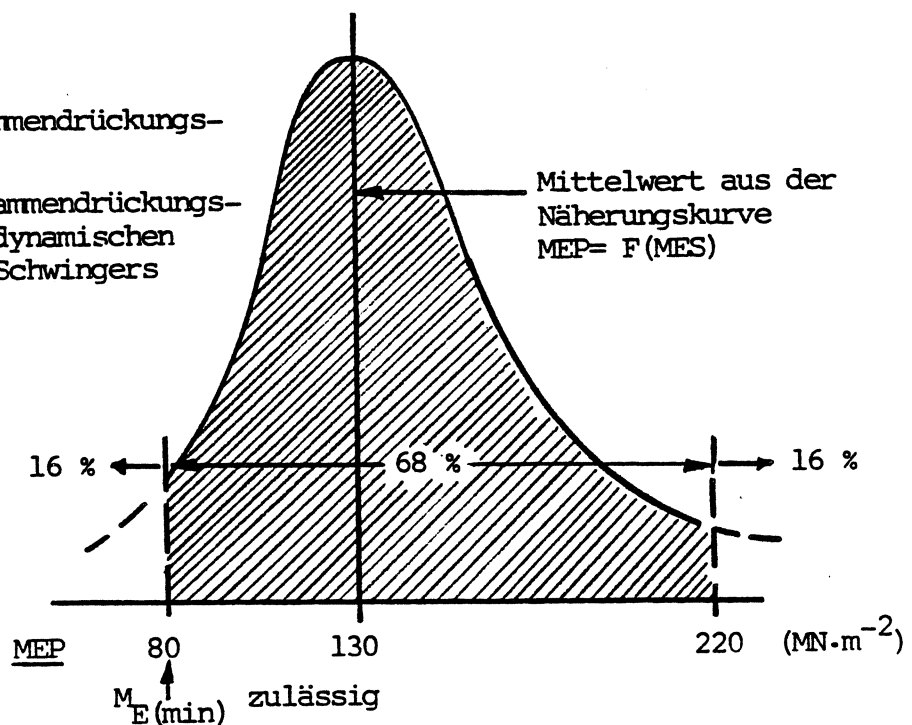
Die praktische Anwendbarkeit des Schwingers zur Qualitätsprüfung wird gerade dadurch infrage gestellt, dass die Voraussage eines statischen Wertes - der sich in der Praxis über Jahrzehnte trotz verschiedener Mängel eingebürgert hat - über die Schwingermessung schlechter ist als umgekehrt.

Da gemäss Norm nur ein bestimmtes Mass der ME-Werte festgelegte Grenzen unterschreiten darf, damit eine Schicht noch als ausreichend verdichtet angesehen werden kann, müssten bei Anwendung des Schwingers Mindestergebnisse verlangt werden, die statistisch gesehen einen viel zu hohen und praktisch kaum erreichbaren Verdichtungsgrad verlangen würden.

Statistische Verteilung der Messergebnisse :

MEP = statischer Zusammendrückungsmodul

MES = dynamischer Zusammendrückungsmodul, aus der dynamischen Einsenkung des Schwingers berechnet



Unter der Annahme, dass aufgrund der Voraussage höchstens 16% der statischen ME-Werte den für Foundationsschichten verlangten ME-Wert = $80 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ unterschreiten, läge das Mittel bei $130 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$, ein in der Praxis nur noch unter äusserst günstigen Einbaubedingungen und starker Verdichtung erzielbarer Wert.

Die Eignung des zur Verfügung stehenden Schwingergerätes für die Qualitätsprüfung von ungebundenen Foundationsschichten ist daher in Frage gestellt. Die Angabe vertretbarer zulässiger Grenzwerte ist unmöglich.

Die Streuung der Messergebnisse verhindert mindestens auf den untersuchten ungebundenen Foundationsschichten auch weitgehend den Einsatz des Gerätes für Homogenitätsuntersuchungen.

Obwohl von der messtechnischen Seite her (einfache, rasche Messung, die inkl. der Verschiebungen zwischen einzelnen Messpunkten bis über 20 Messungen pro Stunde erlaubt) wenig Kritik am vorhandenen Schwingergerät zu üben ist, muss infolge der offensichtlich systembedingten Streuung der Messergebnisse die praktische Anwendbarkeit für die Qualitätsprüfung eindeutig negativ beurteilt werden.

Die Einsetzbarkeit des vorhandenen oder eines ähnlichen Gerätes wäre nur gegeben, wenn durch technische Massnahmen am Gerät, die jedoch die einfache, rasche Messung nicht ausschliessen dürfen, die offenbar systembedingten Streuungen reduziert werden können. Dies könnte z.B. durch eine Erhöhung des Schwingergewichtes oder die Schaffung einer Ausgleichsschicht analog zum Plattendruckversuch versucht werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] SNV-Norm 670 335 Raumgewichtsbestimmung mit der Sandersatzmethode (Ballonmethode)
- [2] SNV-Norm 670 317 Plattendruckversuch
- [3] SNV-Norm 670 362 Versuch mit dem Benkelmanbalken
- [4] Der Deflektograph Lacroix, Strasse und Verkehr Nr.1/1971
- [5] Recherches en matières de routes. Deformations superficielles des sols soumis à des essais de charge avec plaques circulaires rigides, oct. 70, Laboratoire de Géotechnique, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne
- [6] SNV-Norm 640 585a Verdichtungsanforderungen
- [7] SNV-Norm 670 120a Fundationskies

S C H L U S S B E R I C H T1. Einleitung

Das grössere Verkehrsaufkommen auf unseren Strassen - vor allem auch die Zunahme des für die Lebensdauer einer Strasse massgebenden Schwerverkehrs - stellt immer höhere Qualitätsansprüche an den Strassenbau und damit an die Intensität der Qualitätskontrollen.

Dabei sind die heute im Strassenbau üblichen Verfahren zur Prüfung der Verdichtung und des Tragverhaltens ungebundener Ober- und Unterbaumaterialien nicht immer befriedigend. Die Verdichtungskontrolle erfolgt in der Regel mit statischen Einsenkungsmessungen (z.B. Plattendruckversuchen, "proof-rolling") und Raumgewichtsbestimmungen. Der Versuchsaufwand ist im allgemeinen gross und der Bauablauf kann erheblich behindert werden. Dies hat zur Folge, dass die für die statistische Auswertung wünschenswerte grössere Anzahl von Versuchen nicht durchgeführt werden kann. Werden nur wenige Versuche ausgeführt, so ist eine Beurteilung der Homogenität nicht möglich; falsche Schlüsse bezüglich der Tragfähigkeit des eingebauten Materials und der Einhaltung der in den Normen vorgeschriebenen Mindestwerte, respektive zulässigen Streuungen, sind nicht ausgeschlossen.

Es wird daher dringend ein Verfahren benötigt, welches ermöglicht, bei gleichbleibender Qualität der Prüfung eine grosse Anzahl von Kontrollmessungen reproduzierbar, schnell, zerstörungsfrei und wirtschaftlich auszuführen.

In neuerer Zeit werden zur Ueberwachung der Alterung von Fahrbahndecken immer häufiger Verfahren mit dynamischer Lastaufbringung angewendet, die eine wesentlich wirklichkeitsgetreuere Simulierung der Strassenbeanspruchung durch den Verkehr ermöglichen. Es war nun naheliegend, zu untersuchen, ob sich die

gleichen Methoden unter Verwendung derselben Geräte auch zur Ueberprüfung der Verdichtung und des Tragverhaltens von ungebundenen Ober- und Unterbaumaterialien eignen würden.

Die Kommission 3 der Vereinigung schweizerischer Strassenfachleute (VSS) stellte daher 1969 der Kommission für Strassenbaurforschung des Eidg. Departementes des Innern (EDI) den Antrag für einen Forschungskredit, mit dem die Arbeiten über Verdichtungskontrollen im Strassenbau mittels Schwingungsmessungen und die Abklärung der technischen Möglichkeiten sowie praktischen Anwendbarkeit des Verfahrens und der vorhandenen Geräte finanziert werden sollten.

Der Antrag fand Zustimmung und es wurden die folgenden Kredite erteilt:

- Forschungsauftrag 5/70; Fr. 55'000.--
- Forschungsauftrag 10/74; Fr. 160'000.--

Mit der Ausführung der Arbeiten wurde die Firma GEOTEST AG, Zollikofen, Bern in Zusammenarbeit mit dem Institut für Strassenbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETHZ) beauftragt. Dabei stellte das Institut für Strassenbau das Schwingergerät zur Verfügung und führte die entsprechenden Messungen durch.

Die Leitung und Ueberwachung der Versuche, die Auswertung der Ergebnisse, sowie die Ausarbeitung des Berichtes lag in der Verantwortung der Firma GEOTEST AG.

Die Arbeiten begannen 1970 mit der Sichtung vorhandener Unterlagen und Literatur, sowie der Erprobung möglicher Geräte. Die ursprünglich vorgesehene mietweise Beschaffung amerikanischer Geräte (z.B. Dynaflect) erwies sich aus finanziellen und administrativen Gründen als unzweckmässig. In den Jahren 1971 und 1972 wurden mit dem neu entwickelten Schwingermessgerät des Otto-Graf-Institutes der TH Stuttgart (OGI) verschiedene Versuche ausgeführt. Diese Arbeiten liefen im Rahmen des Forschungsauftrages 5/70 und hatten die Entscheidungsgrundlage

über die Fortsetzung des Forschungsauftrages zu liefern. In der Folge entschloss sich das Institut für Strassenbau der ETHZ, für die Strassenüberwachung einen eigenen, vom OGI gebauten Schwinger zu erwerben. Mit diesem konnten in der Folge im Rahmen des Forschungsauftrages 10/74 in den Jahren 1974 bis 1978 verschiedene Versuchsserien gemessen werden, deren Ergebnisse dem vorliegenden Bericht zu Grunde liegen.

2. Zielsetzung der Untersuchungen

Hauptziel war die Ueberprüfung der praktischen Anwendbarkeit der Verdichtungskontrolle im Strassenbau mittels Schwingungsmessungen. Dabei interessierten vor allem die folgenden Punkte:

- Anwendbarkeit des zur Verfügung stehenden OGI-Schwingers (Qualität, Reproduzierbarkeit der Messungen)
- Bestimmung der für die Schwingungsmessungen geeigneten Materialien (nichtbindige Materialien/bindige Böden und/oder stabilisierte Böden im frischen, d.h. noch nicht abgebundenen Zustand).
- Korrelation mit anderen Messmethoden (Plattendruckversuche, Deflektionsmessungen z.B. mit dem Benkelmannbalken, Raumgewichtsmessungen)
- Angabe von Mindestwerten für die Qualitätsprüfung
- Grenzen der Anwendbarkeit des OGI-Schwingers; äussere Einflüsse (Kornaufbau, Schichtstärken, Störungen in der Oberflächenzone etc.) auf die Messergebnisse
- Folgerungen für die praktische Anwendbarkeit des verwendeten oder anderer Schwinger für systematische Verdichtungskontrollen.

Mit der Zunahme der Anzahl durchgeführter Versuche mussten schon bald verschiedene Einschränkungen in der Anwendbarkeit des Verfahrens gemacht werden. Das verwendete Gerät eignet sich grundsätzlich nur für ungebundene, nichtbindige Materialien; eine Korrelation mit den Ergebnissen anderer Versuche ist nur beschränkt möglich. Da nicht abgebundene stabilisierte Materialien in ihrem Verhalten (geringe Durchlässigkeit, hoher Sättigungsgrad) mit bindigen Böden verglichen werden können, fallen beide für Schwingermessungen ausser Betracht. Die Schwierigkeit der Korrelation ist jedoch nicht nur auf die Ergebnisse der Schwingermessungen zurückzuführen, sondern auch auf die oft ebenso problematischen Ergebnisse anderer Versuche, insbesondere der Raumgewichtsbestimmungen.

3. Die herkömmlichen Verfahren der Qualitätsprüfung verdichteter Foundationsschichten

Bevor wir auf die interessierenden Schwingermessungen eingehen, ist eine Uebersicht über die herkömmlichen Verfahren der Verdichtungskontrolle angezeigt.

3.1 Raumgewichtsbestimmungen

Aus der Bestimmung des Trockenraumgewichtes eines eingebauten und verdichteten ungebundenen Erdstoffes lässt sich durch Vergleich mit dem Raumgewicht von Laborproben mit bekannten bodenmechanischen Eigenschaften (z.B. AASHO-Verdichtungsversuch bei bindigen Böden, Bestimmung der Lagerungsdichte bei körnigen Böden) ein Rückschluss auf deren Verdichtung ziehen. Raumgewichtsbestimmungen erfolgen im allgemeinen mittels eines Ersatzverfahrens oder einer Dichtebestimmung auf nuklearem Wege (Nucleodensimeter).

Bei den Ersatzverfahren wird das Trockenraumgewicht aus dem Gewicht, dem Volumen und dem Wassergehalt einer aus der verdichteten Schicht ausgehobenen Teilprobe errechnet (vgl. Abb.1). Das Volumen des ausgehobenen Erdstoffes wird durch Verfüllen des Aushubhohlraumes mit Sand, Gips, Wasser etc. bestimmt.

Die nukleare Dichte- und Wassergehaltsbestimmung erfolgt durch Messung der vom Boden absorbierten resp. zurückgestreuten Gamma- bzw. Neutronenstrahlung (vgl. Abb.2).

Abb.1:

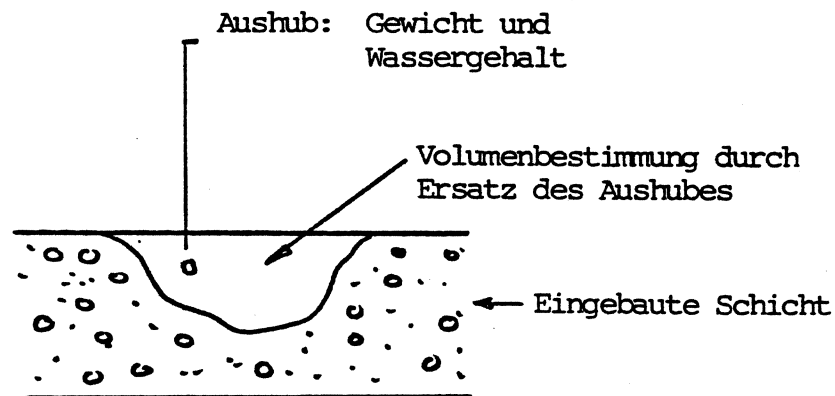
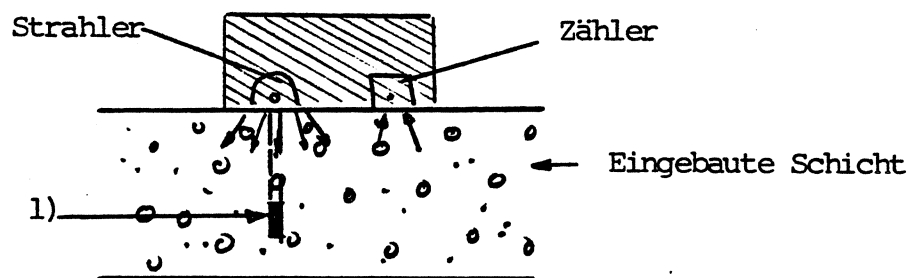


Abb.2:



- 1) Je nach Gerät kann die Nuclear-Sonde auch einige dm in die zu prüfende Schicht eingedrückt werden, so dass das Raumgewicht und der Wassergehalt auch innerhalb dieser gemessen werden kann.

Die Ersatzverfahren sind relativ aufwendig und liefern im allgemeinen nur bei feinkörnigen Böden zuverlässige Werte, d.h. Ergebnisse mit geringer Streuung. In grobkörnigen Böden - Kiesen, wie sie für den Oberbau von Strassen verwendet werden und die uns daher speziell interessieren - sind bei der Ausführung mehrerer Versuche, selbst in einer mehr oder weniger homogenen Schicht, grössere Streuungen zu erwarten.

Die Streuungen rühren daher, dass je nach Methode (Sandersatzgerät, Ballongerät) das untersuchte Volumen, verglichen mit dem Kornaufbau der untersuchten Schicht, klein ist. Grössere Ballongeräte haben einen Durchmesser von ca. 200 mm, Sandersatzgeräte einen solchen von 230 mm (VSS-Gerät). Bei einem im Strassenbau verwendeten Kies ist jedoch ein Anteil der Kornfraktion >10 mm von 20-30% und ein Maximalkorn von 60-100 mm durchaus möglich.

Ferner macht sich gerade bei intensiv verdichteten Kiesen ein "Entspannungseffekt" bemerkbar. Das ausgehobene Loch verkleinert sich nach erfolgtem Aushub; beim Verfüllen mit dem Ersatzmaterial wird so ein zu kleines Volumen gemessen, mit dem schliesslich ein zu hohes Raumgewicht berechnet wird.

Zuverlässiger sind unseres Erachtens Messungen mit dem Nucleodensimeter. Die Methode ist zerstörungsfrei und bedingt keinen mechanischen Eingriff in die zu prüfende Schicht. Diese Messungen lassen sich sehr rasch durchführen und eignen sich daher für grosse Versuchsserien, die eine statistische Auswertung für die Beurteilung der Homogenität etc. erlauben. Ein Nachteil besteht jedoch darin, dass die Nuklearmessungen unter anderem durch den Gehalt an Tonmineralien (auch feldspatreiche Gesteine etc.) beeinflusst werden. Interessieren daher die effektiven Raumgewichte, so ist eine Eichung für ein bestimmtes Bodenmaterial erforderlich.

Grundsätzlich ist jedoch die Anwendung von Raumgewichtsbestimmungen zur Ueberprüfung der Verdichtung von Unter- und Oberbaumaterialien ohnehin etwas fragwürdig. Dies liegt daran, dass

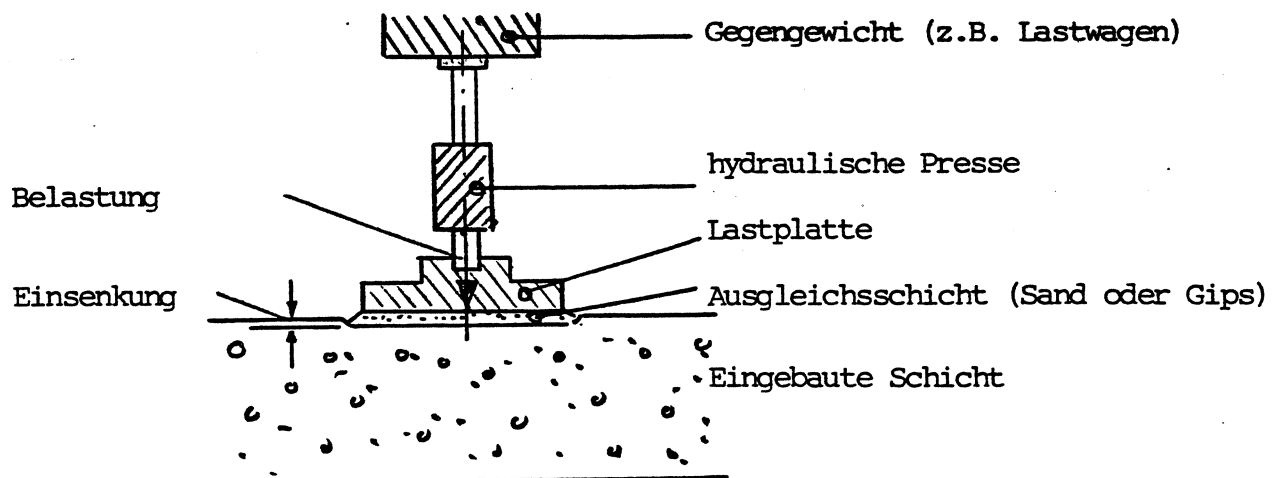
eine unmittelbare Zuordnung von Raumgewichten zu einem bestimmten Verdichtungsgrad nur dann möglich ist, wenn entsprechende Vergleichsversuche (z.B. Plattendruckversuche, AASHO-Test, Bestimmung der dichtesten Lagerung) mit dem gleichen Material vorliegen. Dies wird verständlich, sobald man den Einfluss der unterschiedlichen spezifischen Gewichte, Kornformen und Einzelkornfestigkeiten verschiedener Sande und Kiese auf die gesuchten Parameter in Betracht zieht.

Hinzu kommt, dass die zu beurteilenden Kiese und Sande durch eine bessere Verdichtung eine ganz wesentliche Steigerung der Tragfähigkeit erreichen können, die sich durch eine entsprechende Zunahme des statischen Zusammendrückungsmoduls ME (Plattenversuch) manifestiert, während kaum eine Veränderung des Raumgewichtes beobachtet wird.

3.2 Plattendruckversuche

Beim Plattendruckversuch wird unmittelbar die statische Zusammendrückbarkeit der eingebauten und zu prüfenden Schicht bestimmt (vgl. Abbildung 3). Plattendruckversuche setzen eine besonders sorgfältige Versuchsdurchführung - insbesondere beim Aufbringen der Ausgleichsschicht und dem Setzen der Druckplatte voraus.

Abbildung 3



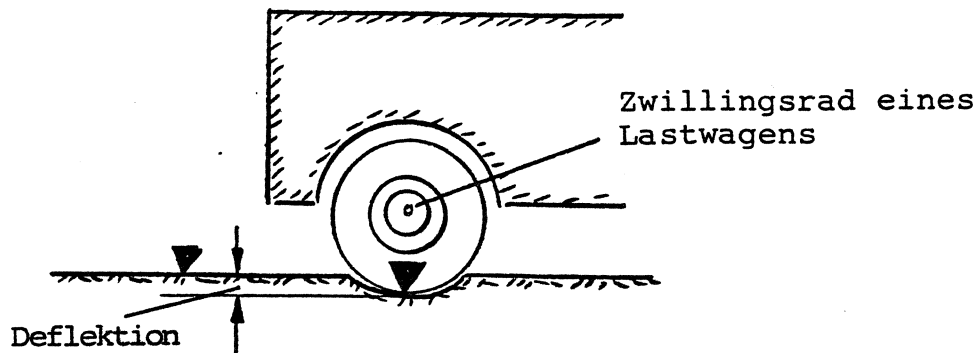
Bei grobkörnigen Schichten mit Steinen oder gar Blöcken ist eine einwandfreie Versuchsdurchführung nicht mehr möglich, da sich die Lastabtragung unterhalb der Platte auf die Grobanteile konzentriert. Dies kann zu örtlichen Grundbrüchen unter den einzelnen Grobanteilen und damit, im Vergleich mit der tatsächlichen Zusammendrückbarkeit der Schicht, zu übermässigen Einsenkungen führen.

Bei wassergesättigten, feinkörnigen Böden besteht das Problem des Konsolidationsverzuges. In den entsprechenden Normen (SNV 670 317 [2]) wird diesem Umstand nur bedingt Rechnung getragen. Grundsätzlich müssten analog zum Oedometerversuch Zeitsetzungskurven aufgenommen werden.

Der Versuch ist zu aufwendig. Selbst in kiesigem Material können bei günstigen Bedingungen kaum mehr als 2 bzw. maximal 3 Versuche pro Stunde ausgeführt werden. Der Baubetrieb in der Nähe der Messstelle muss eingestellt werden, da Erschütterungen die Ergebnisse verfälschen oder ein Ablesen der Messuhren gar verunmöglichen.

3.3 Statische Deflektionsmessungen

Bei statischen Deflektionsmessungen (z.B. mechanisch mit dem Benkelman - Balken oder optisch mit einem Deflektometer) wird die Einsenkung der Oberfläche unter dem Zwillingsrad der einfachen Hinterachse eines stehenden Lastwagens von genormtem Gewicht, Pneudruck und Abmessungen bestimmt (vgl. Abb.4), (SNV-Norm 670 362 [3]). Enthält die untersuchte Schicht Grobanteile, so ergeben sich ähnliche Schwierigkeiten wie beim Plattendruckversuch.

Abbildung 4

Automatische Messeinrichtungen erlauben das Messen bis zu 30 Punkten pro Minute.

Die Messeinrichtung ist zudem gegenüber dem Plattendruckversuch aufwendiger.

Um den Versuchsablauf zu rationalisieren und die Belastungsart den tatsächlichen - vorwiegend dynamischen - Verkehrsbelastungen etwas anzupassen, wurden Geräte entwickelt, die eine Deflektionsmessung unter rollender Last in konstanten Abständen vornehmen und die Messergebnisse graphisch darstellen (z.B. Deflectograph Lacroix [4]).

Photo 1



Das Gerät ist in einem speziell konstruierten Lastwagen integriert; die Ausrüstung ist entsprechend aufwendig. Bestechend ist die hohe Leistungsfähigkeit von gegen 1000 Messungen pro Stunde bei einer Bewegungsgeschwindigkeit von 2 km/h.

3.4 Folgerungen

Allen erwähnten Verfahren der Verdichtungskontrolle haften gewisse Unzulänglichkeiten an - keines vermag vollends zu befriedigen. Die Versuche

- sind zeitlich zu aufwendig
- liefern zu grosse Streuungen in den Resultaten
- simulieren die Wirklichkeit unter der Verkehrsbelastung nur unzureichend
- sind zu kostenintensiv (teure Geräte)

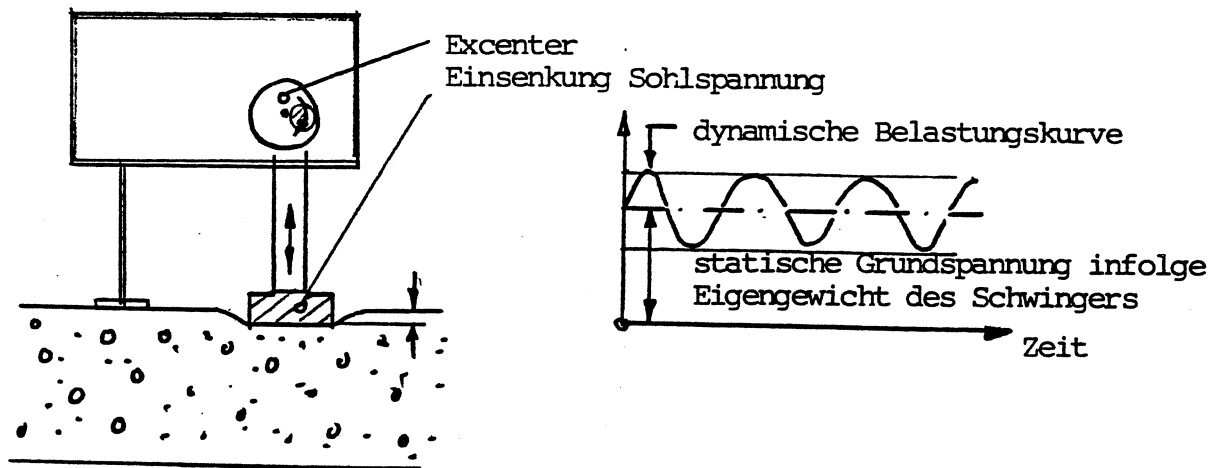
Die Suche nach rationelleren und zweckmässigeren Methoden für die Verdichtungskontrolle wurde daher schon seit geraumer Zeit aufgenommen. Eine Möglichkeit bildet die dynamische Deflektionsmessung mit einer Schwingermaschine.

4. Das für die dynamischen Messungen verwendete Gerät

In Europa und den Vereinigten Staaten waren verschiedene Geräte bekannt und praktisch erprobt, die sich für unsere Untersuchungen eignen konnten, obwohl diese allgemein für andere Zwecke - vor allem die Qualitätskontrolle bituminöser oder zementgebundener Fahrbahnbeläge - entwickelt worden waren.

Bei den meisten Geräten wird die Einsenkung der Oberfläche der zu prüfenden Schicht unter dem Stempel einer Schwingermaschine gemessen, welcher eine zeitabhängige sinus-förmige Belastung auf die Oberfläche der Schicht aufbringt (vgl. Abb. 5).

Abbildung 5



Es existieren grosse Schwinger, die Belastungen in der Grössenordnung der tatsächlichen Verkehrslasten mit vergleichbarer Frequenz auf den Fahrbahnbelag aufbringen. Kleinere Schwinger werden häufig zur Bestimmung der wesentlichen mechanischen Eigenschaften kennzeichnenden Ausbreitungsgeschwindigkeit der Raleighwelle eingesetzt, um Inhomogenitäten oder Anomalien im Strassenbau festzustellen.

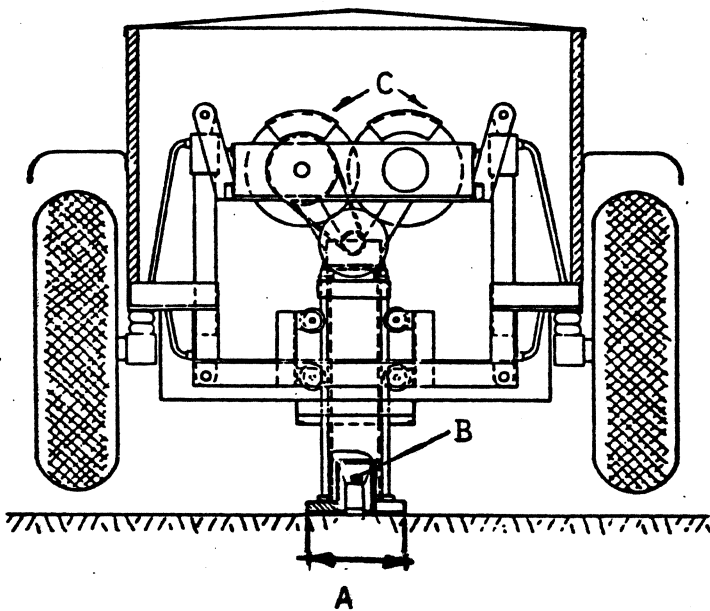
Ueber Einsenkungsmessungen mit Schwingmaschinen auf ungebundenen Schichten des Unter- und Oberbaues von Strassen zur Ueberprüfung der Verdichtung und Tragfähigkeit war aus der Literatur nur wenig bekannt.

Nach verschiedenen Abklärungen stand schliesslich der Schwinger des Otto-Graf-Institutes (OGI) der Technischen Hochschule Stuttgart zur Verfügung. Ein vom OGI gebautes Gerät wurde durch das Institut für Strassenbau der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) angeschafft, welches in der Folge auch die Messarbeiten für uns durchführte.

4.1 Technische Daten des OGI-Schwingers

- Gesamtgewicht des Schwingers 4.41 kN (450 kp)
- Sinusförmige Belastung 1.96 kN (200 kp)
- Frequenz 8 Hz (Schwingungen pro sec.)
- Stempeldurchmesser 220 mm
- Innere Oeffnung 76 mm

In der Oeffnung der Stempelplatte ist ein Geophon angeordnet, das der Messung der Einsenkung dient.



- A Stempel Ø 220 mm
- B Geophon
- C Exzentrerscheiben

4.2 Die Messung der Einsenkung

Wie erwähnt wird die Einsenkung mit dem in der Stempelmitte angeordneten Geophon gemessen. Ohne auf technische Details und Probleme der Impulsübertragung und Auswertung einzugehen, beruht die Methode auf folgendem Prinzip:

Das verwendete Geophon gibt eine Spannung ab, die bei konstanter Frequenz proportional der Schwingschnelle ist. Die Höhe der Spannung kann deshalb als Mass für die Reaktion der Strassenoberfläche angesehen werden. Unter der Annahme einer rein sinusförmigen Anregung und Reaktion gilt

$$u = a \cdot \sin \omega \cdot t$$

worin u die Spannung und $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz bedeuten.

Bezeichnen wir mit x den vertikalen Weg, den ein Teilchen der Strassenoberfläche als Reaktion auf die dynamische Belastung zurücklegt, dann gilt für die Anzeige der Geophone

$$u = b \cdot \frac{dx}{dt} \quad (b = \text{Proportionalitätsfaktor})$$

oder

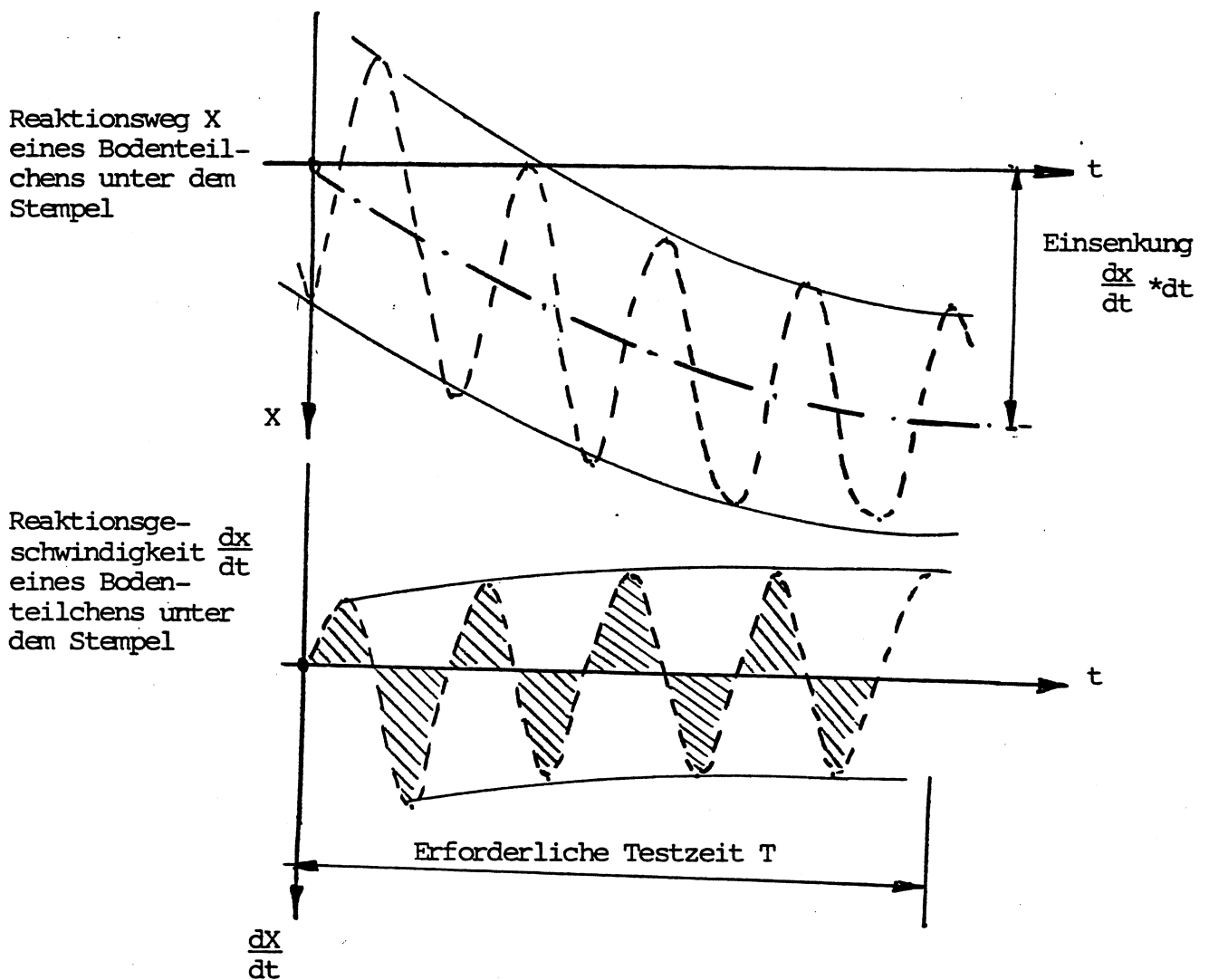
$$\frac{dx}{dt} = \frac{a}{b} \sin \omega t = c \cdot \sin \omega t$$

Damit wird

$$x = c \int_0^T \sin \omega t \cdot dt = -\frac{c}{\omega} \cos \omega t$$

$$= c' \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Diagramm



Die Integration über die Geschwindigkeitskurve, die durch die Messeinrichtung selbst durchgeführt wird, liefert den Reaktions- oder Verschiebungsweg, aus dem die gesuchte dynamische Einsenkung gewonnen werden kann.

Die Länge der Testzeit T ist so zu wählen, dass die Schwingungen um einen konstanten Mittelwert pulsieren, welcher der Einsenkung entspricht. Dann sind Hebungs- und Senkungsgeschwindigkeit identisch. (vgl. Diagramm).

Da die sinusförmige Stempelbelastung mit einer Frequenz von ca. 8 Hz aufgebracht wird und sich vor allem bei durchlässigen, körnigen Böden die Reaktion rasch einstellt, beschränkt sich die erforderliche Testzeit auf wenige Sekunden. Mit anderen Worten: die Testzeit ist gegenüber der Einrichtung- und Auswertungszeit vernachlässigbar.

4.3 Das Messen

Die eigentliche Schwingermaschine - als PW-Anhänger mit einem Gesamtgewicht von ca. 4.41 kN (450 kp) konzipiert - kann von einem PW-Kombi gezogen werden. Das elektronische Mess- und Steuergerät nimmt einen Raum von ca. 55 x 55 x 60 cm ein und wiegt ca. 0.60 kN (60 kp). Für die Stromversorgung der Schwingermaschine und der Steuer- und Messgeräte ist ein Wechselstromgenerator 380 Volt mit ca. 2 kW Leistung erforderlich. (siehe Fotos auf der folgenden Seite).

