

KfK 3047
Dezember 1980

Strömungsuntersuchungen an einem asymmetrischen Stabbündel ($W/D = 1.096$)

K. Rehme
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

KfK 3047

Strömungsuntersuchungen an einem asymmetrischen Stabbündel
($W/D=1.096$)

K. Rehme

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Strömungsuntersuchungen an einem asymmetrischen Stabbündel

Zusammenfassung

An einem Stabbündel aus vier parallelen Stäben, das asymmetrisch in einem Rechteckkanal angeordnet war, wurden im Wandkanal ($P/D=1.07$, $W/D=1.096$) die Geschwindigkeits-, Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen gemessen. Die Reynoldszahl der Untersuchung betrug $Re=1.07 \cdot 10^5$.

Die Meßergebnisse zeigen, daß der Impulstransport besonders in den engsten Stellen des Kanals stark anisotrop ist. Einflüsse von Sekundärströmungen sind in der Verteilung des zeitlichen Mittelwerts der Strömungsgeschwindigkeit nicht zu erkennen, in den Verteilungen der Turbulenzintensität und der kinetischen Energie der Turbulenz jedoch deutlich sichtbar.

Experimental Investigations on the Fluid Flow Through an Asymmetric Rod Bundle (W/D=1.096)

Abstract

Measurements of the distributions of the mean velocity, the wall shear stresses and the turbulence were performed in a wall subchannel of a rod bundle of four parallel rods arranged asymmetrically in a rectangular channel ($P/D=1.07$, $W/D=1.096$). The Reynolds number of this investigations was $Re=1.07 \times 10^5$.

The experimental results show that the momentum transport is highly anisotropic especially in the gaps of the rod bundle. Influences of secondary flow cannot be detected in the distribution of the time-mean velocity, however, such influences are found in the distributions of the turbulence intensities and the kinetic energy of turbulence.

1. Problemstellung

Bei der Entwicklung von Rechenprogrammen, die eine detaillierte Berechnung von Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen bei turbulenter Strömung durch Stabbündel ermöglichen, ist es unumgänglich, die Turbulenzbewegung der Strömung durch sog. Turbulenzmodelle zu beschreiben. Die Ergebnisse, die mit den Rechenprogrammen erzielt werden, sind dann immer nur so genau und abgesichert, wie die darin enthaltenen Turbulenzmodelle durch experimentelle Ergebnisse abgesichert sind.

Die für die Berechnung von Strömungs- und Temperaturverteilungen in Stabbündeln zur Verfügung stehenden bzw. sich in der Entwicklung befindlichen Programme VELASCO /1/ (nur Geschwindigkeitsverteilung) und VITESSE /2/ modellieren die Anisotropie des Impulsaustausches durch Wirbelviskositäten senkrecht und parallel zu den Wänden. In VITESSE ist außerdem die kinetische Energie der turbulenten Schwankungsbewegung modelliert. Zur Absicherung und zur Verbesserung der verwendeten Modelle wurden eine Reihe von Strömungsuntersuchungen in Unterkanälen von Stabbündeln durchgeführt /3-12/. Bei allen Versuchen wurde ein Stabbündel aus vier parallelen Rohren in einem Rechteckkanal verwendet. Die Rohre waren symmetrisch im Kanal angeordnet.

Beim Betrieb von Stabbündelbrennelementen in Kernreaktoren wird jedoch im allgemeinen keine ideale Geometrie der Unterkanäle vorliegen. Abweichungen von der Idealgeometrie ergeben sich aufgrund der vorhandenen Toleranzen, durch Verbiegen der Brennstäbe unter Temperaturgradienten und Spannungen sowie durch das Brennstabschwellen im Strahlenfeld. Diese Abweichungen von der idealen Geometrie, sog. gestörte Geometrien, sind außerdem abhängig von der Lebensdauer der Brennstäbe.

Damit die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen auch in gestörten Geometrien sicher berechenbar sind, sind hierfür ebenfalls experimentelle Untersuchungen zum turbulenten Impulstransport nötig, um die Rechenprogramme mit experimentellen Daten zu verifizieren. Deshalb wurden Messungen der Geschwindigkeits-, Wandschubspannungs- und Turbulenzverteilungen an einem asymmetrischen Stabbündel durchgeführt

2. Teststrecke

Für die Untersuchungen wurde ein Stabbündel mit einem Stababstandsverhältnis von $P/D=1.072$ ausgewählt. Die vier parallelen Rohre wurden jedoch nicht wie in den Versuchen /3,12/ symmetrisch angeordnet, so daß das Wandabstandsverhältnis ebenfalls $P/D=1.072$ betrug, sondern die Rohre wurden asymmetrisch angeordnet, wobei der Abstand zwischen den Rohren und der Kanalwand auf der einen Seite etwa doppelt so groß war, wie der Abstand zwischen Rohren und Kanalwand auf der anderen Seite (Abb.1).

Die eingestellten Abstände betragen $a_1=15.15$ mm und $a_2=7.55$ mm. Mit dem Rohrdurchmesser von $D=157.5$ mm ergaben sich die Wandabstandsverhältnisse zu

$$\left(\frac{W}{D}\right)_{\text{weit}} = 1.096$$

$$\left(\frac{W}{D}\right)_{\text{eng}} = 1.048.$$

Die Messungen wurden genau so durchgeführt, wie bei den vorausgegangenen Untersuchungen /3/. Gemessen wurden:

- die Verteilung der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten
- die Wandschubspannungsverteilung
- die Verteilung der Turbulenzintensitäten und
- die Verteilung der turbulenten Schubspannungen senkrecht und parallel zu den Wänden.

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Untersuchungen im weiten Wandkanal ($W/D=1.096$) dargestellt und diskutiert.

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse aller Messungen liegen in Form von Tabellen vor.

3.1 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit

Die mit Pitotrohren gemessenen zeitlichen Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit sind als Funktion des relativen Wandabstandes y/L (L =Länge des Geschwindigkeitsprofils zwischen Wand und Position der Maximalgeschwindigkeit) in Abb.2 für den Teil des Strömungskanals, der dem Stab benachbart ist (r/ϕ) und in Abb.3 für den der Kanalwand benachbarten Teil (x/y) dargestellt. Als Bezugswert wurde die konstant gehaltene Strömungsgeschwindigkeit am fest eingebauten Pitotrohr verwendet. Die gemessenen Geschwindigkeitverteilungen zeigen, daß das Minimum der Strömungsgeschwindigkeit jeweils im engsten Spalt zwischen den Stäben ($\phi = 0$ deg) bzw. zwischen Stab und Kanalwand ($\phi = 90$ deg bzw. $x=0$ mm) auftritt, wie es zu erwarten ist.

Ein Isotachenbild der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung, bezogen auf den Wert am fest eingebauten Pitotrohr, zeigt Abb.4. Einflüsse von Sekundärströmungen sind nicht zu bemerken.

Mit einem Rechenprogramm wurde aus den Meßwerten die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Wandkanal durch Integration ermittelt. Diese Geschwindigkeit ergab sich zu

$$u_m = 28.51 \text{ ms}^{-1},$$

während am fest eingebauten Pitotrohr eine Geschwindigkeit von

$$u_{REF} = 27.80 \text{ ms}^{-1}$$

während der Messungen konstant gehalten wurde.

Mit dem hydraulischen Durchmesser des Wandkanals von

$$D_h = 58.711 \text{ mm}$$

ergibt sich die mittlere Reynoldszahl der Untersuchung zu

$$Re = 1.068 \cdot 10^5 .$$

3.2 Wandschubspannung

Abb.5 zeigt die mit Prestonrohren gemessenen Wandschubspannungsverteilungen an Stab- und Kanalwand. Dabei sind sowohl die Meßwerte, die während der Turbulenzmessungen über etwa 3 Monate gemessen wurden, als auch die Ergebnisse einer direkten Messung an der Kanalwand dargestellt. Die Übereinstimmung beider Meßreihen ist gut, naturgemäß ist die Streuung bei den Meßwerten über den längeren Zeitraum

stärker. Die dargestellten Wandschubspannungen sind auf den Mittelwert der Wandschubspannung im ausgemessenen Teil des Wandkanals bezogen. Dieser Mittelwert ergab sich aus den Einzelmessungen durch Integration zu

$$\tau_{W_{av}} = 2.048 \text{ Nm}^{-2}.$$

3.3 Reibungsbeiwert und dimensionsloses Geschwindigkeitsprofil

Aus der gemessenen mittleren Wandschubspannung errechnet sich der Reibungsbeiwert nach

$$\lambda = \frac{8 \tau_{W_{av}}}{\rho u_m^2} \quad (1)$$

zu $\lambda = 0.01723$

für $Re = 1.068 \cdot 10^5$.

Für das Kreisrohr ergibt sich für diese Reynoldszahl nach der Beziehung von Maubach /13/:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.035 \lg Re\sqrt{\lambda} - 0.989$$

der Reibungsbeiwert zu: $\lambda = 0.01794$.

Der im Wandkanal gemessene Reibungsbeiwert liegt also etwa 4% niedriger als der Kreisrohrwert.

Den gemessenen Wert kann man mit dem theoretischen Wert vergleichen, der sich nach der Laminarmethode /14/ ergibt. Dazu wird für den Wandkanal der Geometrieparameter der Laminarströmung für $P/D=1.071$ und $W/D=1.096$ nach /15/ zu:

$$K = 64.7$$

bestimmt. Für die Geometrieparameter bei turbulenter Strömung ergibt sich nach /14/

$$A = 1.0$$

$$G^* = 5.71$$

Das Reibungsgesetz für den Wandkanal lautet damit:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 1.0 \left[2.5 \ln \operatorname{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} + 5.5 \right] - 5.71 \quad (3)$$

Man erhält für $\operatorname{Re} = 1.068 \cdot 10^5$ einen Reibungsbeiwert von $\lambda = 0.01795$, der um 4% von dem gemessenen Wert abweicht und damit eine gute Bestätigung der theoretischen Methode für einen Wandkanal liefert.

Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile sind in dimensionsloser Darstellung in Abb.6 für die dem Stab benachbarte Strömungszone und in Abb.7 für die der Kanalwand benachbarte Strömungszone aufgetragen. Die Geschwindigkeit u wurde mit der örtlichen Wandschubspannungsgeschwindigkeit

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4)$$

zu

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u^*}$$

und der Wandabstand y zu

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu} \quad (6)$$

dimensionslos gemacht.

Zum Vergleich ist das bekannte Wandgesetz der Geschwindigkeitsverteilung in Kreisrohren von Nikuradse /16/

$$u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5 \quad (7)$$

als durchgezogene Linie in die Abbildungen eingetragen. Die Meßergebnisse liegen überwiegend niedriger als das Wandgesetz von Nikuradse im wandnahen Bereich. Auffällig ist die geringe Streuung der Meßwerte nahe der Kanalwand. Im Spalt zwischen den Stäben ($\phi = 0-20$ grd) liegen die Meßergebnisse auf oder über dem Wandgesetz von Nikuradse. Bei früheren Messungen wurde ein derartiges Verhalten nicht beobachtet. Diese Abweichung könnte ihre Ursache in der Asymmetrie des Kanals im Spalt haben.

3.4 Turbulenzintensitäten und kinetische Energie der Turbulenz

Die Meßergebnisse der Turbulenzintensitäten in den drei Strömungsrichtungen, sowie der kinetischen Energie der turbulenten Bewegung sind auf zweifache Weise dargestellt. Zunächst werden die Daten für die Bereiche zwischen Wand und Maximalgeschwindigkeit von beiden Wänden aus gesehen ($r/\phi =$ Stabwand, $x/y =$ Kanalwand) gezeigt. Dabei werden die Intensitäten auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogen. In einer weiteren Darstellung werden die Linien gleicher Intensität (Höhenlinien) dargestellt. Diese Bilder wurden mit Hilfe eines Rechenprogramms /17/ auf einem Zeichengeräte erzeugt. Wegen der komplizierten Geometrie (r/ϕ und x/y) wurden aus den Meßdaten je zwei Bilder erzeugt, die anschließend an der Linie

der Maximalgeschwindigkeit zusammen gesetzt wurden. Daher und auch wegen der z.T. unterschiedlichen Richtungen bei der Messung der Daten an der Trennlinie ergeben sich nicht immer glatte Verläufe der Höhenlinien, sondern es treten Sprünge auf. Dies ist besonders deutlich bei den in der Zeichenebene liegenden Komponenten w' und v' zu sehen. Bei der Erzeugung der Höhenlinienbilder wurden alle Daten auf einen Referenz-Wert der Wandschubspannungsgeschwindigkeit normiert. Als Normierungsgröße wurde die Wandschubspannung bei $\phi = 0 \text{ grad } (r/\phi)$ gewählt.

3.4.1 Axiale Turbulenzintensität $\sqrt{u'^2}$

Die gemessenen Verläufe der axialen Turbulenzintensität sind in Abb.8 für den Bereich nahe der Stabwand und in Abb.9 für den Bereich nahe der Kanalwand dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß die axiale Turbulenzintensität - wie erwartet - in Wandnähe am größten ist. Dabei ergeben sich die auf die lokale Wandschubspannungsgeschwindigkeit bezogenen Werte des Maximums zu etwa

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u^*} = 2.2 \div 2.4$$

Diese Werte sind etwas höher als die Ergebnisse von Messungen an Kreisrohren. Auffallend ist, daß die Werte in Richtung auf die Maximalgeschwindigkeit ($y/L = 1$) wesentlich schwächer abfallen als beim Kreisrohr, für das sich in Rohrmitte ein Wert von ca. 0.8 ergibt. Auch zeigt sich, daß der Abfall stark von der Position an der Stab- und bzw. Kanalwand abhängt. Während die axiale Turbulenzintensität in den weitesten Querschnitten $\phi = 35$ und 40 grad bzw. $x=80$ und 84.4 mm mit dem Wandabstand stark abfällt, ist z.B. für $\phi = 60 - 70 \text{ grad}$ und $\phi = 15 - 25 \text{ grad}$ (Abb.8) bzw. $x = 30 - 55 \text{ mm}$ (Abb.9) die axiale Turbulenzintensität konstant über den Querschnitt, ja sie steigt in einigen Fällen mit der Entfernung von der Wand

leicht an. Eine Erklärung für diese Tatsache kann wohl nur in der Wirkung der Sekundärströmung gefunden werden. Dies zeigt sich auch in der Höhenliniendarstellung der axialen Turbulenzintensität (Abb.10).

3.4.2 Radiale Turbulenzintensität $\sqrt{v'^2}$

Die Turbulenzintensitäten in radialer Richtung (Abb.11 und 12) fallen generell mit wachsendem Wandabstand ab. In Wandnähe liegen die Werte zwischen 1.0 und 1.2, an der Linie der Maximalgeschwindigkeit zwischen 0.7 und 1.0. Die Meßwerte der radialen Turbulenzintensität sind mit einer relativ großen Meßunsicherheit behaftet, daher ergibt auch das Höhenlinienbild (Abb.13) eine etwas uneinheitliche Darstellung.

3.4.3 Azimutale Turbulenzintensität $\sqrt{w'^2}$

Die Daten für die azimutale Turbulenzintensität (Abb.14 und 15) zeigen mit wachsendem Wandabstand im allgemeinen einen leichten Abfall, wobei die Werte in Wandnähe von gleicher Größe sind wie bei Kreisrohren. Auffällig ist daß die azimutale Turbulenzintensität in den Spalten sowohl zwischen den Stäben ($\phi = 0 - 15$ grad) als auch zwischen Stab- und Kanalwand ($\phi = 65 - 90$ grad bzw. $x = 0 - 40$ mm) nahezu konstant ist oder sogar mit wachsendem Wandabstand ansteigt. Dieses Verhalten, das wohl nur durch Sekundärströmungseffekte erklärt werden kann, wird besonders deutlich in der Höhenliniendarstellung (Abb.16).

3.4.4 Kinetische Energie der Turbulenz \overline{k}

Die gemessene kinetische Energie der Turbulenz

$$\overline{k} = \frac{1}{2} \left[\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right] \quad (8)$$

fällt mit wachsendem Wandabstand im allgemeinen mehr oder weniger stark ab (Abb.17 und 18). Die Werte in Wandnähe liegen höher als beim Kreisrohr. Im wandfernen Bereich fallen die Meßergebnisse für $\phi = 15 - 25$ grad, $\phi = 50 - 65$ grad und $x = 35 - 45$ mm und schwach ab mit wachsendem Wandabstand. In diesen Bereichen ist die kinetische Energie der Turbulenz relativ unabhängig vom Wandabstand, wie auch das Höhenlinienbild zeigt (Abb.19). Diese Bereiche zeigen die größten Gradienten der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung ($\partial u / \partial \phi$) (s. Abb.1 und 2).

Der Abfall der kinetischen Energie der Turbulenz zur Linie der Maximalgeschwindigkeit ist überhaupt wesentlich schwächer als beim Kreisrohr und ist dort am stärksten ausgeprägt, wo der Kanalquerschnitt die größte Ausdehnung hat ($x = 75 - 84.4$ mm bzw. $\phi = 35 - 45$ grad). Insgesamt gesehen ist die kinetische Energie im wandfernen Bereich wesentlich höher als beim Kreisrohr.

3.5 Schubspannungen und Korrelationskoeffizienten

3.5.1 Radiale Schubspannung $\overline{-u'v'}$

Die gemessenen turbulenten Schubspannungen senkrecht zu den Wänden sind in Abb.20 und 21 dargestellt. In Wandnähe folgen die Werte recht gut einer linearen Schubspannungsverteilung. Da der Strömungsquerschnitt senkrecht zur Stabwand mit wachsendem Wandabstand leicht anwächst, sollten die Profile in Abb.20 leicht nach unten gekrümmt sein. Dieser Verlauf ist nicht überall vorhanden, vor allem deswegen, weil durch die gewählten Koordinaten (r/ϕ im Bereich der Stabwand und entsprechend für Abb.21 x/y im Bereich der Kanalwand) mit wachsendem Wandabstand ein wachsender Teil der azimuthalen turbulenten Schubspannung mitgemessen wird. In den engsten Querschnitten ist dieser Effekt am ehesten vernachlässigbar. Tatsächlich verlaufen die Ergebnisse der radialen Schubspannung für $\phi = 0,5, 80 - 90$ grd bzw. $x = 0$ und 5 mm leicht gekrümmt. Die größten Abweichungen ergeben sich dort, wo die Koordinaten im wandfernen Bereich am stärksten von Orthogonalen zur Geschwindigkeitsverteilung abweichen ($\phi = 30-65$ grd bzw. $x = 30-65$ mm).

3.5.2 Azimutale Schubspannung $\overline{-u'w'}$

Die gemessene Schubspannung zeigt in Wandnähe Werte, die gegen Null gehen. Im wandfernen Bereich steigt die azimutale Schubspannung mehr oder weniger stark an (Abb.22 und 23). Es ergibt sich in vernünftiger Weise, daß das Vorzeichen der azimuthalen Schubspannung wechselt an der Position, wo der Gradient der mittleren axialen Geschwindigkeit in Umfangsrichtung verschwindet ($\phi \approx 35$ grd, Abb.22). Weiterhin zeigt sich anhand der Meßdaten, daß im Spalt zwischen Stab und Kanalwand ($\phi = 90$ grd bzw. $x = 0$ mm) die azimutale Schubspannung ebenso verschwindet, wie auf der Symmetrielinie des Wandkanals nahe der

Kanalwand ($x=84.4$ mm). Das beweist, daß die Strömung im ausgemessenen Teil des Wandkanals praktisch unbeeinflusst von den Nachbarkanälen war. Die Höhenliniendarstellung der azimuthalen Schubspannung (Abb.24) verdeutlicht die Meßwerte. Es ergeben sich die Maximalwerte der azimuthalen Schubspannung in den Gebieten des maximalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit in Umfangsrichtung, wie zu erwarten war. Die Meßwerte im wandfernen Bereich scheinen allerdings etwas zu hoch zu sein, wie aus den ermittelten Korrelationskoeffizienten R_{uw} (s. 3.5.4) deutlich wird. Dies wird vor allem auf zwei Ursachen zurückgeführt: einerseits spielt die schon erwähnte nicht orthogonale Richtung der Koordinaten in diesem Bereich sicherlich eine Rolle, andererseits wird sich hier vermutlich die Vernachlässigung der Korrelation $\overline{v'w'}$ bei der Lösung des Gleichungssystems auswirken. Insgesamt verlaufen die gemessenen Werte ganz ähnlich zu früheren Ergebnissen.

3.5.3 Korrelationskoeffizient R_{uv}

Die gemessenen Korrelationskoeffizienten der Schubspannung in radialer Richtung (Abb.25 und 26)

$$R_{uv} = \frac{\overline{-u'v'}}{\sqrt{u'^2} \sqrt{v'^2}} \quad (9)$$

zeigen einen ähnlichen Verlauf wie bei Kreisrohren. Über einen großen Bereich des Strömungsquerschnitts liegt dieser Korrelationskoeffizient bei etwa 0.4. Im wandfernen Bereich liegen die Korrelationskoeffizienten z.T. höher als beim Kreisrohr, was auf die gewählten Koordinaten zurückgeführt werden muß, wodurch die gemessene Position der Nullschubspannung relativ weit vom Ort der Maximalgeschwindigkeit entfernt liegt. Die Höhenliniendarstellung (Abb.27) zeigt ebenfalls

einen relativ gleichmäßigen Verlauf.

3.5.4 Korrelationskoeffizient R_{uw}

Die ermittelten Korrelationskoeffizienten der Schubspannung parallel zu den Wänden (Abb.28 und 29)

$$R_{uw} = \frac{-\overline{u'w'}}{\sqrt{\overline{u'^2}} \cdot \sqrt{\overline{w'^2}}} \quad (10)$$

steigen im wandfernen Bereich sehr stark an. Dieses Verhalten wurde bereits unter 4.3.2 diskutiert. Es ist vermutlich auf die Vernachlässigung der Schubspannung $\overline{v'w'}$ zurückzuführen, sowie auf die nicht-orthogonalen Koordinaten. Korrelationskoeffizienten größer als 1, die physikalisch nicht sinnvoll sind, ergeben sich nicht bei dieser Untersuchung im Gegensatz zu früheren Ergebnissen. Die Höhenliniendarstellung (Abb.30) zeigt ebenfalls, daß die azimuthale Schubspannung gegen Null geht auf der Symmetrielinie ($x = 84.4$ mm) und in den Spalten zwischen den Stäben ($\phi = 0$ grad) bzw. zwischen Stab- und Kanalwand ($\phi = 90$ grad bzw. $x = 0$ mm). Das bedeutet, daß die Nachbarkanäle die Strömungs- und Turbulenzverteilung in dem untersuchten Wandkanal kaum beeinflussen.

3.6 Wirbelviskositäten

Aus den Daten für die turbulenten Schubspannungen und aus der Verteilung des zeitlichen Mittelwerts der Strömungsgeschwindigkeit in axialer Richtung wurden die Wirbelviskositäten in radialer (ϵ_r bzw. ϵ_y) und azimuthaler (ϵ_ϕ und ϵ_x) Richtung gemäß den Definitions-

gleichungen ermittelt. Dazu wurde das Rechenprogramm EPSI /18/ verwendet, in dem die zur Berechnung erforderlichen Geschwindigkeitsgradienten berechnet werden. Es wird durch jeweils drei Meßwerte für die mittlere Geschwindigkeit eine Parabel 2. Ordnung gelegt und die Ableitung am betrachteten Ort ermittelt. Die gemessenen Geschwindigkeits- und Schubspannungsverteilungen werden dabei verwendet, wie sie gemessen wurden, es wird also keinerlei Glättung der Meßdaten vorgenommen.

3.6.1 Wirbelviskosität senkrecht zur Wand ϵ_r

Die Wirbelviskosität senkrecht zur Wand ergibt sich in dimensionsloser Form zu:

$$\epsilon_r^+ = \frac{\epsilon_r}{Lu^*} = \frac{-\overline{\rho u'v'}/\tau_w}{\frac{\partial (u/u_{REF})}{\partial (r/L)}} \frac{u^*}{u_{REF}} \quad (11)$$

Hierin ist $u^+ = \sqrt{\tau_w/\rho}$ die Wandschubspannungsgeschwindigkeit an der betrachteten Umfangsposition und L ist die Länge des Geschwindigkeitsprofils zwischen der Wand und dem Ort der Maximalgeschwindigkeit.

Die ermittelten Wirbelviskositäten sind in Abb.31 und 32 dargestellt. Zum Vergleich wurde der Verlauf der Wirbelviskosität im Kreisrohr nach Reichardt /19/ miteingetragen. Die gemessenen Wirbelviskositäten sind im wandfernen Bereich durchweg höher als beim Kreisrohr. Hier wirken sich die wegen der gewählten Koordinaten relativ zu hoch gemessenen Schubspannungen aus. Die größere Streuung wird natürlich auch durch die sehr kleinen Geschwindigkeitsgradienten bewirkt. In Wandnähe stimmen die ermittelten Wirbelviskositäten senkrecht zur

Wand sehr gut mit den Kreisrohrwerten überein. Die neuen Daten stimmen mit den früheren Ergebnissen sowohl qualitativ als auch quantitativ gut überein. Auch die Höhenliniendarstellung (Abb.33) zeigt eine gleichmäßige Verteilung der Wirbelviskositäten senkrecht zur Wand.

3.6.2 Wirbelviskosität parallel zur Wand ϵ_{ϕ}

Die Wirbelviskosität parallel zur Wand ergibt sich in dimensionsloser Form zu:

$$\epsilon_{\phi}^{+} = \frac{\epsilon_{\phi}}{L \cdot u^{*}} = \frac{-\rho \overline{u'w'}/\tau_w}{\frac{r}{L} \frac{\partial (u/u_{REF})}{\partial \phi}} \frac{u^{*}}{u_{REF}} \quad (12)$$

Wie bei den früheren Messungen unterscheiden sich die Ergebnisse für die Wirbelviskosität parallel zur Wand ganz erheblich von denen senkrecht zur Wand. Die ermittelten Werte sind in Abb.34 und 35 dargestellt. Die Wirbelviskositäten parallel zur Wand sind sehr stark ortsabhängig und zwar sowohl in zu Wand senkrechter Richtung als auch besonders in Umfangsrichtung. So ergeben sich Maximalwerte der Wirbelviskosität parallel zur Wand jeweils nahe den engsten Querschnitten ($\phi = 5, 10, 75-85$ grad bzw. $x=5-20$ mm). In den Spalten selbst ($\phi = 0, 90$ grad bzw. $x=0$ mm) sind die Wirbelviskositäten nicht definiert, da der Geschwindigkeitsgradient in Umfangsrichtung gegen Null geht. Das gleiche gilt für die Symmetrielinie bei $x=84.4$ mm und für $\phi \approx 40$ grad.

Betrachtet man den Verlauf der Wirbelviskosität parallel zur Wand im Strömungsbereich um den Stab, so erkennt man, daß die Wirbelviskositäten zunächst vom Höchstwert $\epsilon_{\phi}^{+} \approx 7$ stark abfallen (etwa um

den Faktor 50) bis $\phi = 40$ grad: die Position, an der der Geschwindigkeitsgradient in Umfangsrichtung verschwindet. Hier werden Werte gemessen, die der Wirbelviskosität parallel zu den Wänden beim Kreisrohr entsprechen ($\epsilon_{\phi}^+ \approx 0.15$).

Anschließend steigen die Wirbelviskositäten wieder stark an zu einem Höchstwert im Spalt zwischen Stab und Wand. Entsprechend ergibt sich für den Strömungsbereich nahe der Kanalwand ein stetiger Abfall vom Höchstwert im Spalt auf den Minimalwert für $x=84.4$ mm, wo der Gradient der Geschwindigkeit in Umfangsrichtung ebenfalls verschwindet.

Zum Verlauf in radialer Richtung läßt sich generell sagen, daß die Wirbelviskositäten mit größerer Entfernung von der Wand zunächst leicht ansteigen, dann jedoch wieder leicht abfallen, nachdem ein Maximalwert durchlaufen wird.

Abb.36 zeigt eine Höhenliniendarstellung der Meßwerte. Die Ergebnisse ergeben ein sehr einheitliches Bild, abgesehen von den Gebieten, wo der Gradient der Geschwindigkeit in Umfangsrichtung gegen Null geht. Dies ist besonders auffällig um $\phi = 40$ grad.

3.6.3 Anisotropiefaktoren

Die Anisotropiekoeffizienten wurden nach

$$n = \frac{\epsilon_{\phi}^+}{\epsilon_r^+}$$

berechnet. Die ermittelten Werte sind in Abb.37 und 38 dargestellt. In Wandnähe ergibt sich ein Anisotropiekoeffizient von 10 und höher. Die Maximalwerte der Anisotropiekoeffizienten ergeben sich zu größer als 70. Diese hohen Werte treten in den engsten Querschnitten auf. Erklärt werden können diese hohen Werte durch den nahezu ungehinderten Impulstransport in Umfangsrichtung in den engen Spalten, während der radiale Impulstransport durch die Wände behindert ist. Die Anisotropiekoeffizienten fallen mit wachsendem Wandabstand zunächst schwach, schließlich stark ab. Dieses starke Absinken wird vor allem durch die hohen gemessenen Wirbelviskositäten in radialer Richtung im wandfernen Bereich verursacht.

Die Höhenliniendarstellung der ermittelten Anisotropiefaktoren (Abb.39) zeigt ebenfalls eine recht gleichmäßige Verteilung.

4. Schlußfolgerungen

Die Meßergebnisse mit einem asymmetrischen Stabbündel aus vier parallelen Stäben im Rechteckkanal zeigen, daß für den Fall eines Wandabstandsverhältnisses ($W/D=1.096$) größer als das Stababstandsverhältnis ($P/D=1.07$) der Impulsaustausch hochgradig anisotrop ist. Das gilt besonders für die engen Spalte zwischen den Stäben bzw. zwischen Stab und Kanalwand. Während der zeitliche Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit keine Einflüsse von Sekundärströmungen erkennen läßt, zeigen die Verteilungen der Turbulenzintensitäten deutlich Auswirkungen von Sekundärströmungen, insbesondere in Gebieten, wo ein großer Gradient der Geschwindigkeitsverteilung in Umfangsrichtung vorliegt. Im zweiten Teil dieses Berichtes wird über die Ergebnisse im engen Wandkanal ($W/D=1.048$) berichtet. Gleichzeitig soll ein Vergleich der Ergebnisse mit Berechnungen durch den VELASCO-code /1/ durchgeführt werden.

Der Autor dankt den Herren E. Mensinger und G. Wörner für ihre
Mitarbeit bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche.

a	m	Abstand
A	-	Geometrieparameter
D	m	Stabdurchmesser
D_h	m	hydraulischer Durchmesser
G^*	-	Geometrieparameter
K	-	Geometrieparameter
$\overline{k'}$	m^2s^{-2}	kinetische Energie der Turbulent
L	m	Länge des Profils zwischen Wand und Maximal- geschwindigkeit
n	-	Anisotropiefaktor
P	m	Stababstand
r	m	Radius
R_{uv}	-	Korrelationskoeffizient uv
R_{uw}	-	Korrelationskoeffizient uw
Re	-	Reynolds-Zahl
\bar{u}	ms^{-1}	Geschwindigkeitskomponente in axialer Richtung
u'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung
u_{REF}	ms^{-1}	Referenzgeschwindigkeit
u_m	ms^{-1}	mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Kanal
u^*	ms^{-1}	Schubspannungsgeschwindigkeit
u^+	-	dimensionslose Geschwindigkeit
v'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit senkrecht zur Wand
w'	ms^{-1}	Schwankungsgeschwindigkeit parallel zur Wand
W	m	Wandabstand
x	m	Position entlang der Kanalwand
y	m	Abstand von der Wand
y^+	-	dimensionsloser Wandabstand
ε	m^2s^{-1}	Wirbelviskosität
ε^+	-	dimensionslose Wirbelviskosität
λ	-	Druckverlustbeiwert
ϕ	grd	Umfangskoordinate
ρ	$kg\ m^{-3}$	Dichte
ν	m^2s^{-1}	kinematische Viskosität

τ_w	Nm-2	Wandschubspannung
τ_{Wav}	Nm-2	mittlere Wandschubspannung

Indizes

r	radial
ϕ	in Umfangsrichtung

Literatur

- /1/ W. Eifler and R. Nijsing
VELASCO Velocity field in asymmetric rod configurations
Report EUR-4950e
- /2/ W. Slagter
Finite element analysis for turbulent flows of incompressible
fluids in fuel rod bundles, Nucl. Sci. Engng., Vol.66, pp.84
(1978)
- /3/ K. Rehme
Experimentelle Untersuchungen der turbulenten Strömung in
einem Wandkanal eines Stabbündels, KfK-Bericht 2441 (1977)
- /4/ K. Rehme
The structure of turbulent flow through a wall subchannel of
a rod bundle, Nucl. Engng. Design 45, pp.311-323 (1978)
- /5/ K. Rehme
Messungen der Geschwindigkeits-, Turbulenz- und Wandschub-
spannungsverteilungen in einem Eckkanal eines Stabbündels,
KfK-Bericht 2512 (1977)
- /6/ K. Rehme
Turbulente Strömung in einem Wandkanal eines Stabbündel
KfK-Bericht 2617 (1978)
- /7/ K. Rehme
Non-isotropic eddy viscosities in turbulent flow through rod
bundles. NATO Advanced Study Institute, Istanbul (1978)
- /8/ K. Rehme
Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilungen in einem Wand-
kanal eines Stabbündels, KfK-Bericht 2637 (1978)

- /9/ K. Rehme
The structure of turbulent flow through a wall subchannel of a rod bundle with roughened rods, KfK-Bericht 2716 (1978)
- /10/ K. Rehme
The structure of turbulent flow through subchannels of rod bundles, Proc. Fluid Flow and Heat Transfer Over Rod or Tube Bundles, ASME Winter Annual Meeting, New York (1976)
- /11/ K. Rehme
Turbulent momentum transport in rod bundles, Nucl. Engng. Design (im Druck)
- /12/ K. Rehme
Untersuchungen zur Turbulenzstruktur in einem Wandkanal eines Stabbündel ($P/D=1.07$), KfK-Bericht 2983 (1980)
- /13/ K. Maubach
Reibungsgesetze turbulenter Strömungen
Chemie-Ing.-Technik 42 (15), 995-1004 (1970)
- /14/ K. Rehme
Simple method of predicting friction factors of turbulent flow in noncircular channels
Int. J. Heat Mass Transfer 16, 933-950 (1973)
- /15/ K. Rehme
Laminarströmung in Stabbündeln
Chemie-Ing.-Technik 43, (17), 962-966 (1971)
- /16/ J. Nikuradse
Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren.
VDI Forsch. Heft No. 356 (1932)

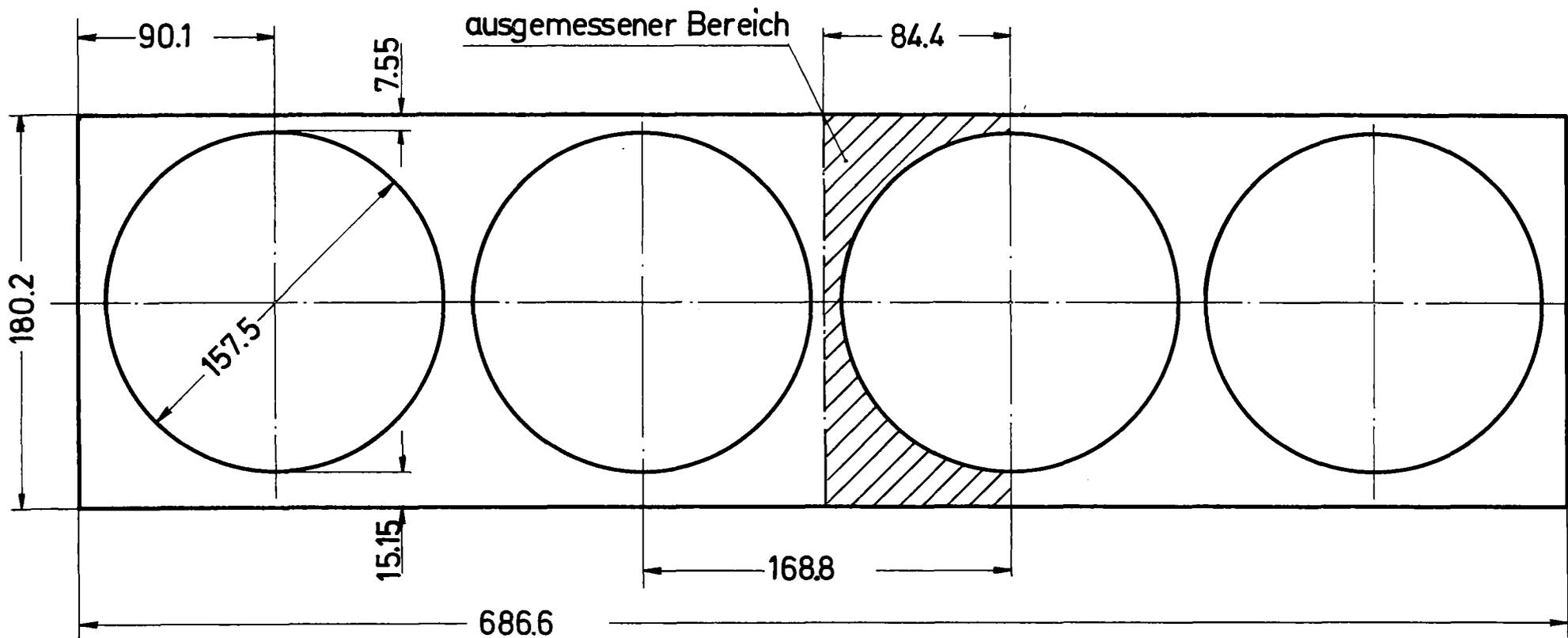
/17/ U. Schumann

- PLOTHL - Ein Fortran IV Unterprogramm zur Darstellung von Funktionen von zwei unabhängigen Variablen durch ihre Höhenlinien auf einem Plotter, KfK-Bericht Nr. 1486 (1971)

/18/ Ch. Hausmann und M. Mangelmann (unveröffentlicht)

/19/ H. Reichardt

Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Leitungen,
Z angew. Math. Mech. 31, 208-219 (1951)



$P/D = 1.0717$

$W/D = 1.0479$ (eng)

$W/D = 1.0962$ (weit)

Abb.1: Kanalquerschnitt

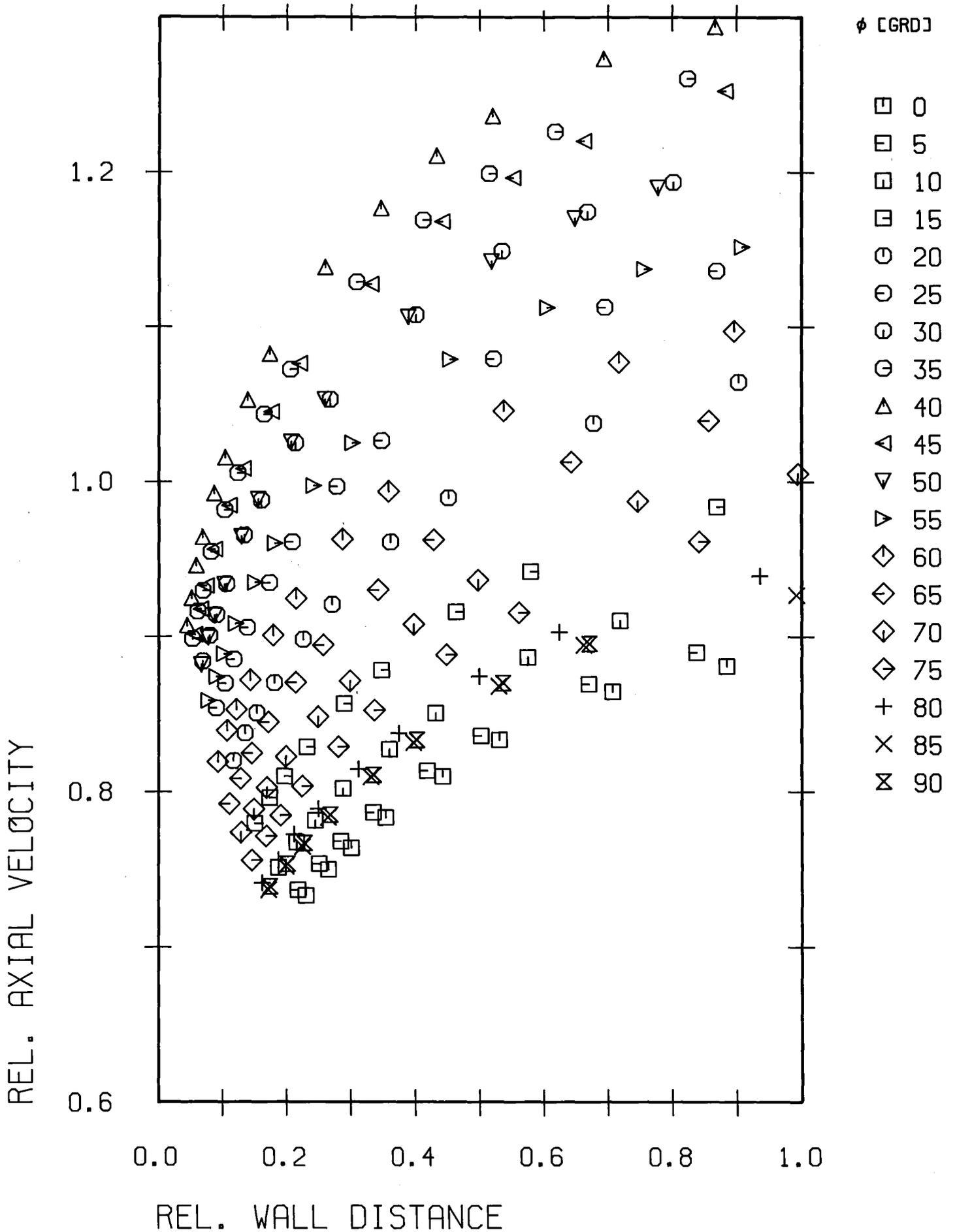


Abb.2: Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit (r/ϕ)

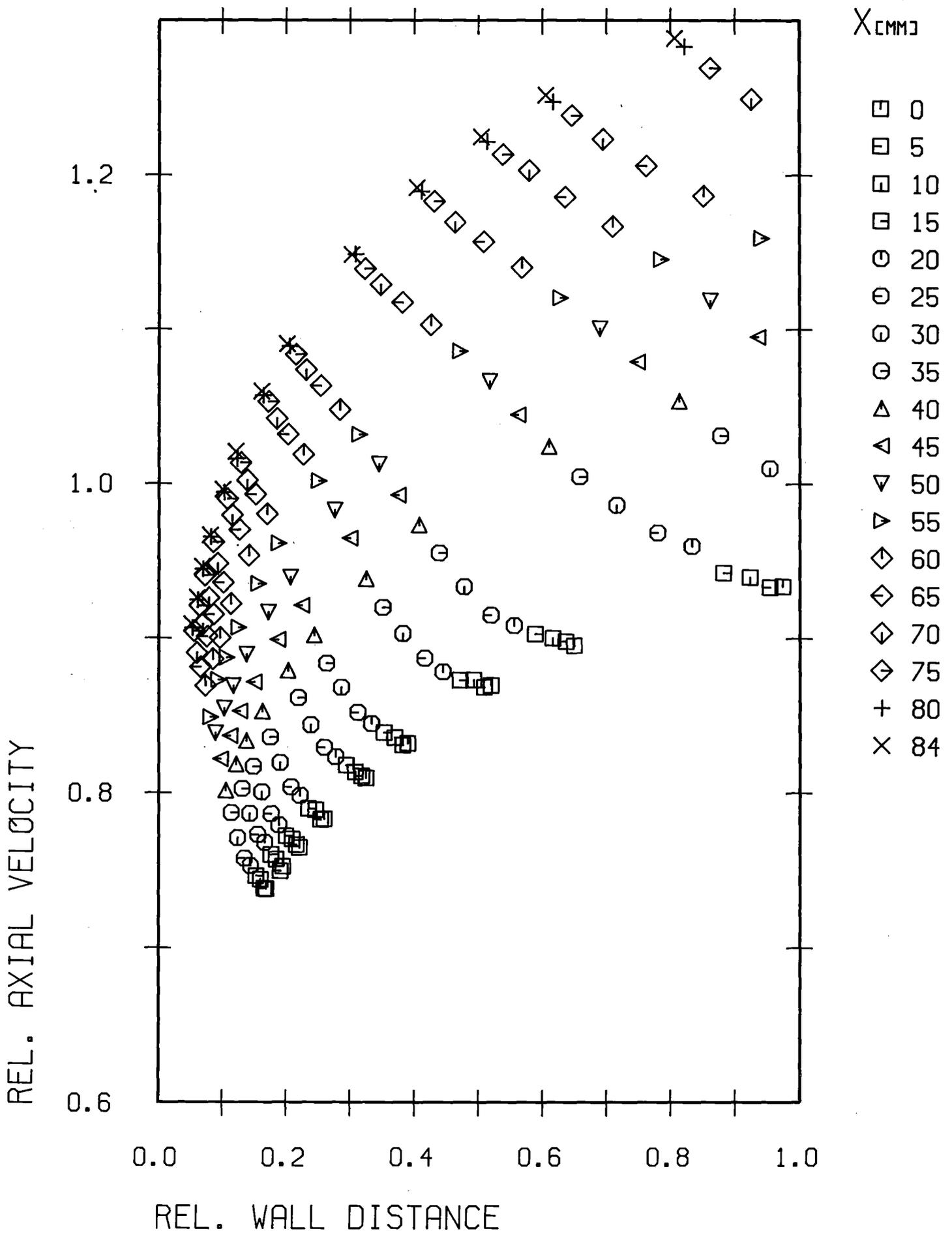


Abb.3: Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit (x/y)