Für das Messen wird mit dem Anhänger über die gewünschte Prüfstelle gefahren. Der Stempel samt der Schwingermaschine kann hydraulisch abgesenkt werden. Dabei wird das Anhängerchassis mit den Laufrädern angehoben, so dass das Gesamtgewicht des Anhängers schliesslich auf dem Stempel ruht.

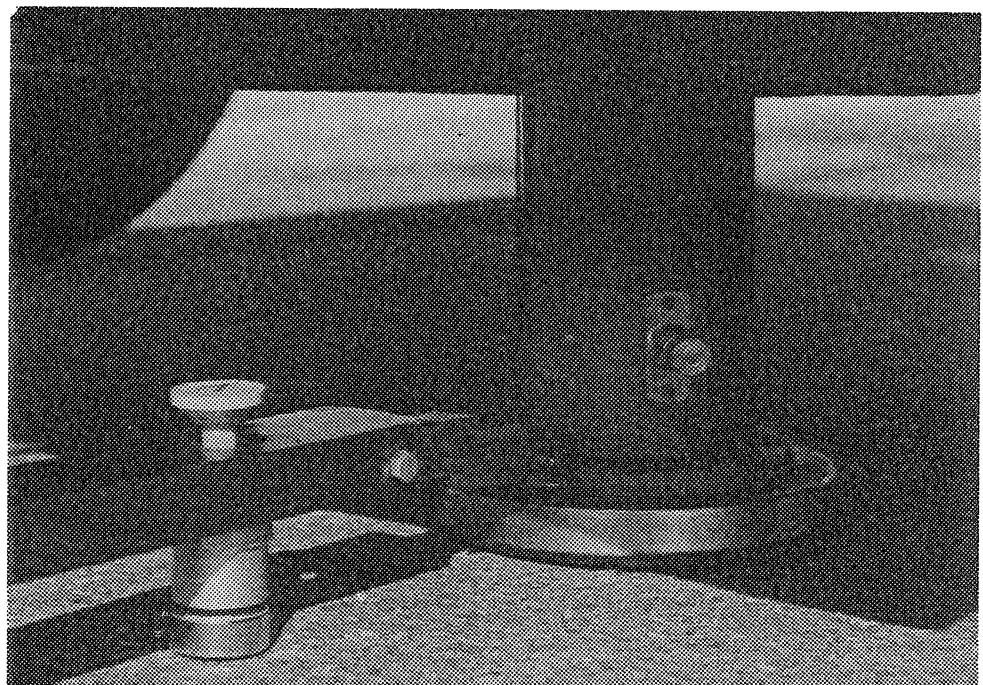
Für das Justieren des Anhängers, das Ausfahren des Stempels, die eigentliche Messung, die Registrierung der Resultate und das Einfahren des Stempels wird eine Gesamtzeit von ca. 1 Minute benötigt.

Foto Nr. 2



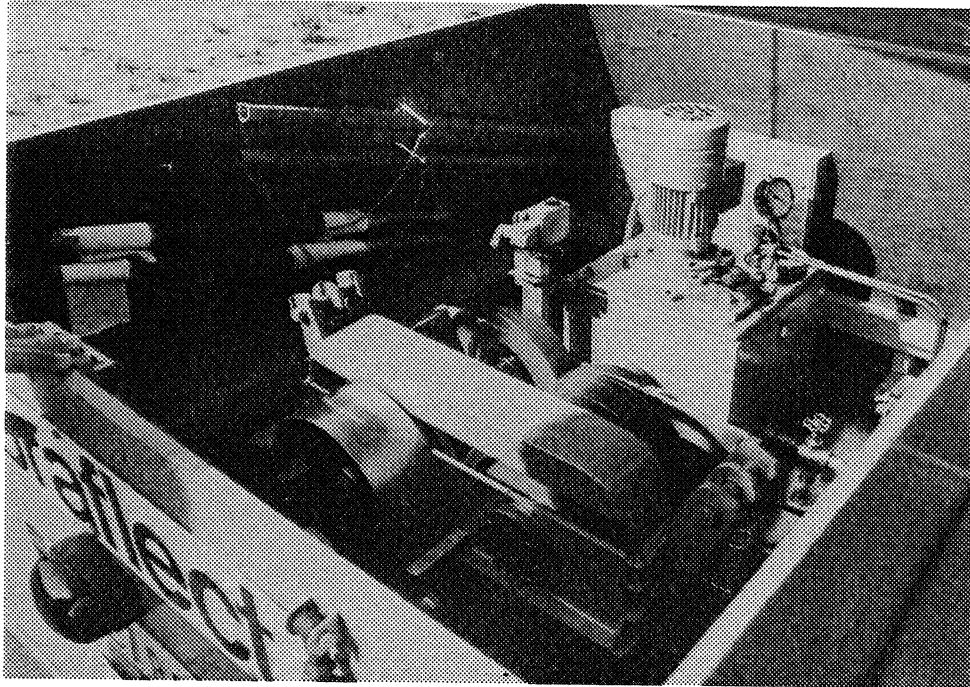
Vibraflect Schwinger ISETH in Arbeitsstellung.
Das ganze Gewicht des Gerätes ruht auf dem
Stempel. Im Vordergrund 4 Geophone zur Ausmes-
sung der Deflektionsmulde.

Foto Nr. 3



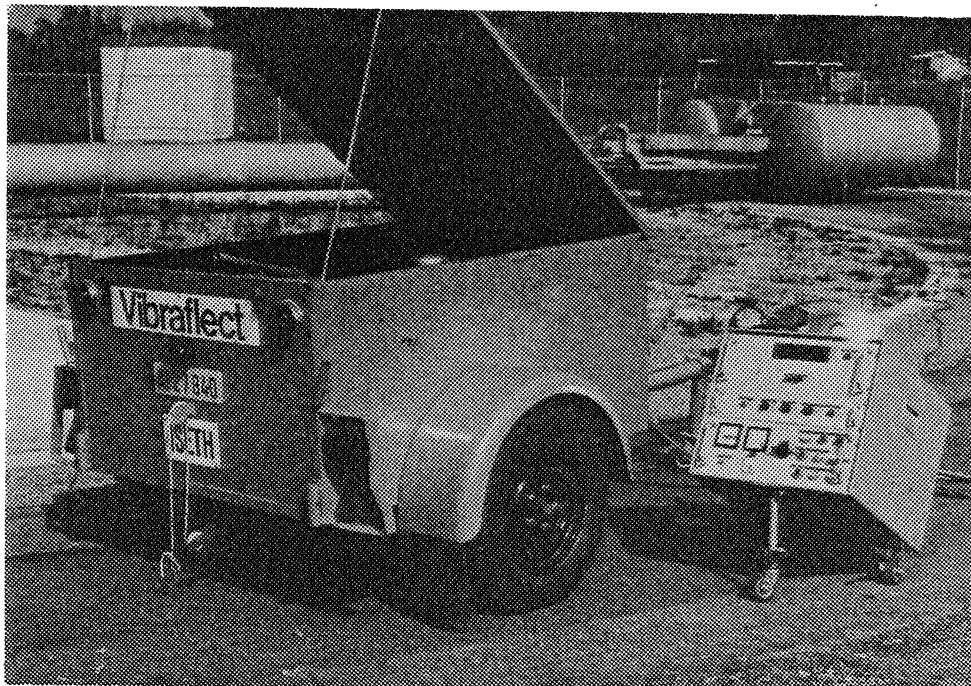
Der Stempel zur Uebertragung der Schwingungen
auf die Unterlage. Links ein Zusatz-Geophon

Foto Nr. 4



Die Exzentermaschine zur Schwingungserzeugung

Foto Nr. 5



Der Schwinger in Transportstellung. Rechts das Registrier- und Anzeigegerät, welches in der Regel im Zugfahrzeug eingebaut wird.

Im günstigen Fall sind ohne Berücksichtigung der Verschiebungszeit zwischen einzelnen Mess-Stellen ca. 60 Messungen pro Stunde möglich. Die Praxis der Verdichtungskontrolle im Strassenbau mit Messpunktabständen von ca. 30 - 100 m erlaubt daher gegen 20 bis 30 Messungen pro Stunde.

5. Mit dem Schwinger durchgeführte und ausgewertete Versuche

Im Rahmen unseres Forschungsauftrages wurden folgende Versuche durchgeführt bzw. wurde auf bestehende, in einem anderen Zusammenhang ausgeführte Versuche zurückgegriffen:

- Messungen 1971 - 1972

Kontrollversuche auf der N12, Corpataux (FR), auf Fundationskies und der N9, Jordillon (VD), auf Moränenmaterial (Einschnitte und Dammbereich). Zusammenfassung im 2. Zwischenbericht zum Forschungsauftrag 5/70 (Stand Ende 1972), Vergleichsversuche mit verschiedenen Verfahren

- Plattendruckversuche
- Raumbewichtsbestimmungen
- Dynamische Einsenkungsmessungen mit OGI-Schwinger
- Phasen-Messung mit VIBROVID-Gerät

- Messungen 1974

Horgen: Vergleichsversuche auf Kies und Kehrriechtschlacke

- Plattendruckversuche
- Deflektion mit Benkelman-Balken
- Deflektionsmessungen mit OGI-Schwinger

Meilen: Laborversuche, Vergleichsversuche auf Kies

- Plattendruckversuche
- Raumbewichtsbestimmungen
- Deflektionsmessungen mit OGI-Schwinger

Bestimmung der Tiefen- und Seitenwirkung des OGI-Schwingers.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuche in Horgen und Meilen zum Forschungsauftrag 5/70 bzw. 10/74 im 3. Zwischenbericht (Stand 1975).

- Messungen 1977 - 1978

Verschiedene Vergleichsversuche auf Kies mit dem Ziel der Korrelation zwischen den Ergebnissen von Schwingermessungen und Plattendruckversuchen sowie teilweise Raumgewichtsmessungen.

Versuchsserien in

- Arnegg (Versuchsschüttung)
- Sennwald (Tanklager, gebrochenes Felsmaterial)
- St.Gallen (Quartierstrasse)
- Liestal (Autobahn N2, Belagserneuerung)
- Buchs (N13, 5 verschiedene Streckenabschnitte)
- Frauenkappelen (Autobahn N1)
- Rundlauf ISETH (2 Versuchsserien)

6. Laborversuche

6.1 Zielsetzung

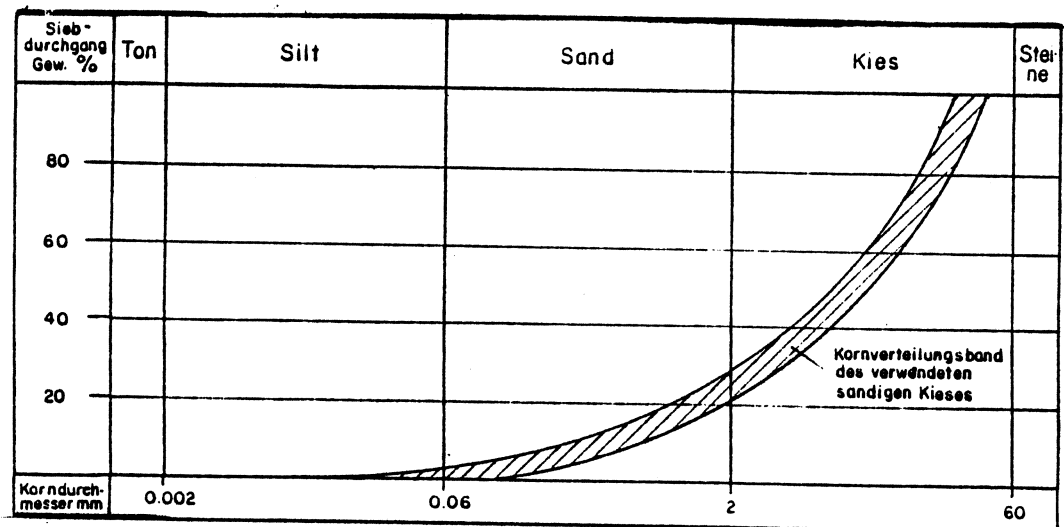
Diese Versuche wurden im Werkhof der Firma Stump Bohr AG in Meilen ausgeführt. Sie hatten zum Ziel, bei genau bekannten Randbedingungen die Tiefen- und Seitenwirkung auf verdichtetem Kies zu ermitteln. Damit sollte die überprüfbare Schichtstärke sowie der Einfluss möglicher Inhomogenitäten (z.B. Rohrleitungen, Blöcke usw.) bestimmt werden. Parallel zu den Schwingermessungen wurden noch einige Plattendruckversuche und Raumgewichtsbestimmungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind im 3. Zwischenbericht (Stand Oktober 1975) zusammengefasst.

6.2 Versuchsdurchführung

Für den Versuch wurde ein Kiessand I gemäss SNV-Norm 670 120a verwendet. Das Kornverteilungsband kann der nachfolgenden Abbildung Nr. 6 entnommen werden.

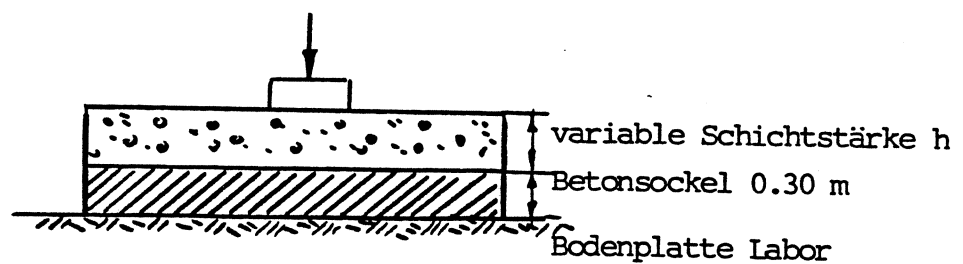
Abbildung 6

Kornzusammensetzung der Versuchsschüttung



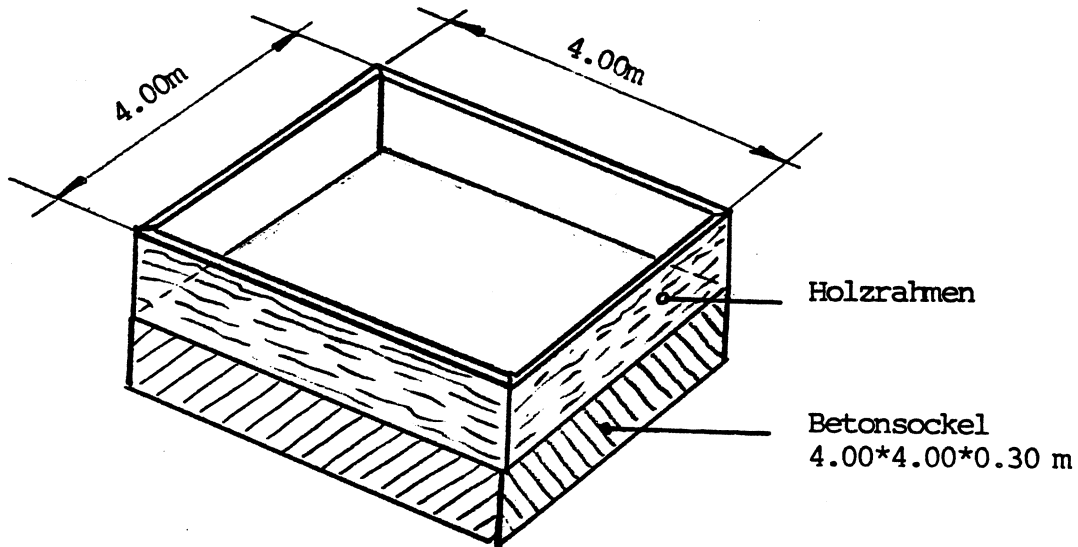
Auf einem Betonsockel von $4.0 \times 4.0 \text{ m}^2$ Fläche und 0.3 m Dicke wurde der Versuchskies in verschiedenen Schichtstärken aufgebracht und verdichtet (vgl. Abbildung 7).

Abbildung 7



Seitlich wurde der Kies von einem Holzrahmen gehalten, dessen Höhe der jeweiligen Schichtstärke entsprach (Abbildung 8).

Abb. 8:



Diese wurde in Stufen von jeweils 120 mm gesteigert und betrug so 120, 240, 360, 480, 600 und 720 mm.

Der Schwinger wurde in der Mitte der Versuchsfläche angesetzt.

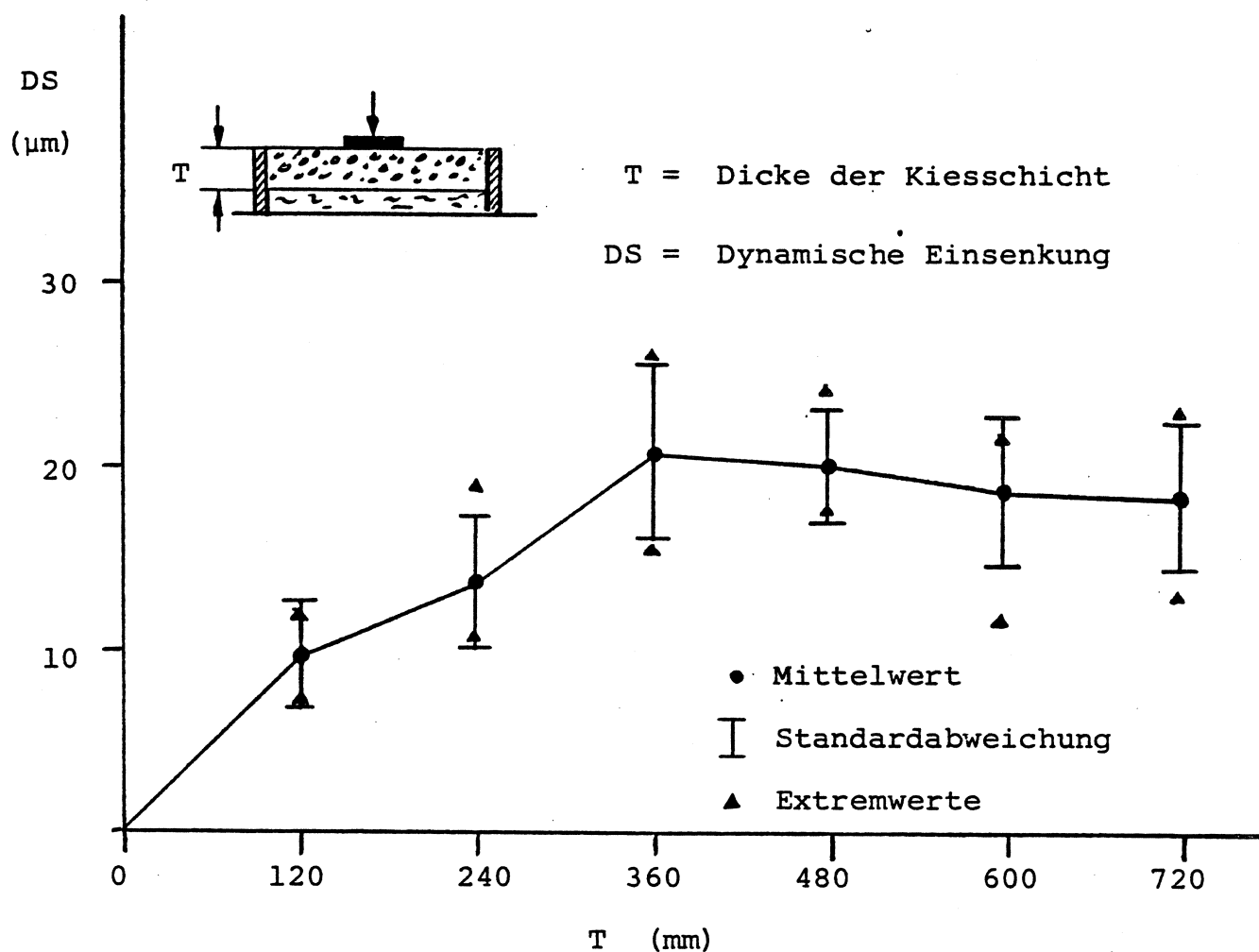
6.3 Tiefenwirkung

Für jede Schichtstärke wurde eine Mess-Serie mit fünf Schwinger-Versuchen ausgeführt. Die Resultate dieser 5 identischen Versuche streuen, wie der Abbildung 9 entnommen werden kann, relativ stark. Eine Interpretation der Ergebnisse ist jedoch über die Mittelwerte möglich.

Tabellarische Zusammenstellung der Resultate

Schichtstärke mm	Anzahl Messungen	Mittelwert der Einsenkung des Stempels μm	Standardabweichung		Streuung Min - Max - Wert	
			μm	in %	μm	in %
120	5	9.74	± 3.18	32.6	5.67	58
240	5	13.64	± 3.45	25.3	8.72	64
600	5	20.72	± 4.92	23.7	11.65	56
480	5	20.08	± 3.00	15.0	7.74	39
600	5	18.59	± 3.99	21.5	22.52	121
720	5	19.32	± 4.05	20.9	25.10	130

Abbildung 9

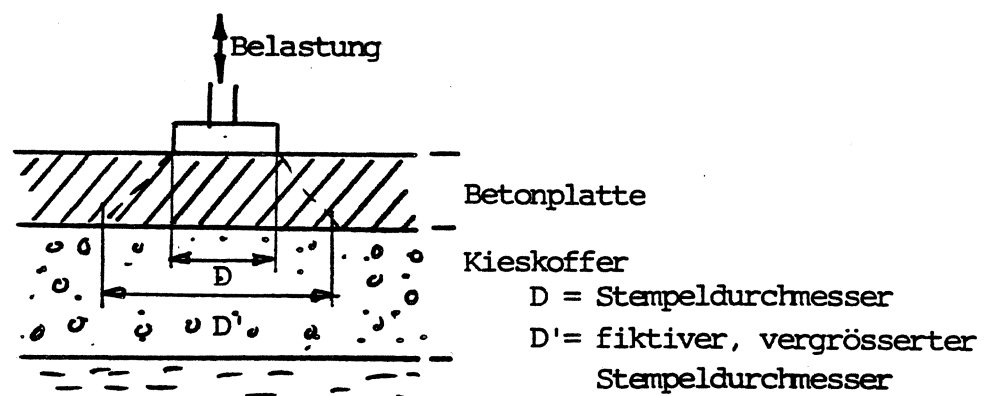


Aufgrund der Messergebnisse darf angenommen werden, dass die Einflusstiefe des verwendeten Schwingers ca. 300 bis 400 mm beträgt und somit ca. dem 1.5- bis 2-fachen des Stempeldurchmessers entspricht.

Für den vorliegenden Fall ist die Einflusstiefe des Schwingers daher mit derjenigen des statischen Plattendruckversuches (300 mm-Platte) vergleichbar.

Die Einflusstiefe des Schwingers hängt offenbar stark vom effektiven Schichtaufbau des Untergrundes ab. Messungen, die vom ISETH in anderem Zusammenhang auf dem fertig erstellten Oberbau (Betonbelag) von Flugpisten (Flughafen Kloten-Zürich) durchgeführt wurden, zeigten eine bedeutend grössere Einflusstiefe, da die Betonplatte in der Nähe des Stempels mitschwang und so - vereinfacht betrachtet - den "Stempeldurchmesser" vergrösserte.

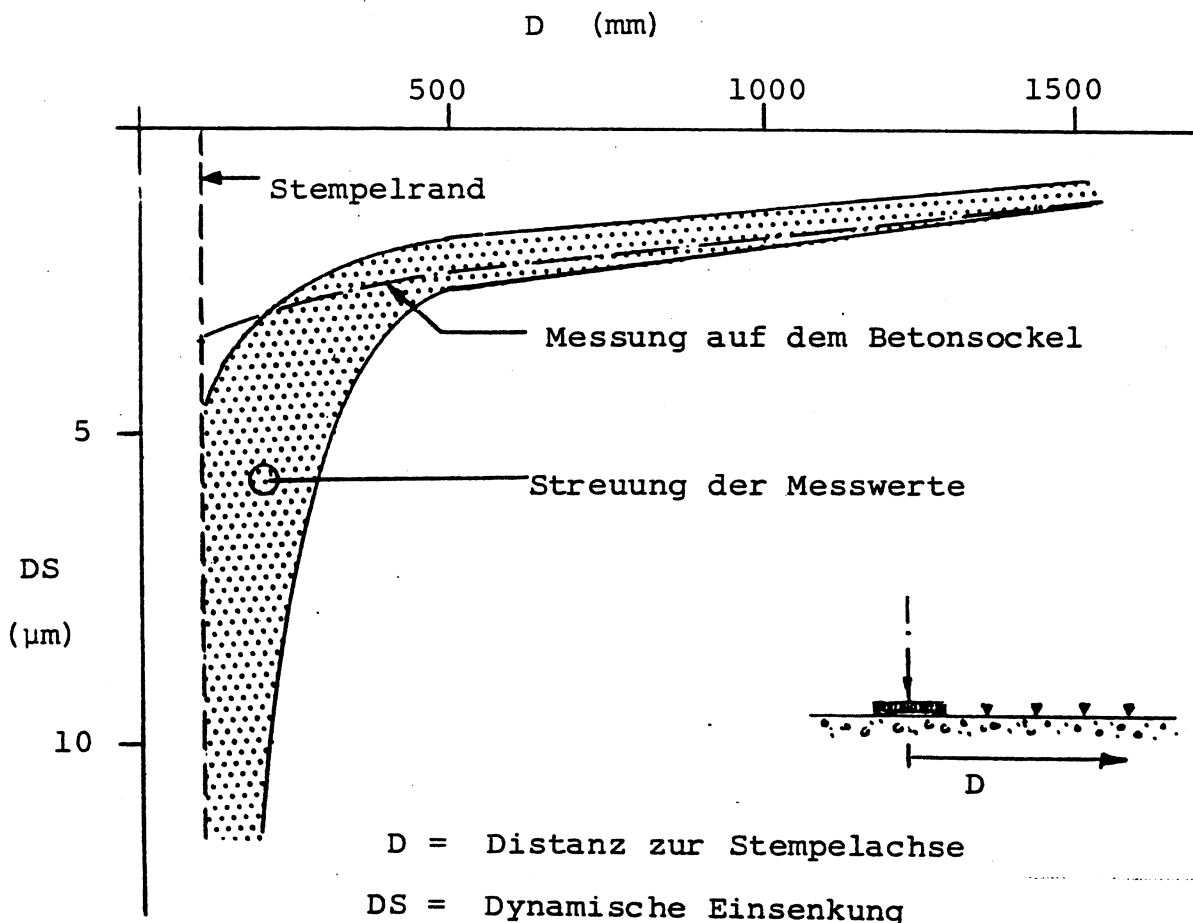
Abbildung 10



6.4 Seitenwirkung

Für die Beurteilung der seitlichen Wirkung der Schwingungen wurden die jeweiligen Setzungsmulden bestimmt. Messpunkte im Abstand von weniger als ca. 400 mm von der Stempelaxe des Schwingers, zeigten relativ grosse Einsenkungen (vgl. Abb.11), während ausserhalb dieses Bereiches geringe, von der Schichtstärke praktisch unbeeinflusste Werte gemessen wurden.

Abbildung 11



Die letzteren entsprechen offensichtlich den Schwingungen der Sockelplatte, wie dies durch die direkte Messung auf dieser selbst bestätigt wurde (vgl. Abb.11). Die Seitenwirkung des Schwingers liegt somit bei ca. 400 mm, also ebenfalls bei ungefähr dem 1.5- bis 2.0-fachen Stempeldurchmesser.

Auch diese Werte sind somit in ihrer Grössenordnung mit denjenigen des statischen Plattendruckversuches vergleichbar. Dort liegt der seitliche Einflussbereich der Einsenkungen ab Belastungsaxe bei ca. 400 - 500 mm (vgl. hierzu Lit. [5]). Fraglich bleibt dabei, ob die verhältnismässig geringe Abhängigkeit des Wirkungsbereiches vom Plattendurchmesser auch für den Schwinger gelten würde.

7. Korrelation zwischen Raumgewicht und Schwingereinsenkung

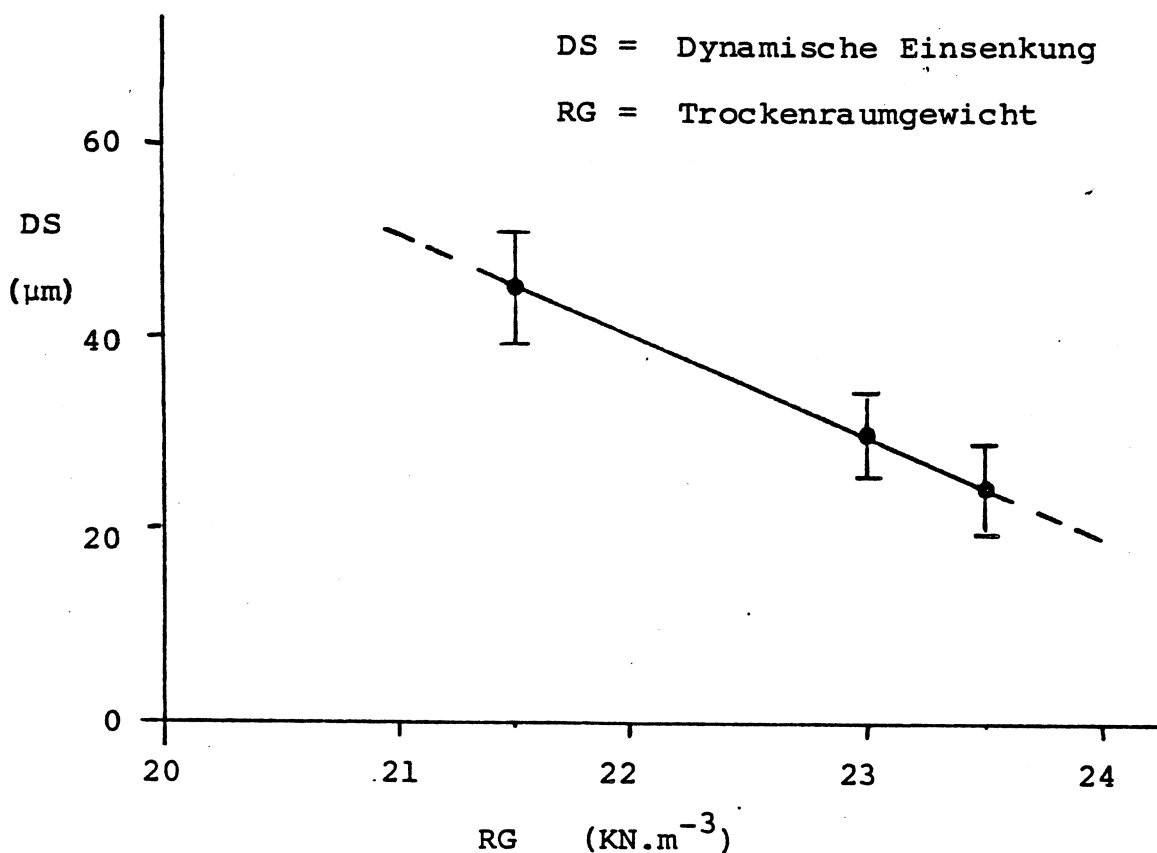
7.1 Laborversuche

Zur Beurteilung der Abhängigkeit zwischen dem Trockenraumgewicht einer verdichteten Kiesschüttung und den dynamischen Schwinger-einsenkungen wurde die zu prüfende Schicht mit unterschiedlichem Verdichtungsaufwand in den beschriebenen Versuchskasten eingebaut.

Das jeweils erzielte Raumgewicht wurde durch mehrere Raumgewichtsbestimmungen mit der Sandersatzmethode ermittelt. Dabei waren unter den Laborbedingungen die Streuungen innerhalb einer mit gleichem Verdichtungsaufwand eingebrachten Schicht verhältnismässig klein, so dass beim Raumgewicht der erzielte Mittelwert als Konstantwert betrachtet werden durfte.

Pro Schicht sind schliesslich 9 Einsenkversuche mit dem Schwinger ausgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt.

Abbildung 12



Hierbei zeigte es sich, dass der Streubereich der Messungen bei gleichem Einbautrockenraumgewicht verhältnismässig gering ist, so dass aufgrund der Schwingermessungen ein Rückschluss auf die Verdichtung der Schüttung möglich wäre.

Diese sich unter Laborbedingungen ergebende verhältnismässig gute Korrelation hat sich in der Praxis mit Messungen auf Strassenbaustellen nicht mehr bestätigt, wie dies aus den Ausführungen im folgenden Kapitel hervorgeht.

7.2 Feldversuche

Auf verschiedenen Strassenbaustellen und Versuchsfeldern wurden auf unterschiedlich verdichtetem Kies ebenfalls Einsenk- und Raumgewichtsmessungen vorgenommen.

Die einzelnen Versuchsserien

Serie	Ort	Kies	Raumgewichtsbestimmung
A	N12 Corpataux	Kiessand I, rund	Nucleodensimeter
B	Arnegg ¹⁾	Kiessand I/II	Nucleodensimeter
C	Arnegg ²⁾	Kiessand I/II	Nucleodensimeter
D	Sennwald	GP, gebrochen	Nucleodensimeter
E	St.Gallen	Kiessand I	Sandersatz

Aus der Resultatdarstellung im Anhang Nr.1 geht eindeutig hervor, dass ein Zusammenhang zwischen dynamischer Einsenkung und Raumgewicht nur noch tendenziell besteht. Ein allgemein gültiger mathematischer Zusammenhang kann vernünftigerweise nicht mehr definiert werden.

1) vor einer Nachverdichtung

2) nach einer Nachverdichtung

Dies auch, wenn wir allfällige systematische Unterschiede zwischen Messungen mit der Sandersatzmethode und mit dem Nucleodensimeter berücksichtigen (vgl. auch die Ausführungen im Kapitel 1.3 "Raumgewichtsbestimmungen").

Das bei den Feldversuchen beobachtete Fehlen einer theoretisch zu erwartenden Abhängigkeit kann vor allem durch zwei Faktoren erklärt werden:

- a) Die allgemeine Streuung der Resultate der mit dem Schwinger gemessenen Einsenkungen
- b) die teilweise empfindliche Reaktion vor allem des statischen Eindringwiderstandes (Plattendruckversuche) und - wenn auch etwas weniger - des dynamischen Eindringwiderstandes des Schwingers auf eine noch so geringe Änderung des Raumgewichtes.

Dies lässt sich am folgenden Beispiel zeigen:

Auf einem Versuchsfeld in Arnegg (SG) mit Kiessand I/II wurden von uns vor und nach einer Nachverdichtung an 9 Stellen die folgenden Parameter bestimmt:

- Statischer Zusammendrückungsmodul M_{EP} (Plattendruckversuch)
- Dynamischer Zusammendrückungsmodul M_{ES} (Schwingermessung)
(Definition des dynamischen Zusammendrückungsmodules gemäss Kap. 8.22)
- Raumgewicht (Nucleodensimeter)

	vor Verdichtung ¹⁾	nach Verdichtung ¹⁾
statischer Zusammendrückungsmodul M_{EP} (MN $\cdot$ m ⁻²)	37.5	50.7
dynamischer Zusammendrückungsmodul M_{ES} (MN $\cdot$ m ⁻²)	223	232
Raumgewicht RG (KN $\cdot$ m ⁻²)	21.6	21.6

1) Mittelwerte aus neun Versuchen

Die Nachverdichtung hat sich auf das Raumgewicht überhaupt nicht, auf den dynamischen Zusammendrückungsmodul wenig, aber verhältnismässig stark auf den statischen Zusammendrückungsmodul ausgewirkt.

Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich die allgemeine Problematik der Qualitätskontrolle von Schüttungen mittels Raumgewichtsmessungen (vgl. auch Kap. 3.1 "Raumgewichtsbestimmungen").

8. Korrelation Schwingungsmessungen - Plattendruckversuche

8.1 Ziel der Versuche

Nachdem mit verschiedenen Versuchen, die im allgemeinen unter Laborbedingungen ausgeführt wurden, die Einflussbereiche des Schwingers in die Tiefe und auf die Seite erfasst werden konnten, ging es nun darum, die Anwendbarkeit des Schwingers im praktischen Einsatz sowie seine Eignung für die Qualitätsprüfung zu testen.

Zur Erreichung dieses Zieles standen sowohl ein direkter als auch ein indirekter Weg offen.

Der direkte Weg würde heissen, dass Schichten aus unterschiedlich verdichtetem Fundationskies geprüft werden. Diese Schichten müssten einer Beanspruchung unterworfen werden, wie sie der Verkehrsbelastung einer Strasse entspricht. Die mögliche Beanspruchung bis zur Endbefahrbarkeit müsste in Relation zu den unmittelbar nach der Verdichtung gemessenen Schwingereinsenkungen oder dynamischen Zusammendrückungsmoduli gebracht werden.

Mit der Forderung nach einer minimalen Beanspruchung - z.B. Anzahl der durchgehenden Norm-Achslasten - könnten dann zulässige Maximalwerte für die Schwingereinsenkungen bestimmt werden.

Dieser Weg hätte einen sehr grossen Aufwand erfordert. Versuchsstrecken hätten bis zur Endbefahrbarkeit beansprucht werden müssen. Solchen Versuchen wären daher aus rein praktischen Gründen - Aufwand, Zeitdauer - enge Grenzen gesetzt gewesen. Die Durchführung hätte

allenfalls auf dem seit Sommer 1978 auf dem Gelände der EMPA Dübendorf installierten Rundlauf des ISETH erfolgen können, auf welchem Foundationsschichten, Beläge etc. binnen weniger Wochen einer Strassenbelastung unterworfen werden können, der sie im Normalfall im Verlauf mehrerer Jahre ausgesetzt gewesen wären.

Solche Versuche wären nur vertretbar gewesen, wenn beim Schwinger von der Messseite her (Streuung der Messresultate) keine Vorbehalte mehr hätten gemacht werden müssen.

Beim indirekten Weg wird versucht, aufgrund von Zusammenhängen mit anderen gängigen Versuchen für die Qualitätskontrolle - insbesondere dem Plattendruckversuch - zulässige Grenzen zu bestimmen. So sind z.B. beim Plattendruckversuch für Foundationsschichten zulässige Mindestwerte für den Zusammendruckungsmodul M_E fixiert, die erreicht werden müssen (z.B. $80 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2} = 800 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ gemäss SNV-Norm 640 585 a [6]). Diese Werte kommen aus der Praxis des Strassenbaues und haben sich, trotz aller Mängel, durchgesetzt und mehr oder weniger bewährt. Wenn sich nun eine zuverlässige Abhängigkeit zwischen den Ergebnissen der statischen Plattendruckversuche und den dynamischen Schwingermessungen manifestiert, dann sollte die Fixierung von zulässigen Limiten möglich sein. Diese Methode ist bei allen Nachteilen - Vergleich mit Resultaten von Versuchen, die man aus den in Kap. 1 "Einleitung" genannten Gründen eigentlich ersetzen möchte - gegenüber dem erwähnten direkten Weg wesentlich weniger aufwendig, da die langwierigen Beanspruchungsversuche wegfallen. Die nachfolgenden - unter Feldbedingungen auf Strassenbaustellen ausgeführten - Versuche konzentrierten sich in der Folge auf das Aufzeigen der Korrelation zwischen den Messungen statischer Plattendruckversuche und den dynamischen Schwingermessungen.

8.2 Definition der statischen und der dynamischen Zusammendrückungsmoduli

Bei den Versuchsmethoden werden prinzipiell Einsenkungen gemessen, die sich aus der jeweiligen statischen oder dynamischen Beanspruchung ergeben.

Aus der statischen Einsenkung DP und einer definierten Laststufe ΔP wird der statische Zusammendrückungsmodul MEP der geprüften Schicht berechnet, der dann als aussagefähiger Kennwert verwendet wird.

Die Auswertung hat gezeigt, dass es wenig sinnvoll ist, statische Zusammendrückungsmoduli MEP mit dynamischen Einsenkungen DS zu vergleichen. Es war daher naheliegend, auch einen dynamischen Zusammendrückungsmodul MES zu definieren.

8.2.1 Der statische Zusammendrückungsmodul MEP

In der Literatur sowie auch in den Normen verschiedener Länder bestehen unterschiedliche Definitionen für Zusammendrückungsmoduli, die mittels Versuchen mit steifen (starren) Lastplatten bestimmt werden.

Alle gehen grundsätzlich vom Ansatz des elastisch-isotropen Halbraumes aus, der die elastisch-plastischen Vorgänge des geprüften Untergrundmaterials nur ungenügend berücksichtigt. Alle Einflüsse zu erfassen wäre jedoch schwierig, so dass eine einfache Definition, die die Wirklichkeit nur relativ ungenau erfasst, trotzdem gerechtfertigt ist.

In der schweizerischen SNV-Norm 670 317 [2] wird der sogenannte ME -Wert oder Zusammendrückungsmodul definiert zu

$$ME = MEP = \frac{\Delta p}{DP} \cdot D$$

mit Δp = massgebende Laststufe = 150-250 kN · m⁻²
 DP = statische Einsenkung für die entsprechende Laststufe
 D = Plattendurchmesser

Dieser Modul entspricht ungefähr dem Zusammendrückungsmodul bei behinderter Seitendehnung, wie er im Oedometer ermittelt wird.

Die andere oft verwendete Formel lautet:

$$E^* = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\Delta p \cdot D(1 - \mu^2)}{DP}$$

mit Δp = Belastungsstufe

DP = Einsenkung unter der entsprechenden Belastungsstufe

μ = Poissonzahl

E^* = Zusammendrückungsmodul bei unbehinderter Seitendehnung $\approx$ Elastizitätsmodul

dabei ist $E^* < ME$

8.2.2 Der dynamische Zusammendrückungsmodul MES

Die Definition eines der Wirklichkeit entsprechenden dynamischen Zusammendrückungsmoduls dürfte auf noch grössere Schwierigkeiten stossen als beim statischen Zusammendrückungsmodul. Es ist daher auch hier zweckmässiger, eine einfache Definition zu suchen.

Da wir den gemessenen Wert ja für Vergleichszwecke mit statischen Zusammendrückungsmoduli benützen, spielt die Art der Definition auch keine ausschlaggebende Rolle. Sie ist vor allem dort wichtig, wo die aus den gemessenen dynamischen Einsenkungen berechneten Zusammendrückungsmoduli für andere Zwecke verwendet werden sollten.

Der Stempel des Schwingers erfährt zunächst eine statische Belastung von ca. 4.5 kN durch das hydraulische Anheben des Gerätes. Die Setzungen unter dieser statischen Last werden bei durchlässigen, körnigen Böden sehr rasch eintreten und durch die Einsenkungsmessung mittels Geophon nicht erfasst. Das Geophon erfasst die dynamische Einsenkung nach der Inbetriebsetzung der Schwingermaschine (vgl. auch Kapitel 4.2 "Die Messung der Einsenkung"). Die dynamische Kraft beträgt ± 2.0 kN. Für die Berechnung des dynamischen Zusammendrückungsmoduls berücksichtigen wir die positive, d.h. nach unten gerichtete maximale Kraftkomponente von ca. 2.0 kN.

Aus dieser Kraft wird die mittlere spezifische Plattenpressung für den Durchmesser $D' = 220$ mm berechnet. Die innere Oeffnung von 76 mm, in der das Geophon für die Einsenkungsmessung Platz findet, wird vernachlässigt in der Annahme, dass schon in geringer Tiefe unter der Platte die Spannungsverteilung für den Ring wie für die geschlossene Platte dieselbe ist.

Bei analoger Definition wie für den statischen Zusammendrückungsmodul nach der SNV-Norm 670 317 [2] gilt der Ansatz:

$$MES = \frac{\Delta P'}{DS} \cdot D'$$

mit $\Delta P' =$ maximale positive Bodenpressung des Schwingers
(~52 kN · m⁻²)

DS = dynamische Einsenkung

D' = Durchmesser des Schwingerstempels (-Platte)

8.3 Die Versuchsserien

Im Rahmen der Untersuchungen wurden auf den in der folgenden Tabelle zusammengestellten Strecken Versuchsmessungen ausgeführt.

Anmerkung zur Tabelle:

- 1) Gleiche Messpunkte des Plattendruckversuches, jedoch verglichen mit dem Mittel von 3 - 4 Schwingermesspunkten in der Umgebung der Platte, anstatt nur mit einem Schwingermesspunkt in unmittelbarer Nähe des statischen Messpunktes.

Serie	Bez.	Datum	Anzahl Messstellen	Kiesart	Bemerkungen
Arnegg	A	Okt. 77	18	Kiessand I/II rund	Versuchsschüttung für den Nachweis der Verdichtbarkeit
Sennwald	B	Okt. 77	21	gebrochenes Felsbachschuttmaterial (GP)	Foundationsschicht für Tanklager
St.Gallen	C	April 78	20	Kiessand I/II rund	Erschliessungsstrasse
Liestal N12	D	Juli 78	24	Kiessand I/II rund	Bestehende Nationalstrasse Belagserneuerung
Horgen	E	Nov. 74	9	Kehrichtschlacke	Erschliessungsstrasse Versuchsabschnitt
Buchs (1)N13	F	Aug. 78	13	Kiessand I/II rund	Nationalstrasse
Buchs (1a)N13	G	Aug. 78	(13) ¹⁾	Kiessand I/II rund	
Buchs (2) N13	H	Aug. 78	7	Kiessand I/II rund	
Buchs (3)N13	I	Aug. 78	28	Kiessand I/II rund	
Buchs (3a)N3	K	Aug. 78	(28) ¹⁾	Kiessand I/II rund	
Frauenkappelen N1	L	Okt. 78	20	Kiessand I/II rund	Nationalstrasse
Rundlauf ISETH	M	Aug. 78	12		Versuch für Strassenbauforschung
Rundlauf ISETH	N	Aug. 78	6		Versuch für Strassenbauforschung
Corpataux N12	O	1971	26	Kiessand I rund	Nationalstrasse
Jordillon N9	P	1971	10	Moräne, tonig-siltig	Einschnitt
Jordillon N9	Q	1971	24	bis siltig sandig	Dammschüttung
Total ausgewertet inkl. 1)			279		

Ergänzend kann festgestellt werden:

Bei den Serien A, C, D, F, G, H, I, K, L, M, N, O handelt es sich um Versuche auf normalem Fundationskies vorwiegend der Klasse I, bezüglich Ungleichförmigkeit und Krümmung teilweise der Klasse II.

Bei der Serie B (Sennwald) handelt es sich um gebrochenes Fels- und Bachschuttmaterial mit einem deutlichen Manko in der Sand- und Feinkiesfraktion gegenüber einem Fundationskies optimaler Kornzusammensetzung.

Bei der Versuchsserie E (Horgen) fanden die ausgewerteten Versuche auf Kehrichtschlacke statt.

Bei den Versuchsserien P und Q handelt es sich um tonig-siltige bis siltig-sandige Kiese (Moränenmaterial) mit hohem Wassersättigungsgrad.

Die Ergebnisse dieser erwähnten Serien B, E, P und Q können mit denjenigen der übrigen Serien auf Fundationskies nicht direkt verglichen werden. Sie sollen charakteristische Abweichungen aufzeigen, welche sich bei der Prüfung anderer Materialien ergeben.

8.4 Die Auswertung der Resultate

Wie bereits in Kap. 8.2 "Definition der Messwerte" erwähnt, war es nur sinnvoll, entweder die statischen mit den dynamischen Einsenkungen oder dann die daraus berechneten Zusammendrückungsmoduli zu vergleichen.

Die Auswertung - Suche von Näherungskurven, statistische Analysen - erfolgte mit der Beratung und den Rechenprogrammen der Firma INTERDATA, Zürich.

Dank diesen Programmen, die gleichzeitig auch die Resultate aufzeichneten, konnten mit verhältnismässig geringem Aufwand verschiedene Auswertungen vorgenommen werden: so die Analyse der Messresultate der einzelnen Versuchsserien, sowie die Summe einzelner oder aller Versuchsserien.

8.4.1 Rechenansatz für die Auswertung

Die Auswertung zeigte rasch, dass zwischen den statischen und dynamischen Einsenkungen bzw. den entsprechenden Zusammendrückungsmoduli keine lineare Abhängigkeit besteht, sondern ein nicht linearer Zusammenhang gesucht werden musste. Dabei setzen wir voraus, dass die Näherungskurve aus naheliegenden Gründen jeweils durch den Nullpunkt gehen sollte und formulierten den Ansatz

$$y = a \cdot x^b$$

Diese Gleichung konnte in die Form

$$\log y = \log a + b \cdot \log x$$

transformiert werden und ermöglichte nachher eine normale lineare Regressionsanalyse.

Folgende Funktionen wurden gesucht

$$\begin{aligned} DS &= A \cdot DP^B & DP &= A' \cdot DS^{B'} \\ MES &= C \cdot MEP^D & MEP &= C' \cdot MES^{D'} \end{aligned}$$

mit

DS = dynamische Einsenkung des Schwingers
 DP = statische Einsenkung beim Plattendruckversuch
 für die Laststufe 150-250 kN · m⁻²
 MES = dynamischer Zusammendrückungsmodul Schwinger
 MEP = statischer Zusammendrückungsmodul Platten-
 druckversuch für die Laststufe 150-250 kN · m⁻²

gemäss Definition in den Kapitel 8.2.1 und 8.2.2

Aus Gründen der Auswertungsmethode - die Methode der kleinsten Quadrate berücksichtigt immer die zur Ordinate parallelen Abstände Messpunkt - Näherungskurve - sind die Näherungskurven beim Austausch der Variablen nicht identisch. Die Näherungskurve kann also bei vertauschten Varianten nicht durch die mathematische Bildung der Umkehrfunktion

$$y = a \cdot x^b \leftrightarrow x = \frac{1}{a} \cdot y^{-b}$$

gefunden werden.

8.4.2 Statistische Auswertung der Messresultate

Die Rechenprogramme der INTERDATA erlaubten neben der Berechnung der Funktion der Näherungskurve auch die Berechnung der Vertrauens- oder Konfidenzintervalle.

Die Breite dieser Vertrauensintervalle wurde so gewählt, dass diese ungefähr der einfachen bzw. doppelten Standardabweichung bei Annahme einer Gauss'schen Normalverteilung entsprechen.

68.3 % = einfache Standardabweichung

95.4 % = doppelte Standardabweichung

Diese Prozentzahlen bedeuten, dass 68.3 bzw. 95.4 % aller Messwertpaare (dynamische + statische Einsenkungen bzw. entsprechende Zusammendrückungsmoduli) im dazugehörenden Vertrauensintervall liegen.

Die statistische Auswertung der Messergebnisse ist vor allem wichtig für die Angabe zulässiger Grenzwerte zur Qualitätserfassung von verdichteten Foundationsschichten.

8.5 Ergebnisse der Auswertung der Messresultate

8.5.1 Näherungskurven

Infolge der direkten Abhängigkeit zwischen Einsenkung und Zusammendrückungsmodul

$$\text{Einsenkung} = \frac{x}{\text{Zusammendrückungsmodul}}$$

mit x = konstante Grösse, bestimmt durch die Laststufe und den Durchmesser der Druckplatte sowie einen Formfaktor

$$x = \Delta p \cdot D \cdot f$$

Δp = spezifische Laststufe

D = Plattendurchmesser

f = Formfaktor, im vorliegenden Fall = 1.0
(vgl. Kap. 8.2.1 und 8.2.2)

führt der Vergleich zwischen den Einsenkungen und zwischen den Zusammendrückungsmoduli zu den gleichen Ergebnissen

Wir beschränken uns hier auf den Vergleich der Zusammendrückungsmoduli. Diese charakterisieren die Verdichtungsqualität anschaulicher als die Einsenkung, da sie mehr oder weniger allgemein bekannte Bodenkennwerte angeben.

Die einzelnen Ergebnisse der Versuchsserien sind in den Anhängen Nr. 2 bis Nr. 43 zu diesem Bericht zusammengefasst

Die folgende Tabelle gibt die Ergebnisse der Funktionen der einzelnen Näherungskurven wieder, die für die einzelnen Versuchsserien gefunden wurden.

Tabelle 1

MES = A . MEP ^B				MEP = A' . MES ^{B'}			
SERIE	ANHANG	A	B	SERIE	ANHANG	A'	B'
A	2	82.3	0.268	A	23	0.299	0.922
B	3	135	0.151	B	24	0.299	0.967
C	4	82.3	0.344	C	25	0.299	0.976
D	5	82.3	0.330	D	26	0.299	1.04
E	6	82.3	0.208	E	27	0.299	1.03
F	7	82.3	0.327	F	28	0.299	0.920
G	8	82.3	0.311	G	29	0.299	0.930
H	9	82.3	0.365	H	30	0.299	0.943
I	10	82.3	0.318	I	31	0.299	0.950
K	11	82.3	0.319	K	32	0.299	0.950
L	12	19.8	0.608	L	33	0.299	0.951
M	13	21.1	0.561	M	34	0.299	0.946
N	14	35.8	0.442	N	35	0.299	0.904
O	15	82.3	0.383	O	36	0.299	0.938
P	16	93.6	0.422	P	37	0.299	0.958
Q	17	379.0	0.047	Q	38	0.299	0.833

Nachstehend die Ergebnisse der Messresultate verschiedener, gruppenweise zusammengefasster Versuchsserien.

Tabelle 2

Serien	Anhang	A	B	Anhang	A'	B'
F, G, H, I, K	18	128	0.216	39	0.00764	1.57
M, N	19	25	0.522	40	0.0011	1.58
P, Q	20	168	0.275	41	0.114	1.03
A, C, D, F, G, H, I, K, L, M, N	21	34.2	0.510	42	0.0489	1.27
A, C, D, F, G, H, I, K, L, M, N, O	22	31.0	0.541	43	0.0903	1.16

Zunächst zeigt die tabellarische Zusammenstellung der Funktionswerte folgende interessante Erscheinungen:

- a) bei den Funktionen $MES = A \cdot MEP^B$ sind die Streuungen des Steigungs- und des Exponentialkoeffizienten sehr viel grösser als bei den Funktionen $MEP = A' \cdot MES^{B'}$
- b) wie an sich zu erwarten, zeichnen sich einzelne Serien vor allem bei den Funktionen $MES = A \cdot MEP^B$ durch deutliche Abweichungen in den Koeffizienten aus.

So vor allem bei den folgenden Serien:

- Serie B gebrochenes Material
- Serie E Kehrichtschlacke
- Serie L Liestal N12, Fundationskies nach mehrjähriger Beanspruchung
- Serie M,N Rundlauf ISETH. Dünne Foundationsschicht auf schlechtem, siltigem Untergrund
- Serie P,Q Moränenmaterial

Bei den übrigen Serien (alle auf Fundationskies Kiessand I/II) bleibt der lineare Koeffizient unverändert = 82.3 und der Exponent streut zwischen 0.268 und 0.383.

$$\text{Mittelwert} \quad \bar{B} = 0.334$$

$$\text{Standard-Abweichung} = \sigma \bar{B} = \pm 0.035$$

- c) Bei den Funktionen $MEP = A' \cdot MES^{B'}$ ist die Streuung der beiden Koeffizienten - über alle Serien beobachtet - gering. Der Koeffizient C ist konstant = 0.299 und der Exponent D streut zwischen 0.833 und 1.04

$$\text{Mittelwert} \quad \bar{D} = 0.941$$

$$\text{Standard-Abweichung} \quad \sigma \bar{D} = 0.054$$

Interessant ist nun die Tatsache, dass die Näherungskurven bei der Auswertung der Messpunkte verschiedener Serien wesentlich andere Koeffizienten aufweisen.

Die Aufzeichnung zeigt aber, dass die Unterschiede im Bereich interessanter statischer Zusammendrückungsmoduli zwischen $MEP = 40-120 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ nicht mehr sehr signifikant sind (vgl. die Anhänge Nr.44 und 45). In diesen sind die aus den mittleren Koeffizienten berechneten Näherungskurven ebenfalls eingezeichnet.

$$\text{Anhang 44} \quad MES = 82.3 \cdot MEP^{0.334}$$

$$\text{Anhang 45} \quad MEP = 0.299 \cdot MES^{0.941}$$

Die Änderungen in den Steigungen (Linearglied) und der Krümmung (Exponent) kompensieren sich in diesem Bereich teilweise, so dass die Abweichungen zwischen den beiden Kurven gering sind.

8.5.2 Auswertung der statistischen Analysen

Wie bereits in Kapitel 8.4.2 erläutert, wurde für jede Näherungskurve jeweils auch das 68.3 % - Vertrauensintervall bzw.

95.4 % - Vertrauensintervall

berechnet. Die Ergebnisse würden bei einer Gauss'schen Normalverteilung ungefähr der einfachen bzw. doppelten Standardabweichung entsprechen.

Der anschliessenden Zusammenstellung kann die Bandbreite der jeweiligen abhängigen Variablen MES bzw. MEP für das gewählte Vertrauensintervall entnommen werden:

Funktion Näherungskurve	Vertrauensintervall ¹⁾	Bandbreite in % des ²⁾ Wertes der abhängigen Variablen
MES = $31.0 \text{ MEP}^{0.541}$ (vgl. Anhang Nr. 41)	68.3 %	-31% bis +45%
	95.4%	-42% bis +72%
MEP = $0.903 \text{ MES}^{1.16}$ (vgl. Anhang Nr. 45)	68.3%	-40% bis +67%

1) Vertrauensintervall: 68.3% bzw. 95.4% der Beobachtungen oder Messergebnisse liegen in diesem Bereich (vgl. auch Kap. 8.4.2)

2) Bandbreite: Diese wird charakterisiert durch die prozentuale Abweichung vom über die Näherungskurve berechneten Mittelwert (vgl. Kap. 8.4.1)

8.5.3 Einfluss der Material-Charakteristik auf die Abhängigkeit zwischen dynamischen und statischen Messwerten

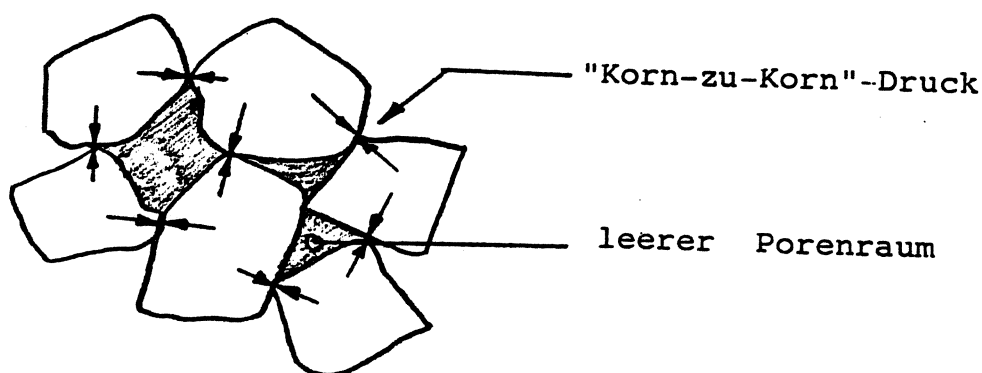
Interessant sind hier vor allem die Messungen der Serie B auf einem gebrochenen Fels- und Bachschuttmaterial mit einem Mangel an Sand- und Feinkiesanteil sowie der Serie Q, P auf einem wassergesättigten tonig-siltigen bis siltig-sandigen Kies (Moränematerial) geringer Durchlässigkeit.

8.5.31 Gebrochenes Fels- bzw. Bachschuttmaterial (Serie B)

Die Näherungskurve dieser Serie B $MES = A \cdot MEP^B$ zeigt im Vergleich zu den Kurven von Fundationskies einen verhältnismässig grossen Steigungskoeffizienten A und dafür einen kleinen Exponentialkoeffizienten. Sie verläuft am Anfang verhältnismässig steil und flacht mit grösseren MEP-Werten stark ab (vgl. Anhänge 3, Serie B und Nr. 21, alle Versuche auf Fundationskies).

Dieser Effekt eines praktisch gleichbleibenden dynamischen Zusammendrückungsmoduls bei stark anwachsendem statischen Zusammendrückungsmodul kann zumindest teilweise durch den Kornaufbau erklärt werden, der durch ein Manko im Sand- und Feinkiesbereich ein verhältnismässig grosses Porenvolumen erwarten lässt (Abbildung 13)

Abbildung 13



Die dynamische Beanspruchung durch den Schwinger konnte Gefügeänderungen provozieren, die zu Einsenkungen des Schwingers-Verdichtungseffekt - geführt haben, während sich bei der statischen Beanspruchung durch den Plattendruckversuch im wesentlichen nur der "Korn-zu-Korn Druck erhöht hat, ohne über eine Gefügeänderung zu Einsenkungen zu führen.

8.5.32 Kohäsives wassergesättigtes Material (Serien P, Q)

Selbst bei kleinen statischen Zusammendrückungsmoduli MEP werden im Vergleich zu Messungen auf Fundationskies schon verhältnismässig hohe dynamische Zusammendrückungsmoduli MES gemessen (vgl. Anhänge Nr.20 und 21).

Dieser Effekt kann durch den Einfluss des Porenwassers erklärt werden. Die geringe Durchlässigkeit des geprüften kohäsiven Untergrundes erlaubt keinen der Frequenz der Schwingerbeanspruchung entsprechenden Abbau der Porenwasserüberdruckspitzen. Die dynamische Beanspruchung erhöht die Porenwasserdrücke, ohne dass durch ein genügend rasches Abfliessen des praktisch inkompressiblen Porenwassers eine Abnahme des Porenvolumens und damit eine Einsenkung ermöglicht wird.

Es kann angenommen werden, dass für dieses Material der Sättigungsgrad einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Zusammenhang zwischen statischem und dynamischem ME-Modul ausübt.

8.5.33 Andere Einflüsse auf den Messwertzusammenhang

Neben der Kornform, dem Anteil an Feinmaterial und dem Sättigungsgrad dürfte vor allem auch die Kornverteilung (Krümmung, Ungleichförmigkeitsgrad) eine Rolle spielen. Infolge der grossen Streuung der Messergebnisse war es jedoch unmöglich, neben den in Kap.8.5.31 und 8.5.32 aufgezeigten charakteristischen Abweichungen andere Einflüsse herauszugreifen und zu interpretieren.

8.6 Das Verhältnis des dynamischen zum statischen Zusammen- Drückungsmodul (MES/MEP) in Funktion des statischen Zusammendrückungsmoduls MEP

Abgesehen vom eigentlichen Ziel der Untersuchung - Qualitätsprüfung von ungebundenen Fundationskiesschichten - lieferten die Versuche Resultate, die für den Bodendynamiker von allgemeinem Interesse sein könnten. Ihn interessiert nicht selten das Verhältnis zwischen dem dynamischen und dem statischen Zusammendrückungsmodul, vor allem auch bei dynamischen Fundationsproblemen (Maschinenfundamente etc.).

In den Anhängen Nr.46 und 47 ist die Näherungskurve für den Wert $\frac{MES}{MEP}$ in Funktion von MEP angegeben. Die Auswertung erfolgte mit den Messungen aller Versuchsserien auf Fundationskies. Bei der Kurve im Anhang Nr.47 wurde die Versuchsserie O auf Fundationskies in Corpataux (N 12) weggelassen.

Die Korrelation ist gegenüber dem direkten Zusammenhang $MES = F_{kt}(MEP)$ besser. Die Bandbreite für das 68.3%-Vertrauensintervall liegt bei -28 bis +35% des durch die Näherungskurve vorausgesagten Verhältniswertes (vgl.Kap.8.5.2 "Auswertung der statistischen Analysen").

Dabei ist völlig klar, dass die hier benützte Definition des statischen sowie des dynamischen Zusammendrückungsmoduls für andere Verwendungszwecke unbedingt berücksichtigt werden muss (vgl. Kap. 8.2.1 und 8.2.2). Das Verhältnis MES/MEP dürfte ferner auch frequenzabhängig sein. Diese Abhängigkeit konnte mit den ausgeführten Versuchen nicht ermittelt werden, da der Schwinger nur Messungen mit der konstanten Frequenz von 8 Hz erlaubt.

9. Folgerungen aus den Versuchsauswertungen

Die Feld- wie auch die Laborversuche haben gezeigt, dass zwischen den gemessenen statischen und dynamischen Einsenkungen (DP und DS) offenbar ein nicht-linearer Zusammenhang besteht. Dies gilt ebenso für die gemäss den Definitionen in den Kapiteln 8.2.1 und 8.2.2 aus den gemessenen Einsenkungen und der jeweiligen Laststufe ΔP berechneten Zusammendrückungsmoduli MEP und MES.

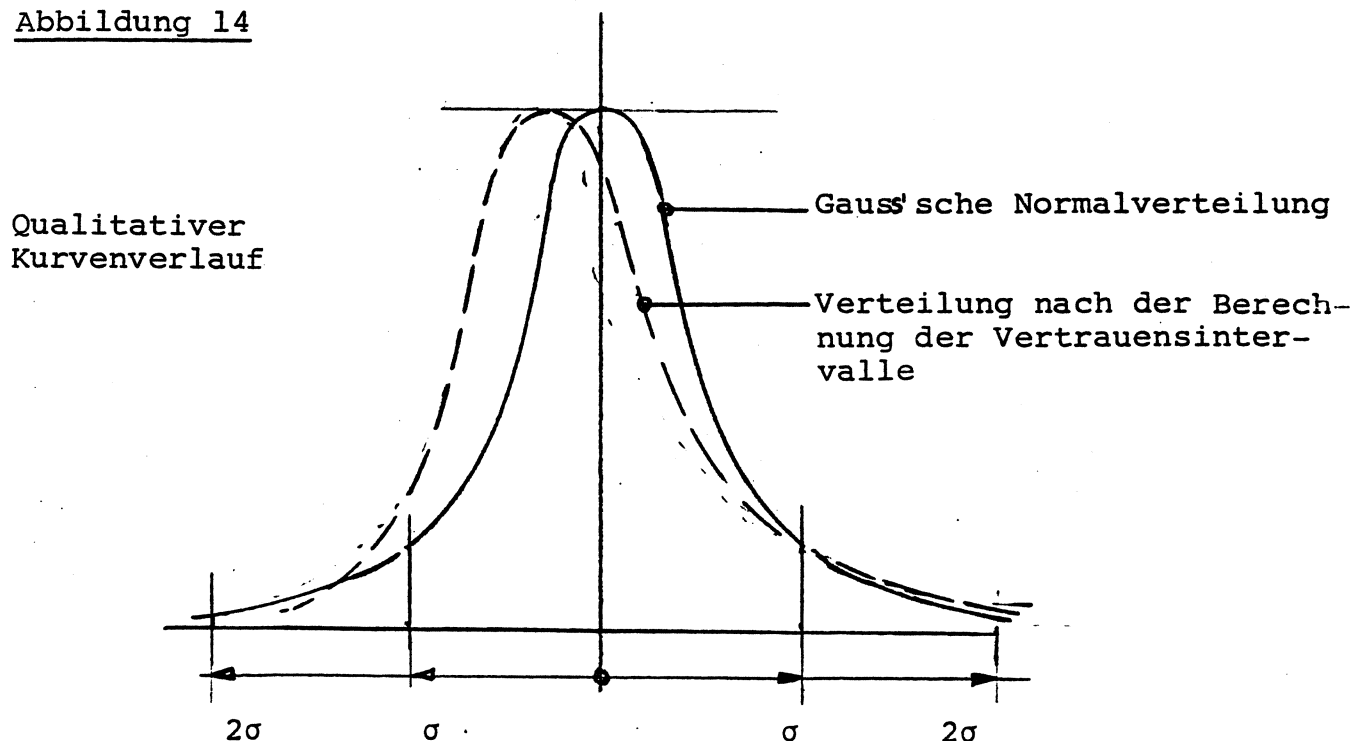
Die Aussagefähigkeit des Zusammenhanges zwischen den beiden Moduli wird jedoch durch eine offenbar messsystembedingte, verhältnismässig grosse Streuung der Messergebnisse beeinträchtigt. Die Bandbreiten für das

68.3%-Vertrauensintervall = einfache Standardabweichung
und das

95.4%-Vertrauensintervall = doppelte Standardabweichung
sind entsprechend gross.

Die Auswertung zeigt ferner, dass die Verteilung nicht genau der Gauss'schen Normalverteilung entspricht (Abb.14).

Abbildung 14



σ = einfache Standardabweichung

2σ = doppelte Standardabweichung

Es stellt sich nun die Frage, woher diese Streuungen kommen. Dabei sind zwei Probleme zu unterscheiden:

- separate Erfassung der Streuung der statischen und der dynamischen Messwerte
- systembedingte Streuungen

9.1 Separate Erfassung der Streuung der statischen und der dynamischen Messwerte

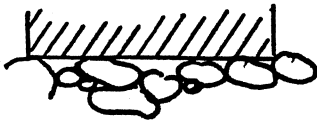
Die getrennte Streuung der beiden Versuche - Plattendruck- und Schwingerversuch - konnte nicht erfasst werden.

So war z.B. der Einbau einer Schicht mit einem konstanten statischen Zusammendrückungsmodul (z.B. $MEP = 50 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$) nicht möglich, auf der mit einer grösseren Serie dynamischer Versuche die effektiven, systembedingten Streuungen der Schwingermessungen hätten ermittelt werden können. Daher war jeweils die Bestimmung des örtlichen statischen Zusammendrückungsmoduls MEP bereits eine Art Zufallsergebnis; bei der in unmittelbarer Nähe ausgeführten Schwingermessung konnte ja schon ein Unterschied in der Qualität des Untergrundes (Verdichtung, Kornaufbau etc.) vorhanden sein.

9.2 Systembedingte Streuung

Gewisse Streuungen der Messergebnisse - insbesondere bei den Schwingermessungen - lassen sich durch die Art der Versuchsdurchführung erklären.

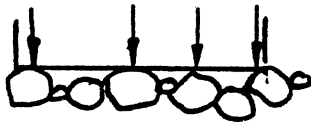
Beim Schwingerversuch werden Stempel und das Geophon auf die unvorbereitete Oberfläche der zu prüfenden Schicht aufgesetzt und nicht auf ein ausgleichendes Sand- oder Gipsbett wie beim Plattendruckversuch.

SchwingerversuchPlattendruckversuchAbbildung 15

Unregelmässige Oberfläche,
evtl. gestörte, aufgelockerte
Oberflächenschicht. Eine
solche kann vor allem bei
hohen Zusammendrückungs-
moduli eine Rolle spielen.

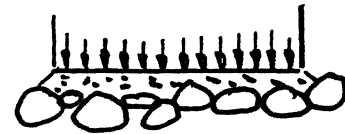


Ausgleichsschicht
(Sand- oder Gipsbett)

Abbildung 16

Spannungsspitzen
auf Einzelkörner möglich.

Nur eine statische Vorbe-
lastung durch das auf den
Stempel wirkende Eigenge-
wicht des Anhängers.



Gleichmässige Spannungsverteilung
infolge der Ausgleichsschicht. Der
zu prüfende Untergrund erfährt
eine Vorbelastung verbunden mit
einer "Homogenisierung" durch die
der Prüflaststufe vorausgehenden
Laststufen

Aus diesen Ausführungen könnte man folgern, dass auch bei den Schwingermessungen eine Ausgleichsschicht aufgebracht werden sollte. Mit diesen Massnahmen wäre jedoch einer der wesentlichen Vorteile der Schwingermessungen - nämlich die rasche Versuchsdurchführung - weitgehend verloren.

Aufgrund der Abhängigkeit zwischen den dynamischen und den statischen Werten kann ferner mit einer statischen Messung der dynamische Wert besser vorausgesagt werden als umgekehrt. Dies ist ein Nachteil, der sich vor allem für die Fixierung zulässiger dynamischer Grenzwerte auswirkt, wie in Kapitel 10 dargelegt wird.

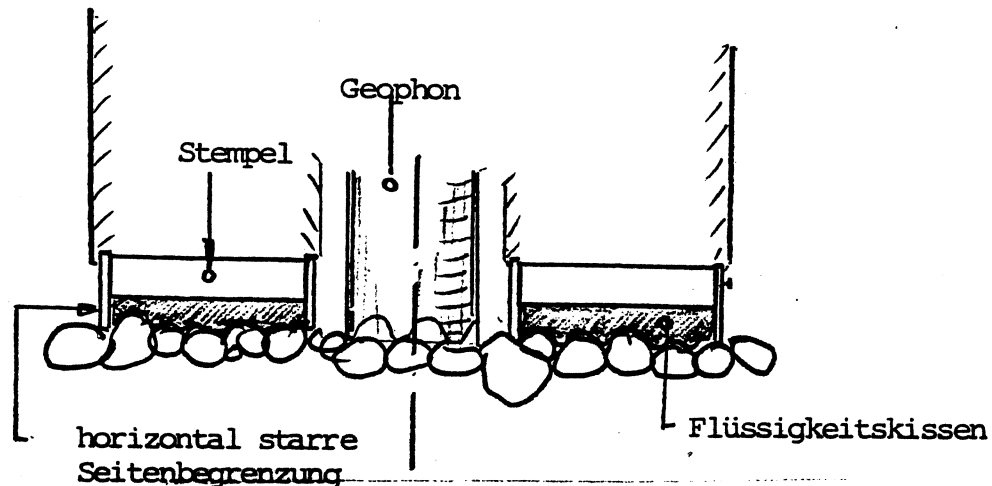
9.3 Vorschläge zur Verbesserung der systembedingten Streuungen

Die Streuung der Messergebnisse könnte durch verschiedene Massnahmen zumindest teilweise reduziert werden. Z.B.:

- Einsatz schwererer Schwingengeräte hinsichtlich Eigengewicht und schwingender Masse. Damit könnte der offensichtlich erhebliche Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit und der Oberflächenstörungen reduziert werden. Gleichzeitig würde dadurch eine Angleichung an die aus dem Verkehr erwachsende Beanspruchung erfolgen. Ein solches Grossgerät wäre jedoch in der Herstellung und im Betrieb sehr teuer und könnte in etwa mit dem Deflektograph Lacroix (vgl. Kap. 3.3) verglichen werden. Die Zahl der verfügbaren Geräte bliebe klein, so dass schliesslich doch keine systematische Baukontrolle möglich wäre, mit der die konventionellen Versuche ersetzt werden könnten.
- Ausgleich der Oberflächen-Inhomogenitäten. Mit technischen Massnahmen am bestehenden Gerät wäre zu erreichen, dass die Oberflächen-Inhomogenitäten ausgeglichen werden. Generell könnte man sich folgendes vorstellen:
Schaffung einer Ausgleichsschicht analog zum Plattendruckversuch. Diese müsste jedoch am Gerät, bzw. am Stempel selbst aufgebracht werden, da ein manuelles Einrichten aus Zeitgründen unbedingt vermieden werden sollte. Denkbar wäre eine Art Flüssigkeitskissen,

wobei die Flüssigkeit als praktisch inkompressibel betrachtet werden könnte. Technisch gelöst werden müsste dabei die Behinderung der seitlichen Ausdehnung eines solchen Kissens.