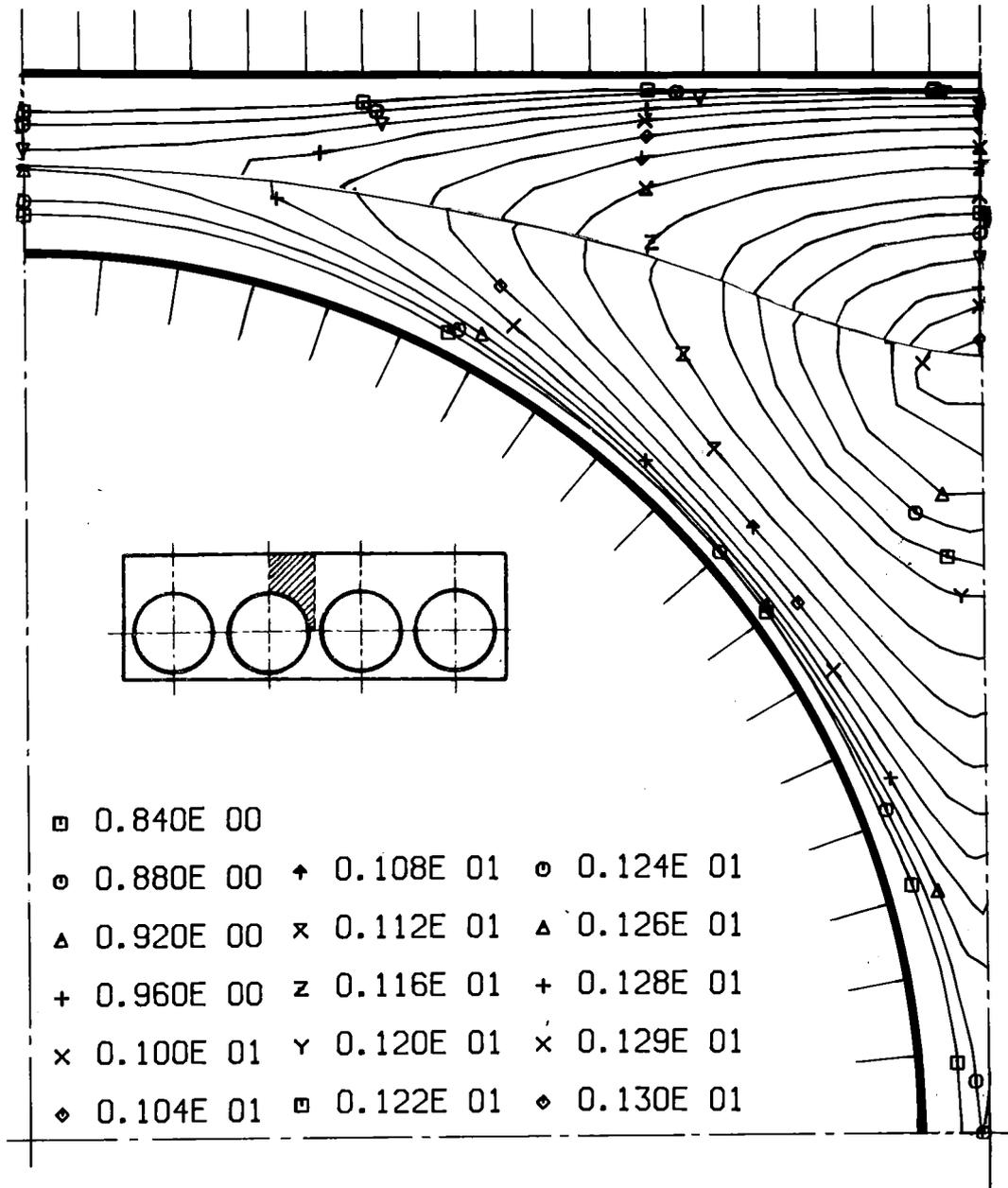


Abb.4: Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit (Höhenlinien)

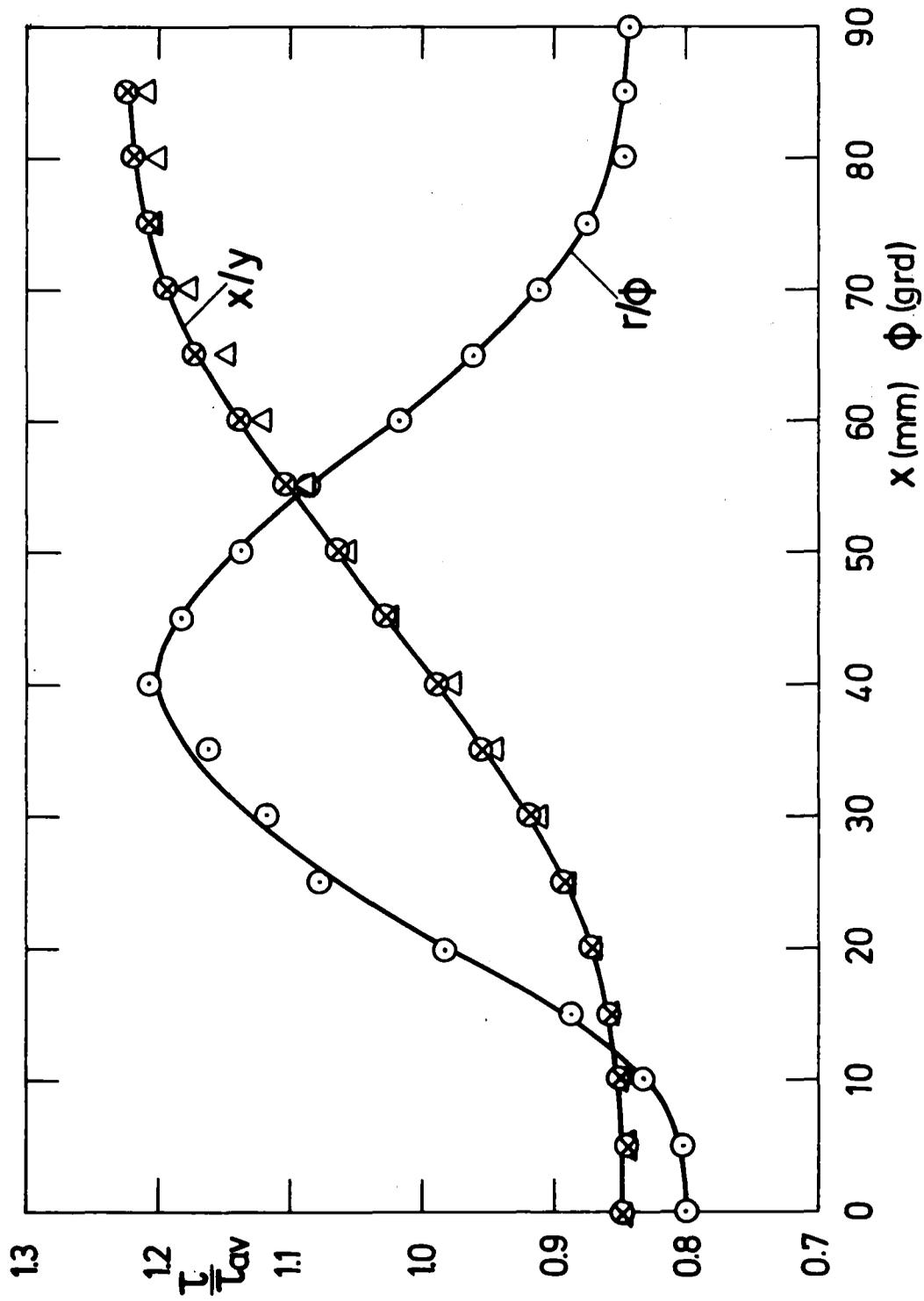


Abb. 5: Wandschubspannungsverteilung

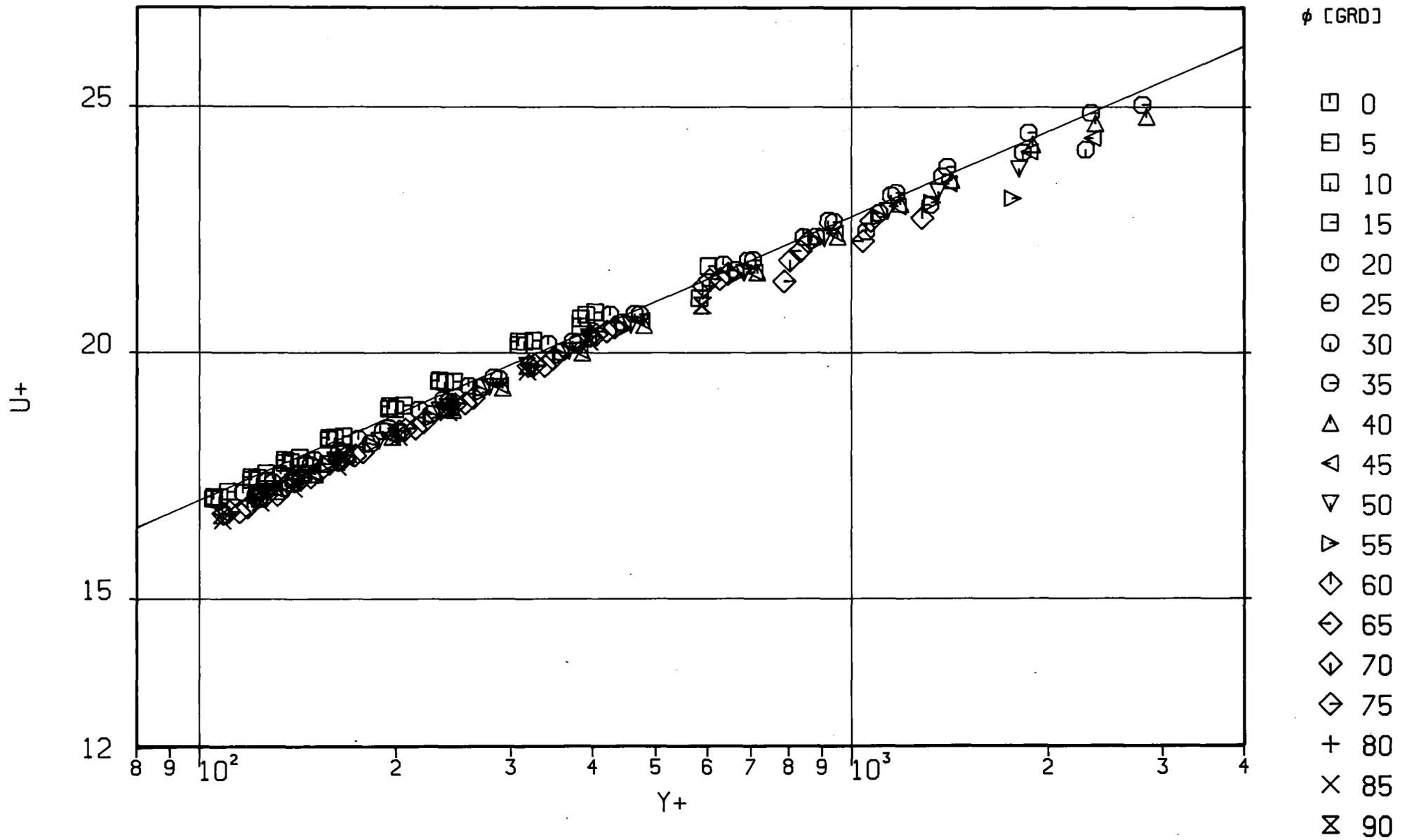


Abb.6: Dimensionsloses Geschwindigkeitsprofil (r/ϕ)

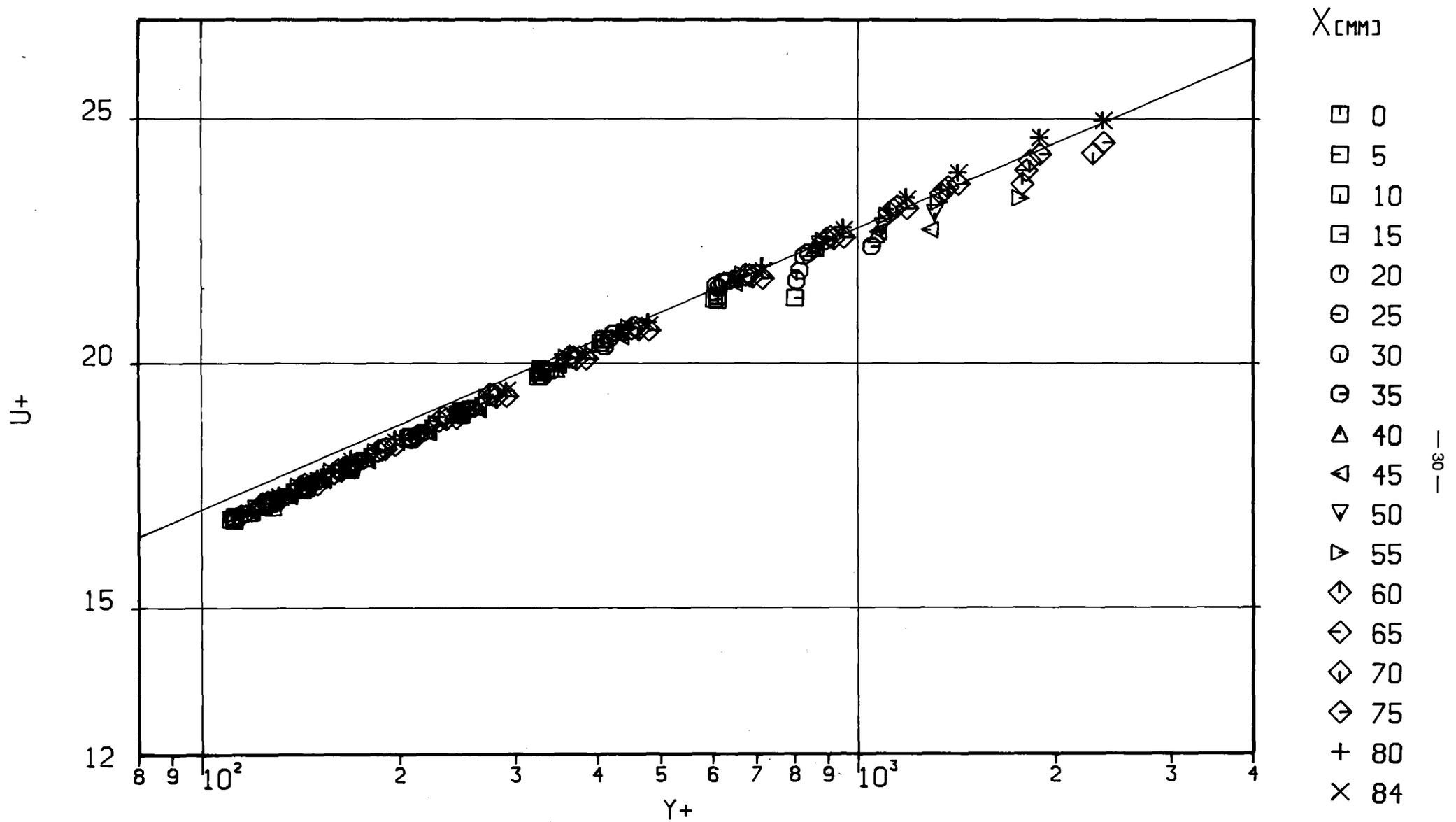


Abb.7: Dimensionsloses Geschwindigkeitsprofil (x/y)

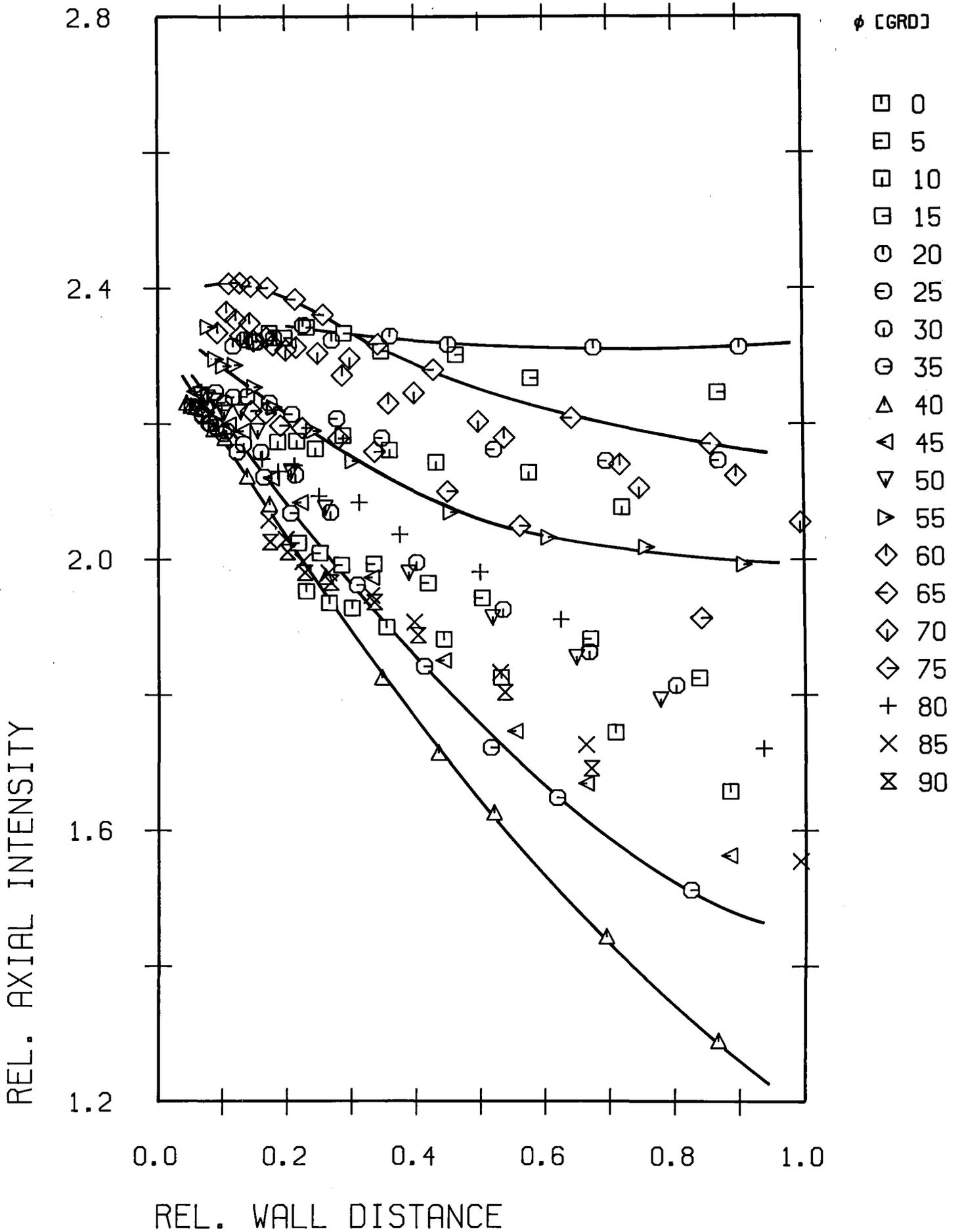


Abb.8: Axiale Turbulenzintensität (r/ϕ)

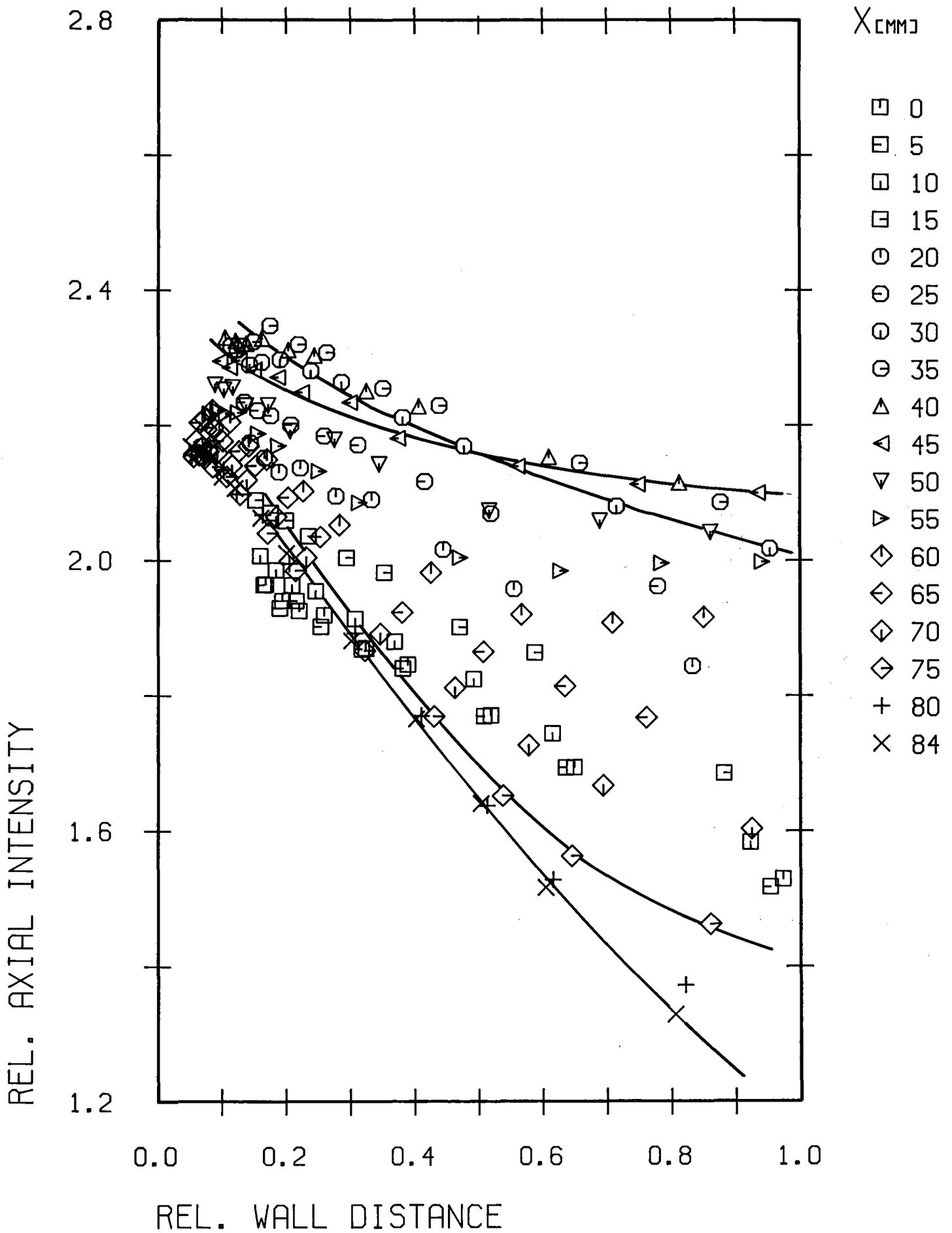


Abb.9: Axiale Turbulenzintensität (x/y)