Abbildung 17



Die seitliche Deformationsbeschränkung wäre erforderlich, damit durch das Kissen keine erhebliche Schwingungsdämpfung eintritt.

10. Eignung des bestehenden Gerätes für die Qualitätsprüfung von ungebundenem Fundamentskies

10.1 Zielvorstellung

Auf dem Weg über die Korrelation der Messergebnisse des Schwingers mit anderen konventionellen Methoden der Qualitätsprüfung sollten Qualitätsnormen für die Schwingerprüfung aufgestellt werden. Als Ausgangspunkt hätten dabei die verlangten Mindestwerte bestehender Versuche zu dienen.

Die Untersuchungen zeigten, dass beim Feldversuch kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Schwingermessungen und dem Raumgewicht einer Schüttung besteht. Es blieb daher nur der Vergleich mit den Ergebnissen des Plattendruckversuches.

So verlangt die SNV-Norm 640 585 a [6] für die Foundationsschichten einen minimalen Zusammendrückungsmodul $MEP = 80 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2} \cong 800 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$). Dieser Mindestwert hat sich in jahrzehntelanger Praxis im Strassenbau eingeführt. Es ging nun darum, den dazu äquivalenten dynamischen Wert zu bestimmen.

10.2 Möglichkeiten unter der Berücksichtigung der Streuung der Messwerte

Es ist davon auszugehen, dass wir mittels Schwingermessungen einen statischen Zusammendrückungsmodul voraussagen wollen. Die Schwingermessungen müssten dann Werte liefern, die entsprechend der Voraussage einen zulässigen statischen Zusammendrückungsmodul erwarten lassen.

Für die Voraussage $MEP = f(MES)$
kann die Näherungskurve $MEP = 0.0903 \cdot MES^{1.16}$
aller Messergebnisse auf Fundationskies (vgl. Anhang Nr.48) herangezogen werden.

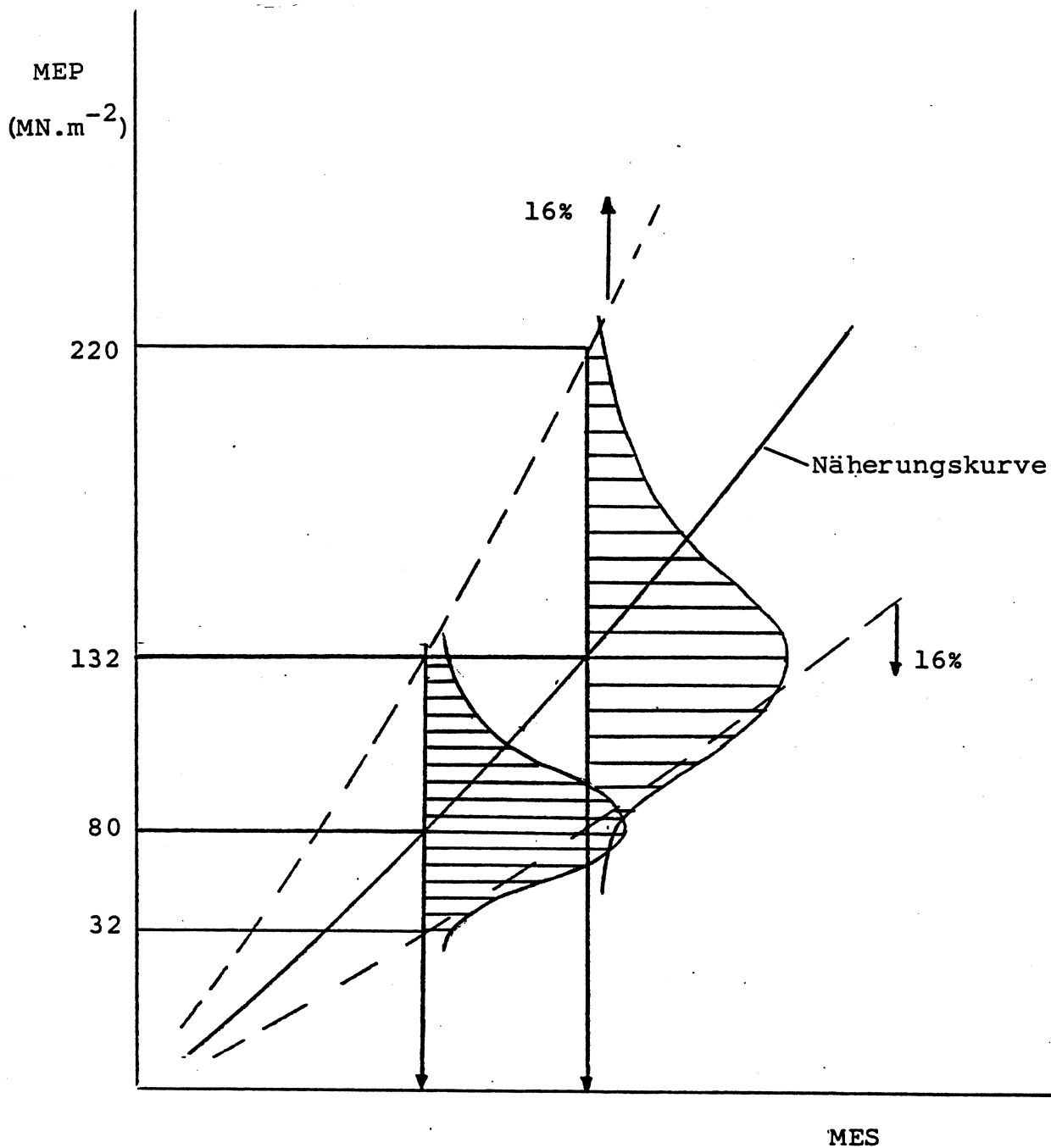
Die Bandbreite des 68.3%-Vertrauensintervalles beträgt:

$$\begin{array}{ll} +1.67 \text{ MES} & +67\% \\ \text{oder} & \\ -\frac{1}{1.67} \text{ MES} & -40\% \end{array}$$

des durch die Näherungskurve vorausgesagten statischen Zusammendrückungsmoduls MEP.

Setzen wir nun voraus, dass höchstens ca. 16% der statischen Äquivalenzwerte den entsprechend der Norm zulässigen Grenzwert von $MEP = 80 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ unterschreiten dürfen, so müsste gemäss Anhang Nr.45 der dynamische Grenzwert ca. $535 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ betragen.

Dies würde dann aber auch heissen, dass 50% der statischen MEP-Werte über $132 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ liegen würden, 16% gar über $220 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$, (vgl. Abbildung 18)

Abbildung 18

Würden wir auf diesen Voraussetzungen beharren, so würde das bedeuten, dass praktisch nur eine unter günstigsten Bedingungen eingebaute und hochverdichtete Schicht den Anforderungen genügt. Das Problem der Messwertstreuung führte zu nicht vertretbaren und vor allem auch unwirtschaftlichen Qualitätsanforderungen.

Würde man jedoch den durch die Näherungskurve gegebenen Wert berücksichtigen, so wäre der entsprechende dynamische Grenzwert

$$\text{ca. } 345 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$$

dabei müsste aber erwartet werden, dass 16% der statischen Werte unter $48 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ liegen würden. Bei einer solchen Fundations-schicht müsste befürchtet werden, dass sie Schwachstellen mit ungenügender Verdichtung aufweist. Zudem würde nur gerade die Hälfte der statischen Zusammendrückungsmoduli statistisch den verlangten Mindestwert von $80 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ überschreiten.

10.3 Folgerungen für die praktische Anwendbarkeit

Die Handhabung des Gerätes kann nicht mehr wesentlich vereinfacht werden. Die Versuchsdurchführung ist einfach und rasch. Sie erlaubt ohne weiteres 20 - 30 Versuche pro Stunde; es sind also rund 10 bis 15 mal mehr Messungen in der selben Zeit möglich wie mit dem Plattendruckversuch.

Die praktische Anwendbarkeit des vorhandenen Schwingers ist jedoch nicht gegeben, wenn es nicht gelingt, die Bandbreite der Streuungen der Messwerte erheblich zu vermindern. Dies müsste in erster Linie durch eine Reduktion des Oberflächeneinflusses der zu prüfenden Schicht geschehen (vgl. Kap. 9.3).

Die Streuung der Messergebnisse begrenzt auch den Einsatz des Gerätes für reine Homogenitätsuntersuchungen.

11. Ausblick

Die Resultate der durchgeführten Untersuchungen zeigen die Möglichkeiten und Grenzen des Schwingers auf und sind unter Umständen für andere Zwecke verwertbar. Sie führen zur Folgerung, dass das vorhandene Gerät für die Qualitätsprüfung von ungebundenem Fundationskies wenig geeignet ist.

Eingehende weitere Untersuchungen sind ohne Verbesserungen am Gerät nicht sinnvoll.

Bessere Ergebnisse könnten wahrscheinlich mit schwereren Geräten erzielt werden. Mit solchen Geräten wäre unter Umständen die massstabgetreue Simulation der Verkehrsbelastung von LKW-Achsen möglich, sofern Gewicht, schwingende Masse und Schwingfrequenz entsprechend gewählt würden.

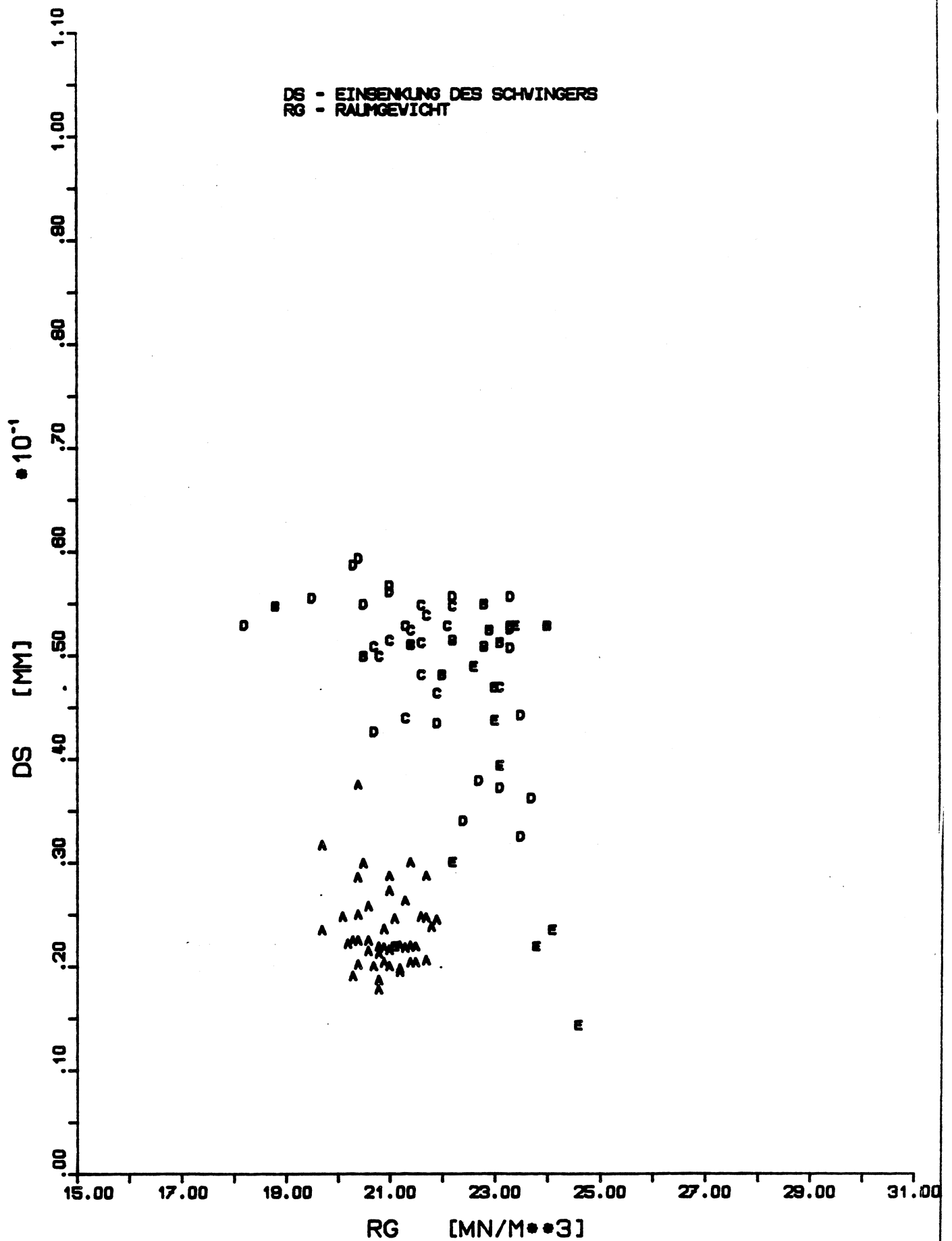
Im Falle einer Reduktion der Streuung der Messergebnisse durch Verbesserungen des bestehenden Schwingers könnte der direkte Weg für die Bestimmung der Qualitätsanforderungen gewählt werden (vgl. Kap. 8.1). Unterschiedlich verdichtete Foundationsschichten aus Kies, die mit dem Schwinger geprüft werden, wären effektiven Verkehrsbelastungen bis zur Endbefahrbarkeit zu unterwerfen und die Werte zu bestimmen, ab welchen die Verdichtung den gestellten Anforderungen genügt.

Aus zeitlichen Gründen könnten solche Versuche nicht auf Versuchsstrecken, die in Strassen integriert werden, zur Ausführung gelangen. Die Durchführung wäre allenfalls im Rahmen anderer Versuche auf dem Rundlauf des ISETH möglich.

Versuchsmessungen auf bituminösen Belägen zeigen, dass dort das Problem der Messwertstreuung zwar auch, jedoch in einem wesentlich geringeren Masse besteht. Diese kleineren Streuungen lassen vermuten, dass durch eine technische Verbesserung des vorhandenen Gerätes - zur Reduktion des Oberflächeneinflusses auf die Streuung der Messergebnisse - positive Resultate möglich wären.

GEOTEST AG

Heinrich R. Ziegler



MESSREIHE: A

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3

•MEP •• .268

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

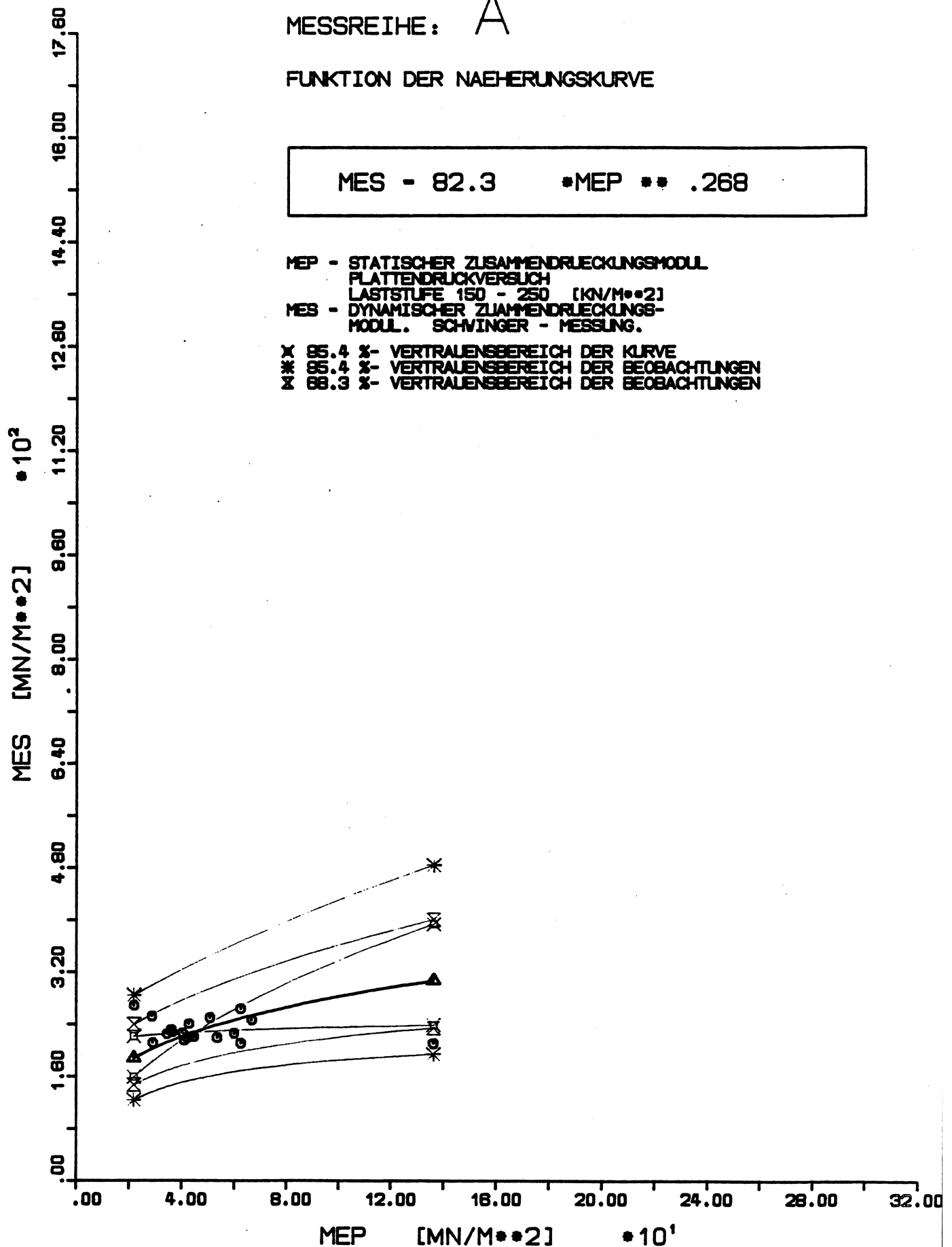
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M••2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE

* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN

X 99.9 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE: B

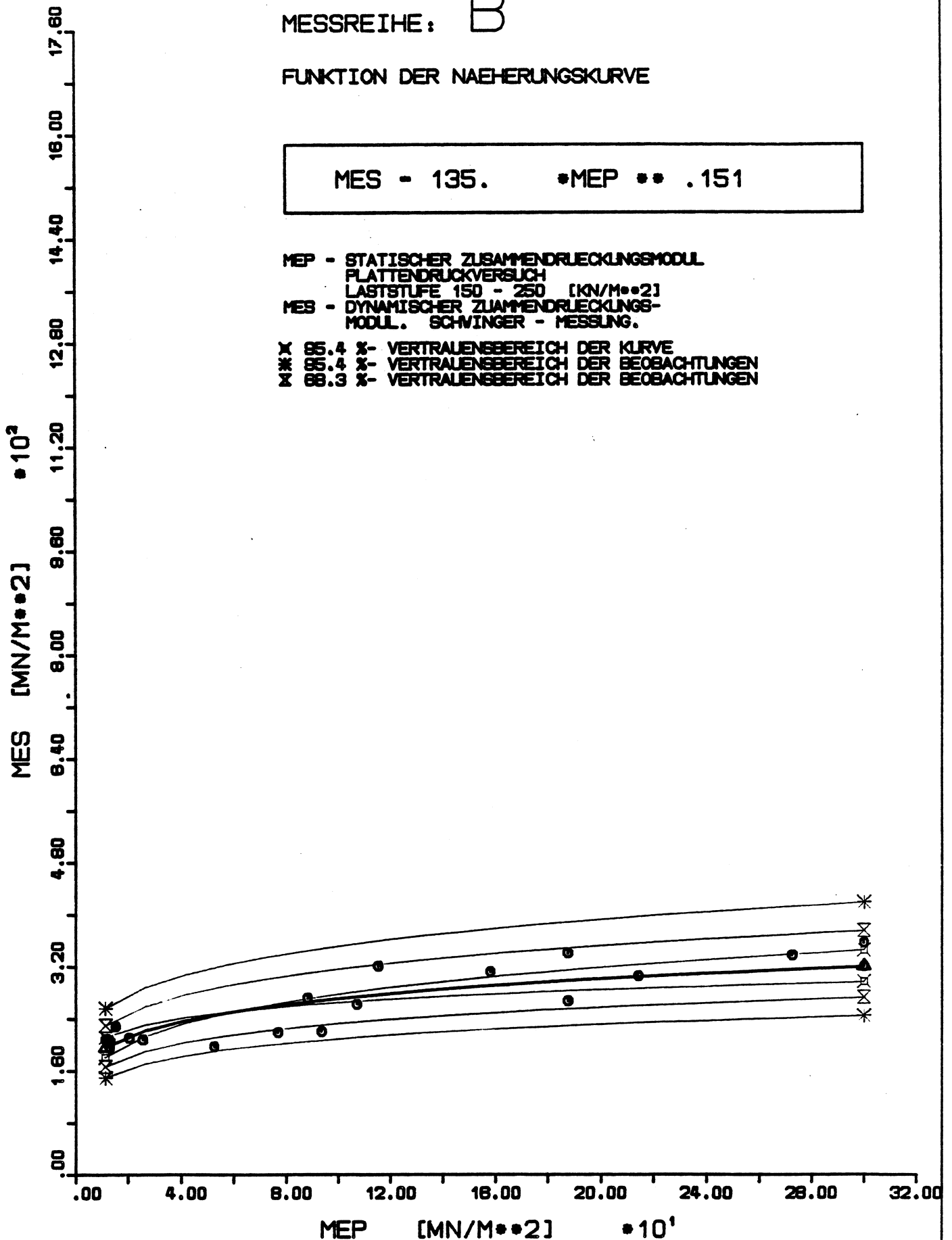
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 135. *MEP ** .151

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
MODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN
x 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE: C

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

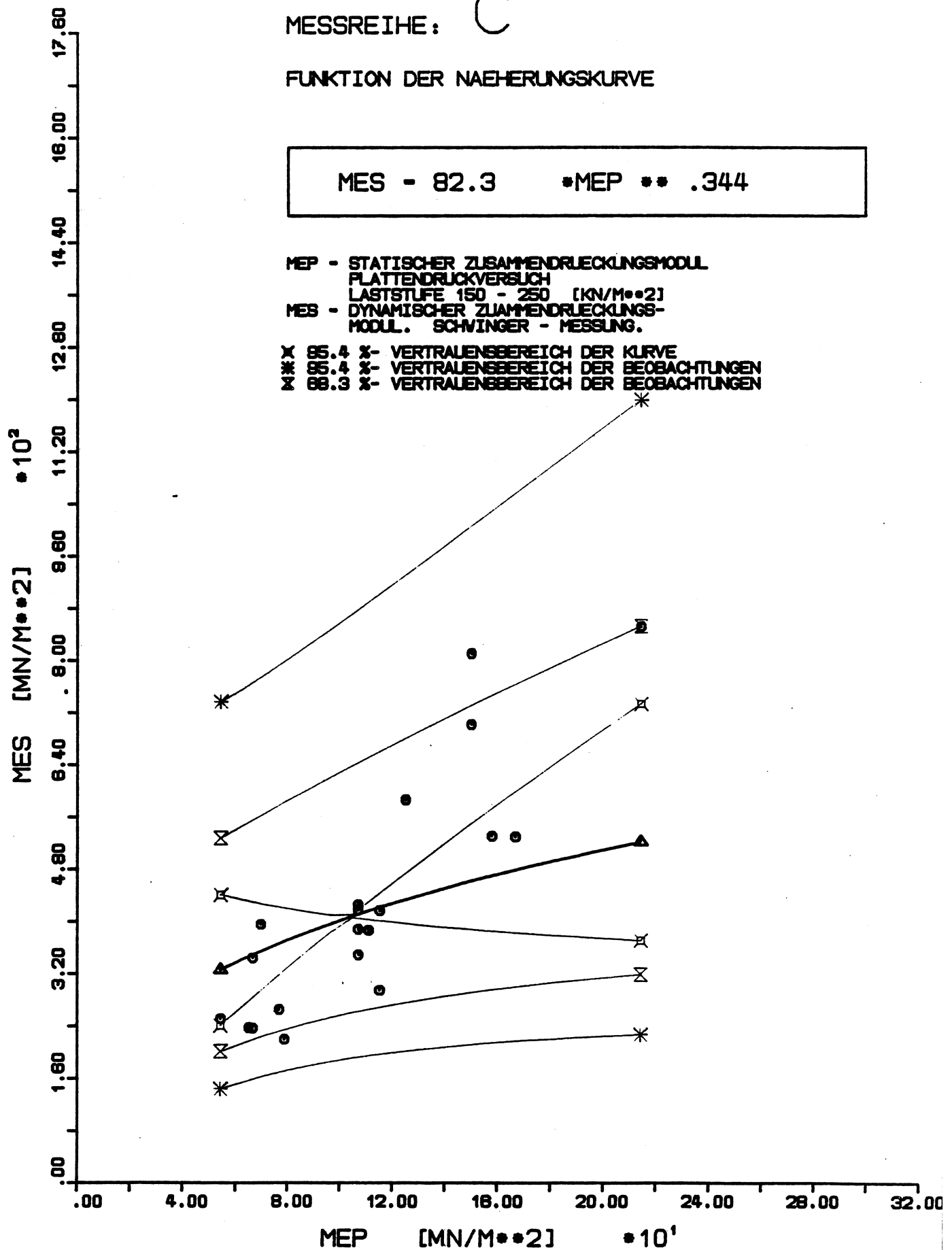
MES - 82.3

•MEP •• .344

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M²]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
 x 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



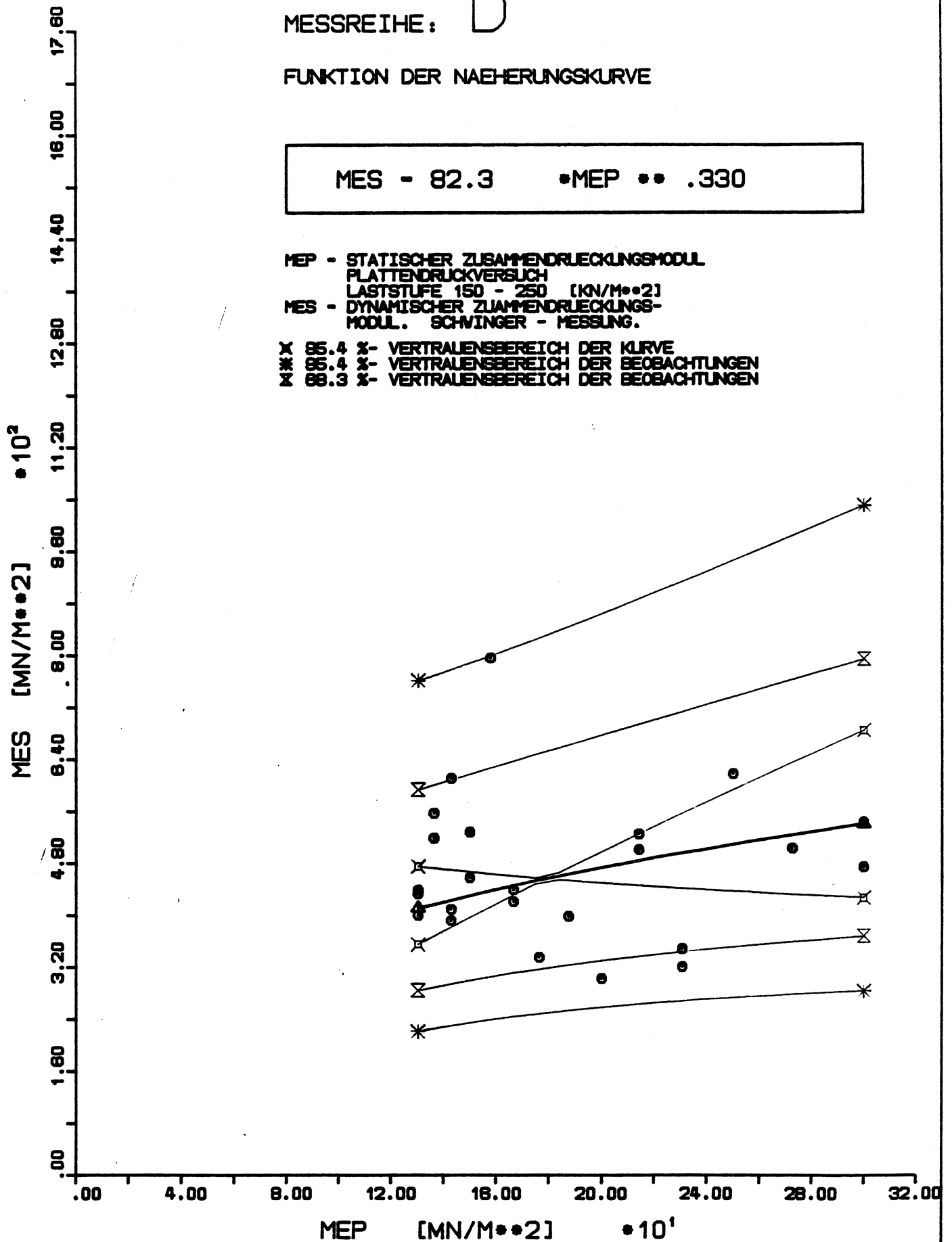
MESSREIHE: D

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3 •MEP •• .330

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
X 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: E

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3 *MEP ** .208

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

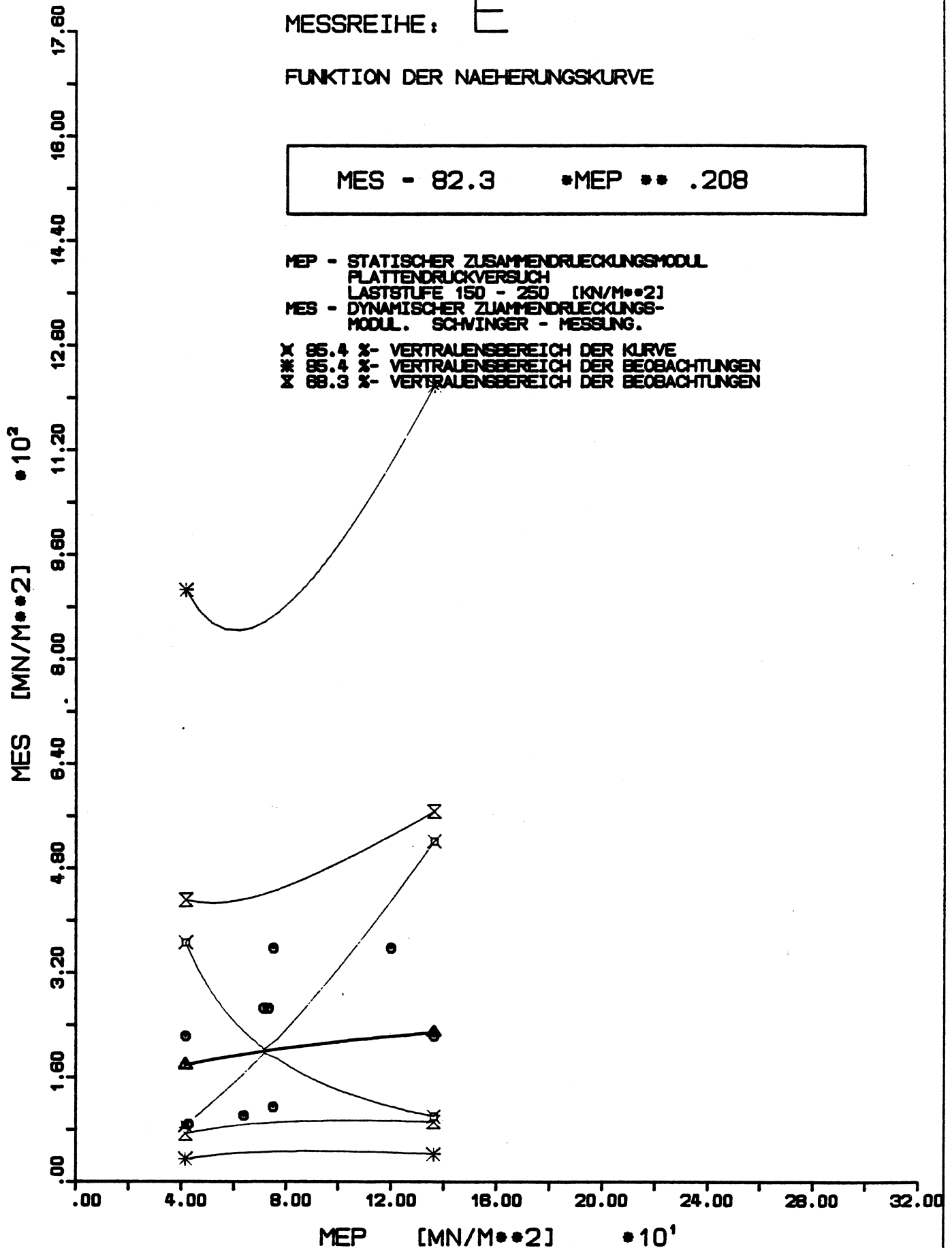
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE

* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN

X 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: F

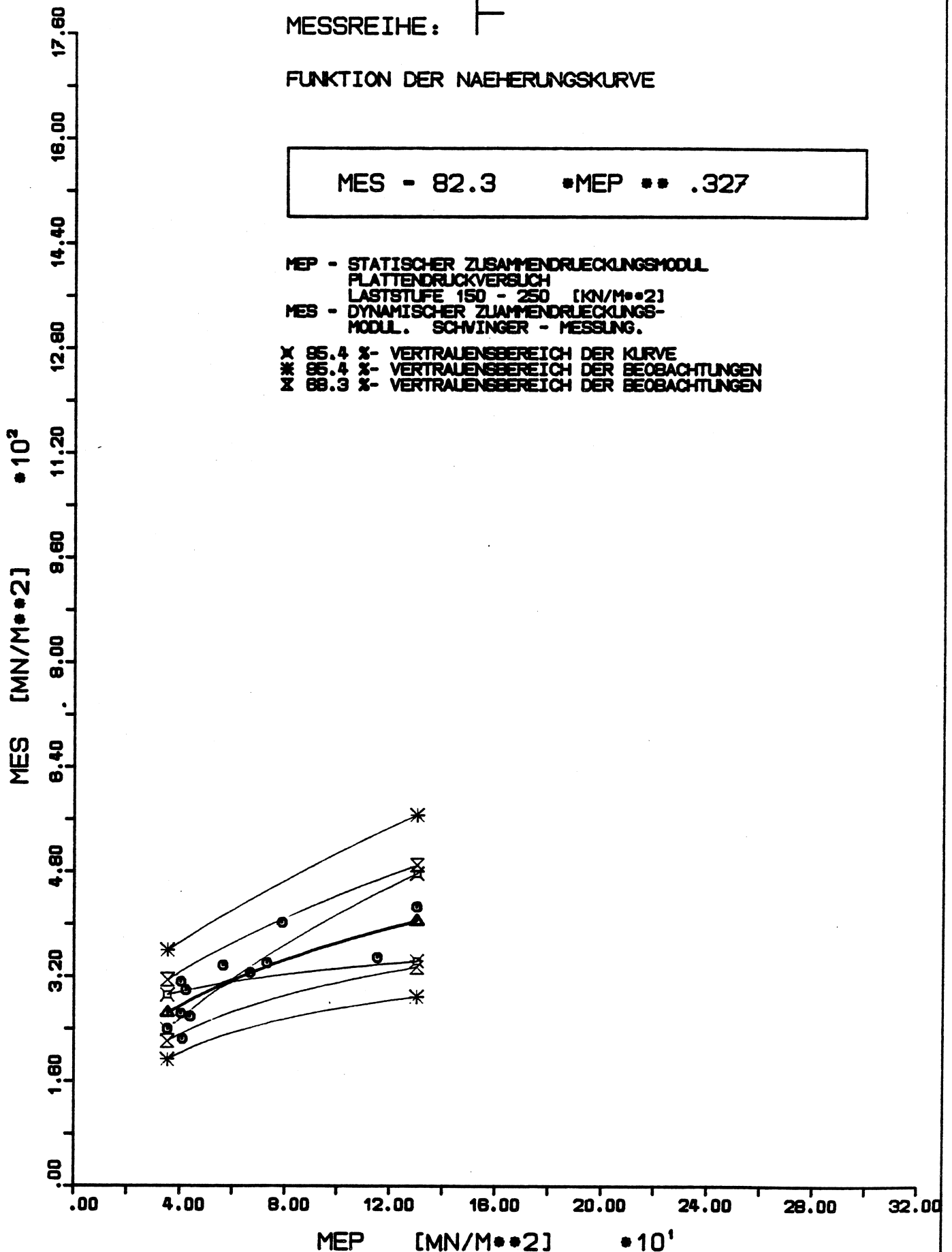
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3	•MEP •• .327
------------	--------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M²]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
 x 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: G