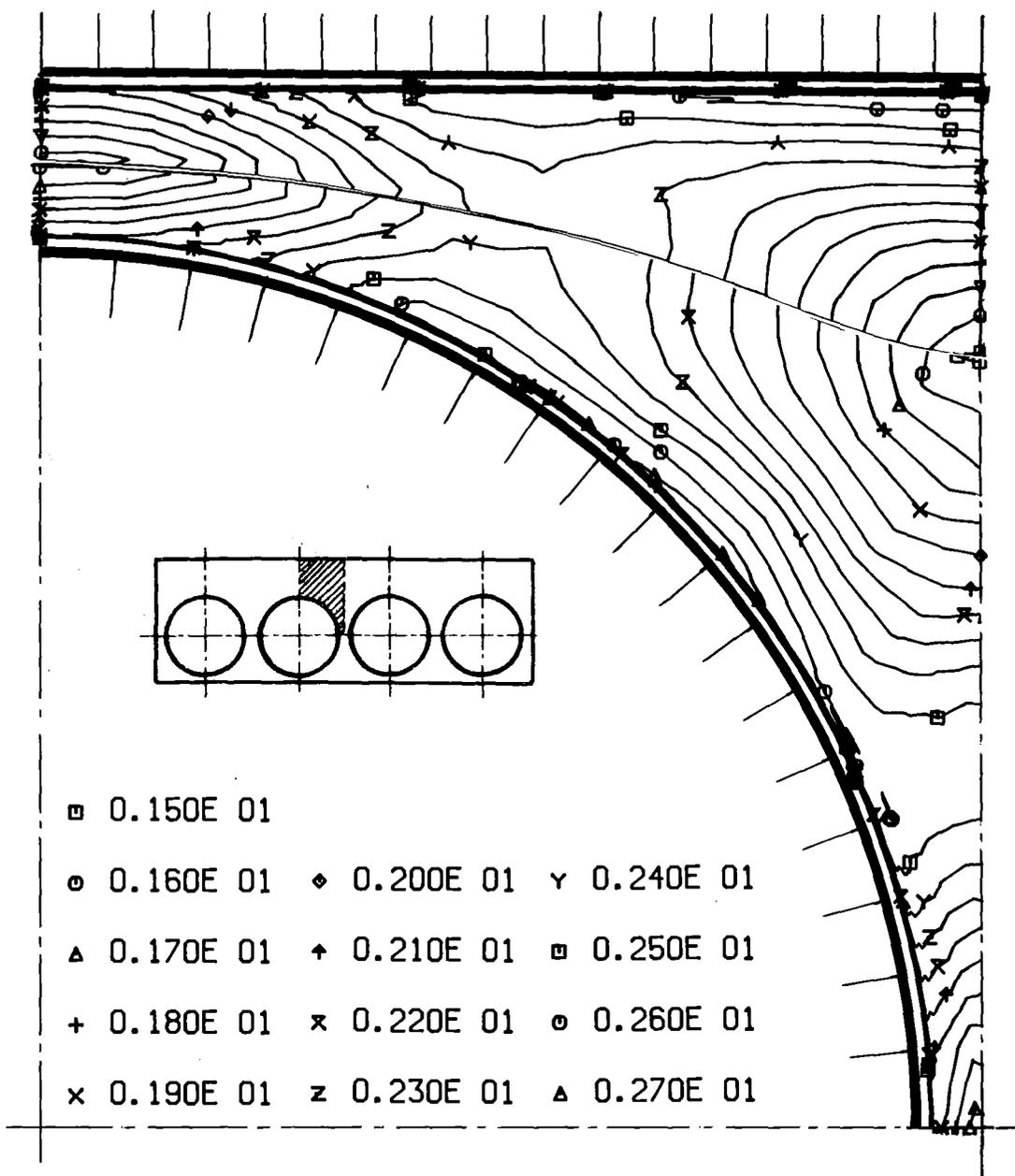


Abb.10: Axiale Turbulenzintensität (Höhenlinien)

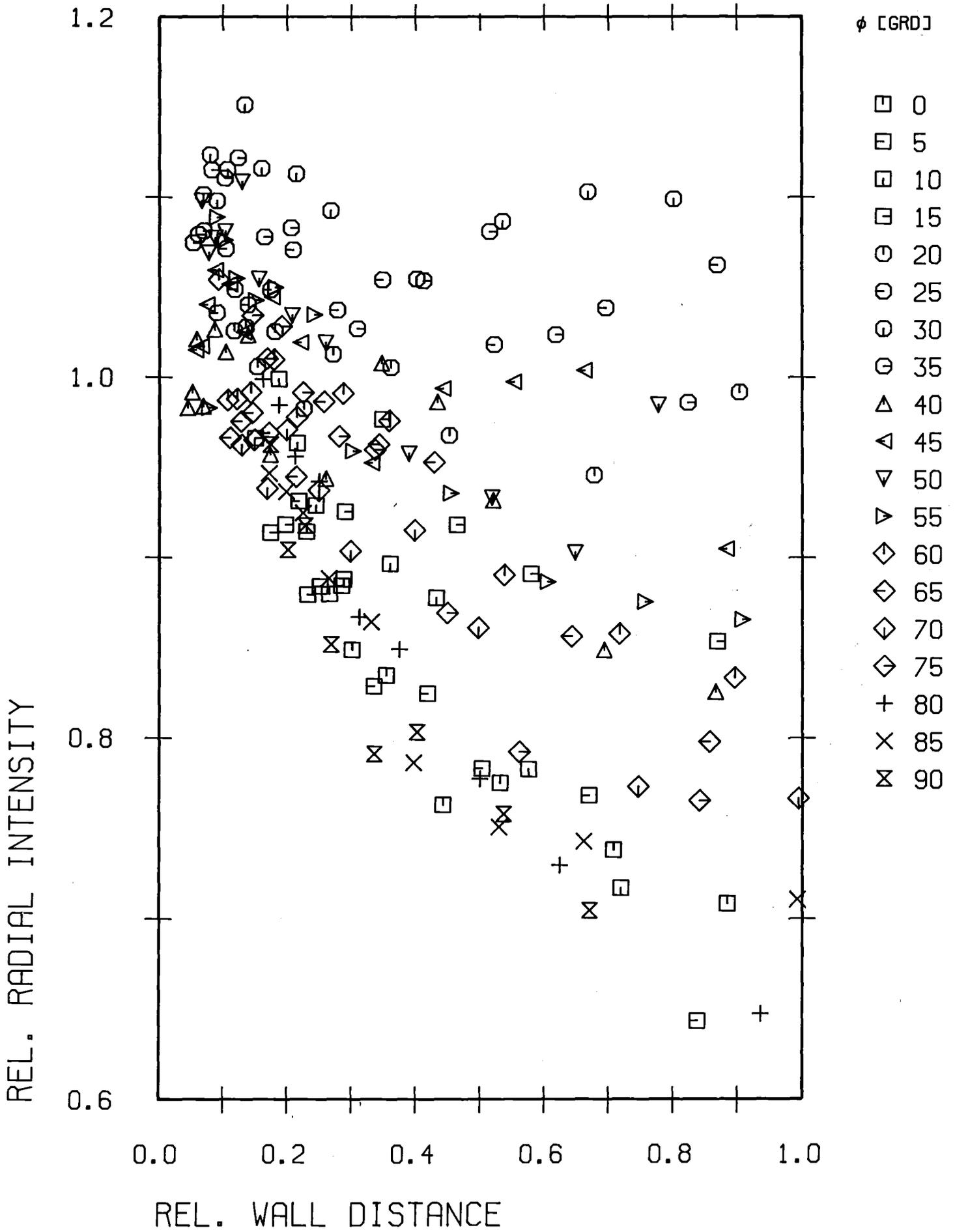


Abb.11: Radiale Turbulenzintensität (r/ϕ)

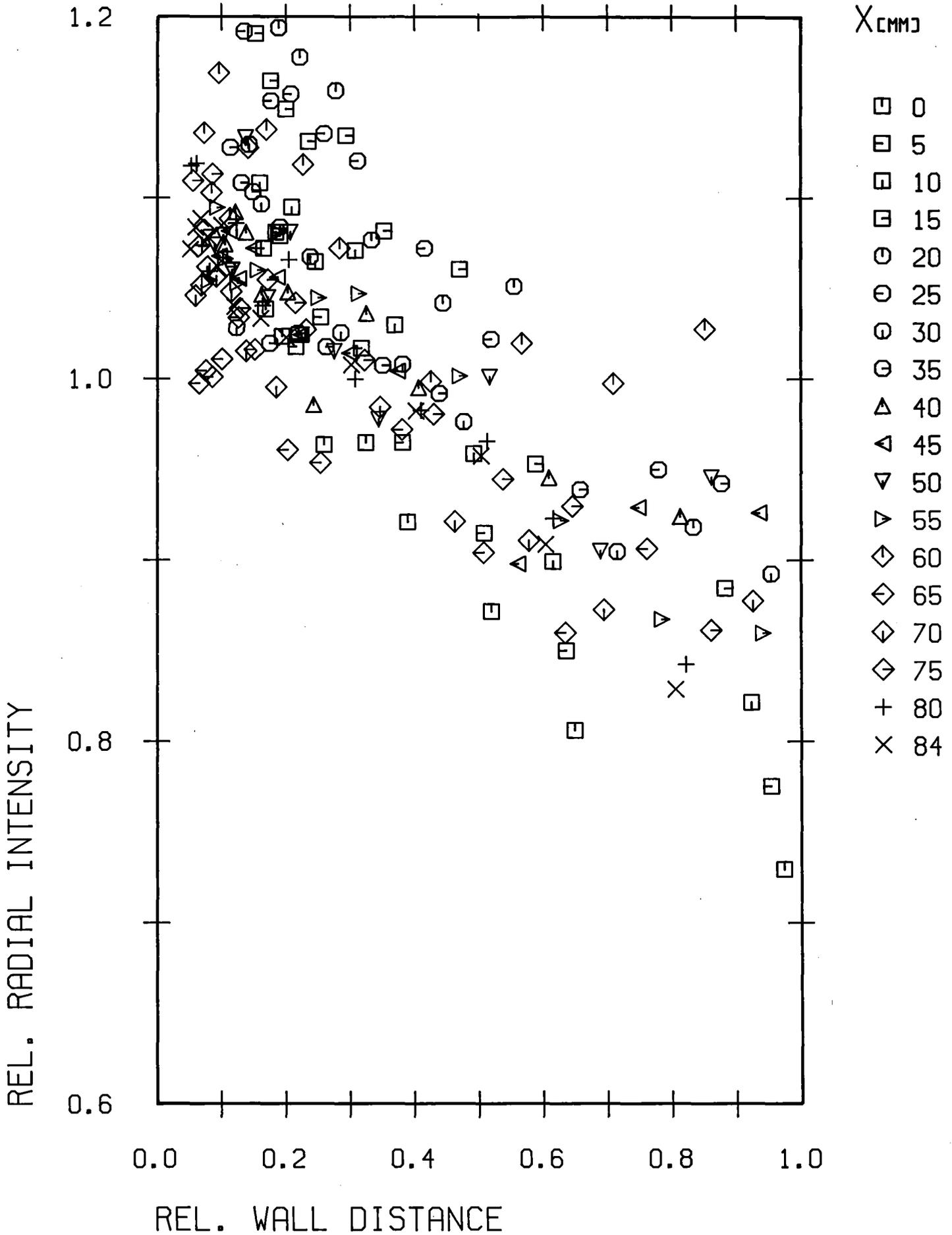


Abb.12: Radiale Turbulenzintensität (x/y)

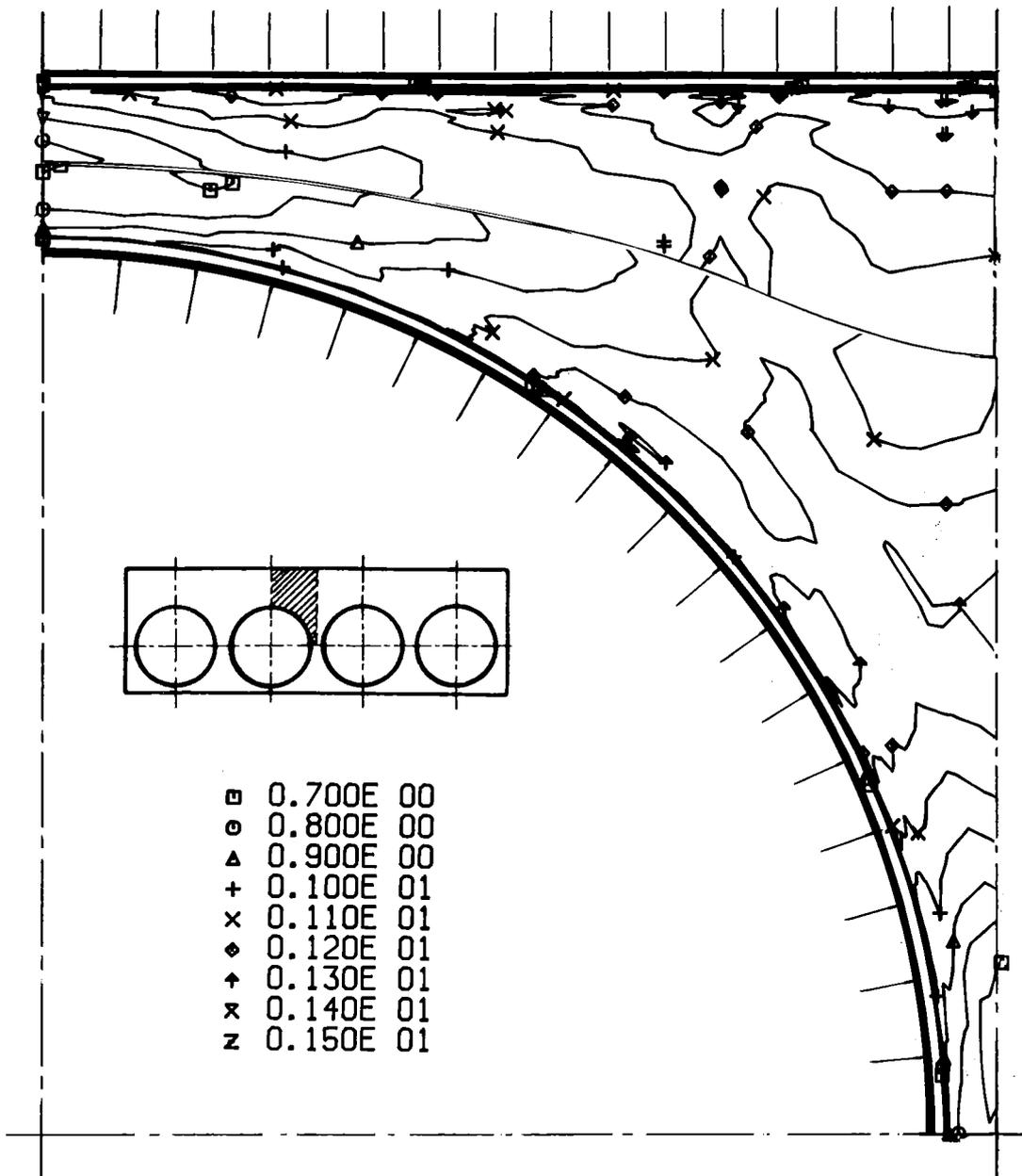


Abb.13: Radiale Turbulenzintensität (Höhenlinien)

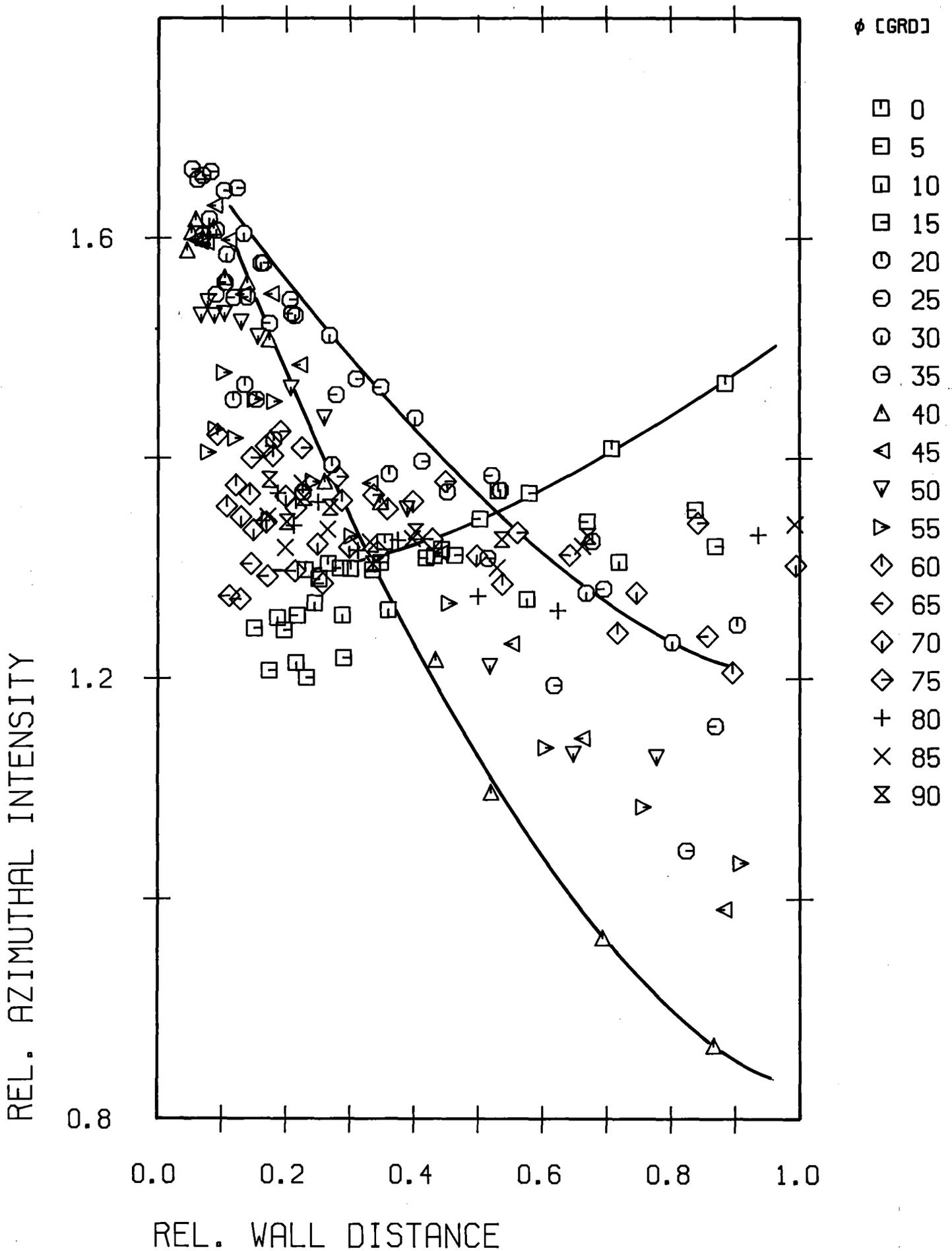


Abb.14: Azimutale Turbulenzintensität (r/ϕ)

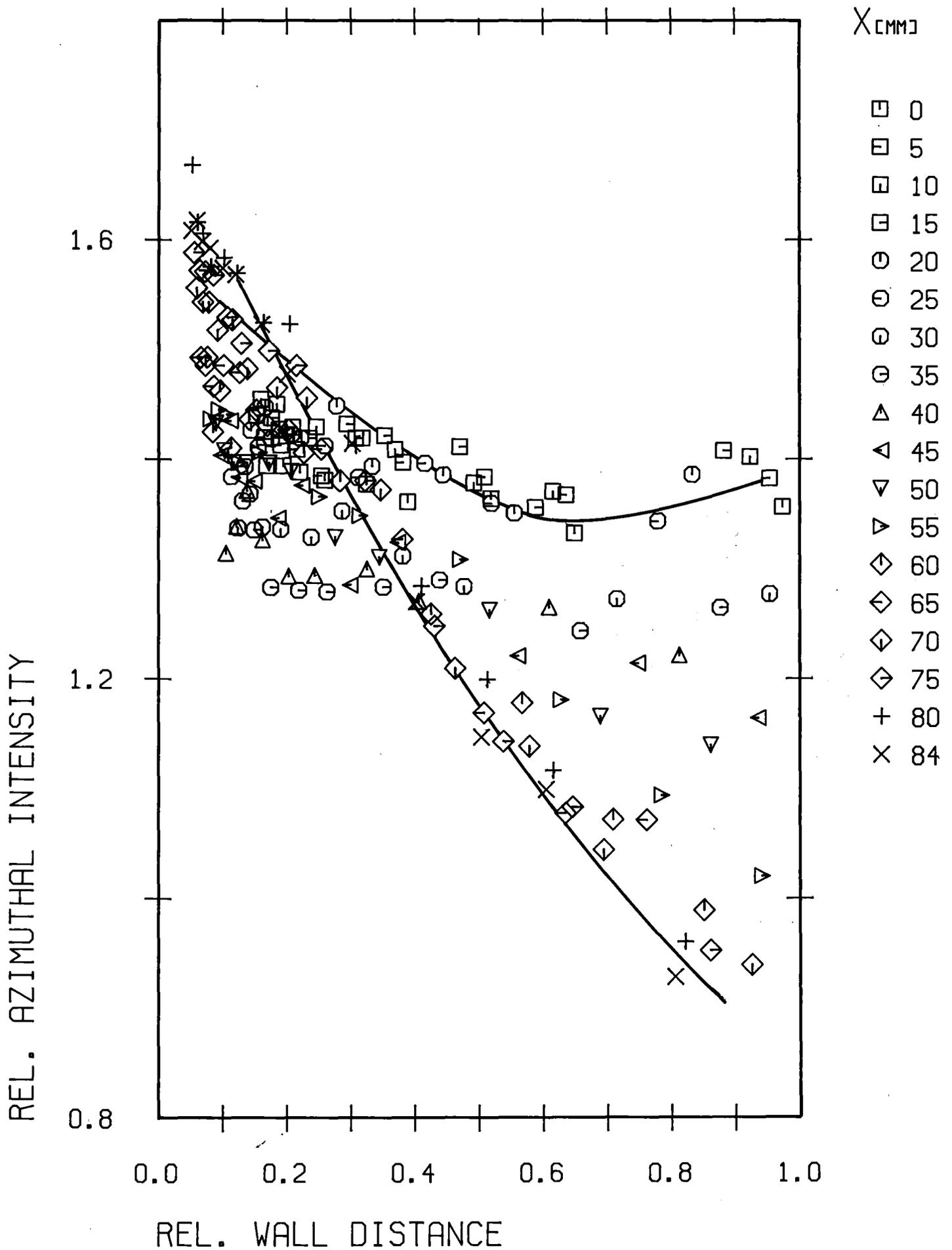


Abb.15: Azimutale Turbulenzintensität (x/y)