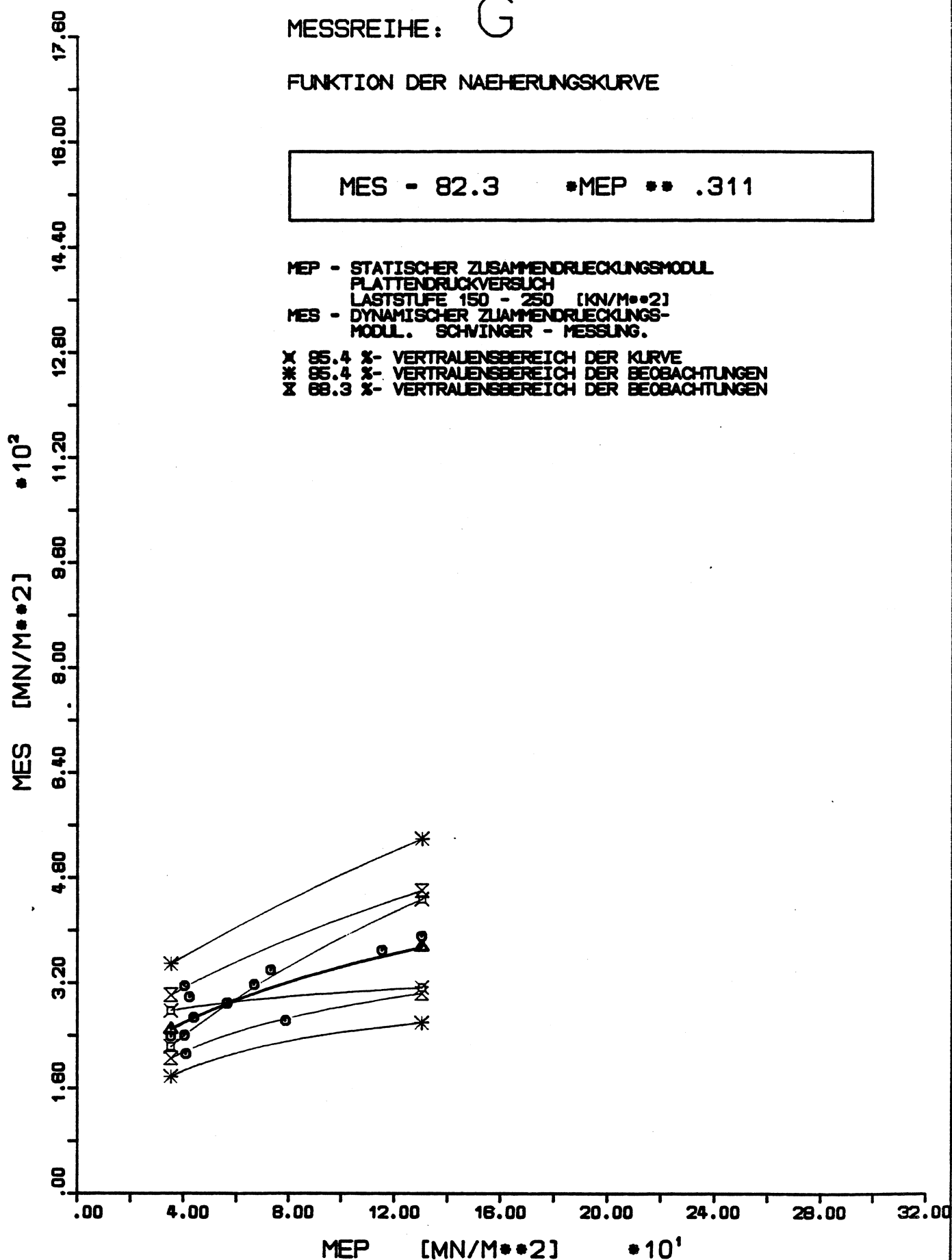
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3	*MEP ** .311
------------	--------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGS-
MODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
x 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: H

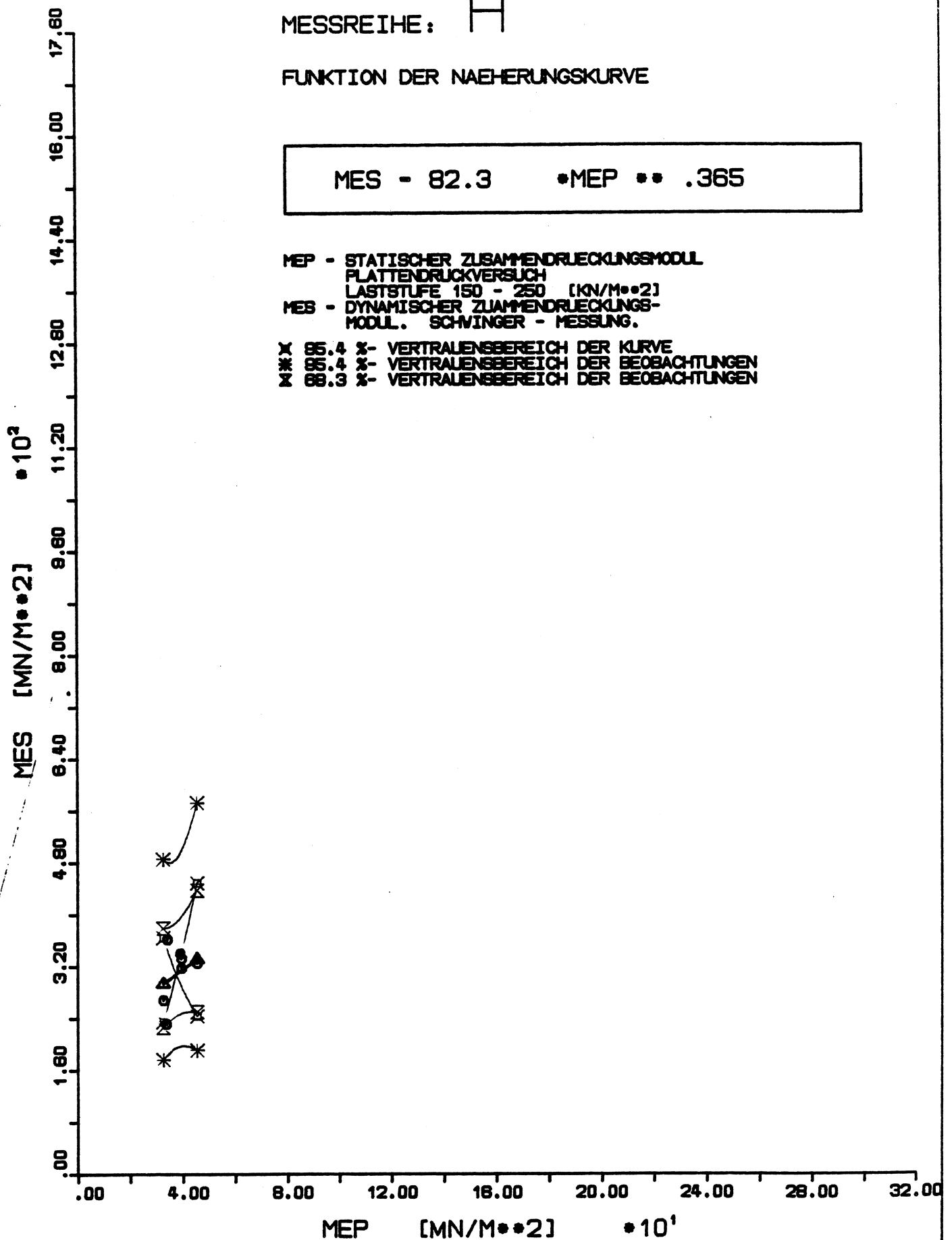
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3	• MEP •• .365
------------	---------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M••2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

x 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
 x 66.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: I

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3	• MEP •• .318
------------	---------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

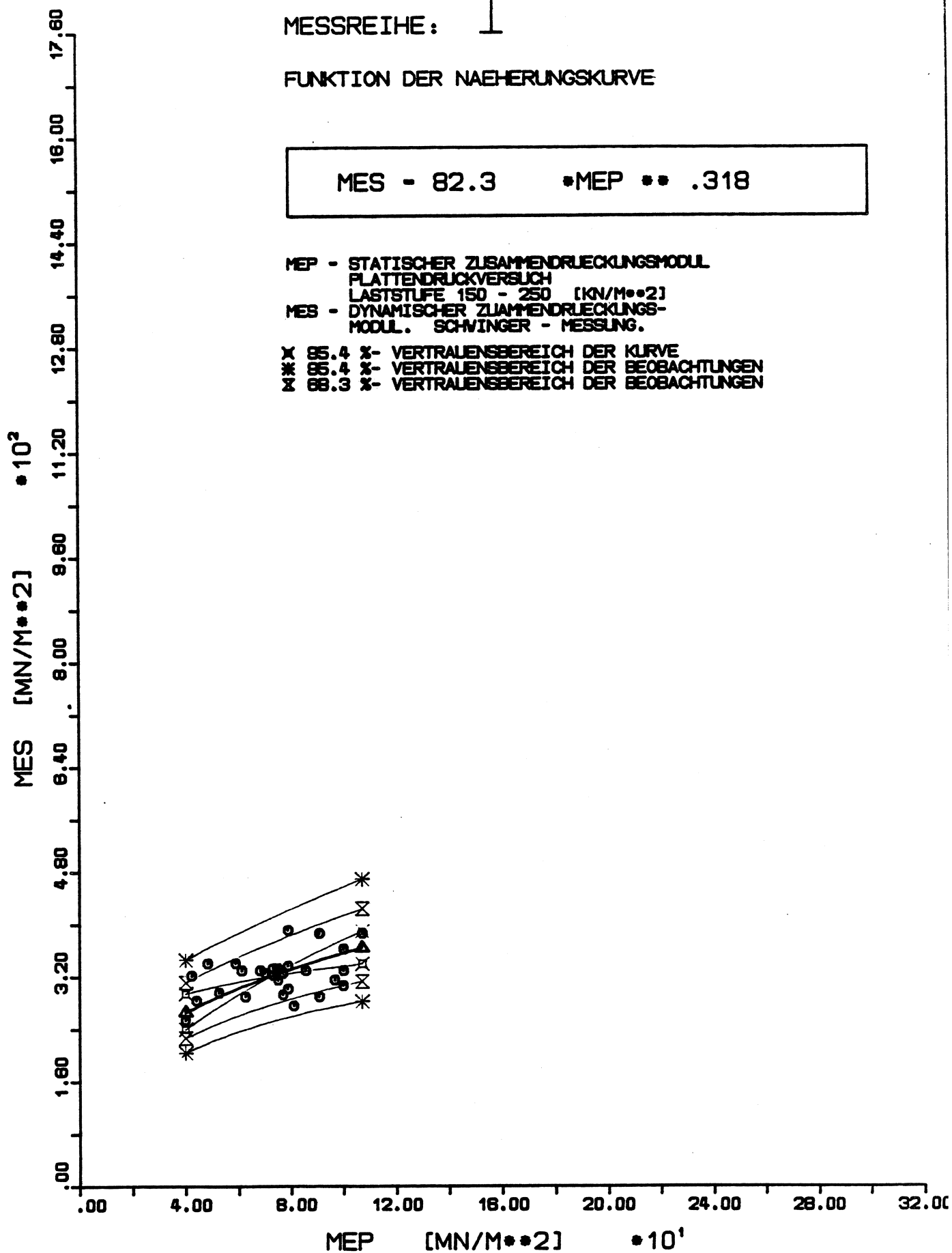
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M²]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE

* 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN

Σ 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE:

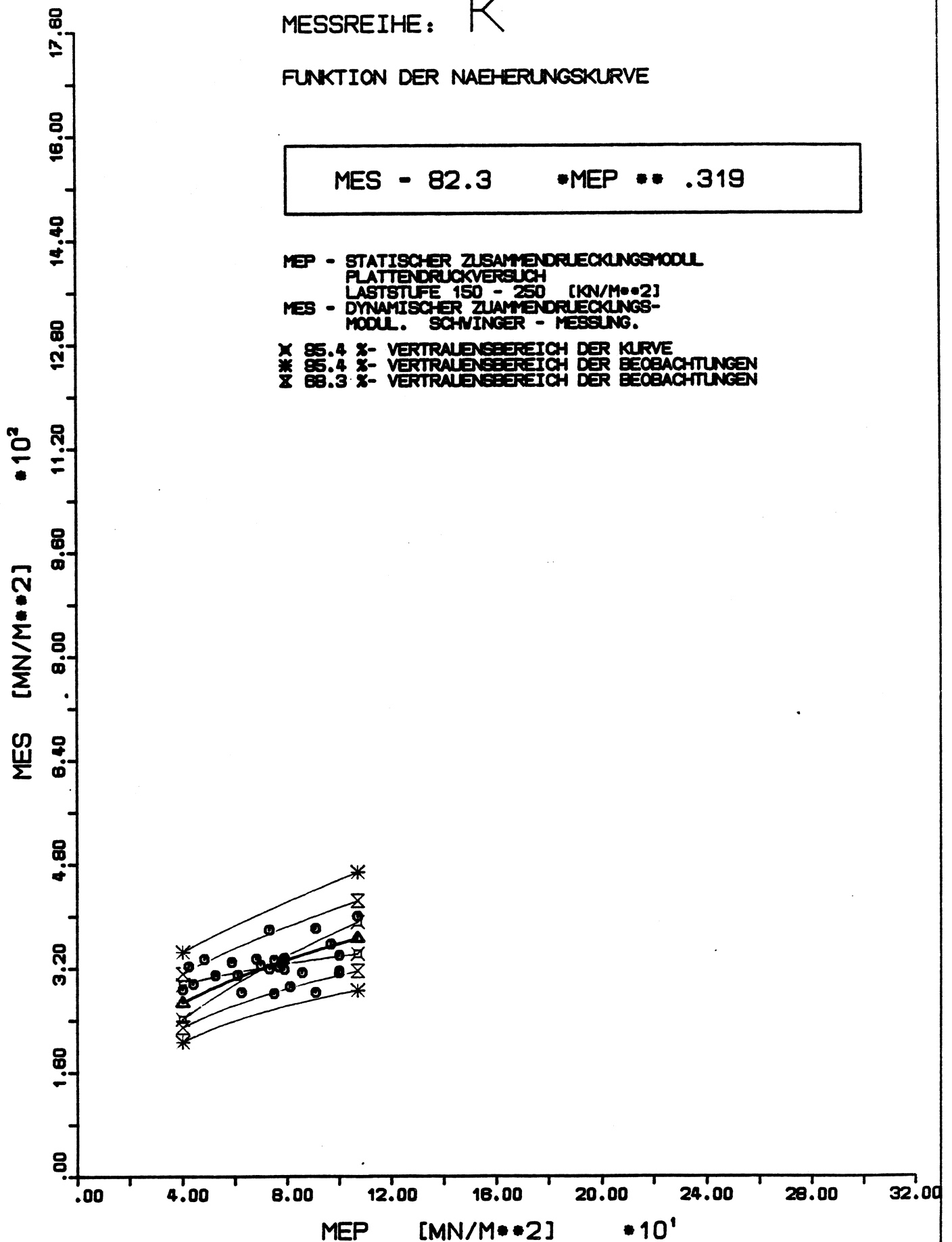
K

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3	•MEP •• .319
------------	--------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 (KN/M**2)
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

x 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN
 x 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE: L

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

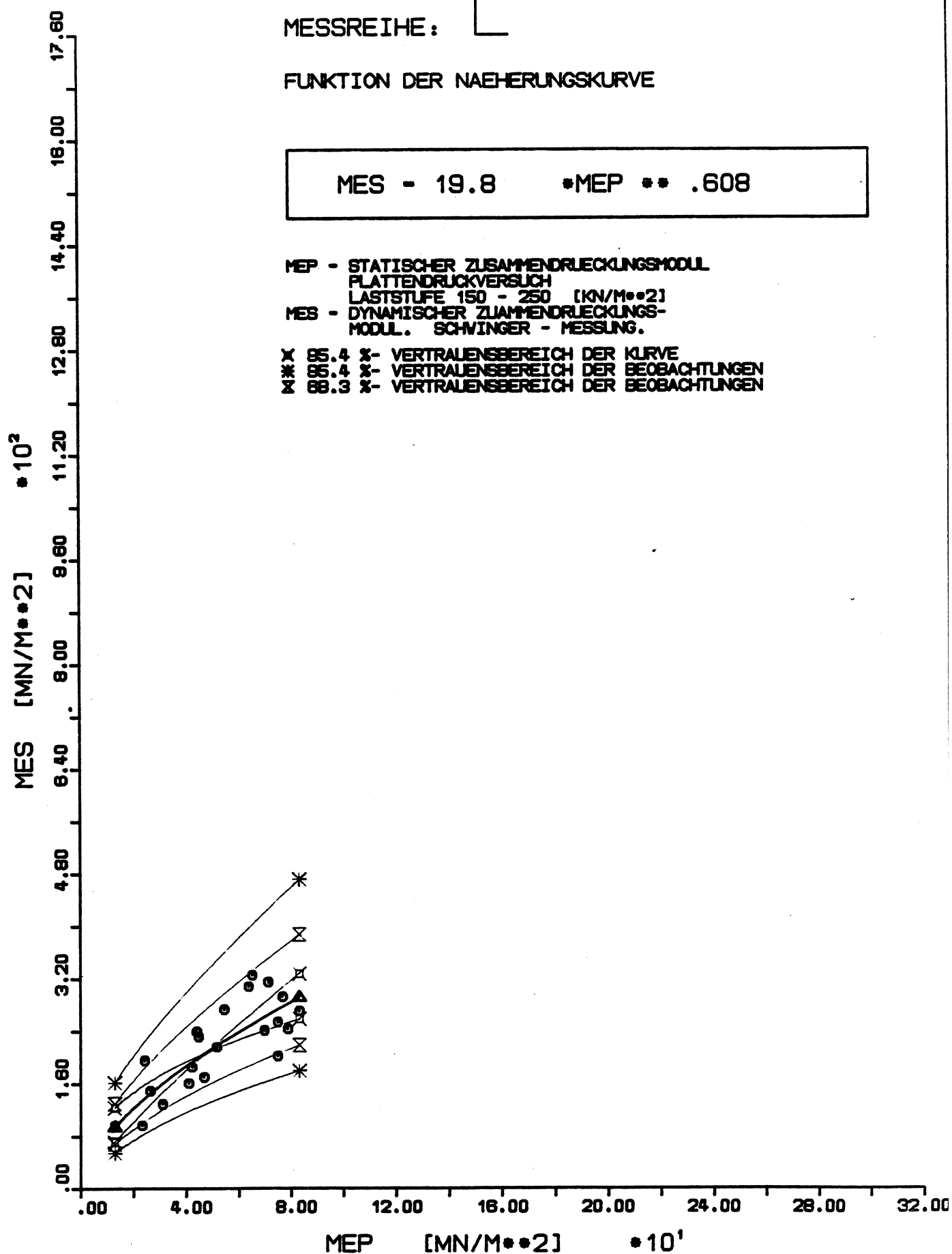
MES - 19.8	*MEP ** .608
------------	--------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
x 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: M

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

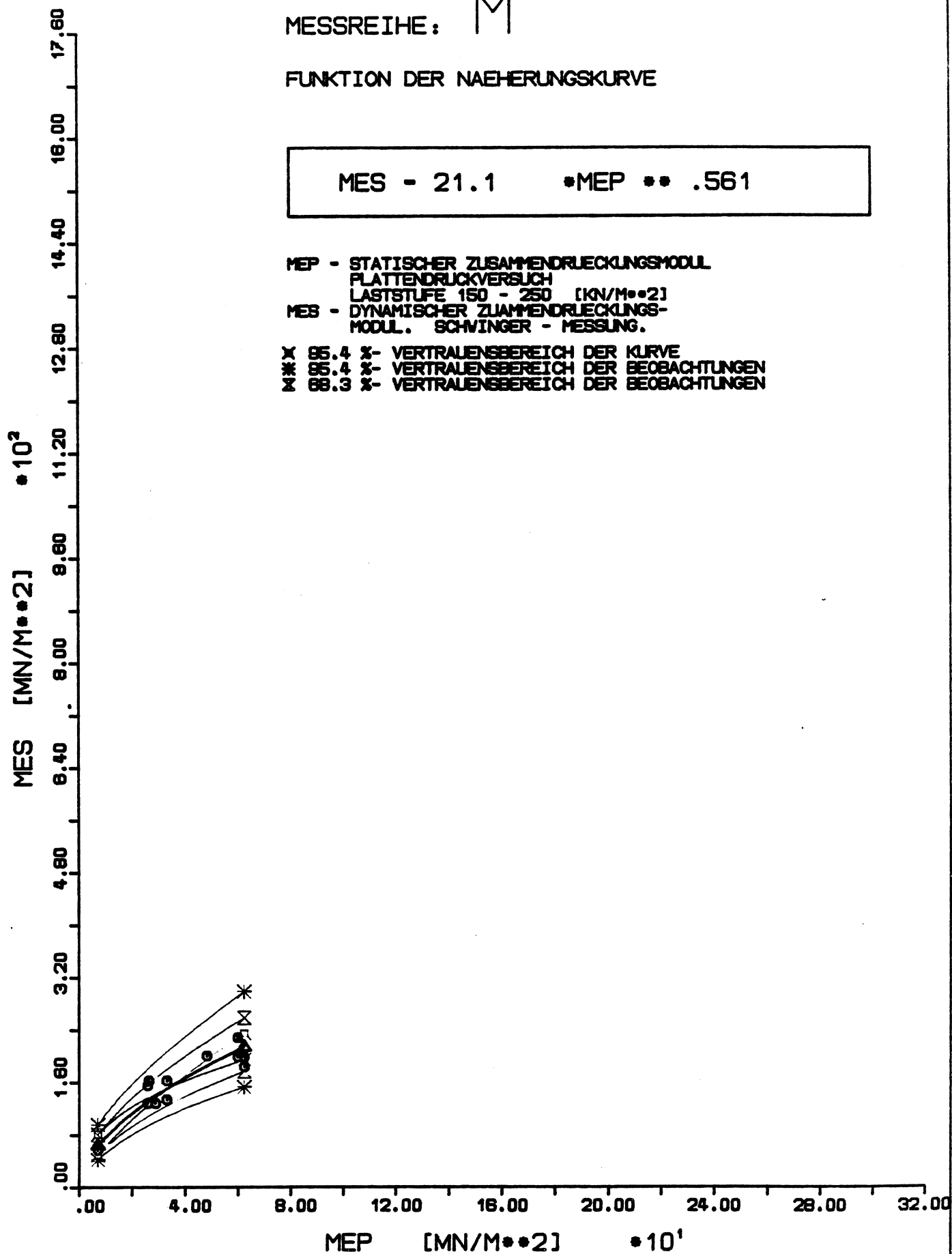
MES - 21.1	•MEP •• .561
------------	--------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
x 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE:

N

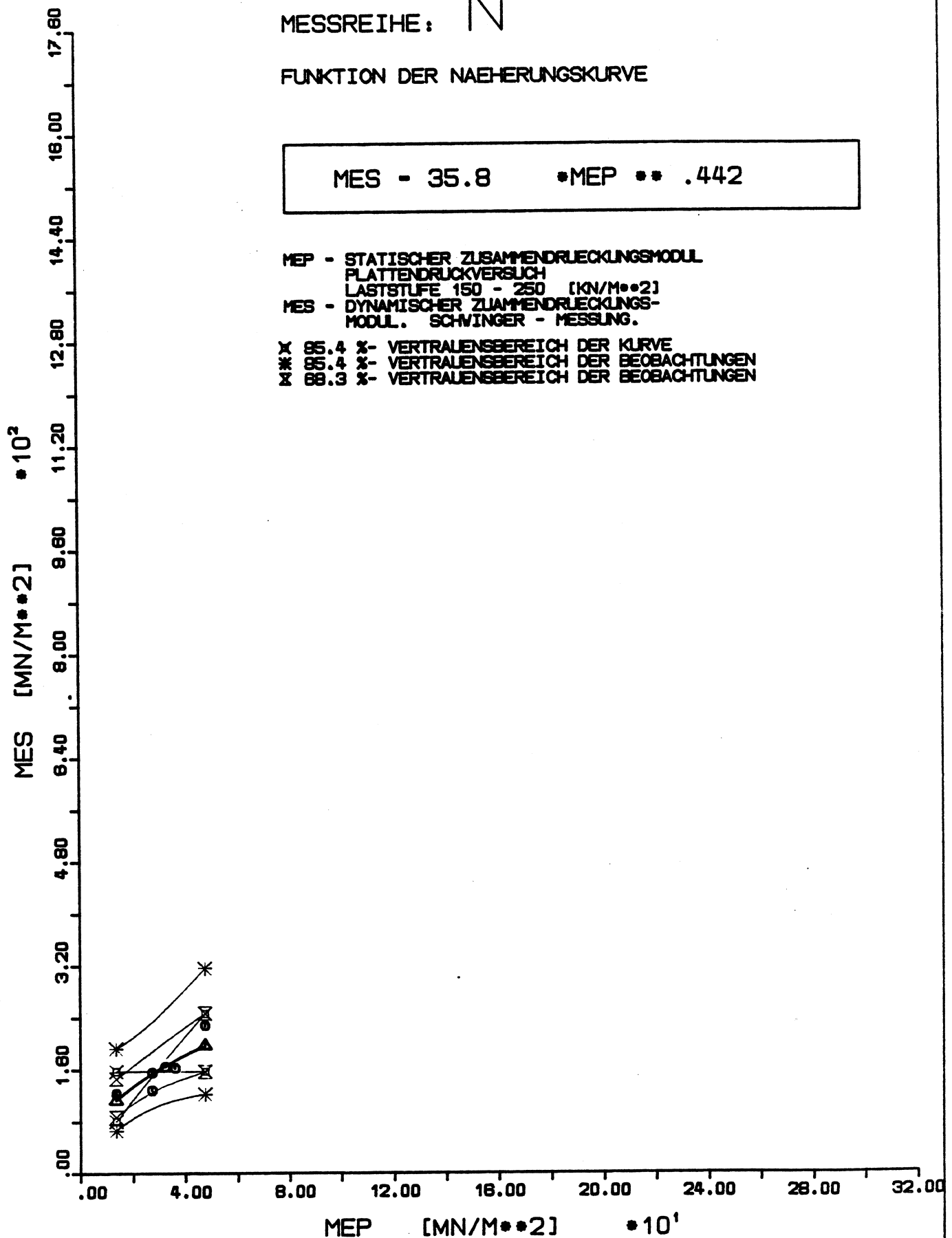
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 35.8

•MEP •• .442

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

x 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
 x 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: 0

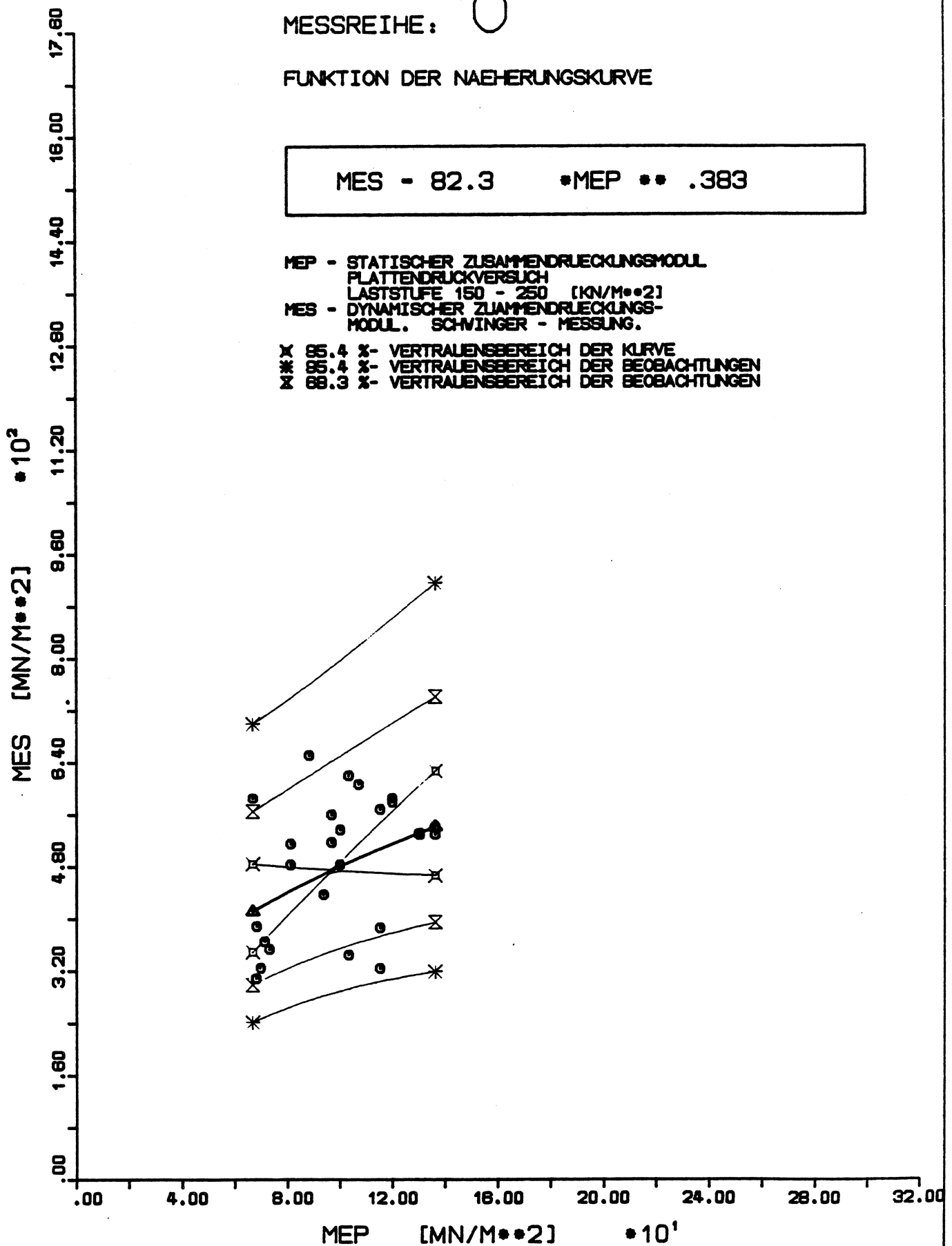
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 82.3

*MEP ** .383

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

x 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
 x 99.9 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: P

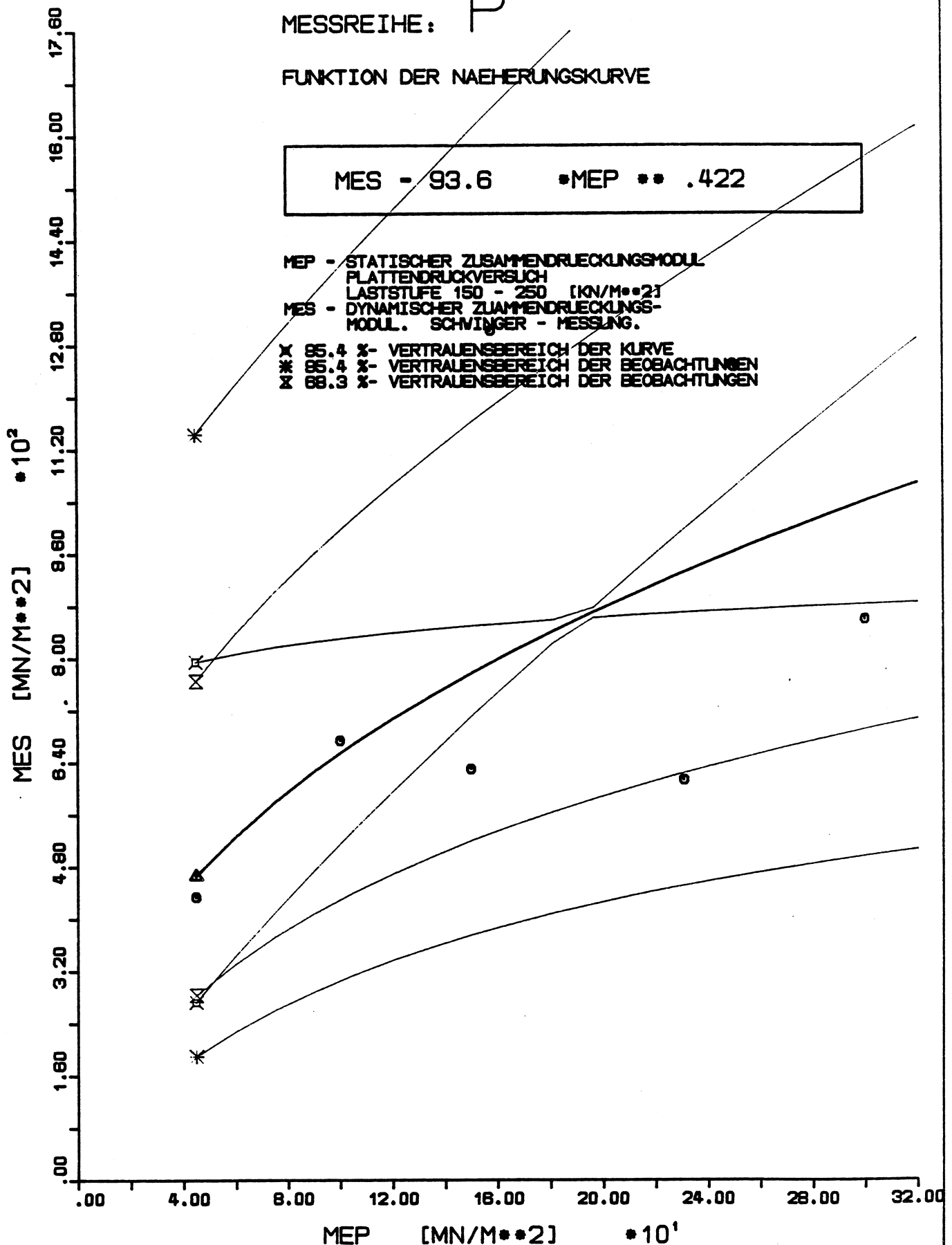
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 93.6 •MEP •• .422

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
X 98.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



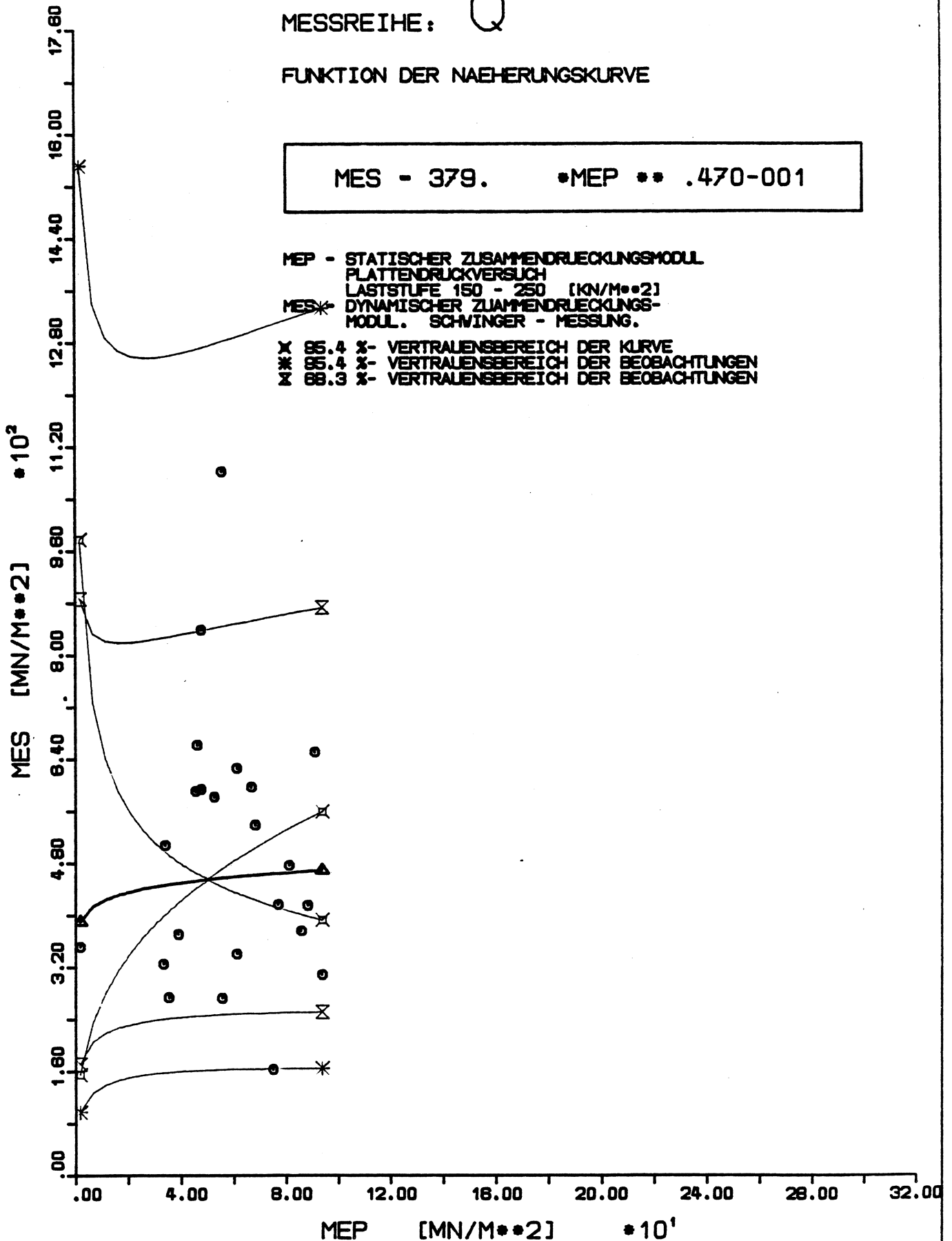
MESSREIHE: Q

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 379. •MEP •• .470-001

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
MES* DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
x 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN