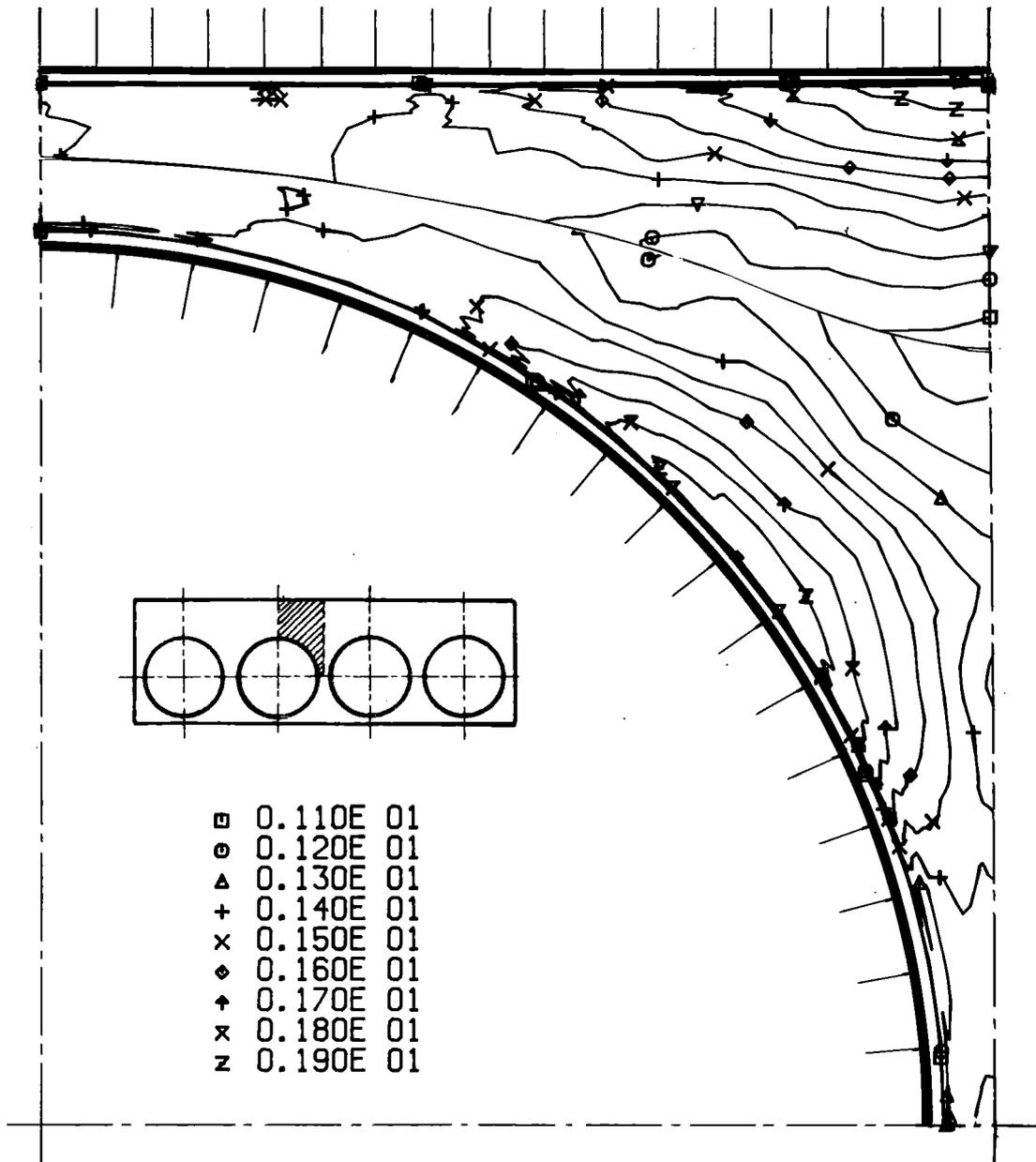


Abb.16: Azimutale Turbulenzintensität (Höhenlinien)

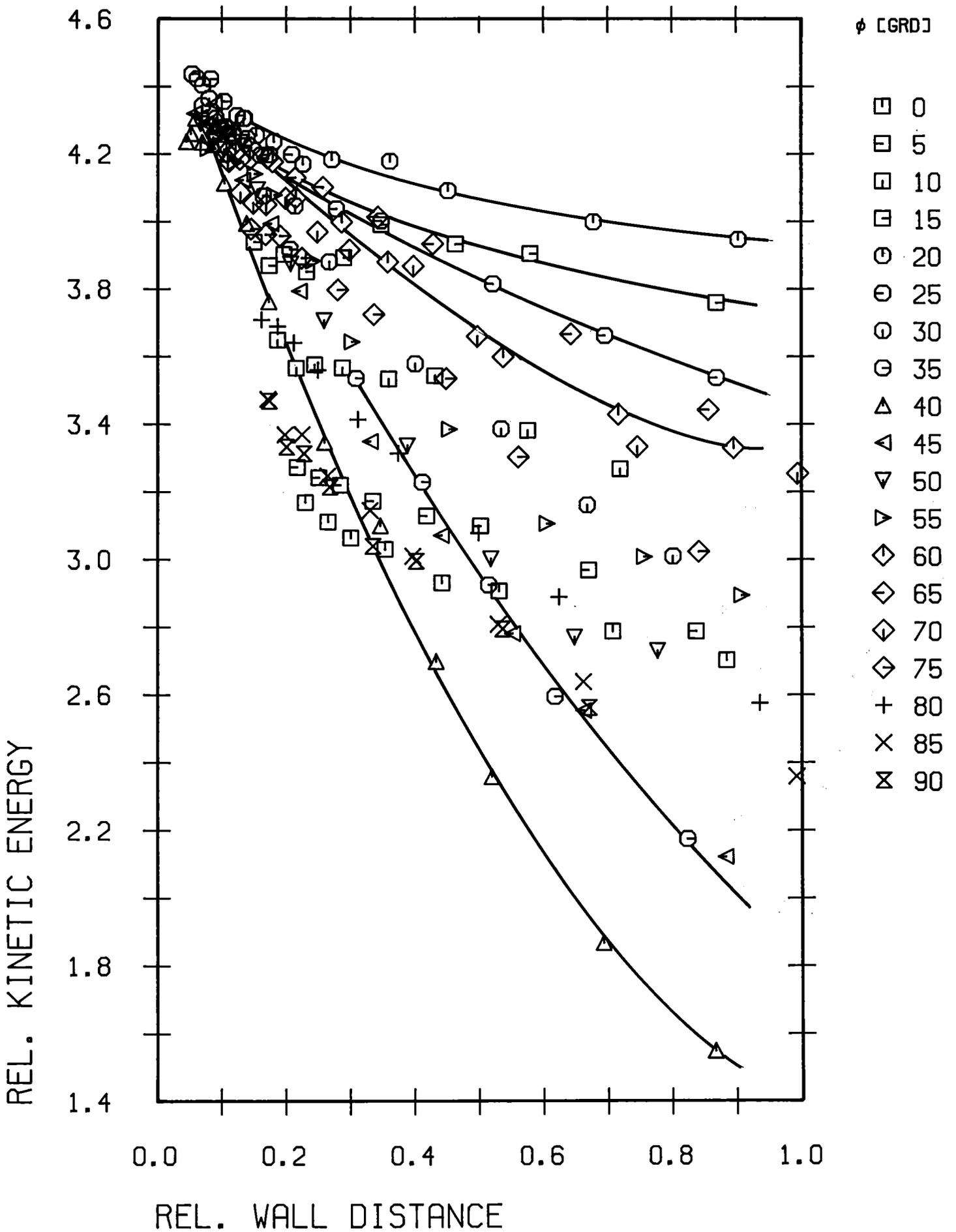


Abb.17: Kinetische Energie der Turbulenz (r/ϕ)

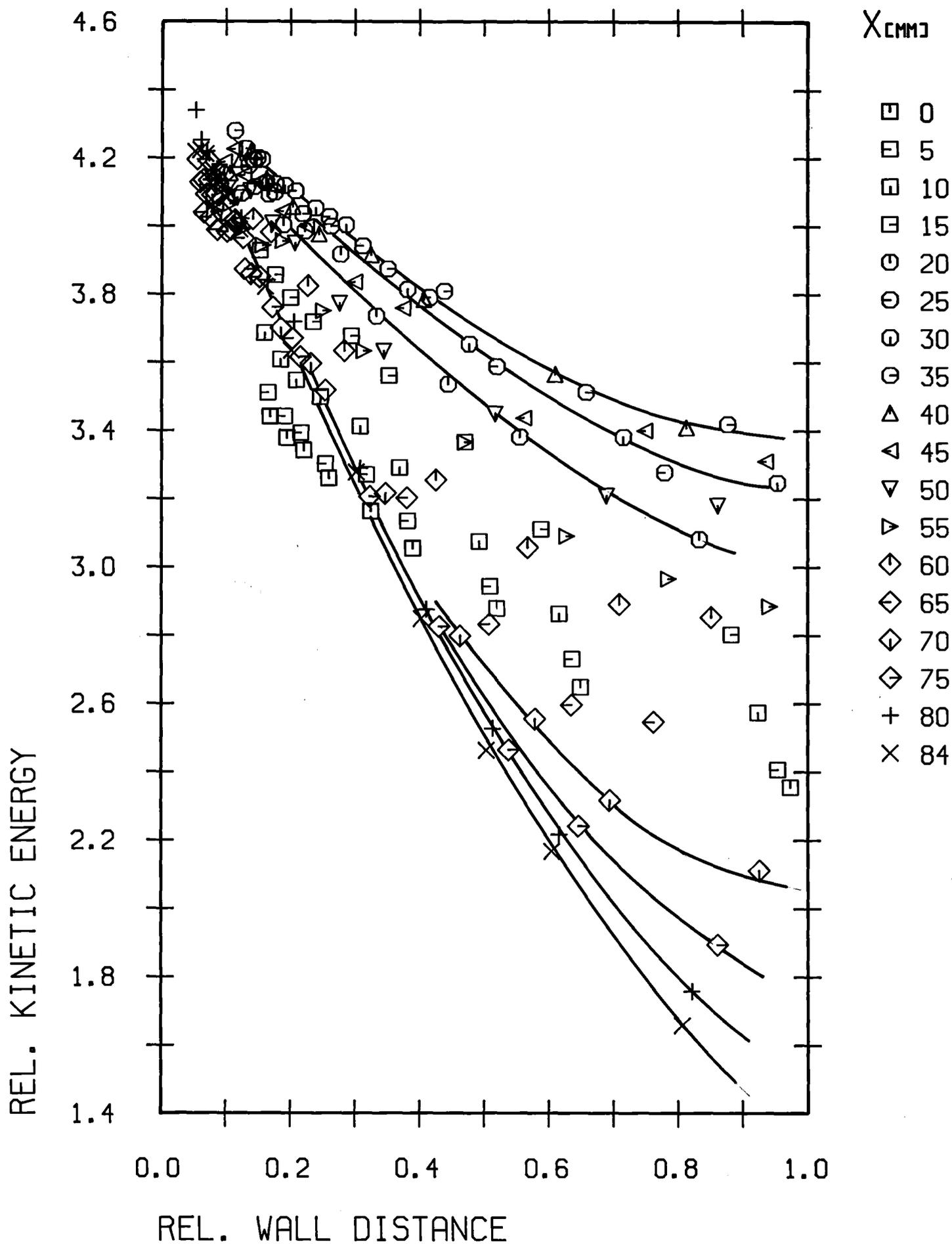


Abb.18: Kinetische Energie der Turbulenz (x/y)

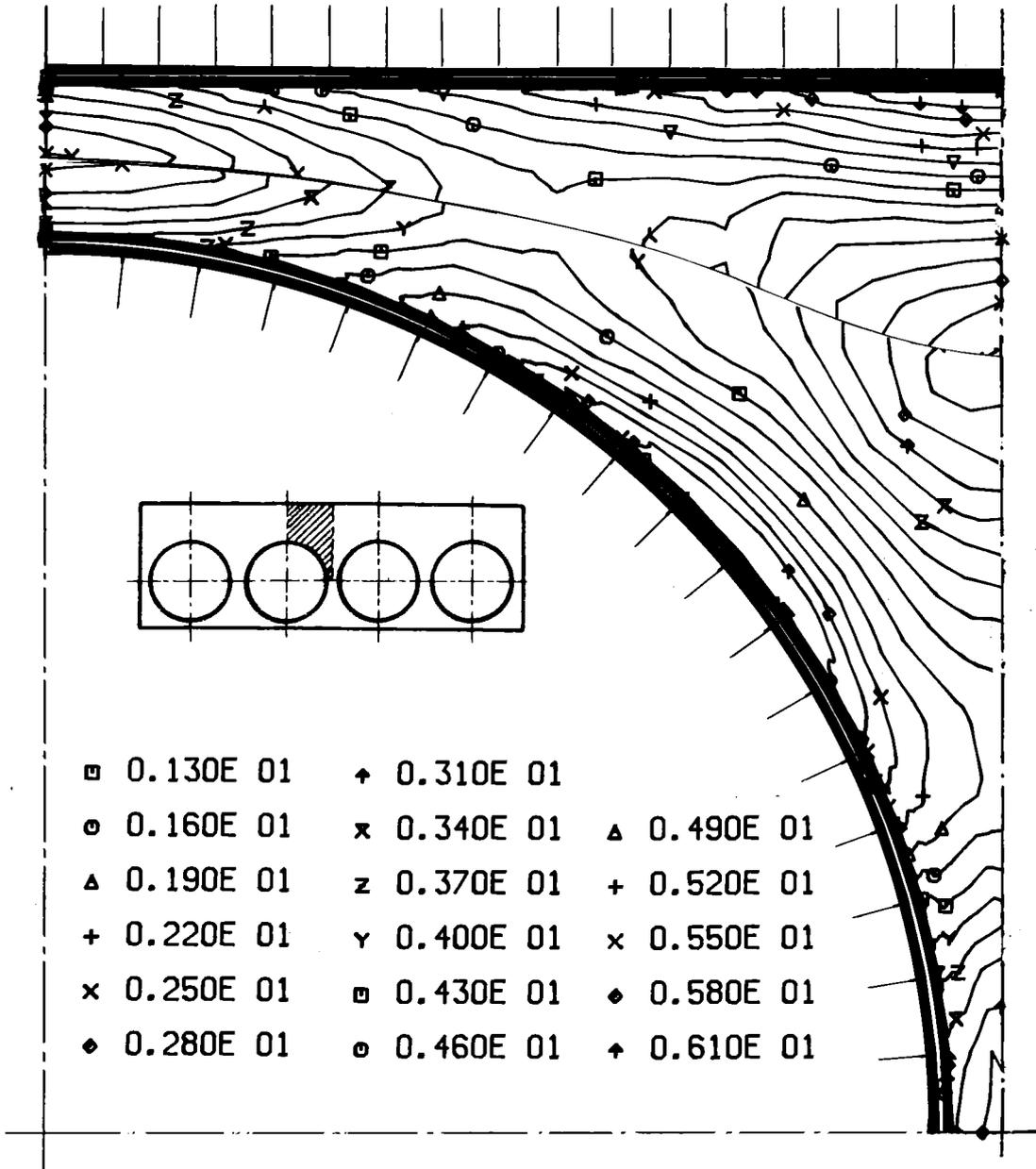


Abb.19: Kinetische Energie der Turbulenz (Höhenlinien)

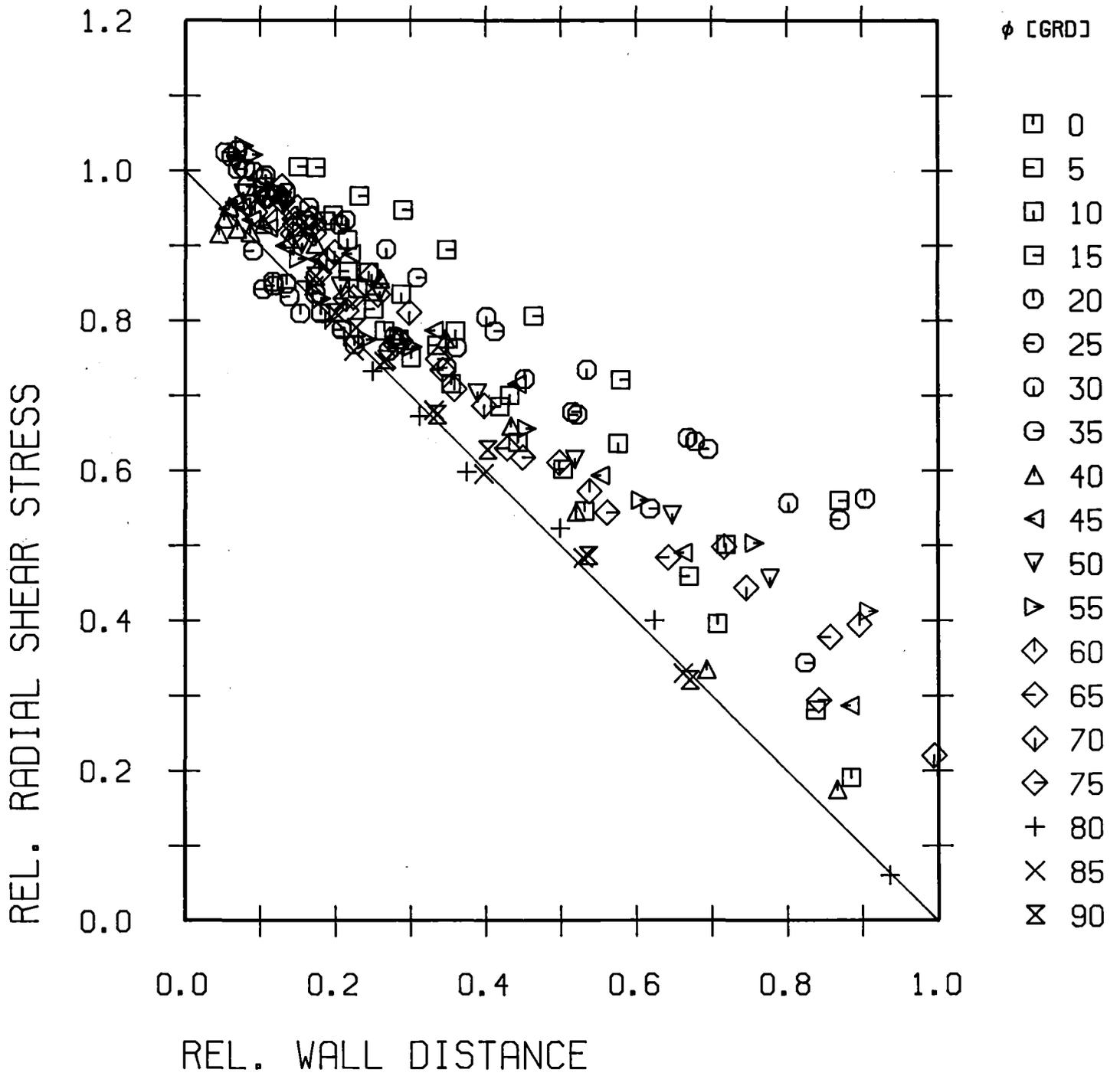


Abb.20: Radiale Schubspannung (r/ϕ)

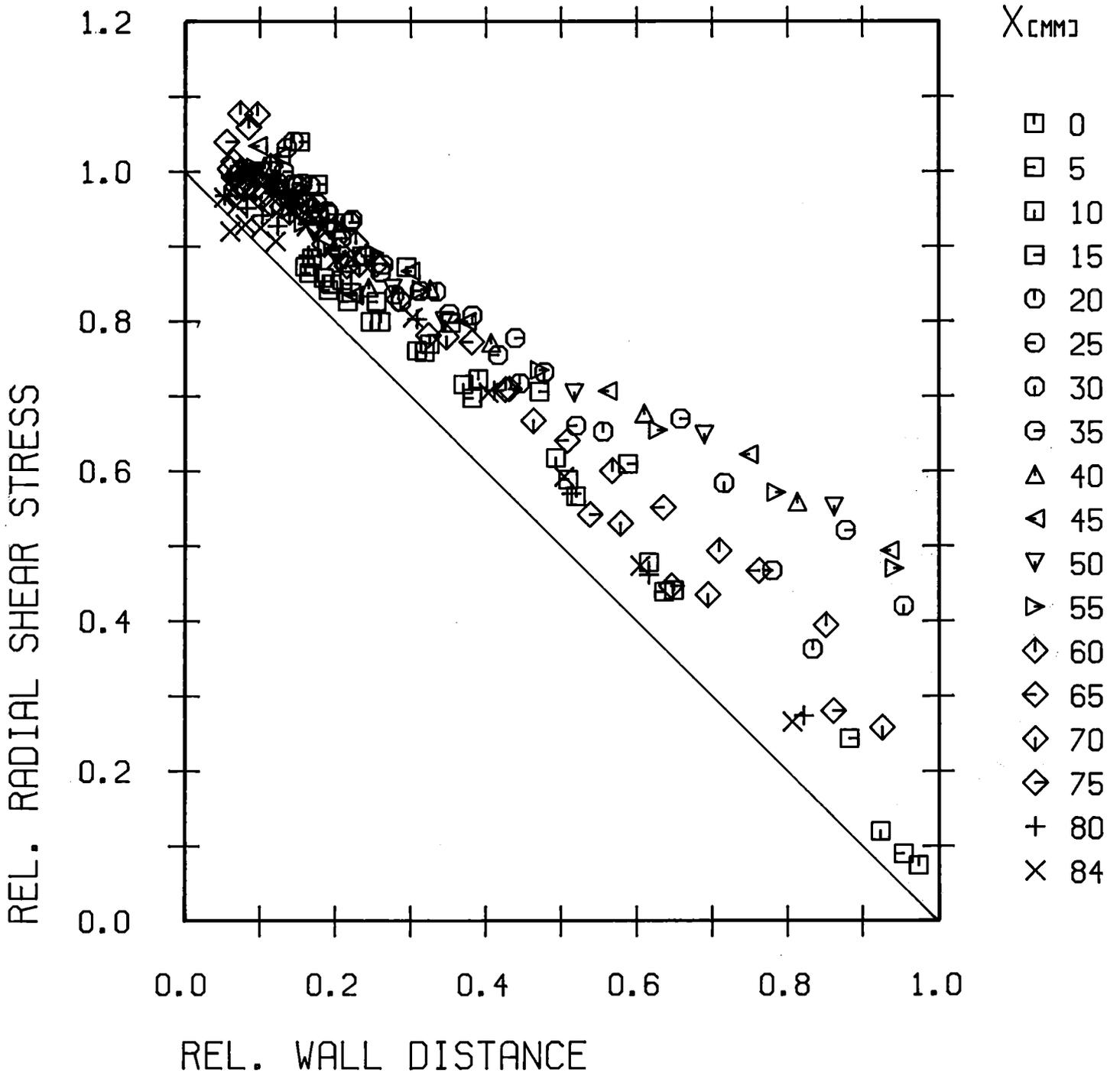


Abb.21: Radiale Schubspannung (x/y)