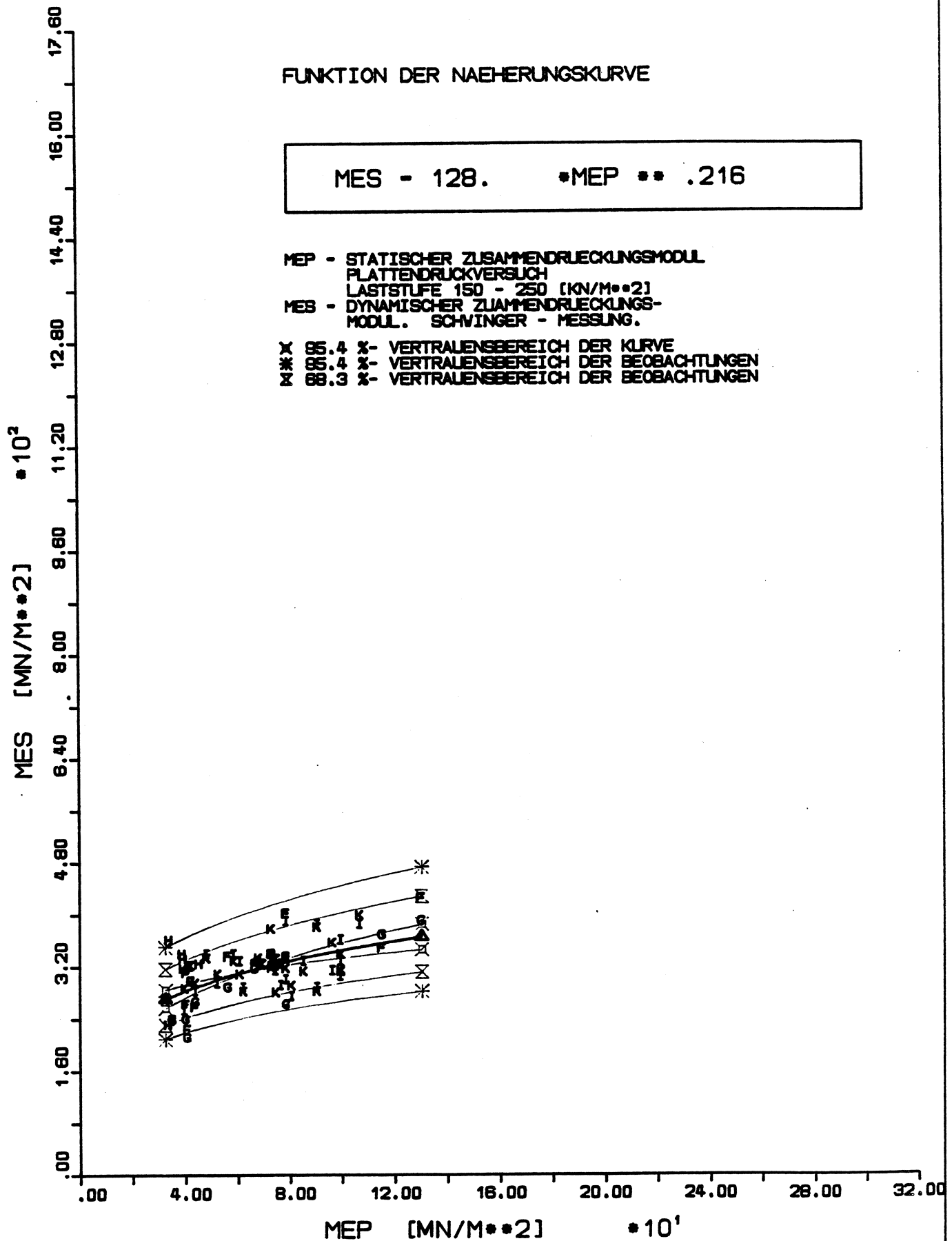


FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 128. *MEP ** .216

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
X 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN

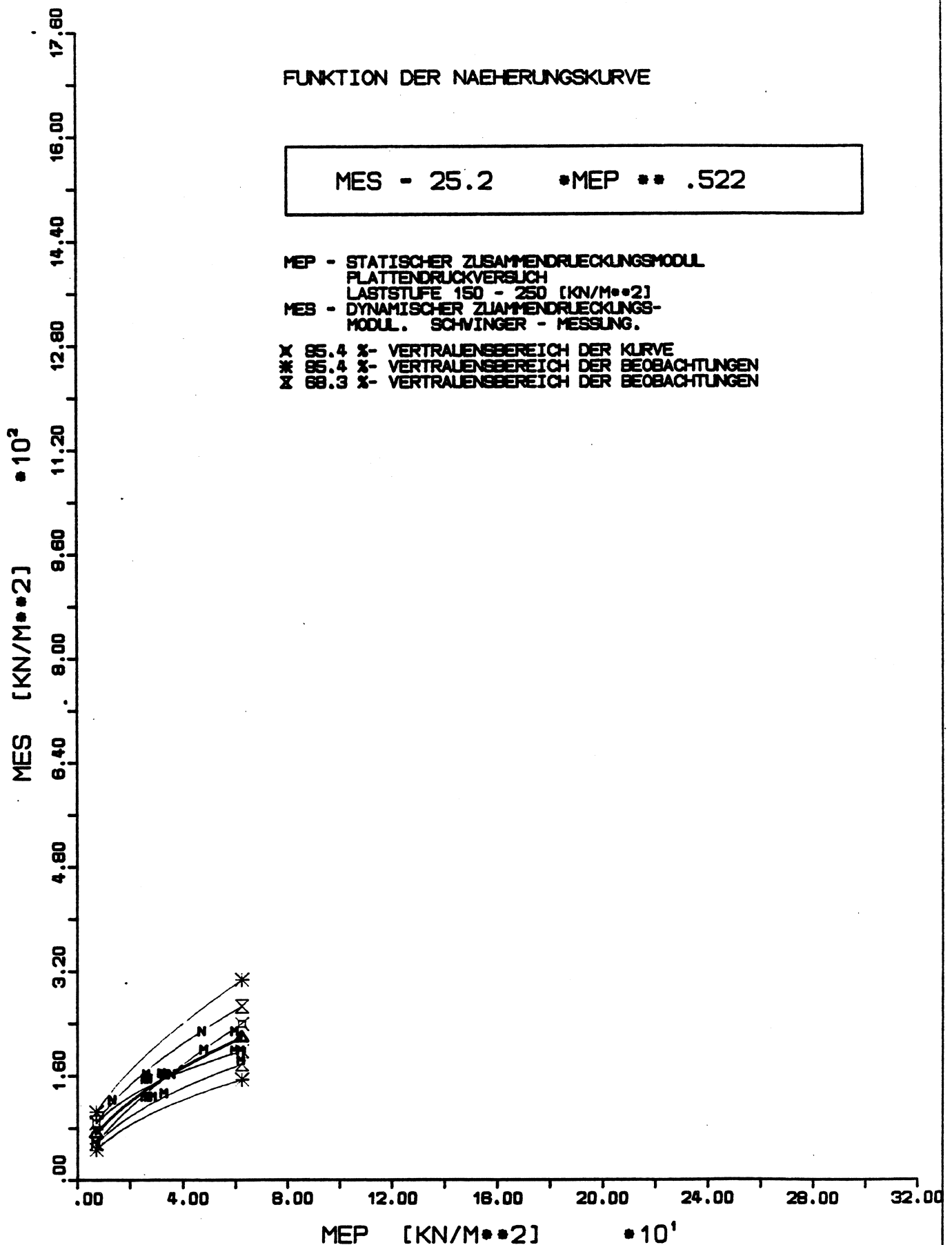


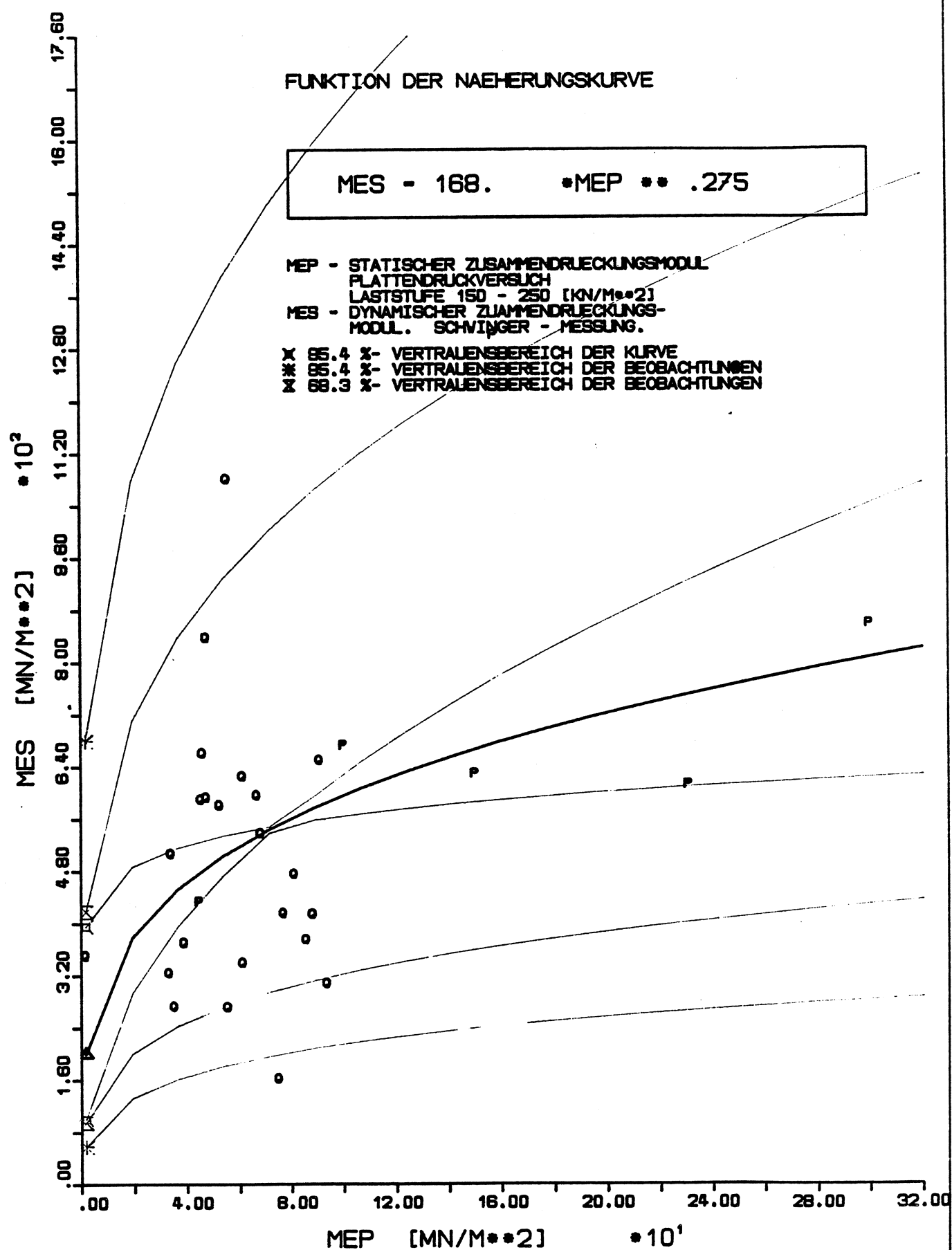
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

$$MES = 25.2 \cdot MEP^{.522}$$

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M²]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
 x 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



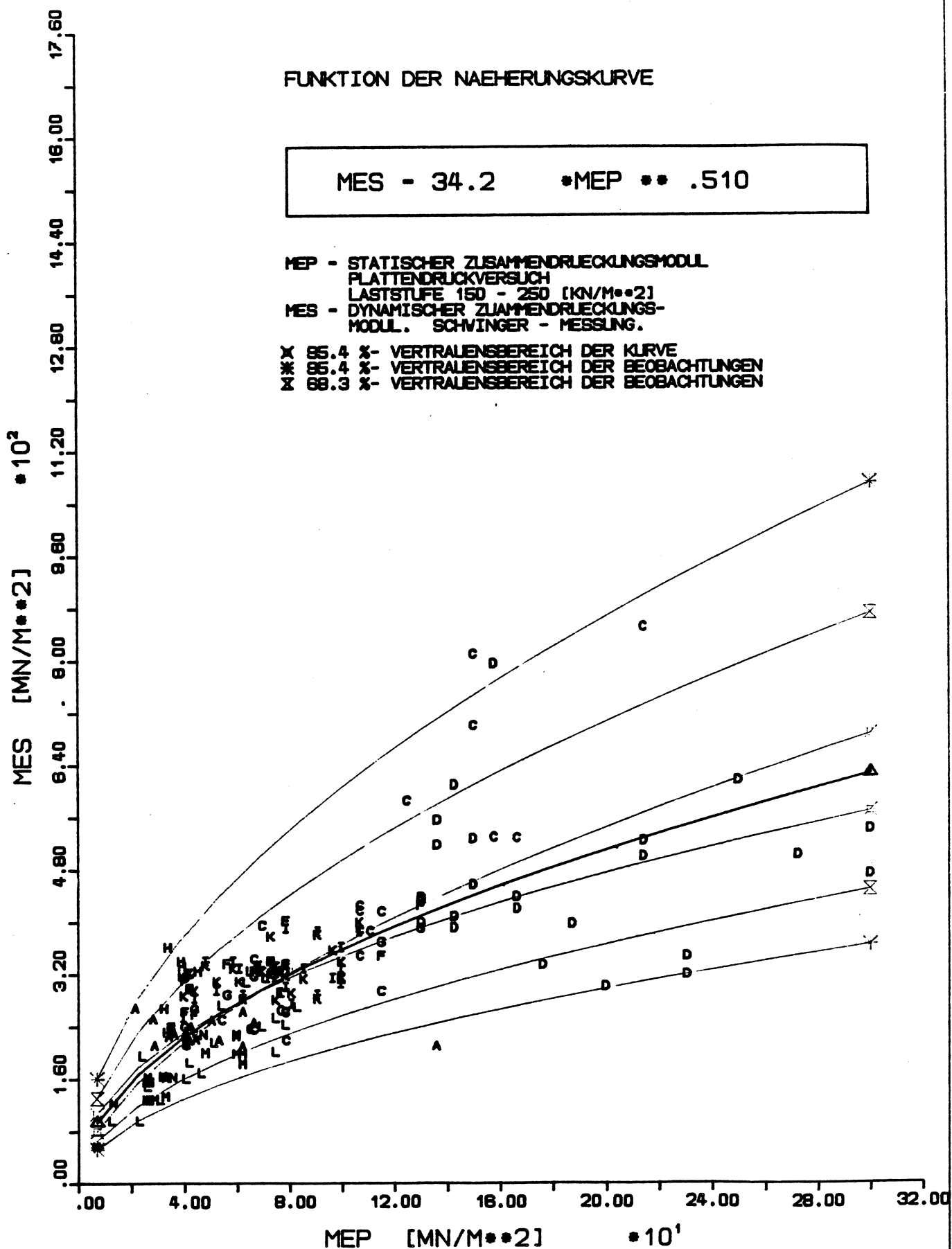


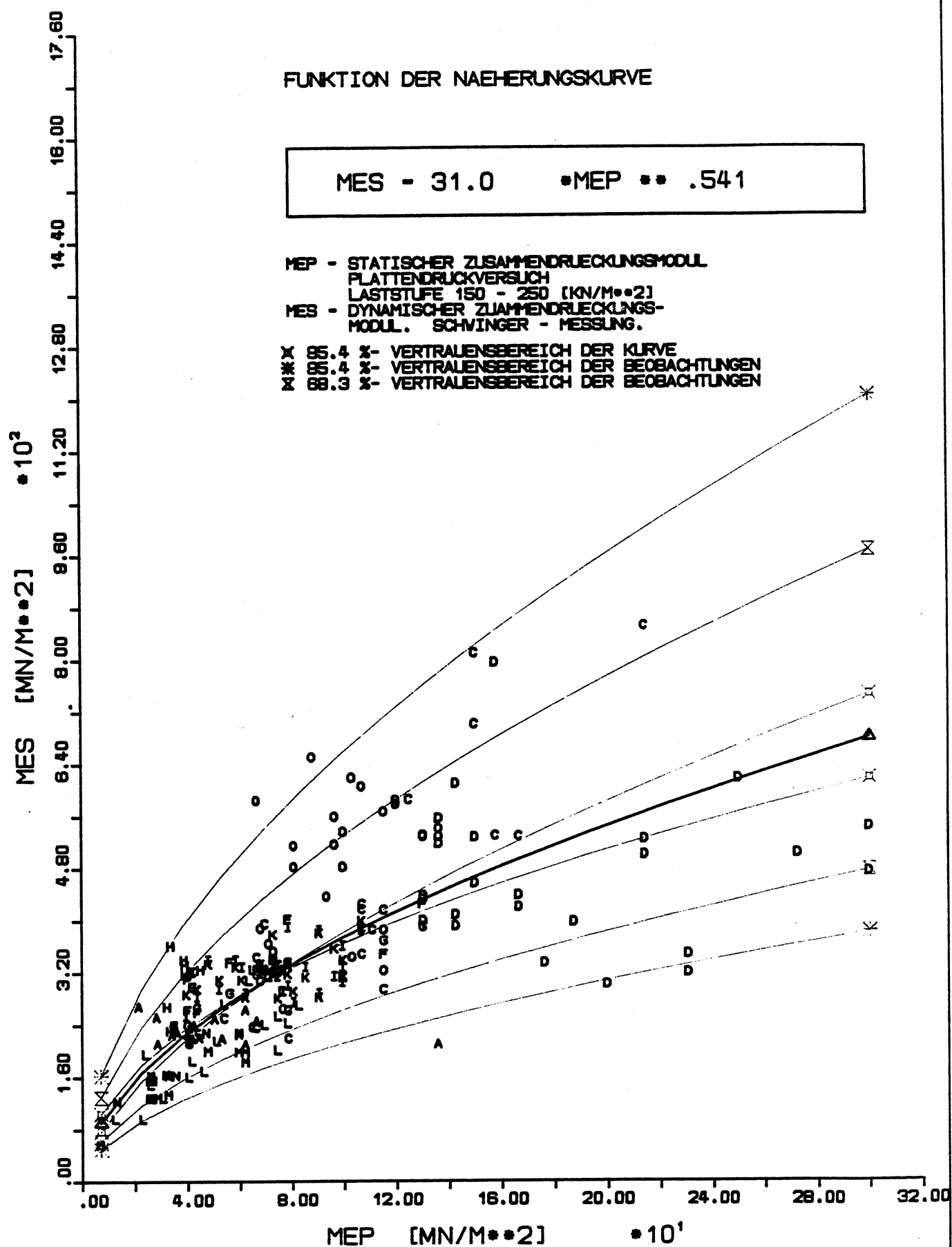
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MES - 34.2 *MEP ** .510

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
 X 98.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN





MESSREIHE: A

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299	•MES •• .922
------------	--------------

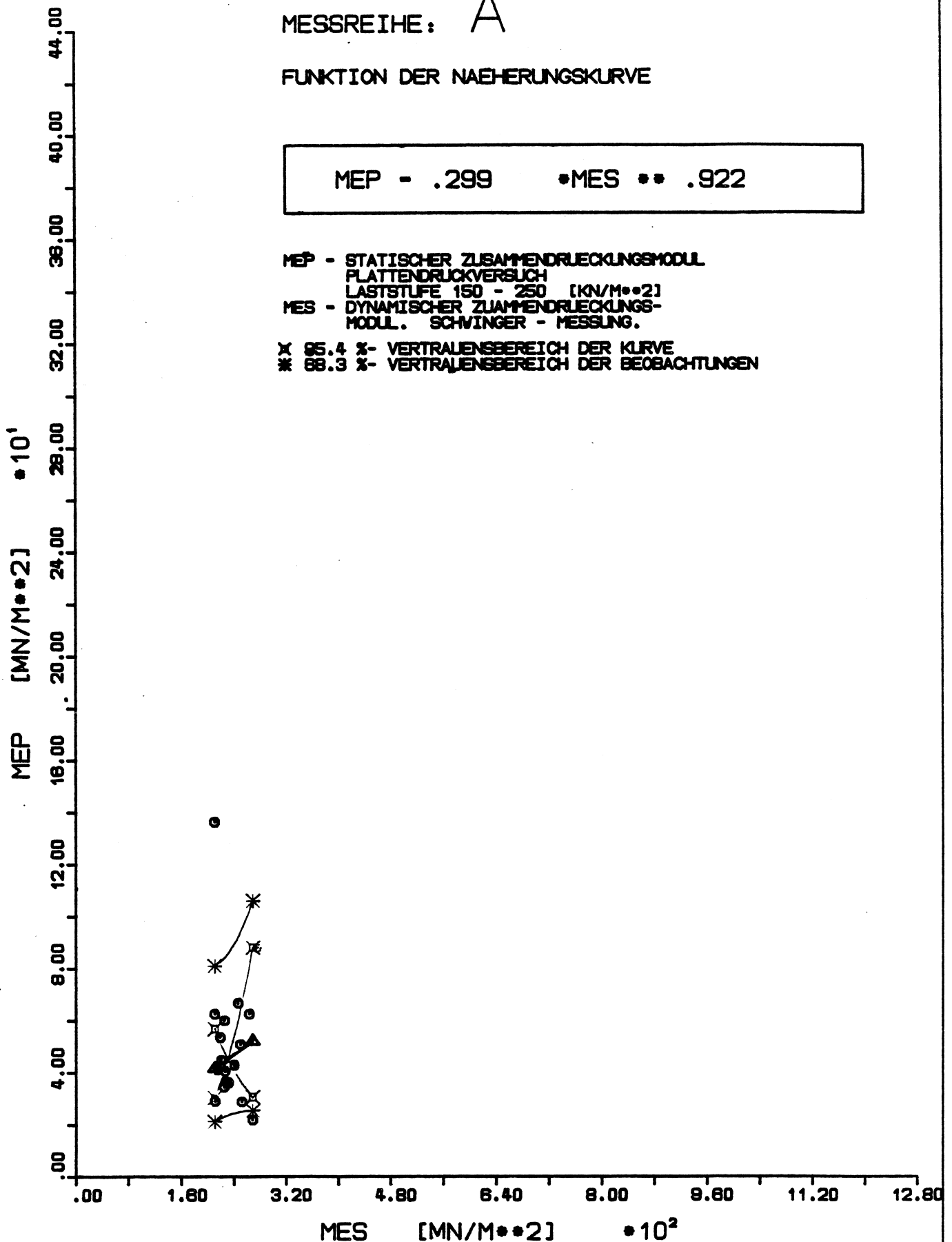
MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

x 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE

* 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE: B

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

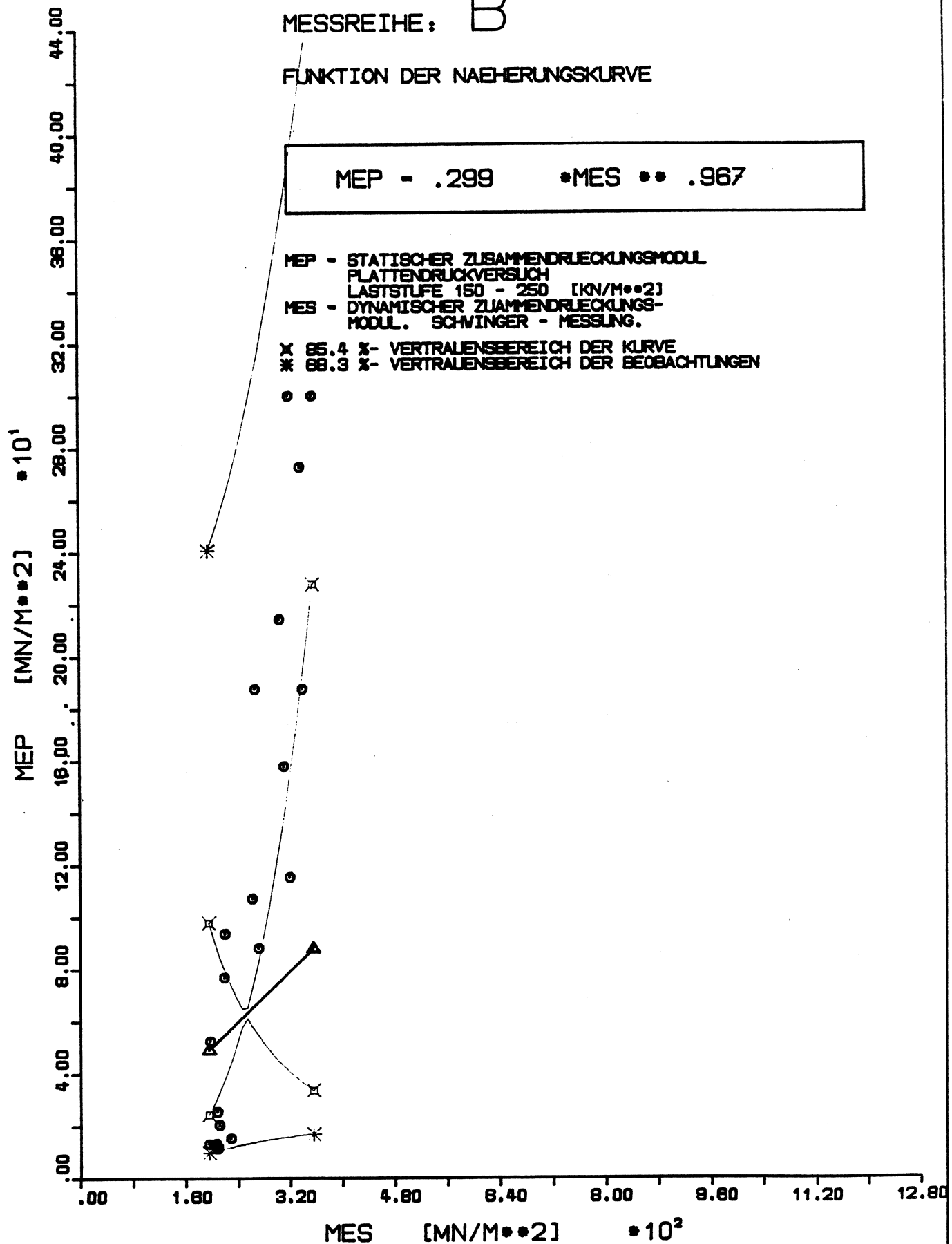
MEP - .299

•MES •• .967

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: C

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299 *MES ** .976

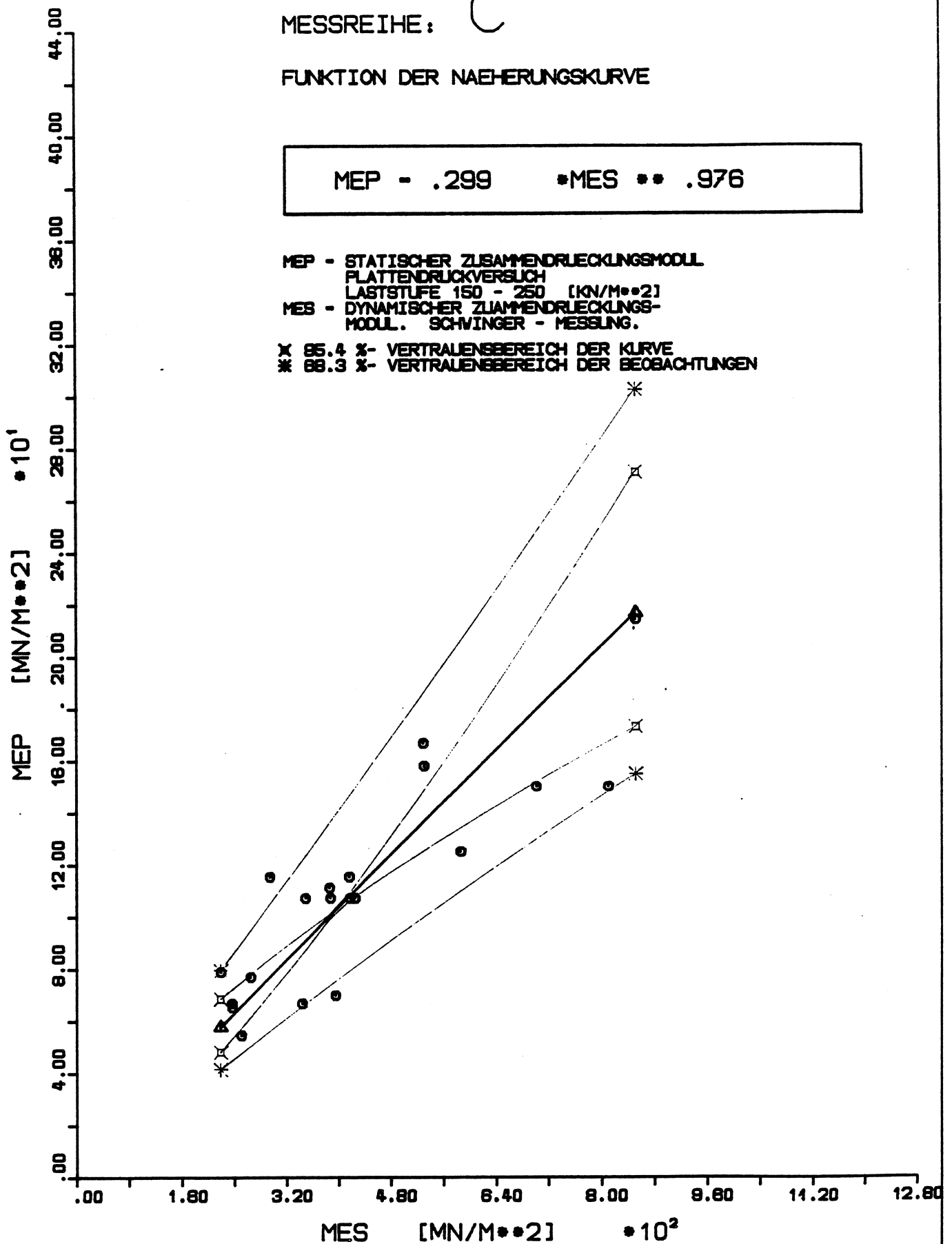
MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

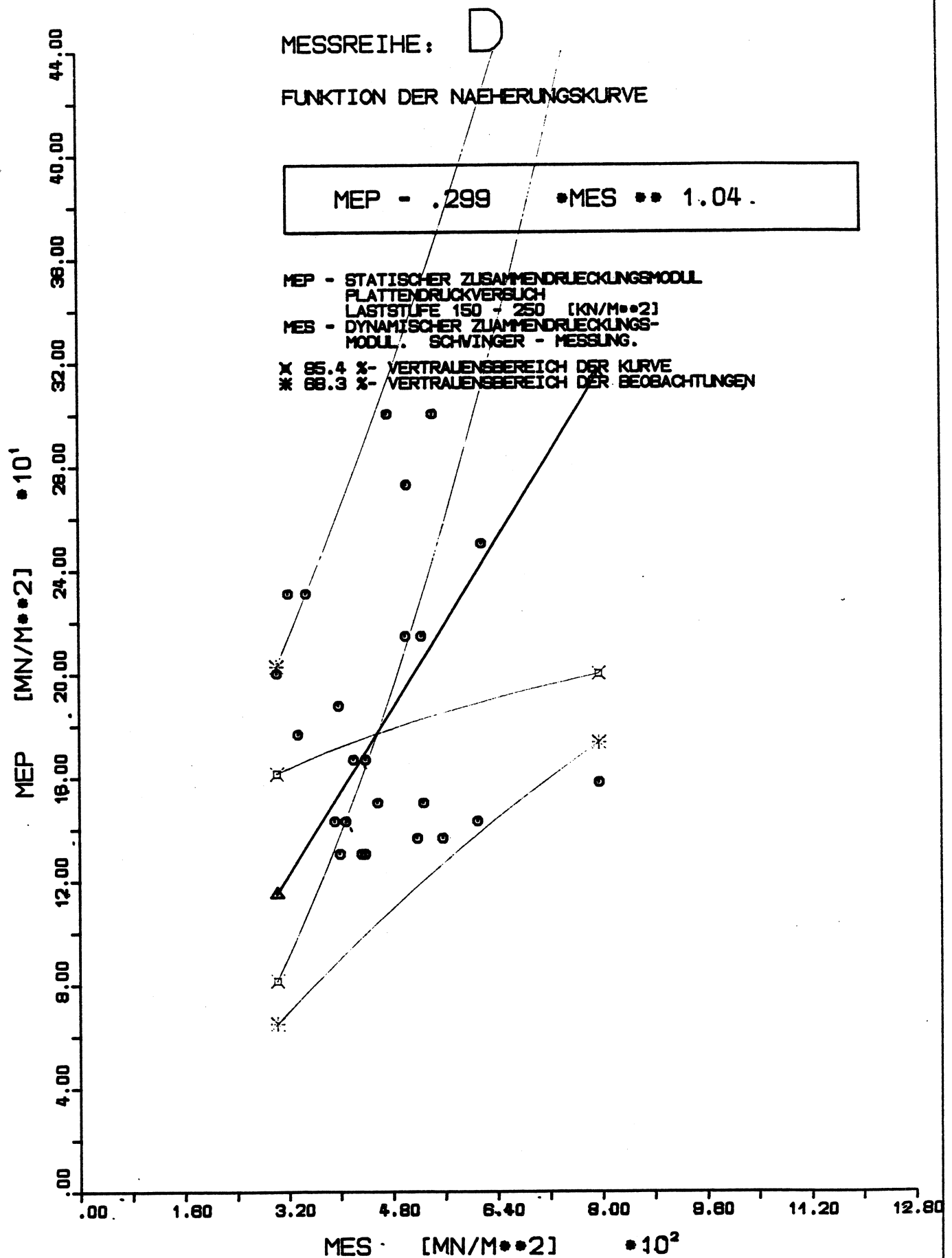
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE

* 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN





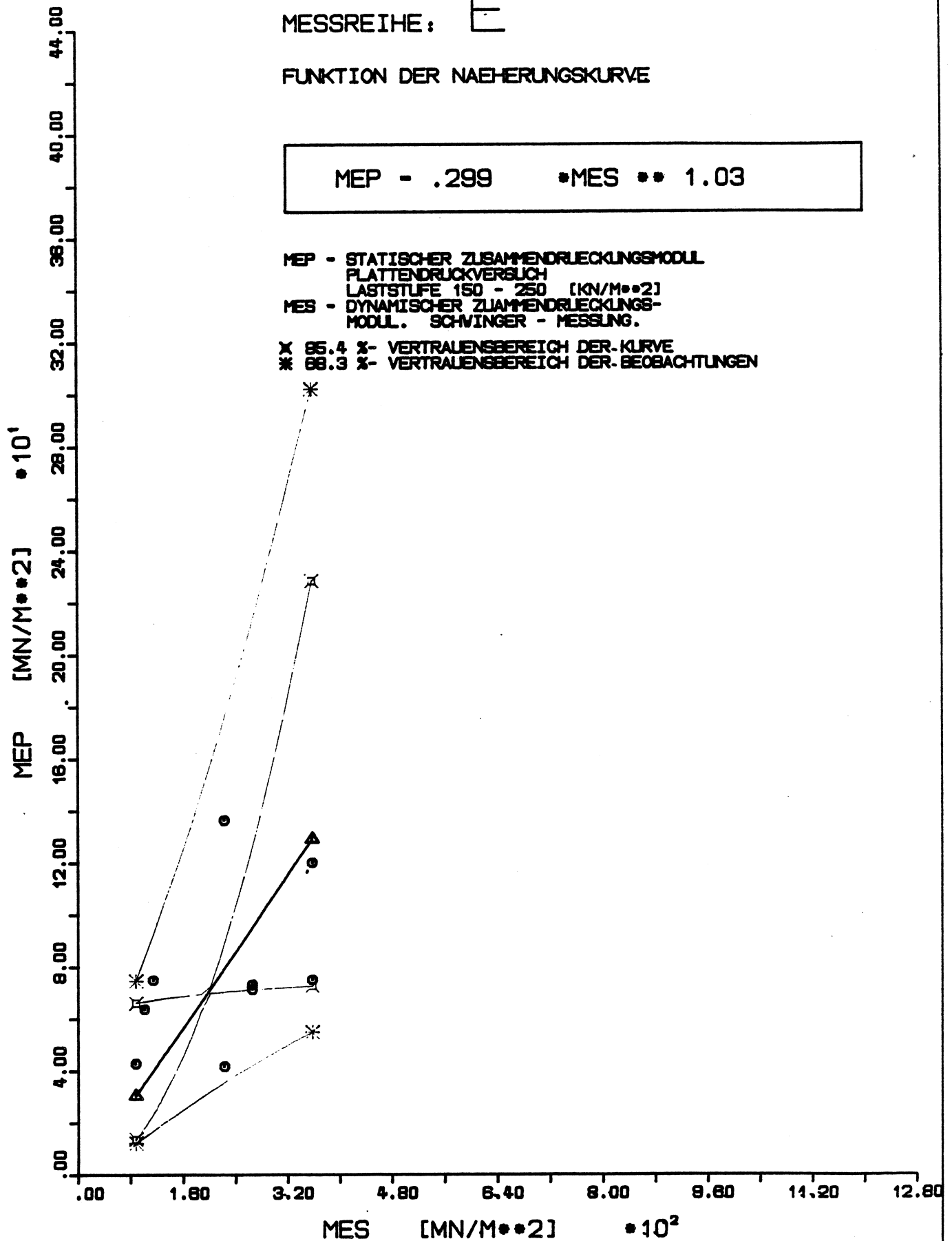
MESSREIHE: E

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299 *MES ** 1.03

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: F

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

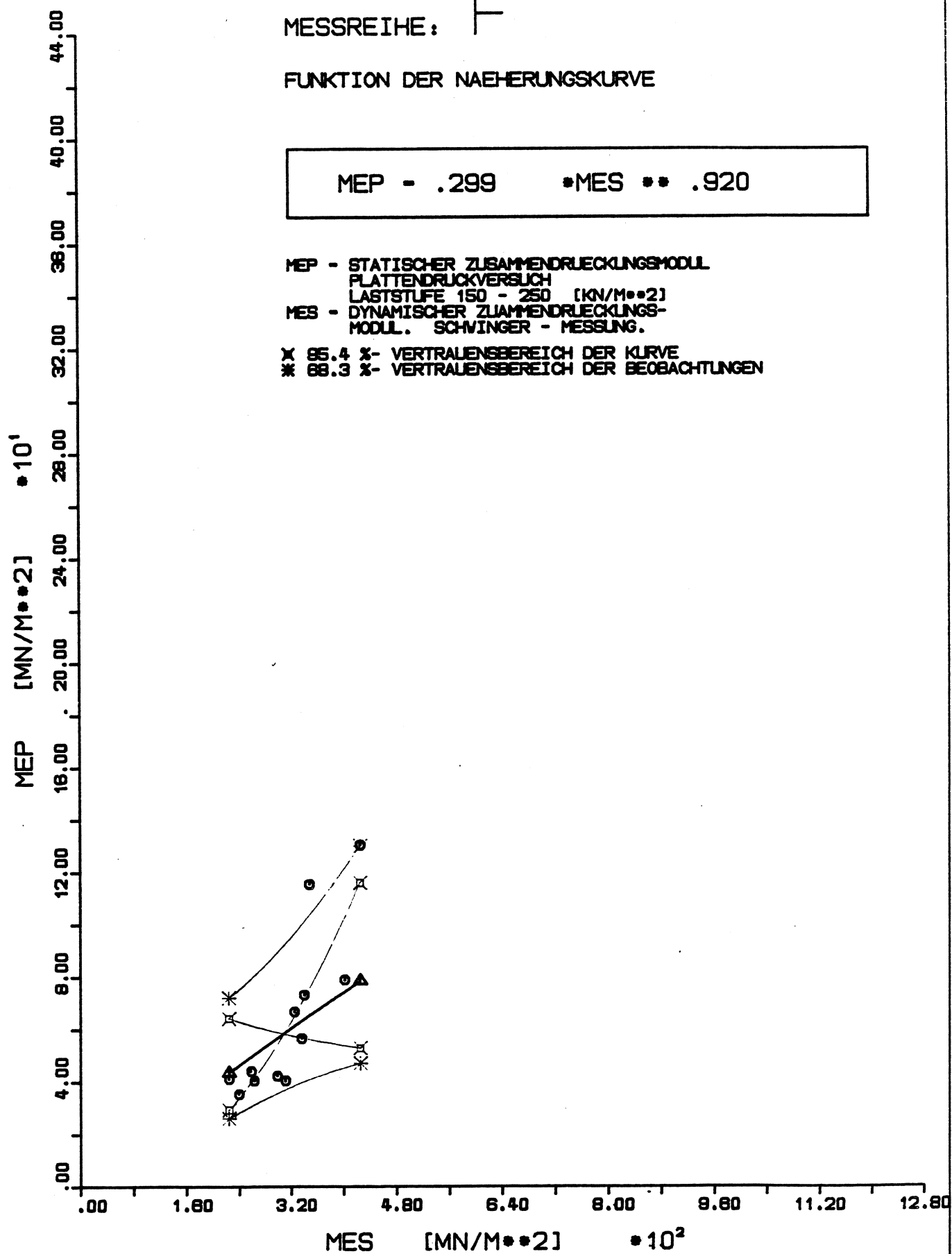
MEP - .299

*MES ** .920

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: G

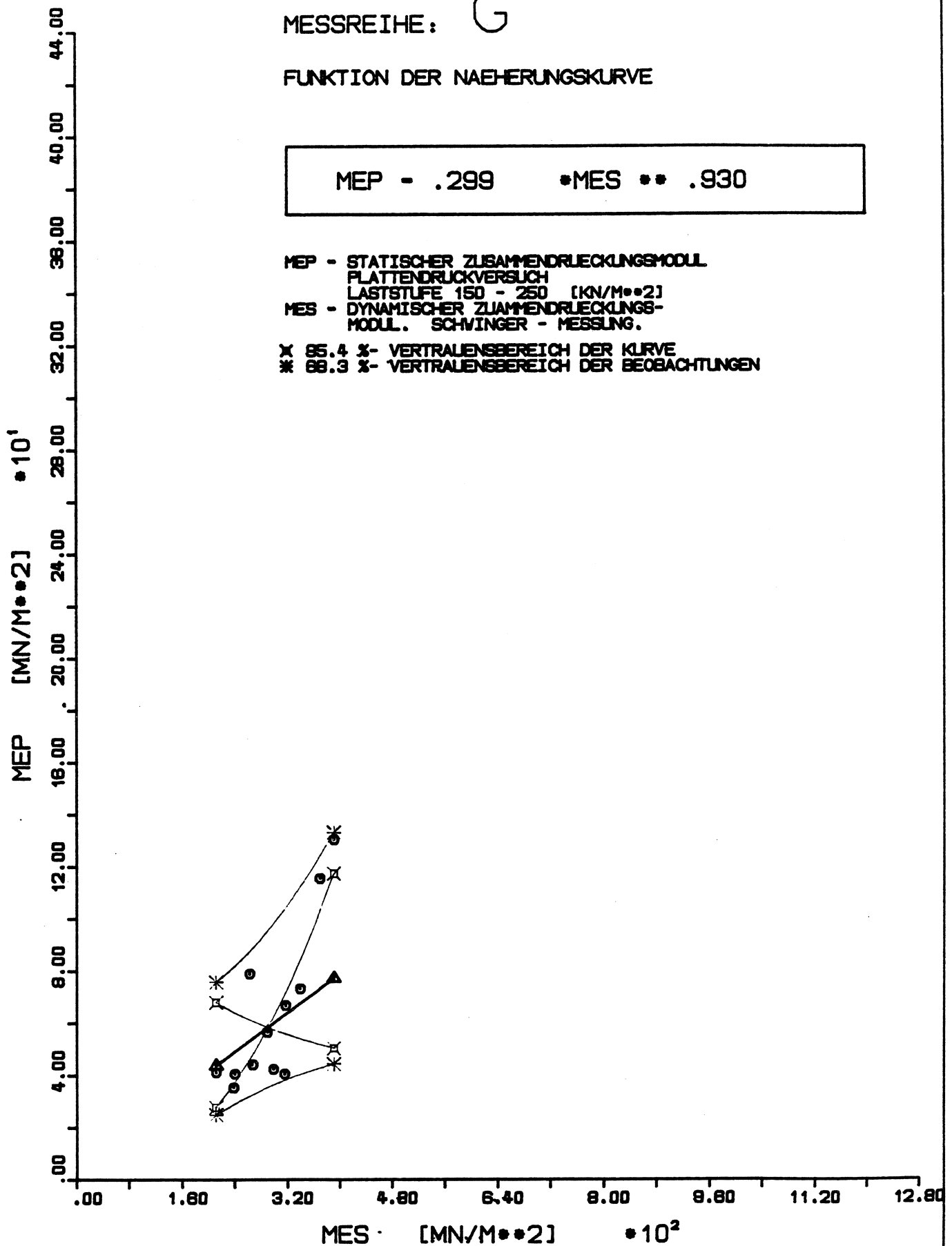
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299 •MES •• .930

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE:.. H

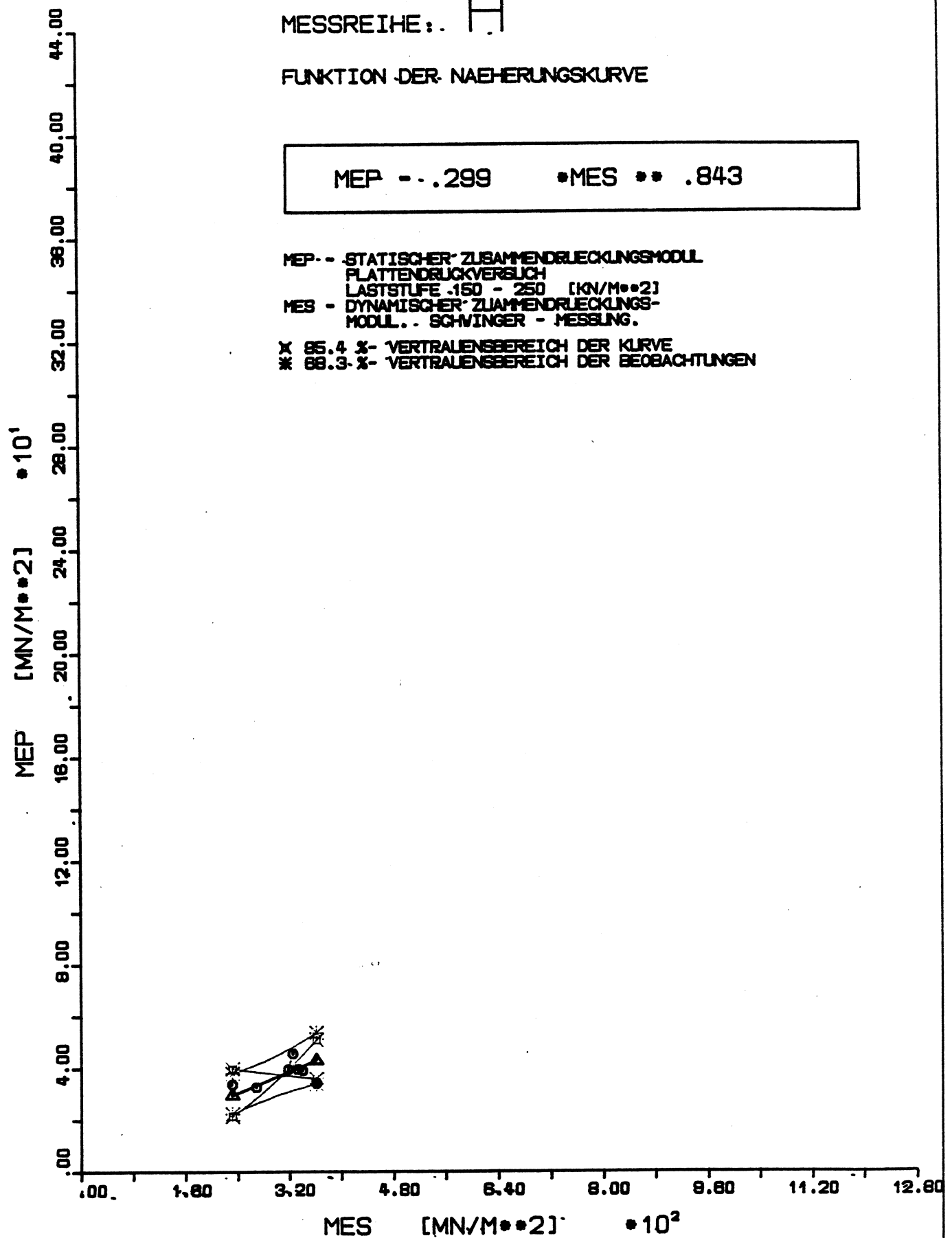
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - . . .299

•MES •• .843

MEP - . STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE .150 - 250 [KN/M••2]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL . . SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE: I

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - . . .299 •MES •• .950

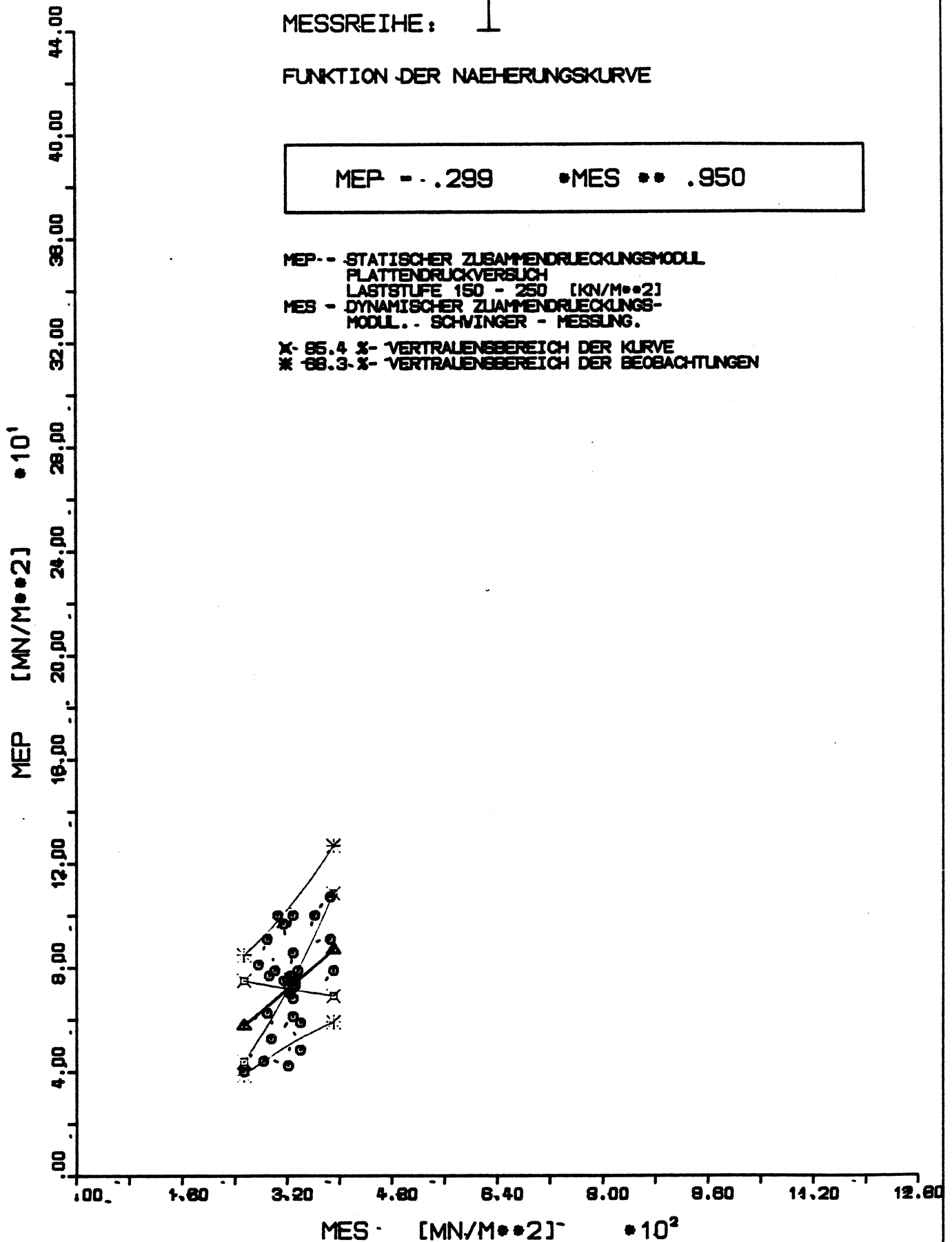
MEP - - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M••2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL - SCHWINGER - MESSUNG.

X- 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE

* 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE: K

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299

•MES •• .950

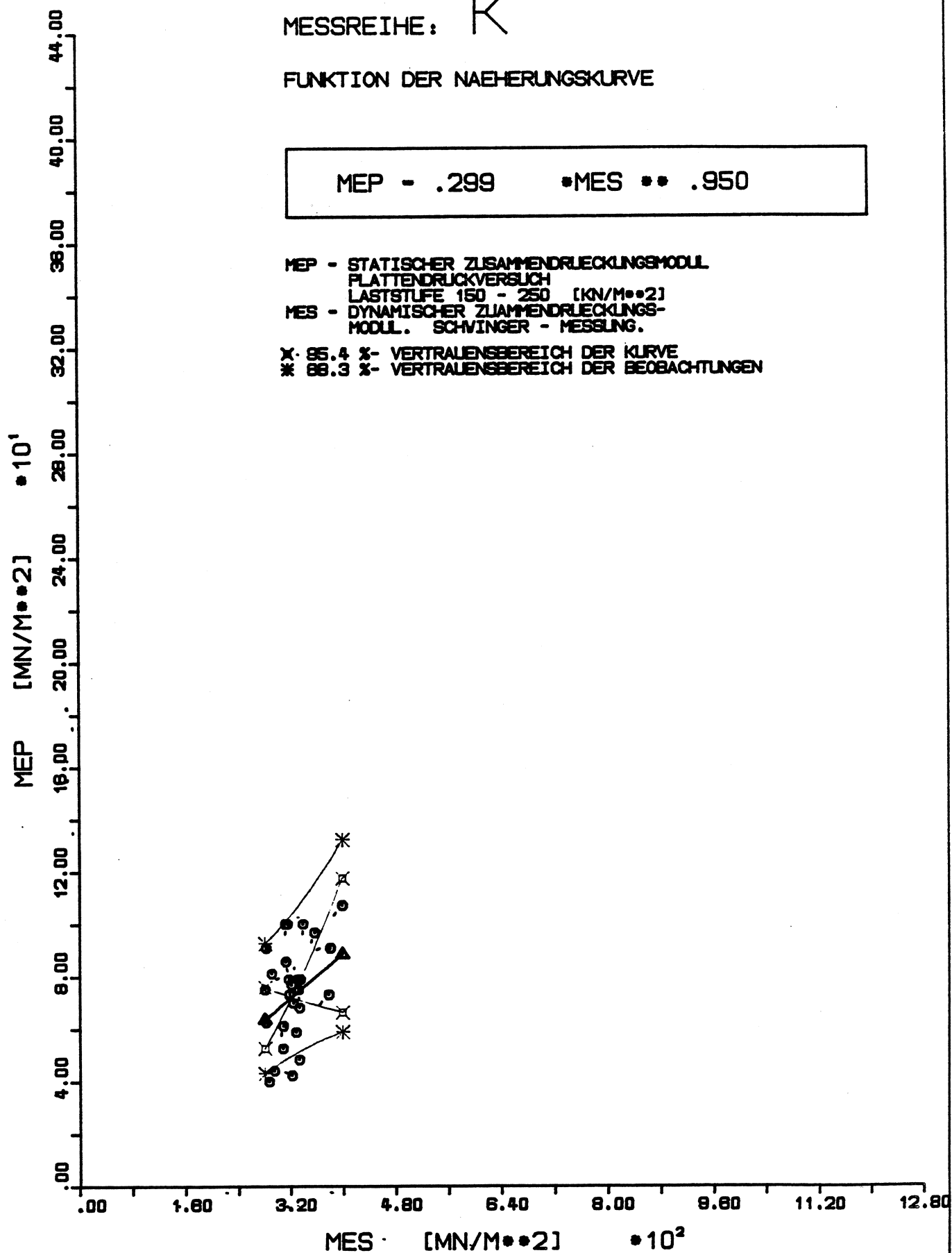
MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X- 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE

* 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



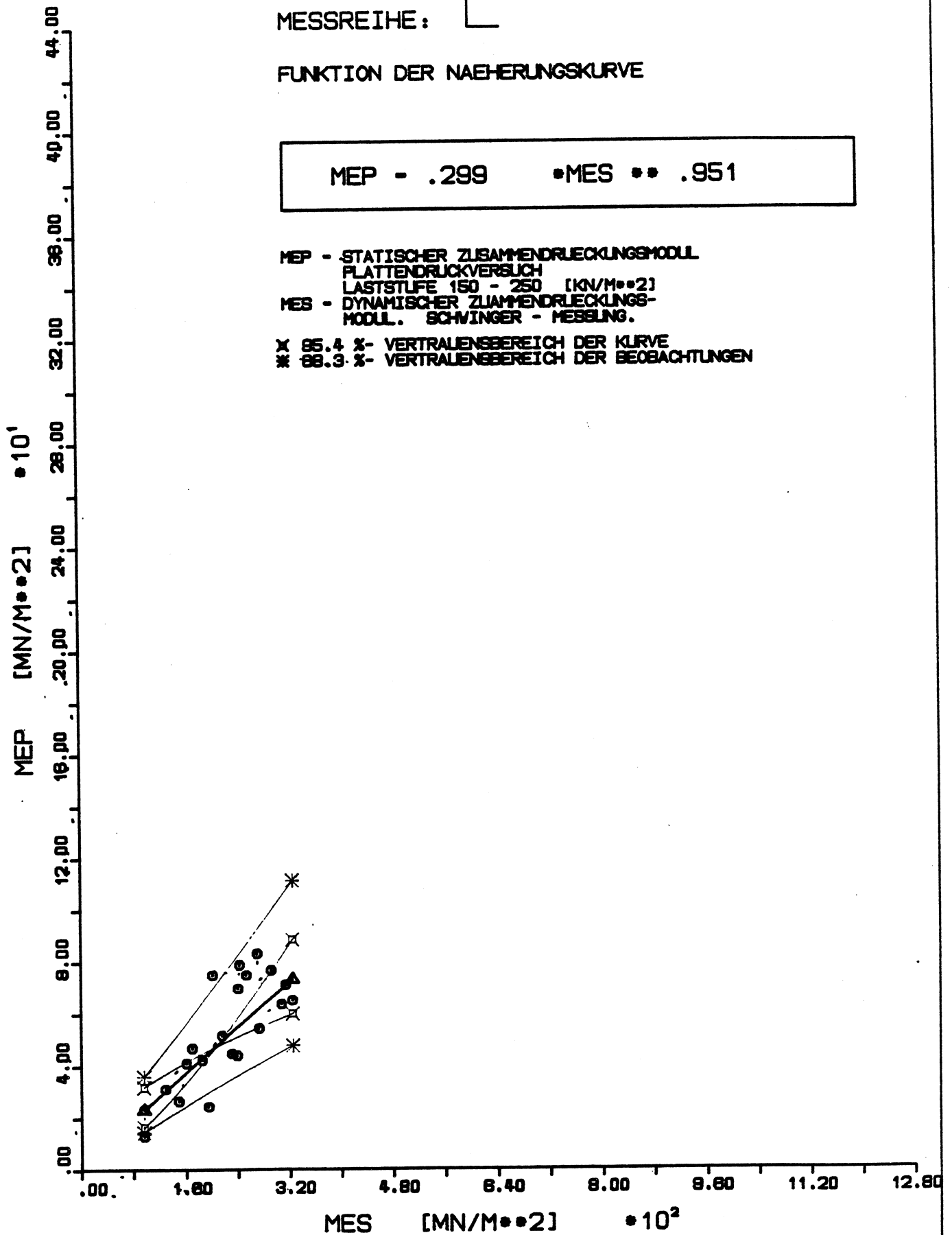
MESSREIHE: L

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299 •MES •• .951

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M••2]
MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
MODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



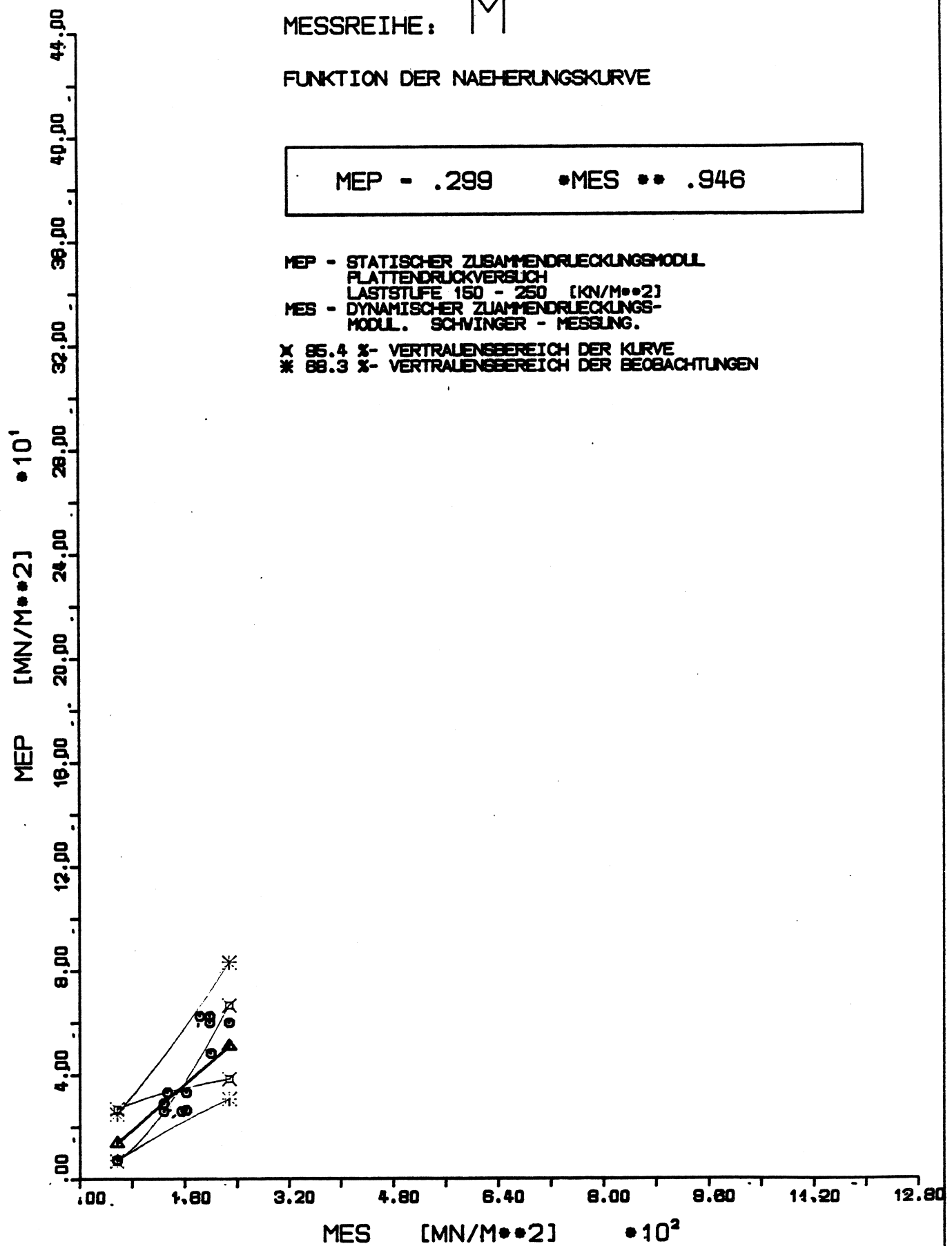
MESSREIHE: M

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299	•MES •• .946
------------	--------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M²]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

x 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE:

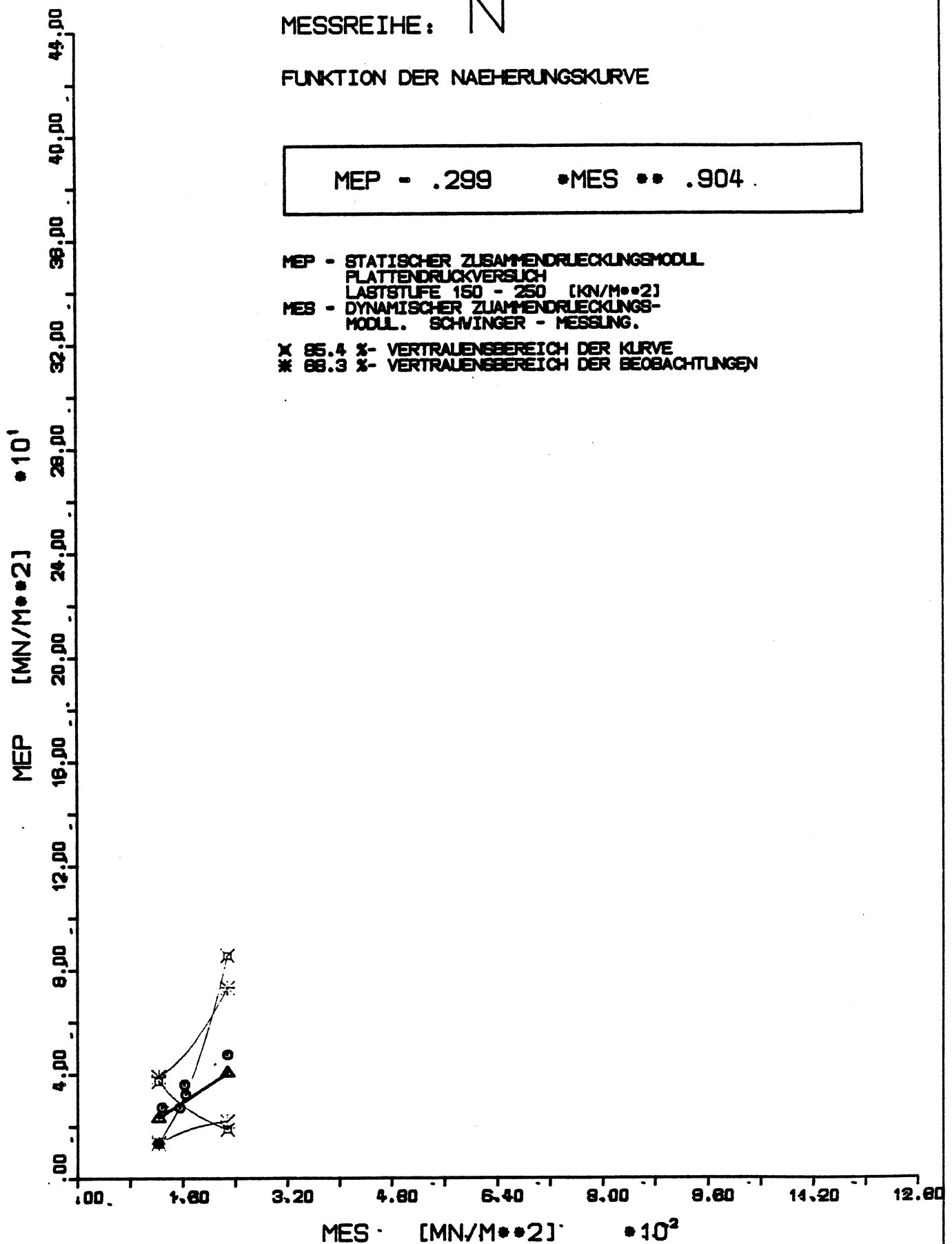
N

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP = .299	•MES •• .904
------------	--------------

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M²]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE: ○

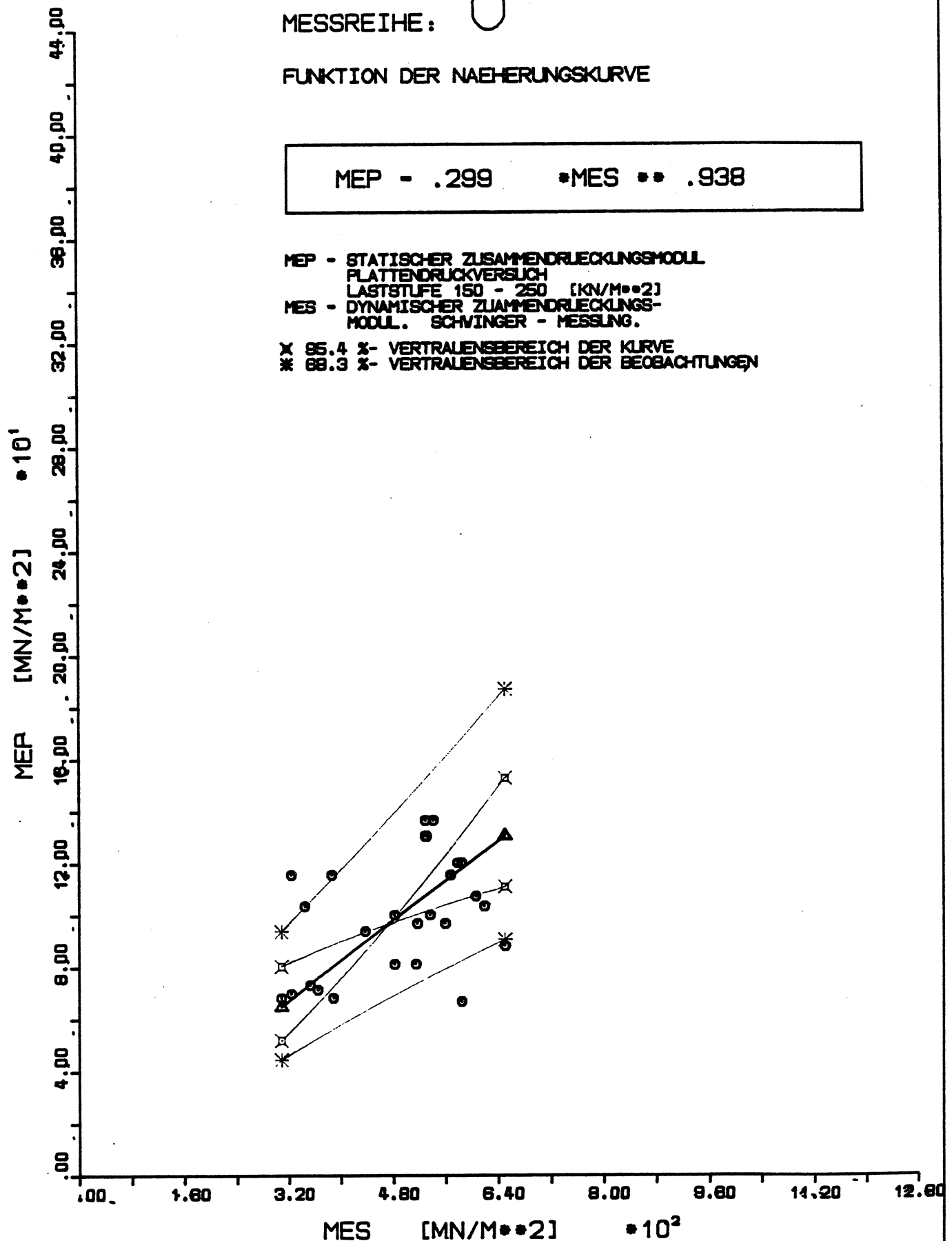
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299