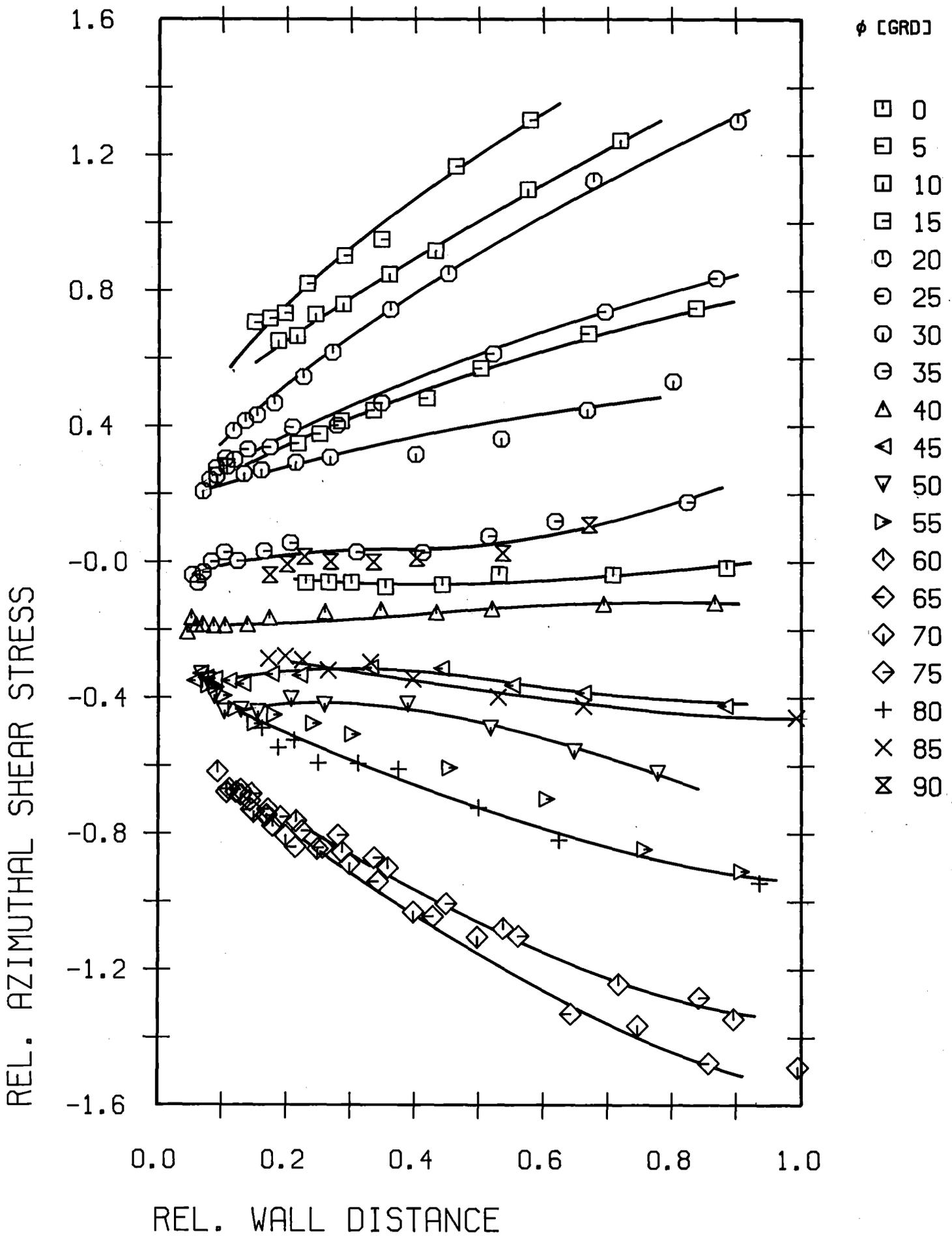


Abb.22: Azimutale Schubspannung (r/ϕ)

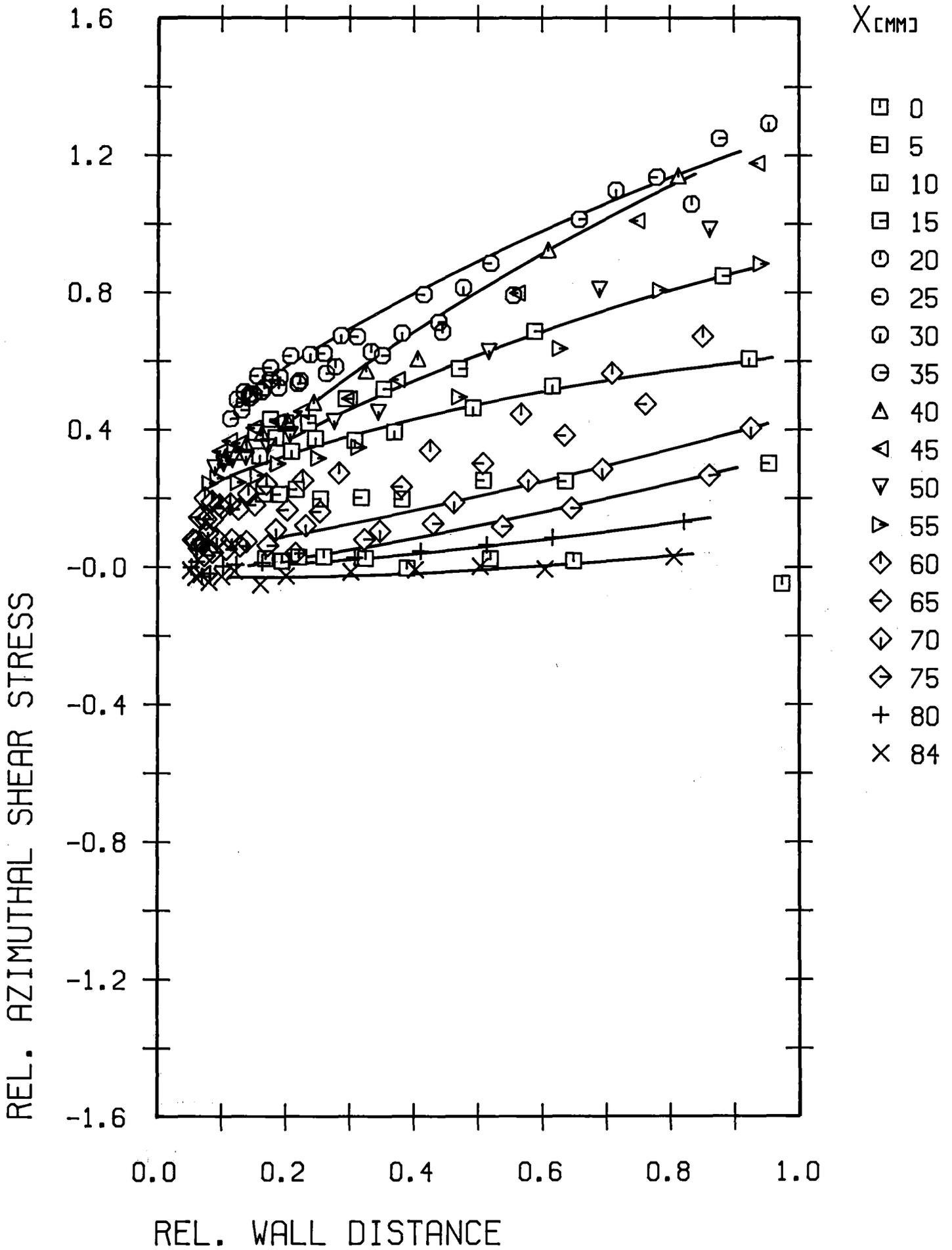


Abb.23: Azimutale Schubspannung (x/y)

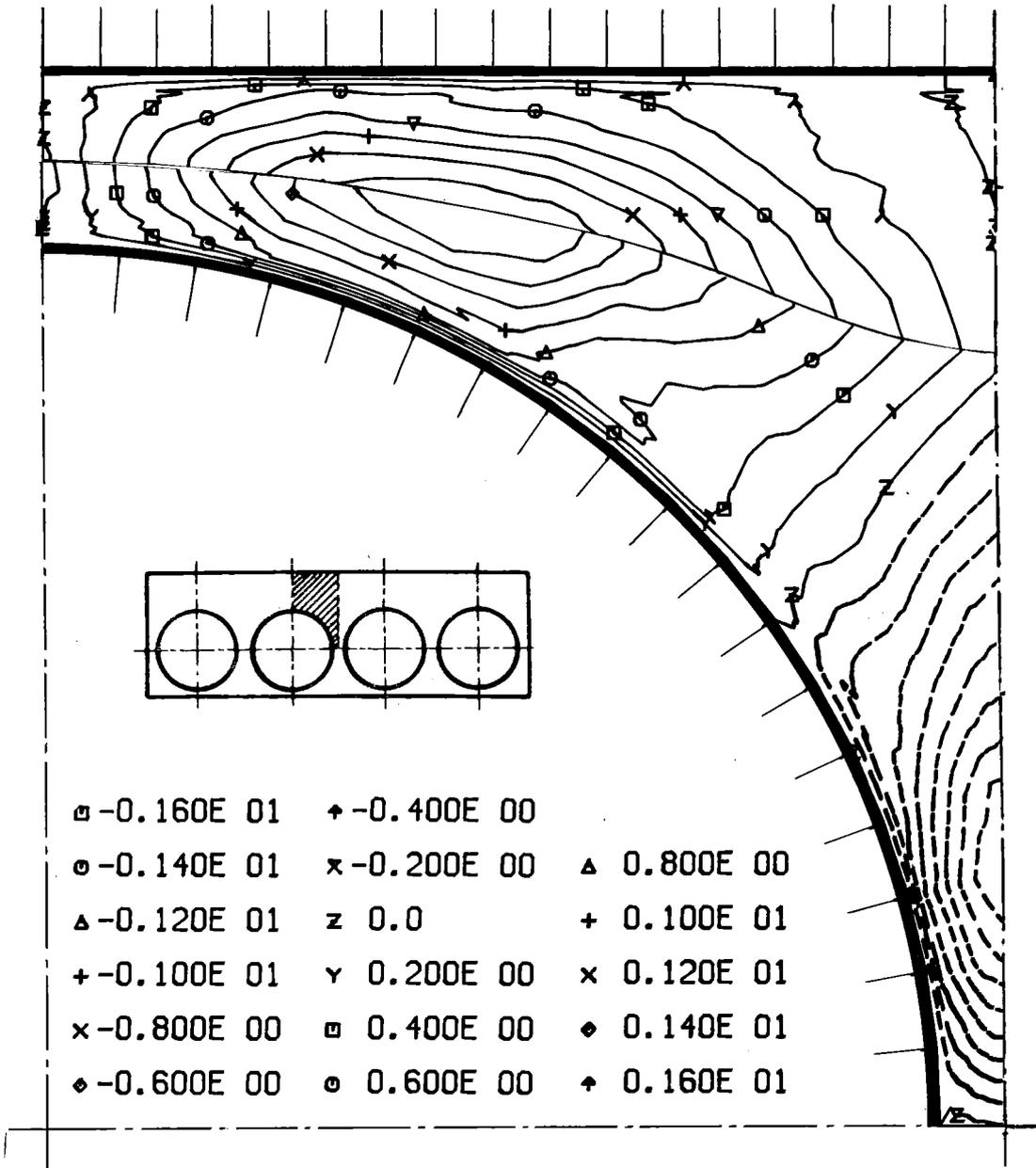


Abb.24: Azimutale Schubspannung (Höhenlinien)

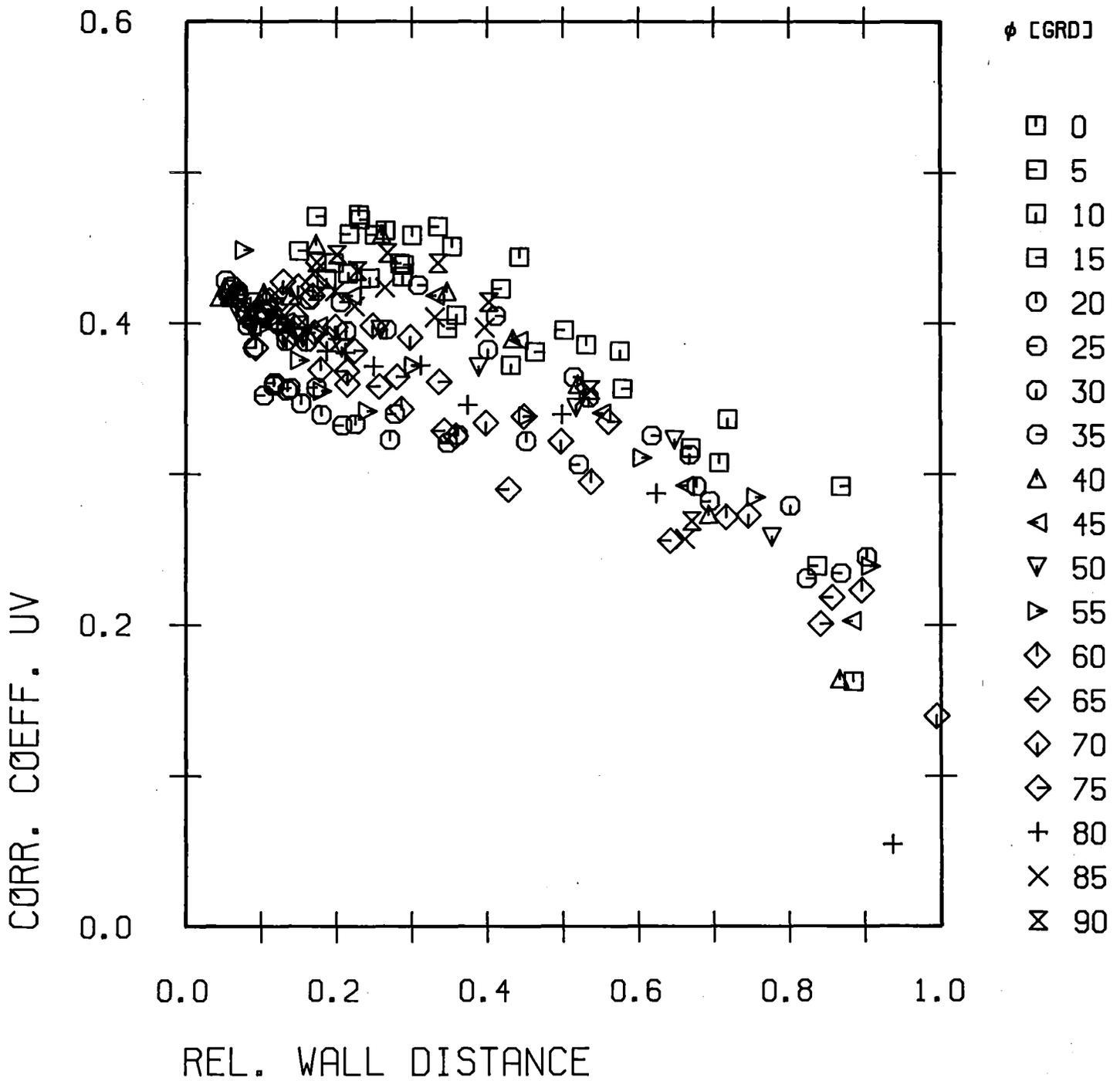


Abb.25: Korrelationskoeffizient R_{uv} (r/ϕ)

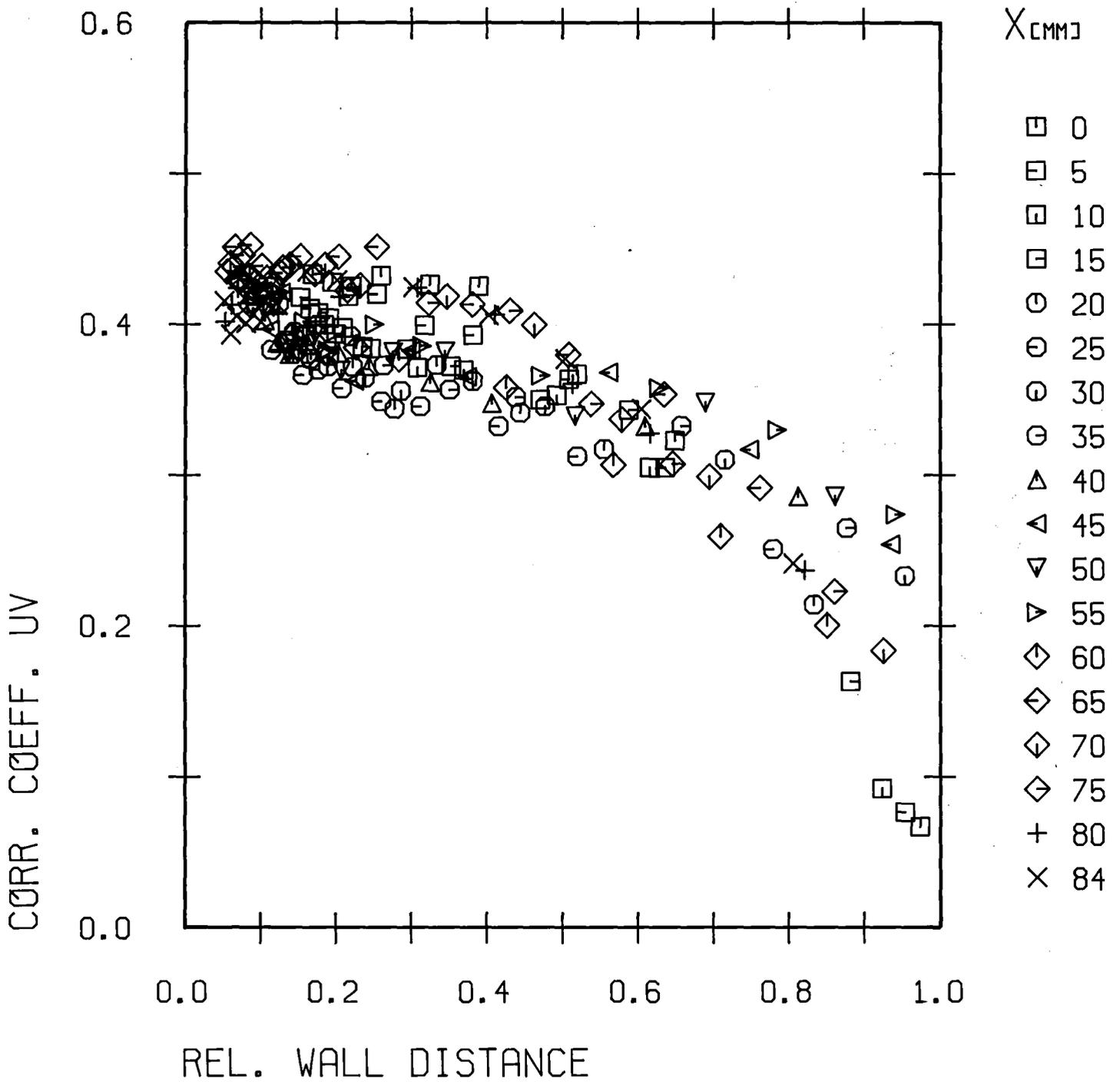


Abb.26: Korrelationskoeffizient R_{uv} (x/y)

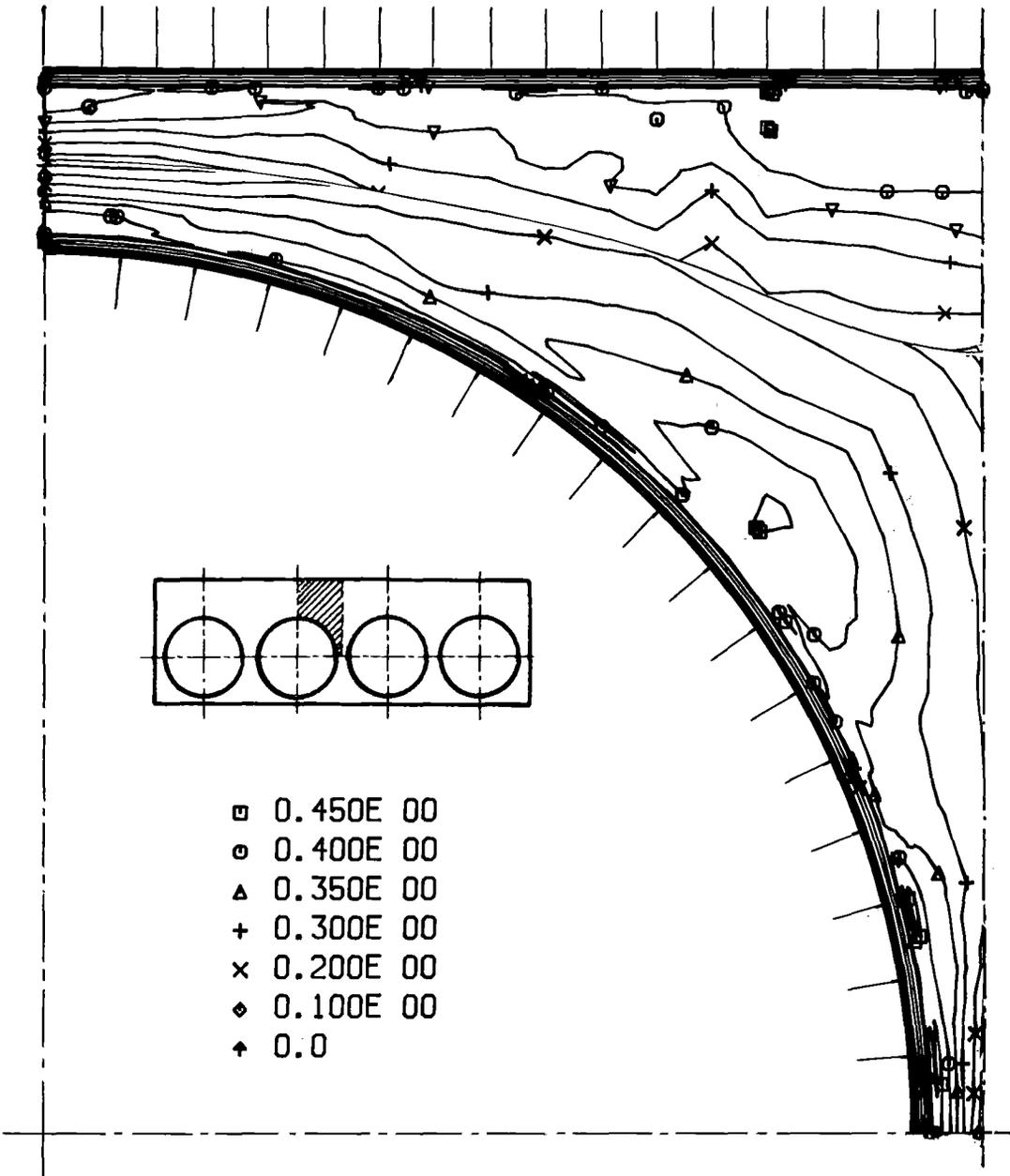


Abb.27: Korrelationskoeffizient R_{uv} (Höhenlinien)