*MES ** .938

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

x 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



MESSREIHE: P

FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

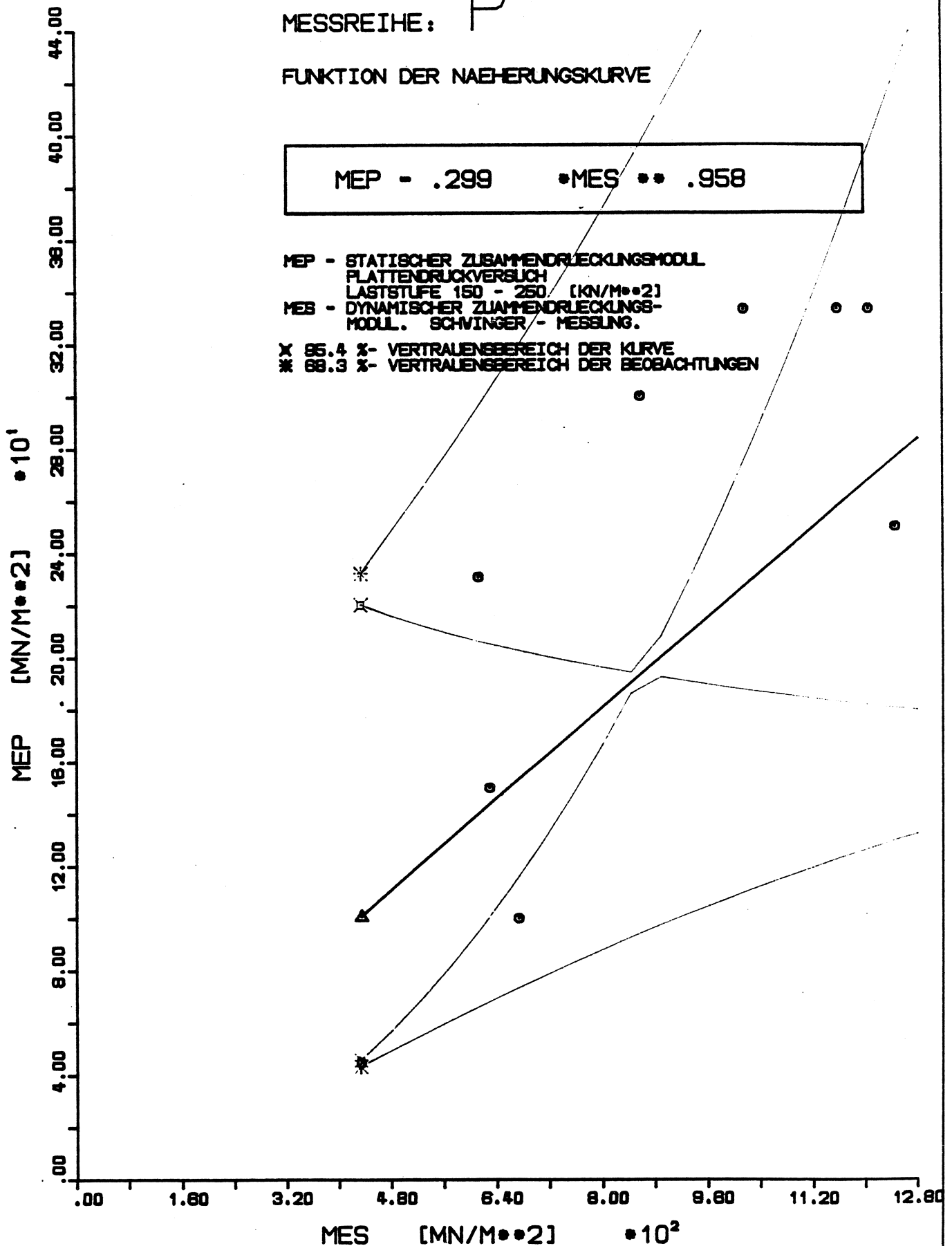
MEP - .299 •MES •• .958

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M••2]
MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE

* 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



MESSREIHE: Q

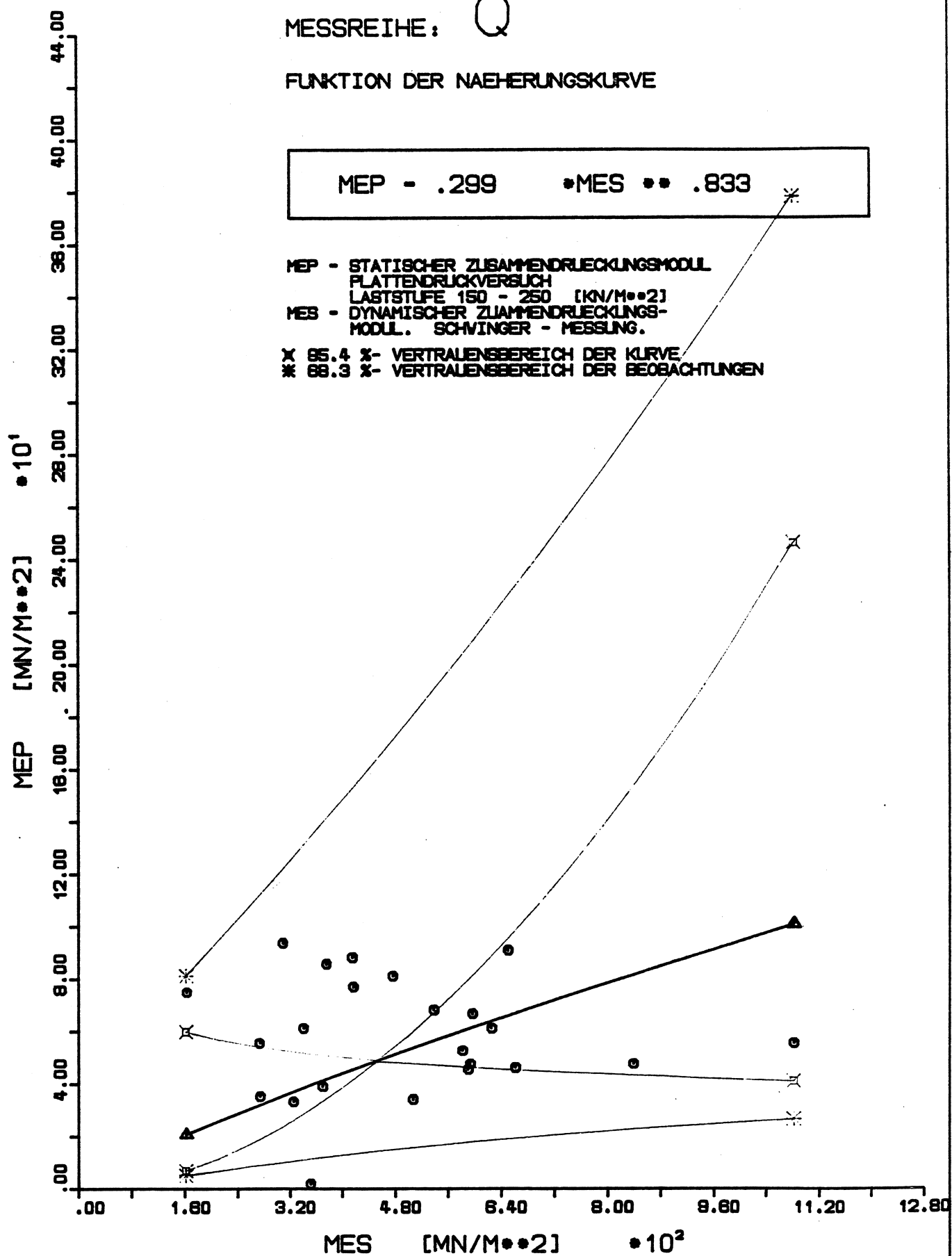
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

MEP - .299

*MES ** .833

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHVINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN



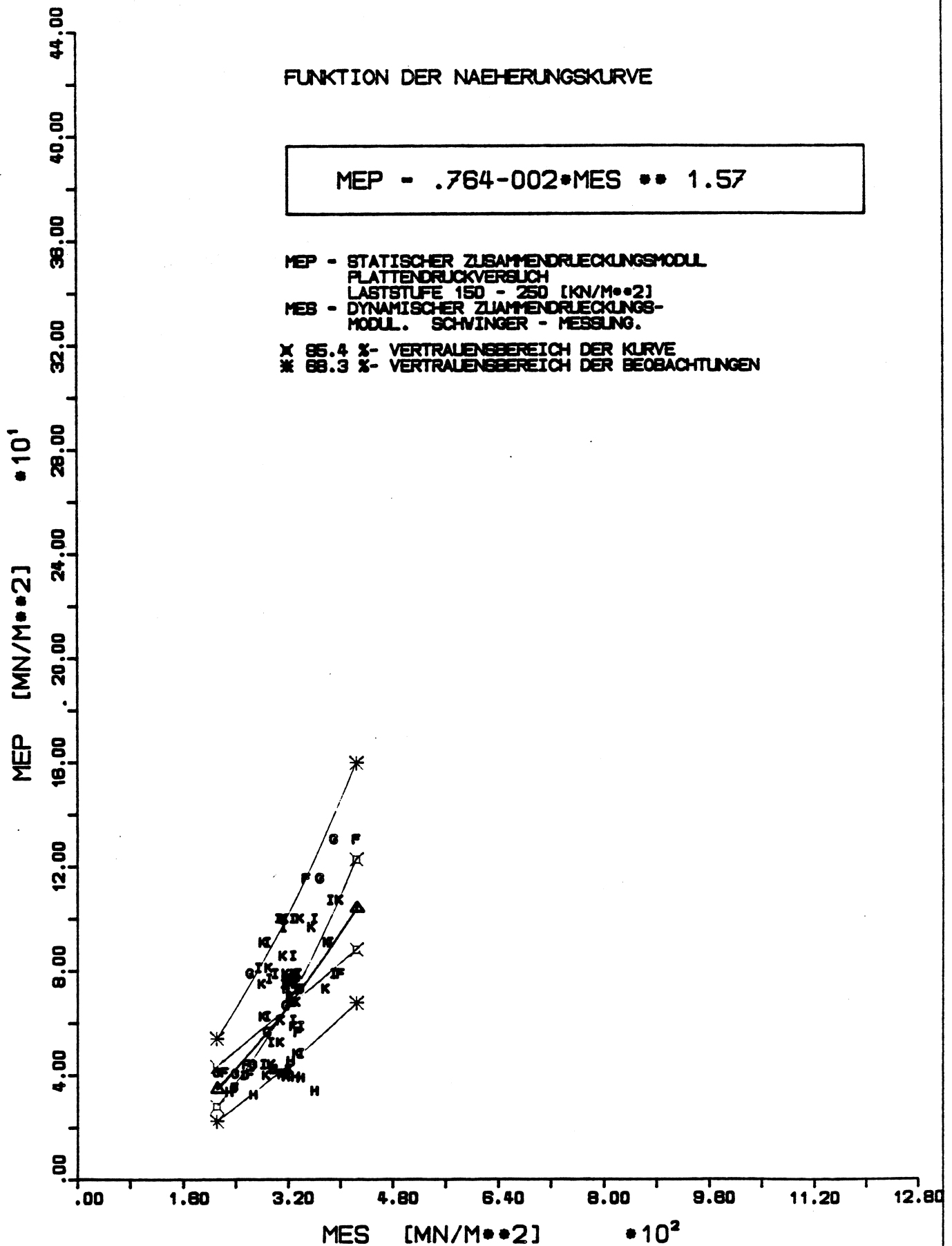
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

$$MEP = .764 - 002 \cdot MES \cdot 1.57$$

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
SCHWINGER - MESSUNG.

x 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 88.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN

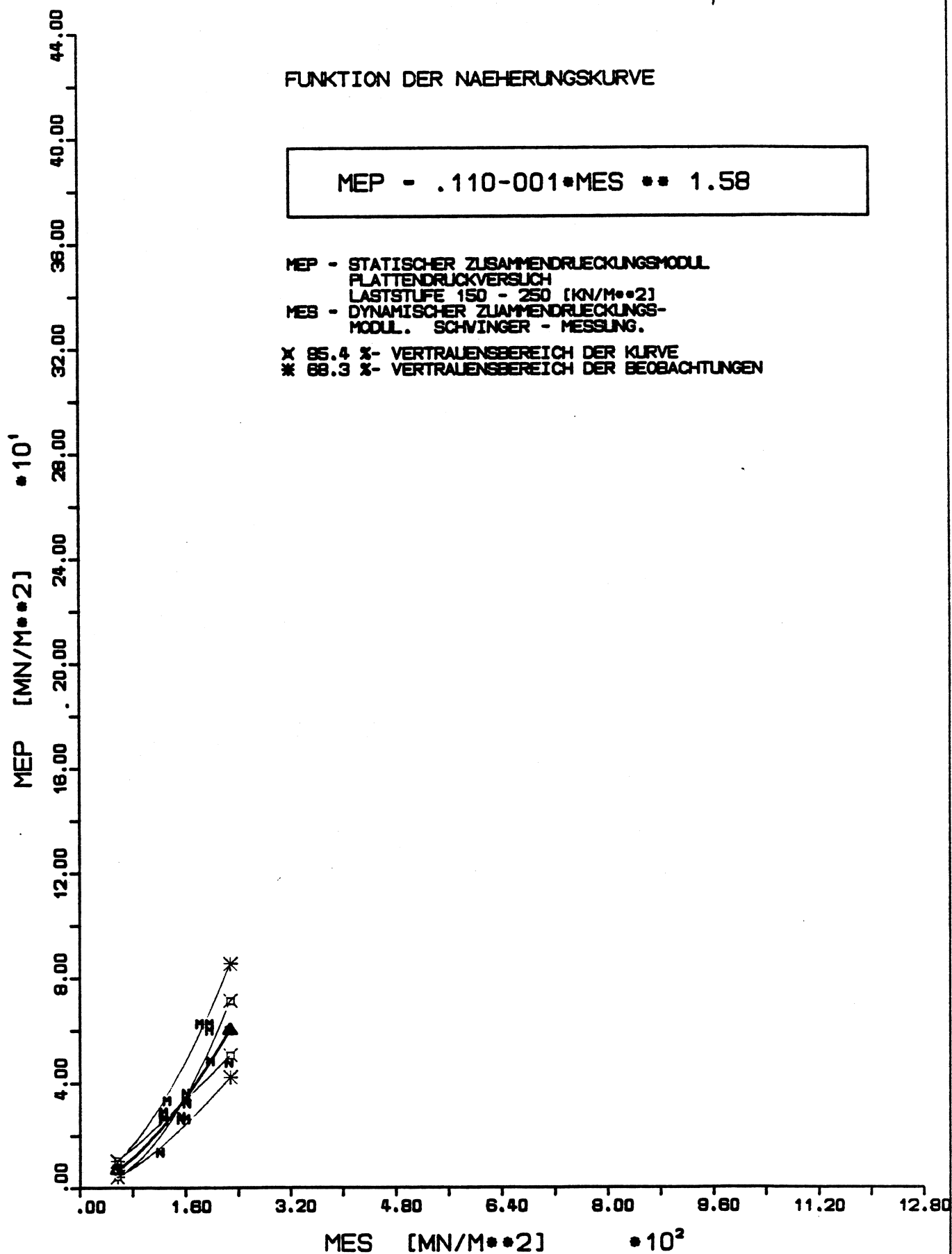


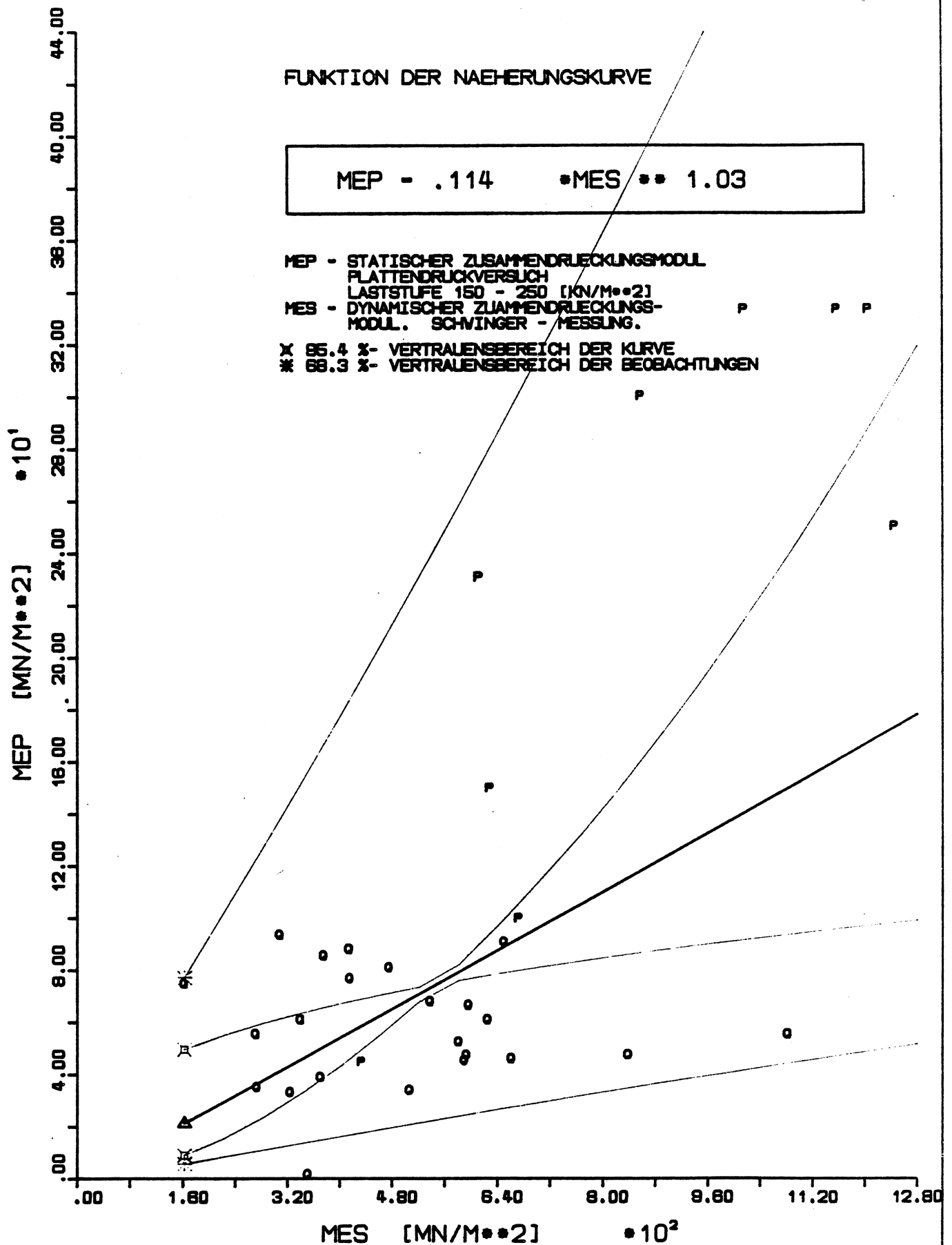
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

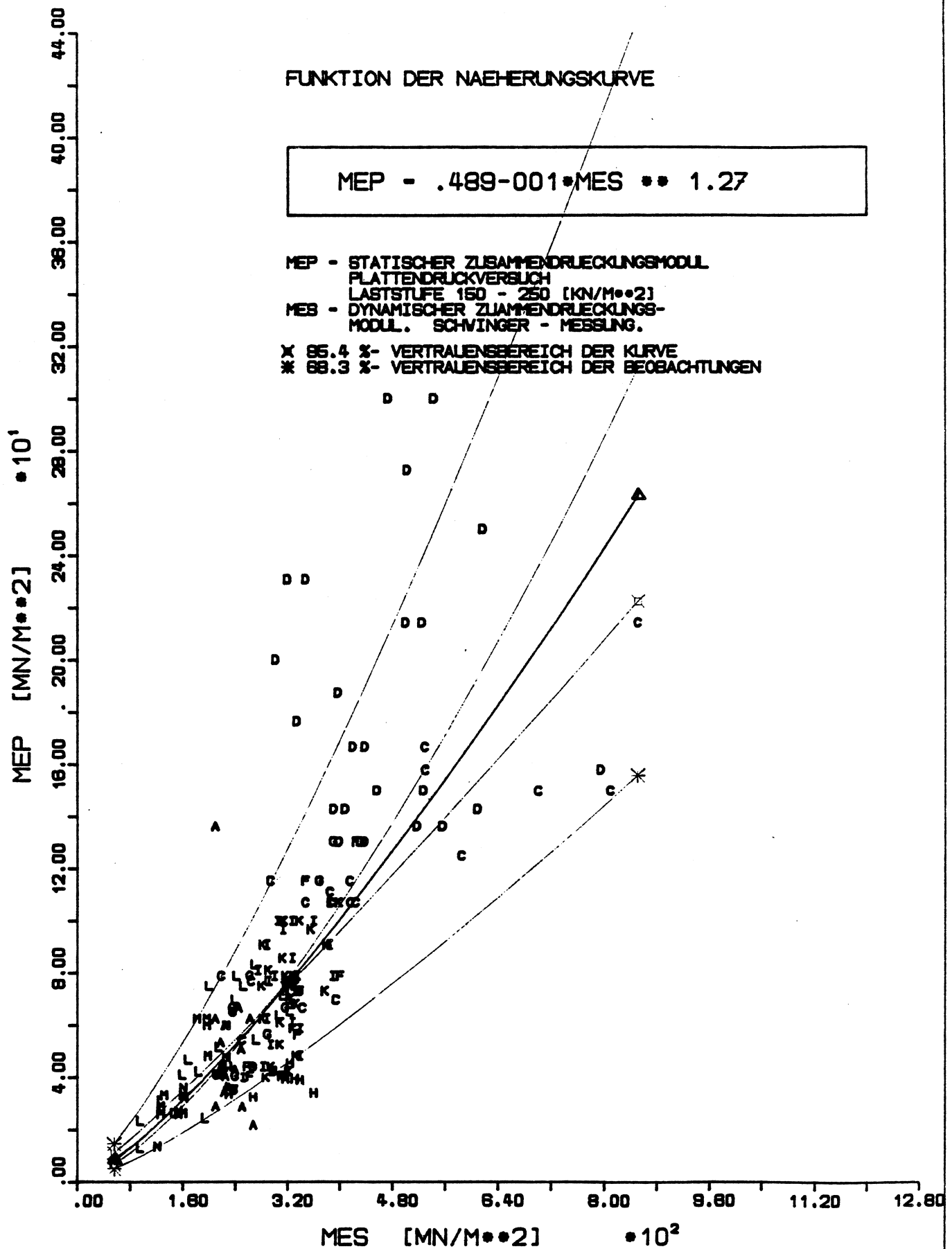
$$MEP = .110-001 \cdot MES^{1.58}$$

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M²]
MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
MODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

x 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 99.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBSACHTUNGEN





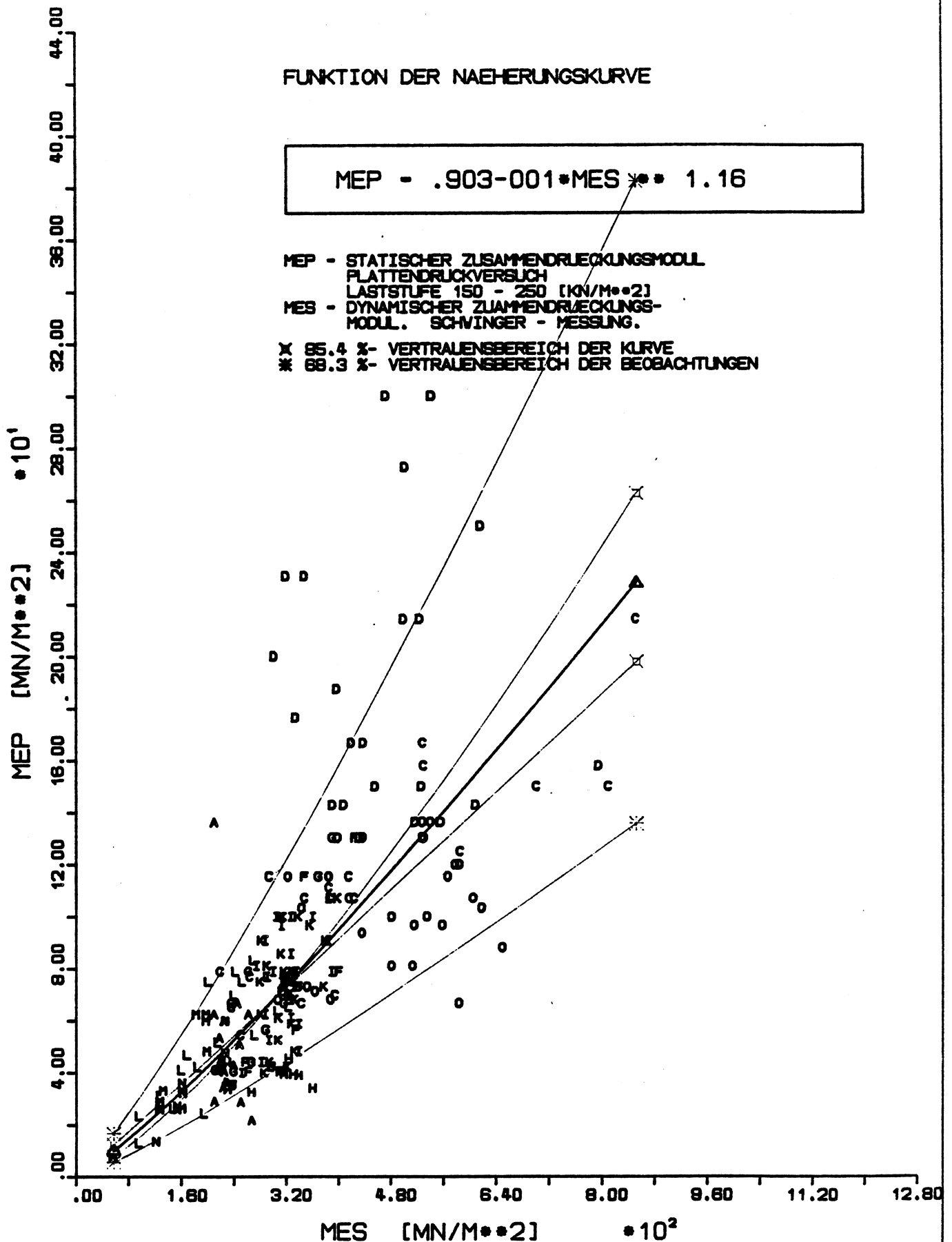


FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

$$MEP = .903 - 001 \cdot MES \cdot 1.16$$

MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN



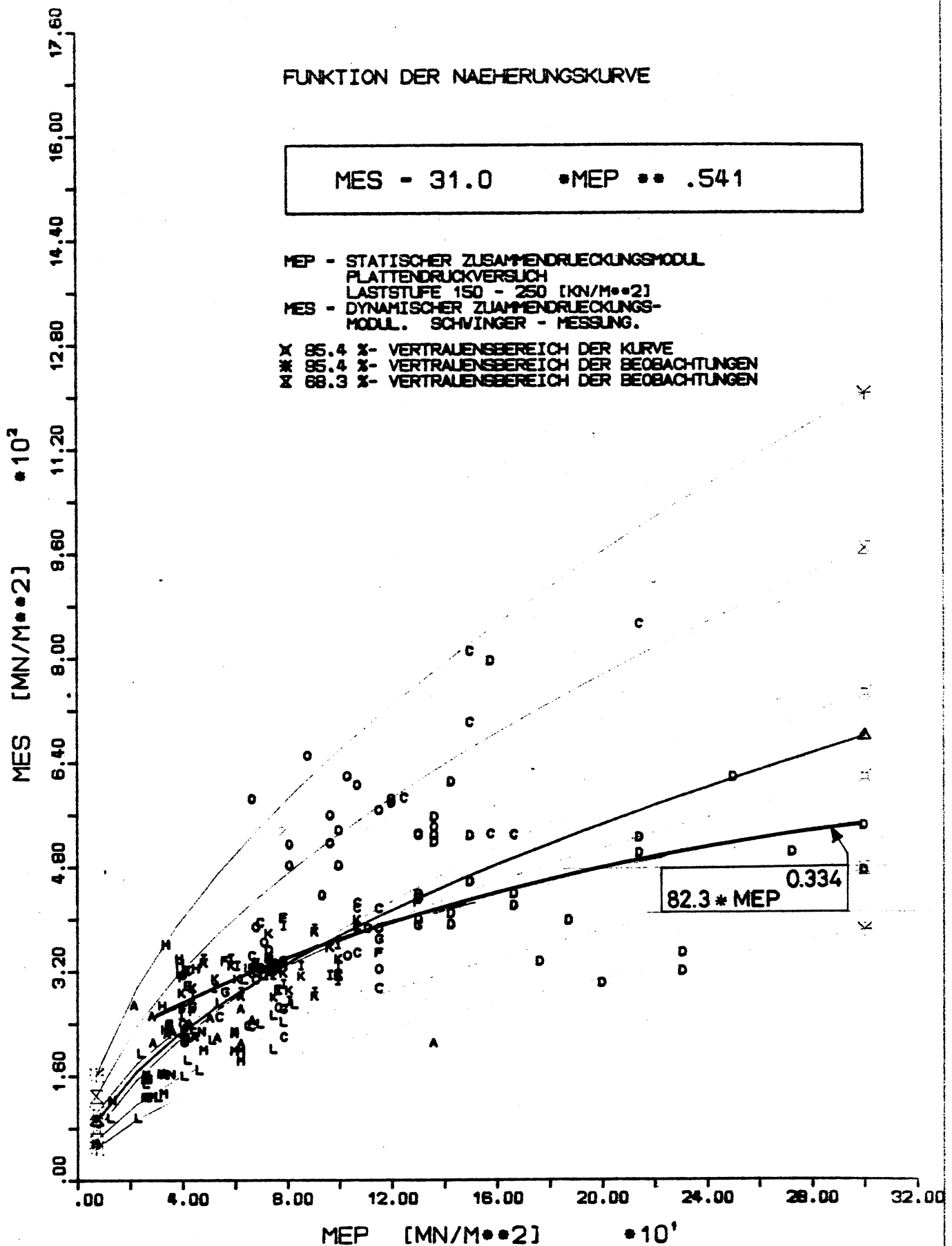
FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

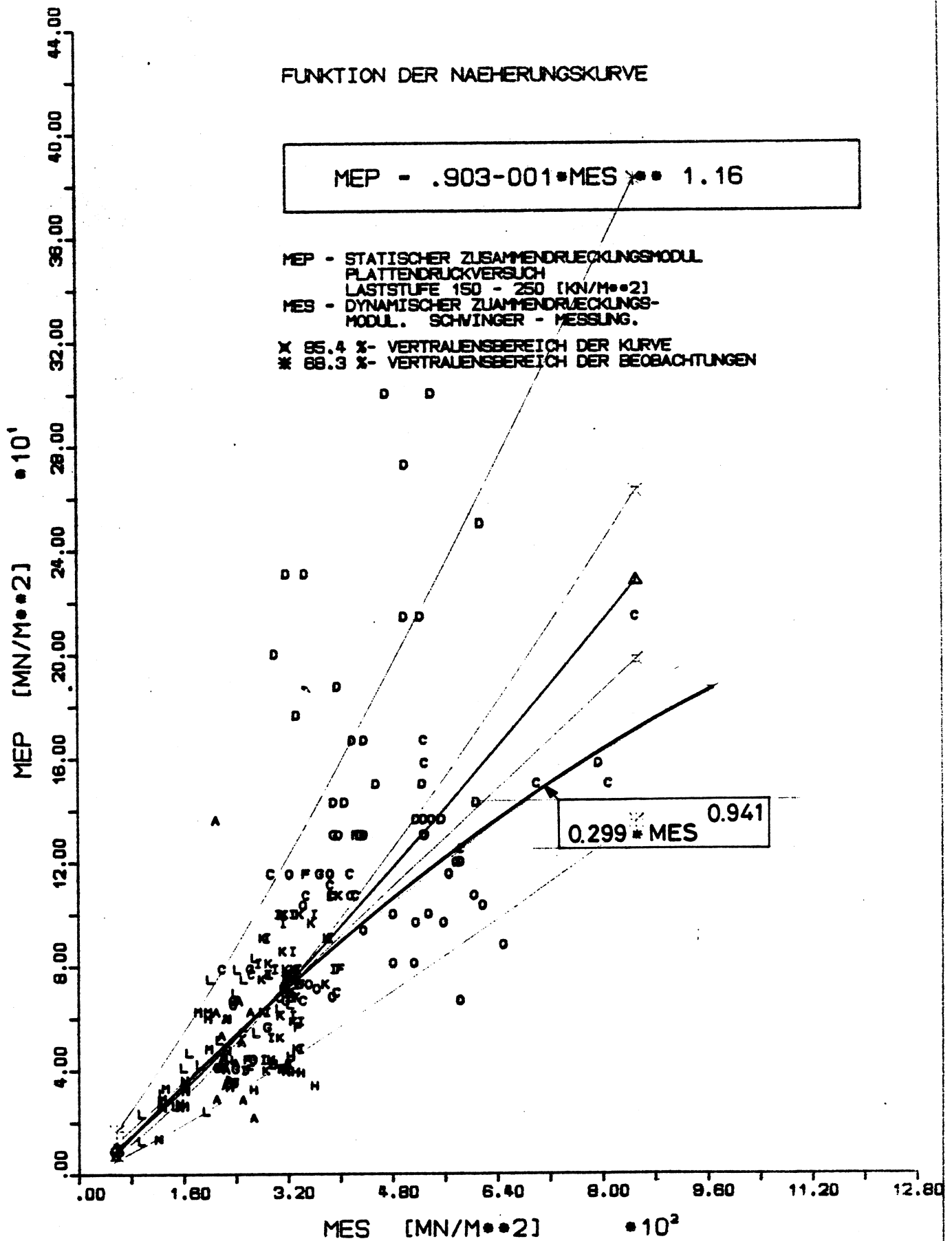
MES - 31.0 •MEP •• .541

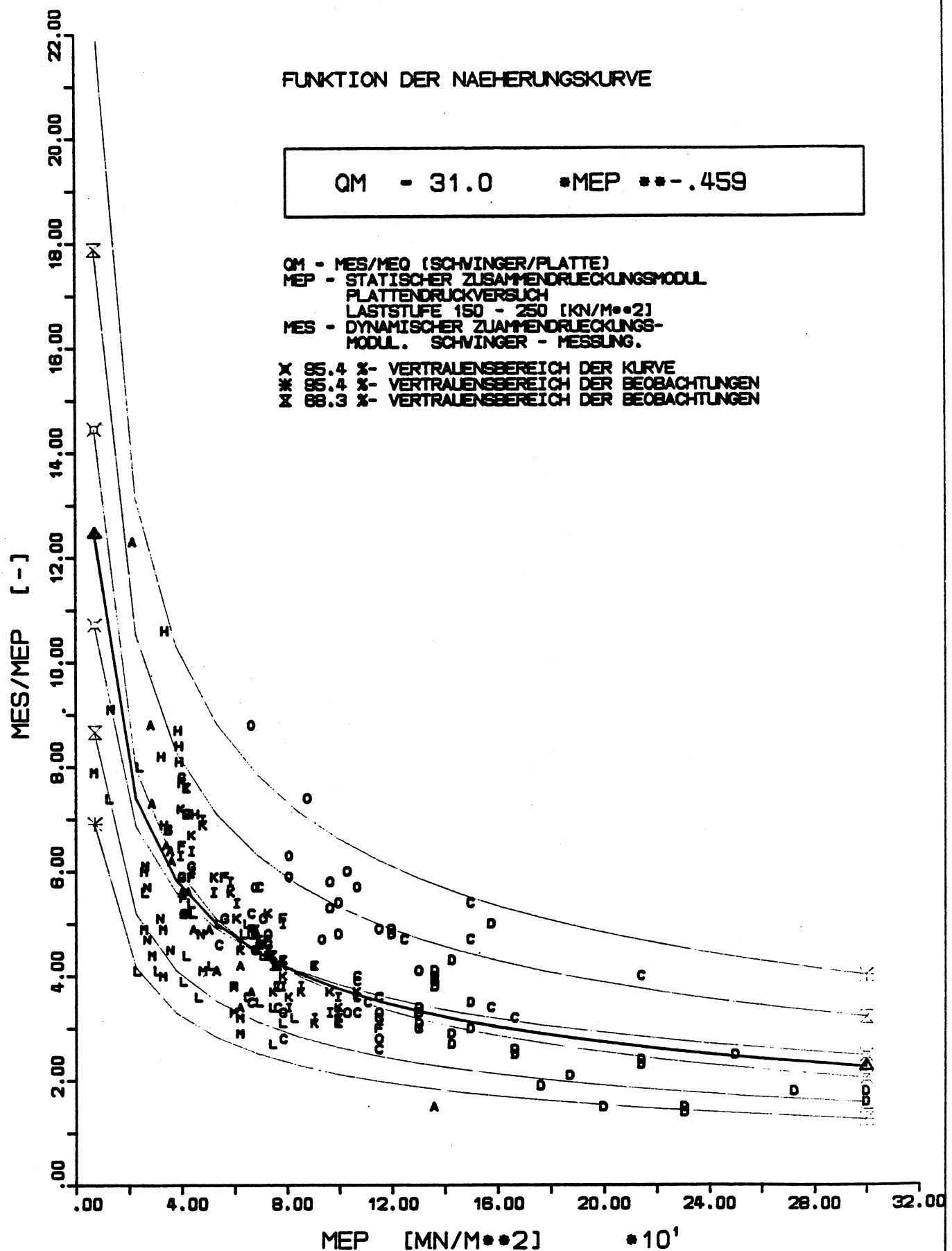
MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
PLATTENDRUCKVERSUCH
LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]

MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
MODUL. SCHWINGER - MESSUNG.

X 85.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
* 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
x 68.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN







FUNKTION DER NAEHERUNGSKURVE

QM - 34.2 *MEP **-.490

QM - MES/MEQ (SCHWINGER/PLATTE)
 MEP - STATISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL
 PLATTENDRUCKVERSUCH
 LASTSTUFE 150 - 250 [KN/M**2]
 MES - DYNAMISCHER ZUSAMMENDRUECKUNGSMODUL. SCHWINGER - MESSUNG.
 X 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER KURVE
 * 95.4 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN
 X 98.3 %- VERTRAUENSBEREICH DER BEOBACHTUNGEN