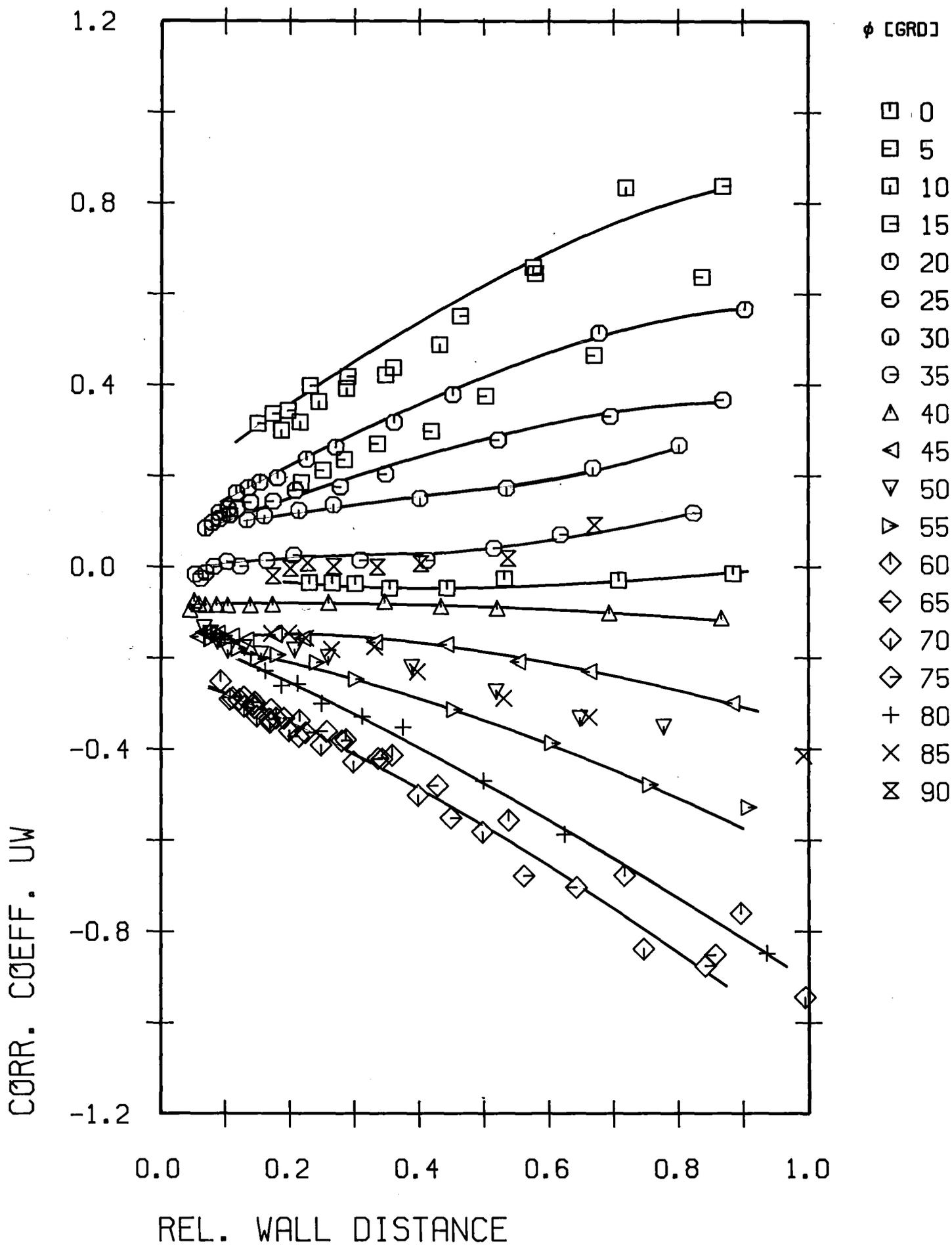


Abb.28: Korrelationskoeffizient R_{uw} (r/ϕ)

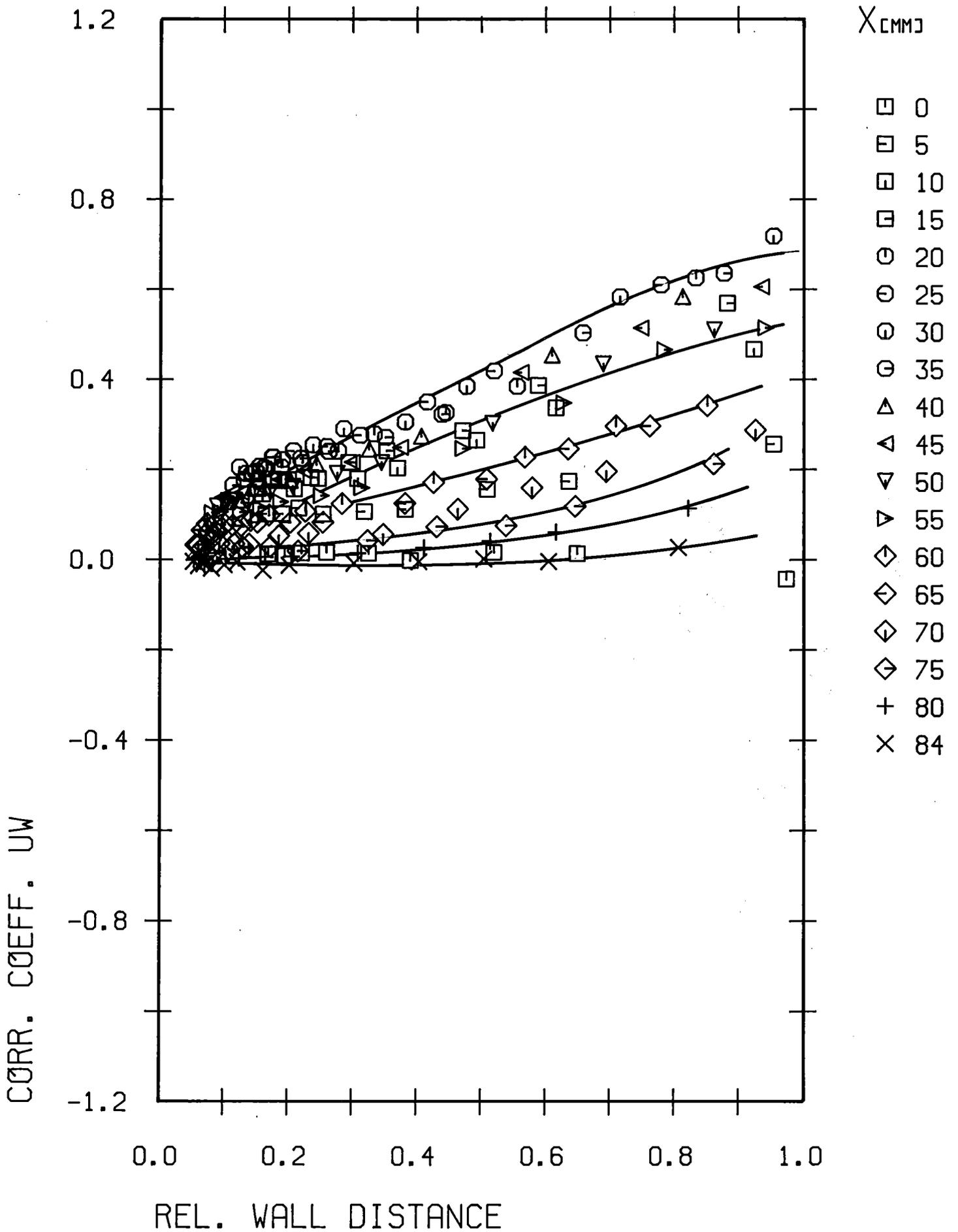


Abb.29: Korrelationskoeffizient $R_{uw}(x/y)$

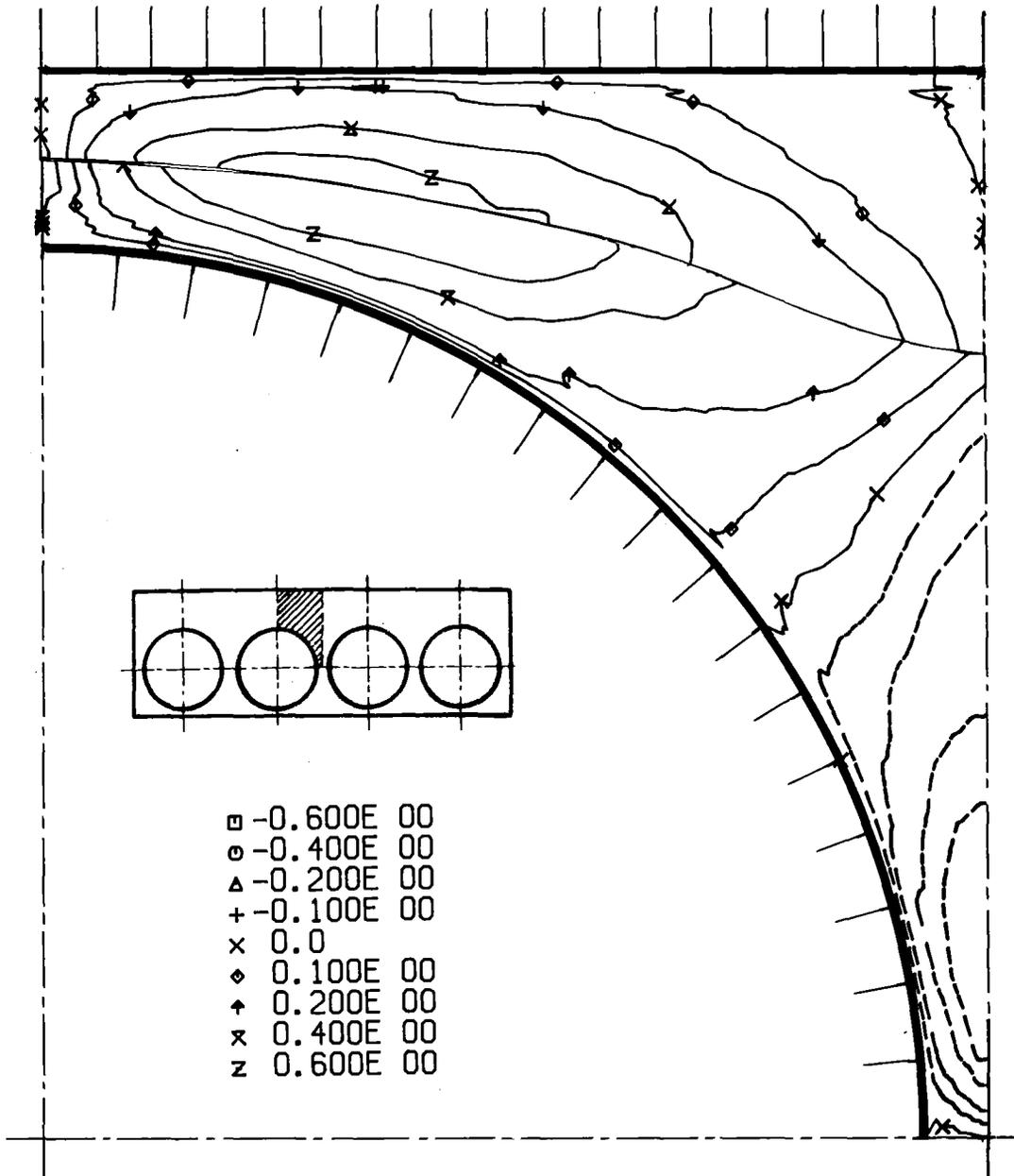


Abb.30: Korrelationskoeffizient R_{uw} (Höhenlinien)

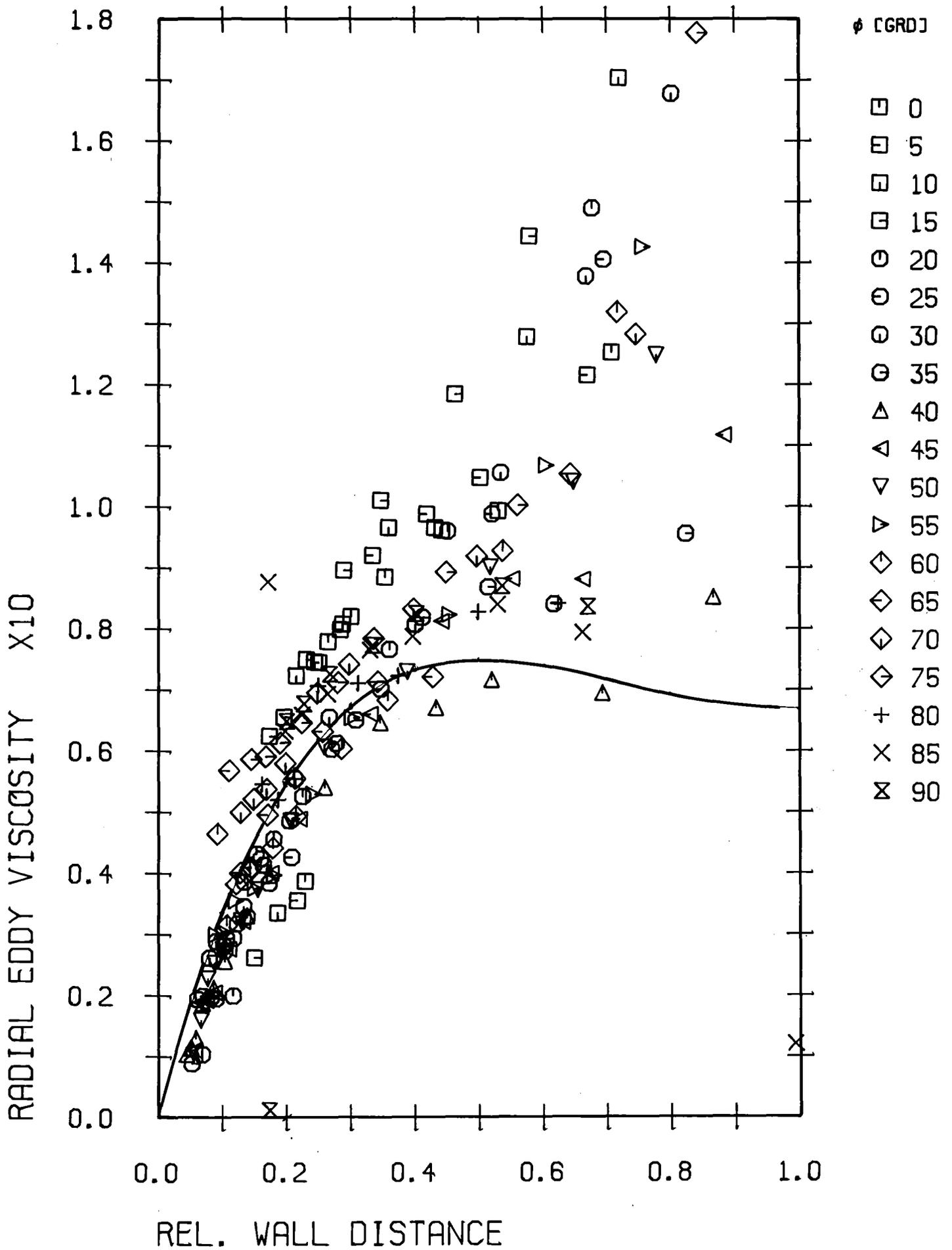


Abb.31: Wirbelviskosität senkrecht zur Wand (r/ϕ)

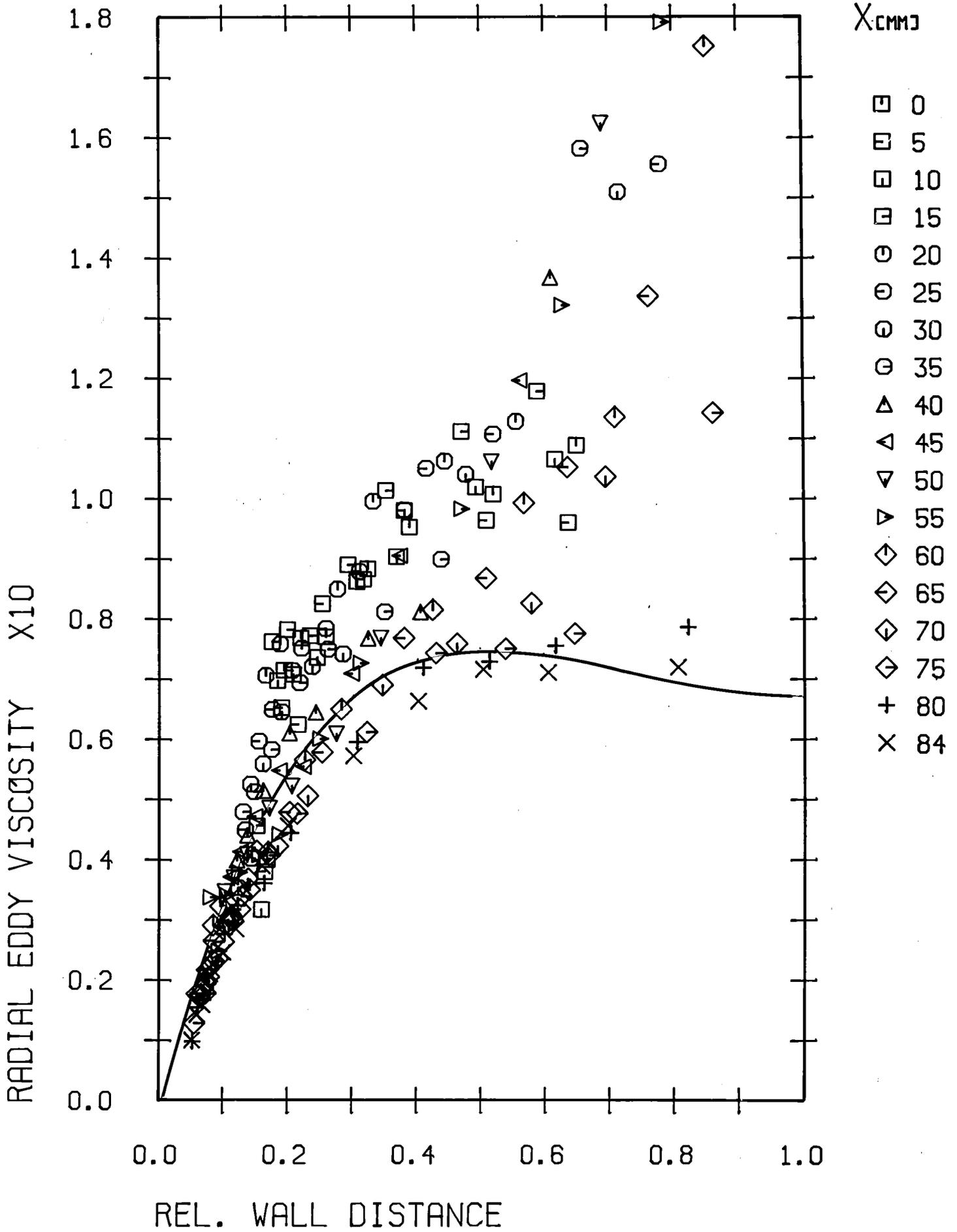


Abb.32: Wirbelviskosität senkrecht zur Wand (x/y)

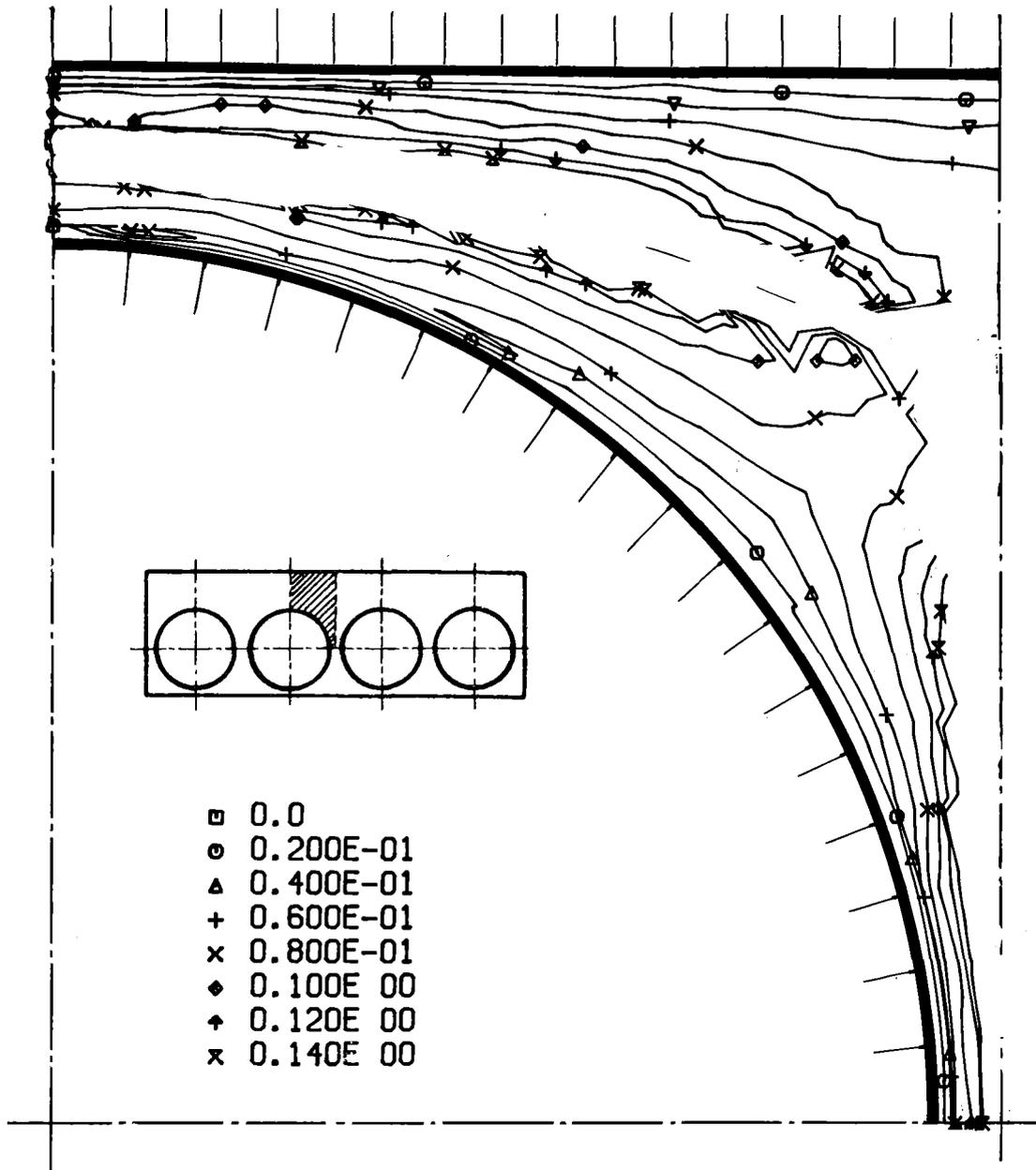


Abb.33: Wirbelviskosität senkrecht zur Wand (Höhenlinien)

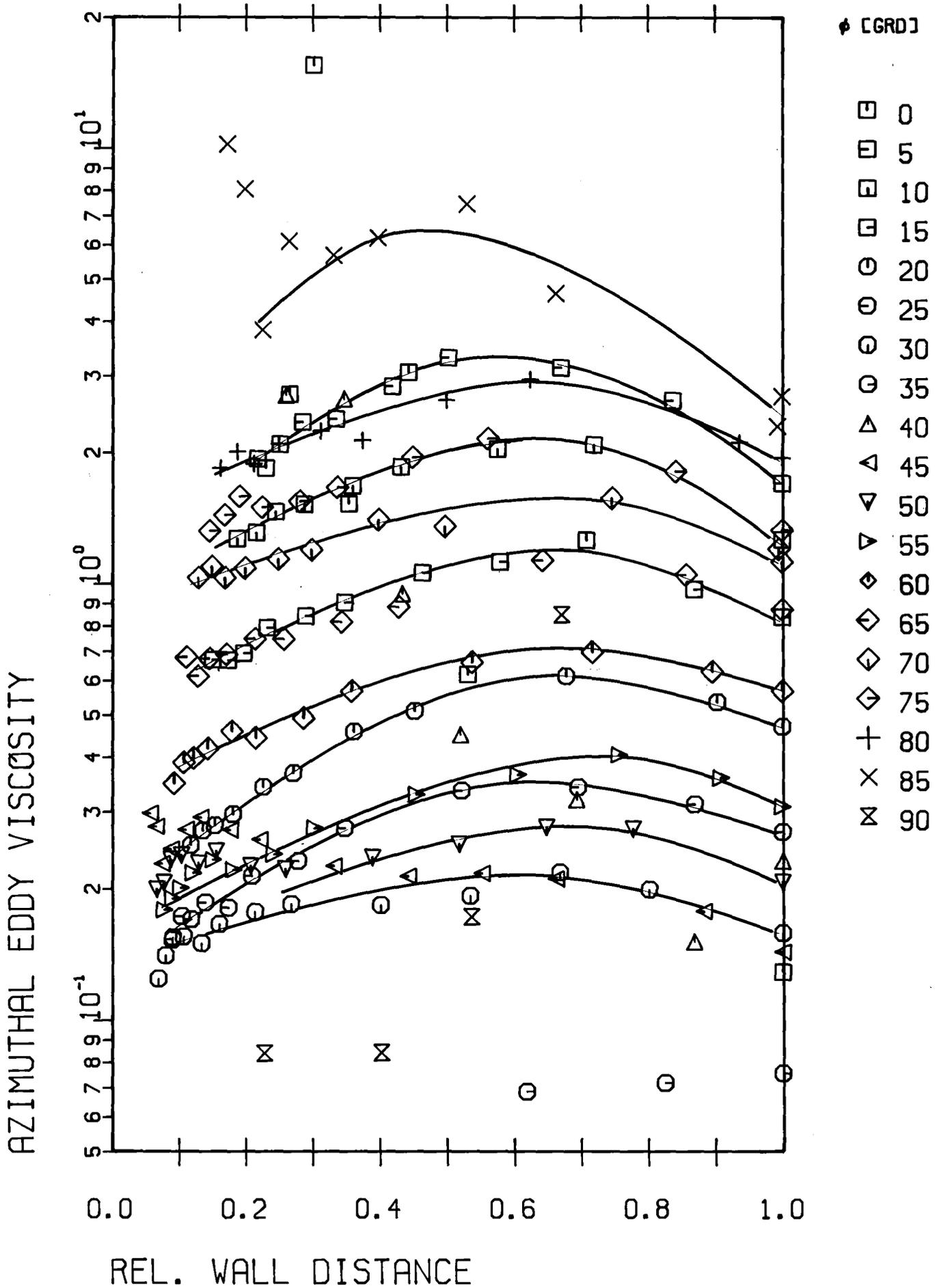


Abb.34: Wirbelviskosität parallel zur Wand (r/ϕ)

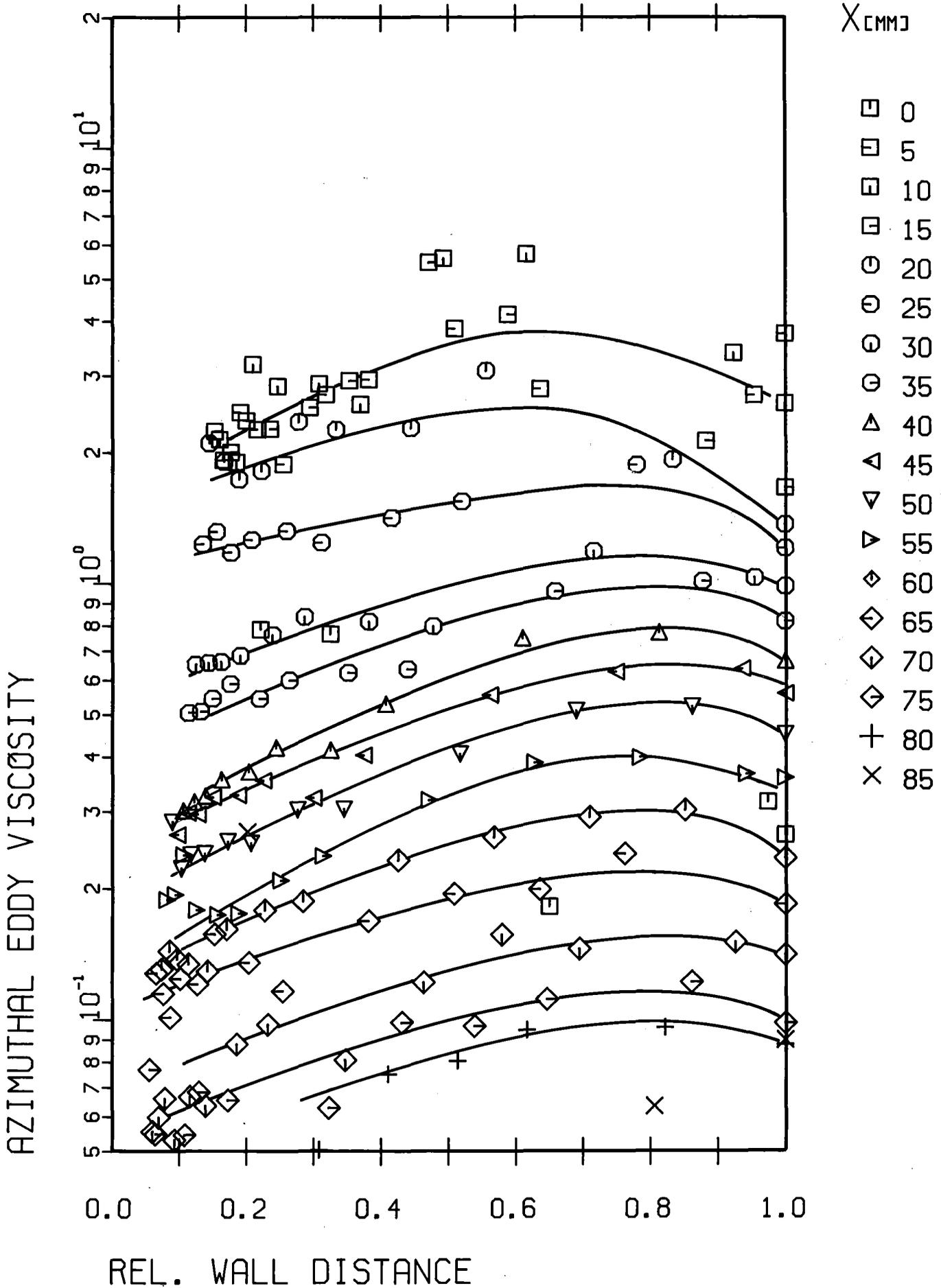


Abb.35: Wirbelviskosität parallel zur Wand (x/y)

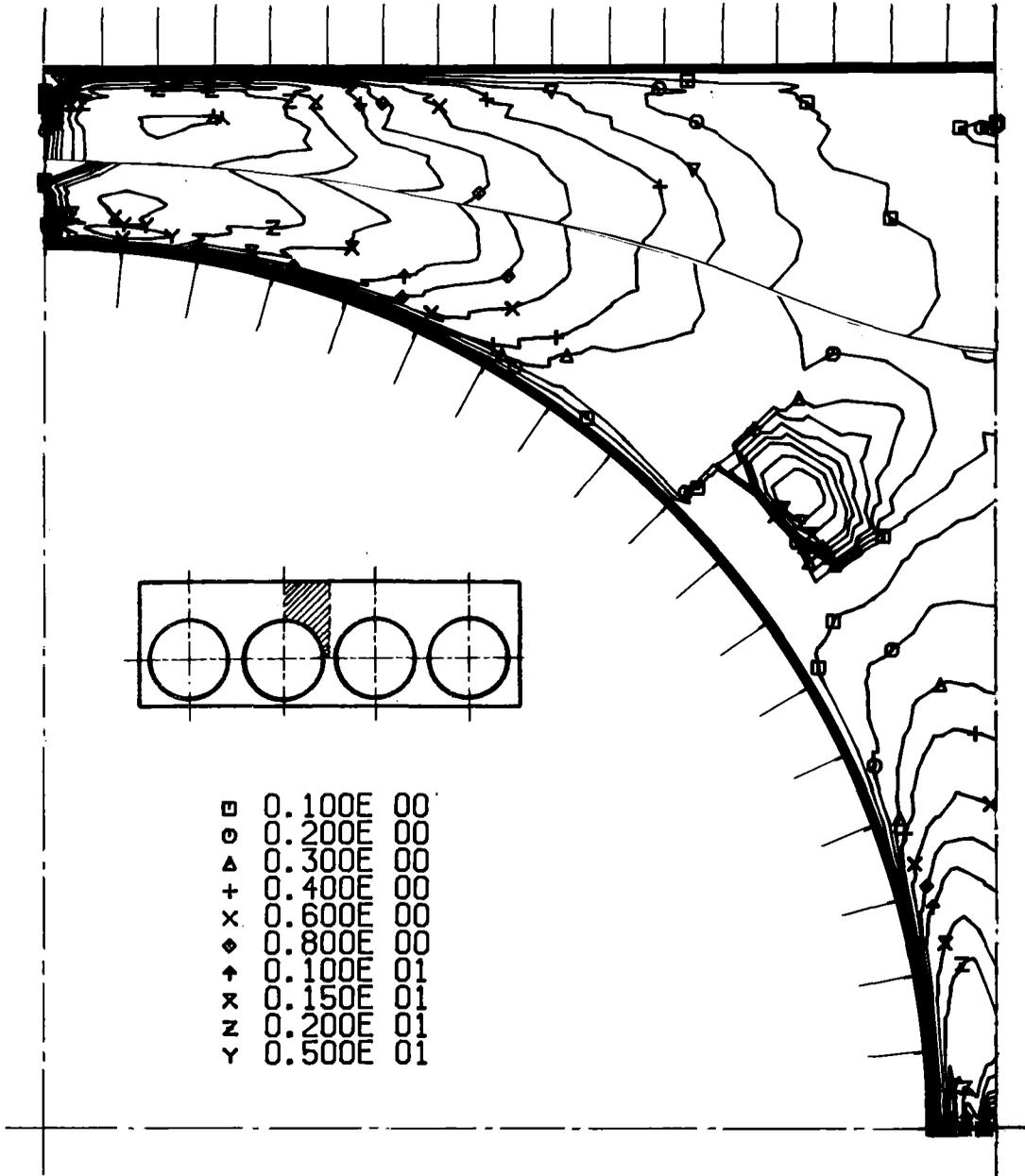


Abb.36: Wirbelviskosität parallel zur Wand (Höhenlinien)

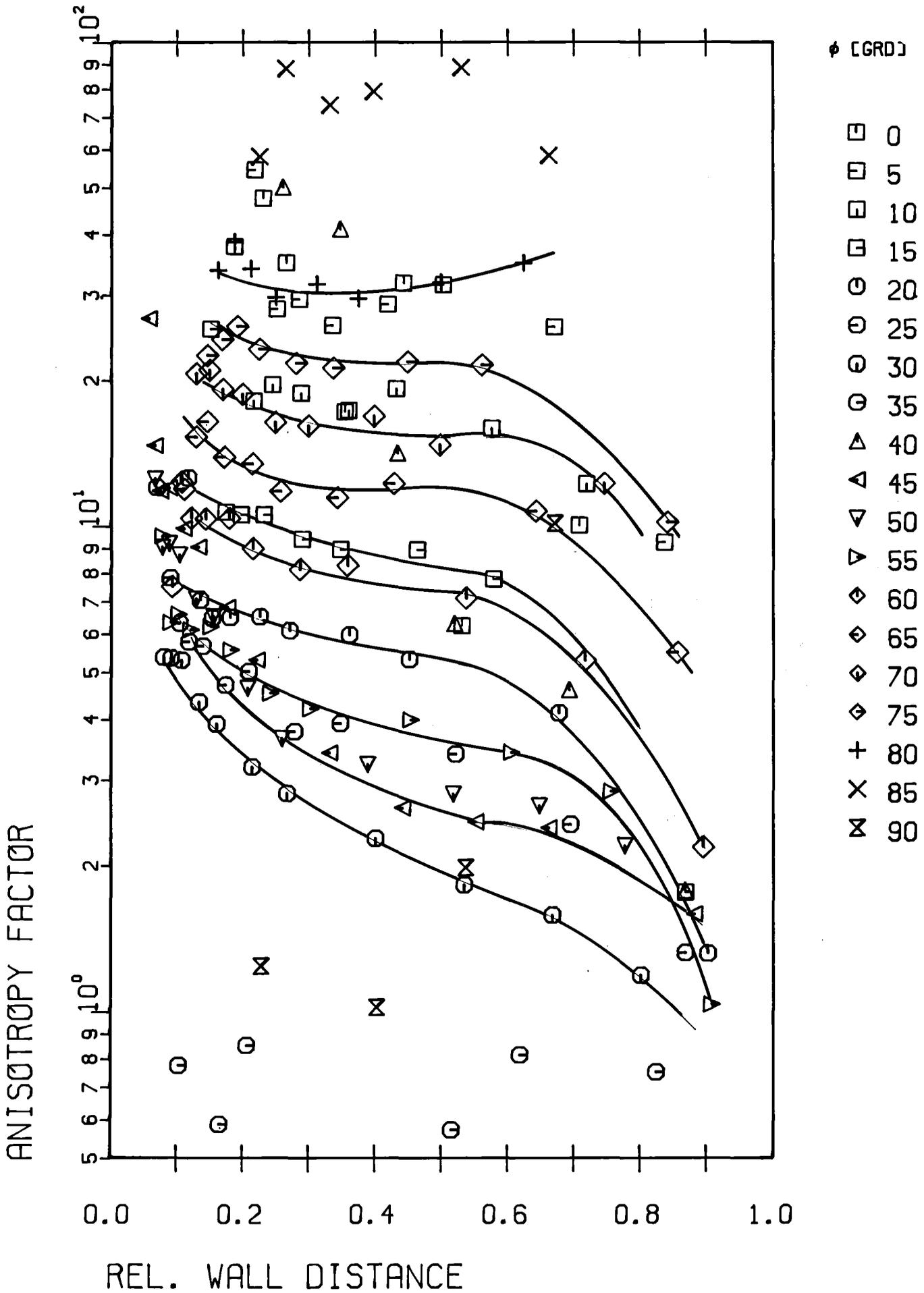


Abb.37: Anisotropiefaktor (r/ϕ)

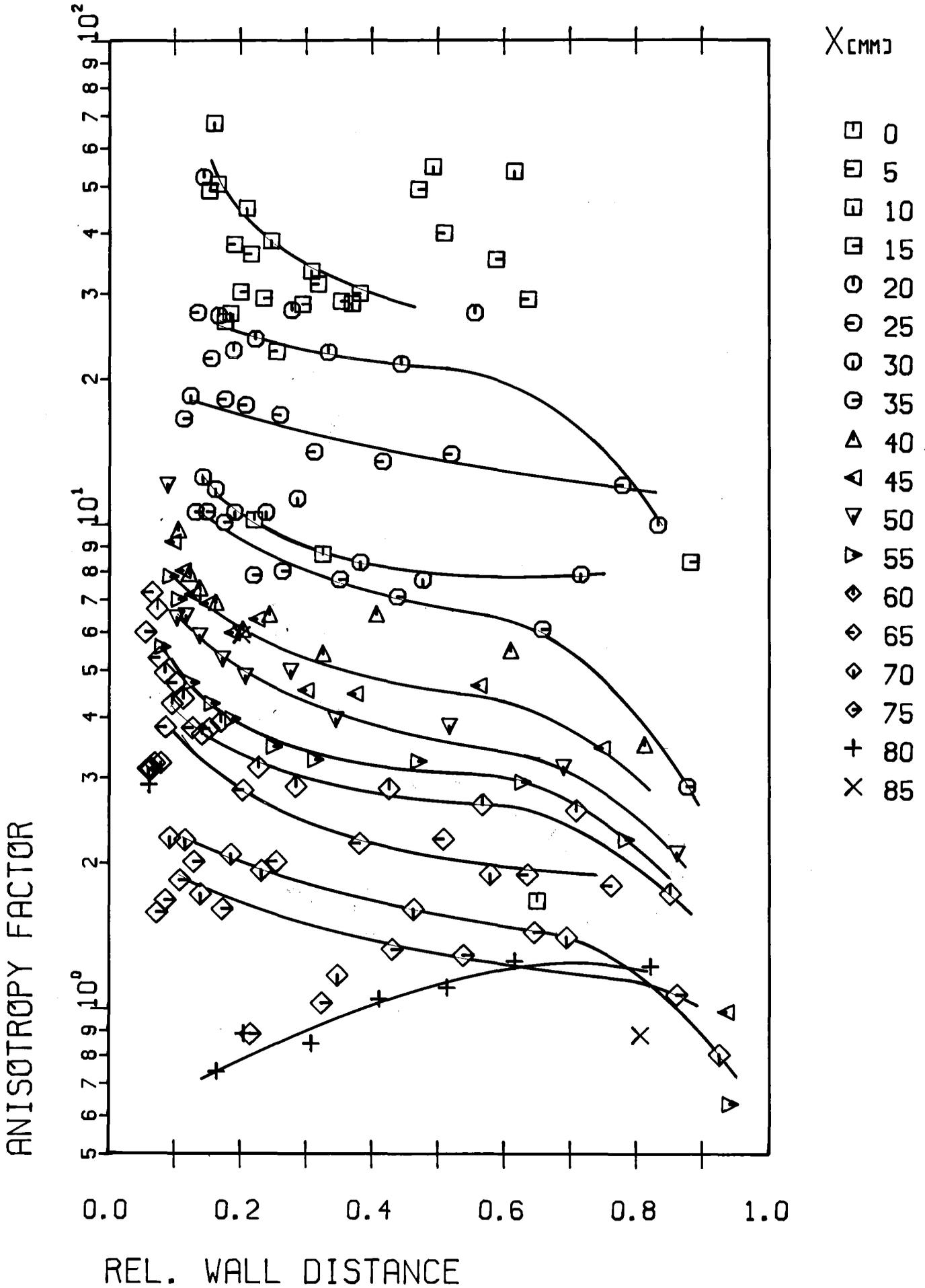


Abb.38: Anisotropiefaktor (x/y)

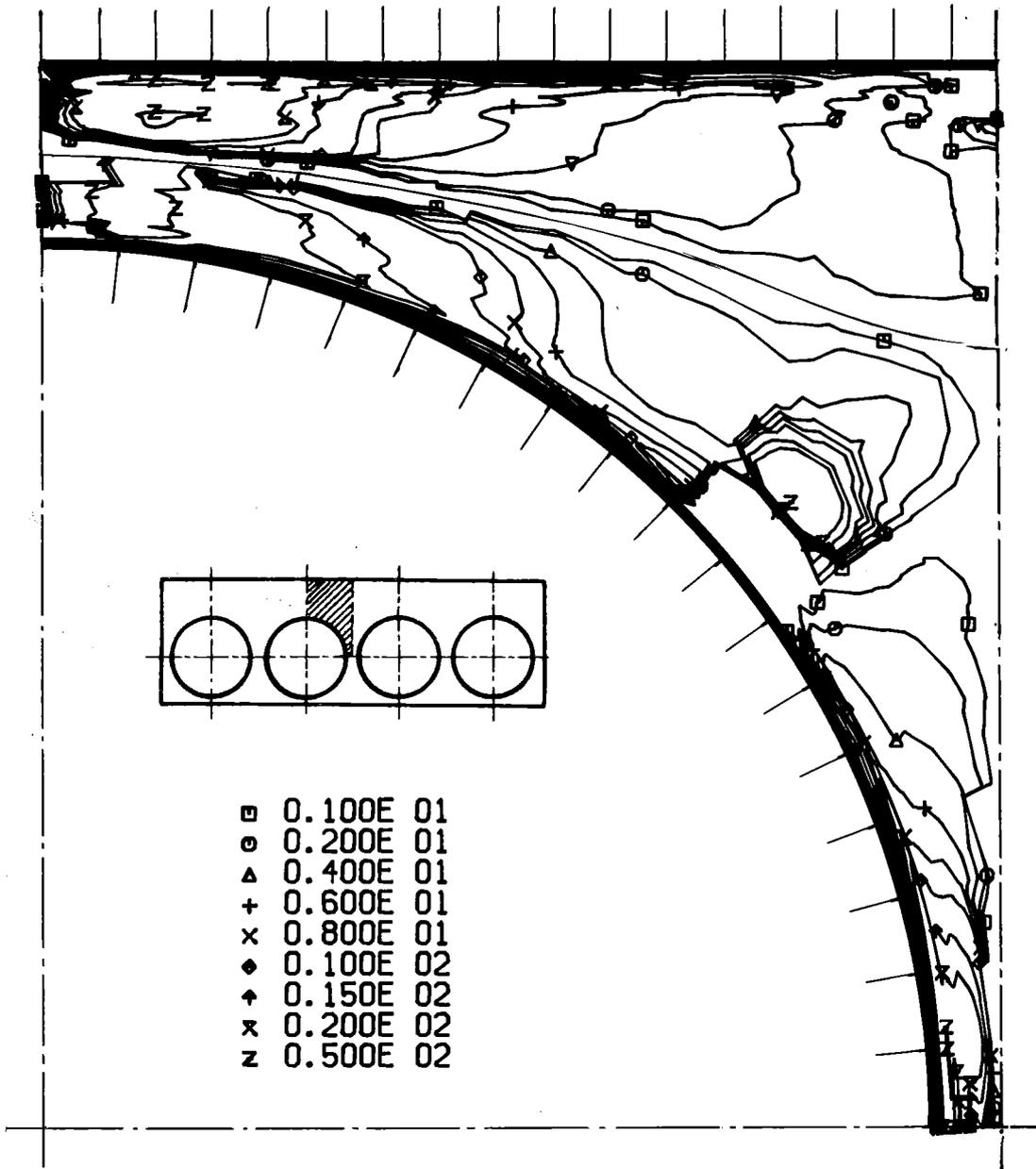


Abb.39: Anisotropiefaktor (Höhenlinien)