

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

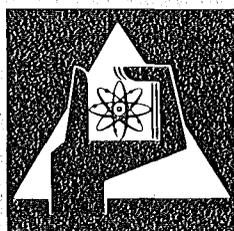
April 1975

KFK 2131

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

**Geometrieabhängigkeit des Rauigkeitsparameters
von Rechteckrauigkeiten**

W. Baumann, K. Rehme



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2131

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Geometrieabhängigkeit des Rauheitsparameters von
Rechteckrauhigkeiten

W. Baumann

K. Rehme

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Zusammenfassung

Aufgrund einer ausführlichen Analyse der in der Literatur beschriebenen Meßergebnisse des Druckverlustes und der Geschwindigkeitsprofile in Kanälen mit künstlichen rechteckförmigen Wandrauheiten wird eine Beziehung für den Rauheitsparameter R des Geschwindigkeitsprofils bei vollrauhher Strömung in Abhängigkeit von den Geometriegrößen der Rauheitselemente entwickelt. Diese Geometrieparameter sind das Verhältnis von Abstand zu Höhe, das Verhältnis von Höhe zu Breite der Rauheit sowie das Verhältnis von Rauheitshöhe zur Länge des Geschwindigkeitsprofils von der rauhen Wand bis zum Ort der Nullschubspannung. Die Verwendung der ermittelten Beziehung, die über einen sehr großen Bereich der Geometrieparameter gültig ist, ermöglicht die Berechnung des Druckverlustes in Kanälen mit rechteckförmigen Wandrauheiten mit guter Genauigkeit.

Roughness parameter for rectangular roughnesses as a function of geometrical shape

Summary

A relation for the roughness parameter R of the velocity profile in a fully rough flow is established as a function of the geometrical parameters of the roughness elements. The evaluation is based on a detailed analysis of experimental results described in the literature. Numerous data of friction factors and velocity profiles in channels with artificial rectangular wall roughnesses were taken into account. The geometrical parameters are the ratio of distance to height, the ratio of height to width of the roughness, and the ratio of the height of the roughness to the length of the velocity profile from the rough wall to the position of zero shear stress. Application of the relation determined in this way, which holds over a very broad range of geometrical parameters, allows the pressure drop to be calculated with a rather good accuracy in channels with rectangular wall roughnesses.

1. Einleitung

Der Wärmeübergang bei ausgebildeter turbulenter Strömung hängt bekanntlich von den Stoffeigenschaften (Prandtl-Zahl) der strömenden Flüssigkeit ab. Flüssigkeiten mit kleiner Prandtl-Zahl (z.B. Flüssigmetalle) haben einen relativ guten Wärmeübergang. Bei Flüssigkeiten mit mittlerer und großer Pr-Zahl (z.B. Gase, Wasser, organische Flüssigkeiten) ist es häufig erforderlich, den Wärmeübergang durch technische Maßnahmen zu verbessern, damit die wärmeübertragenden Apparate klein gehalten werden können. Ein zweckmäßiges und häufig angewendetes Verfahren, das auch für die Brennelemente des gasgekühlten Schnellen Brutreaktors vorgeschlagen wird /1/, besteht darin, die wärmeübertragende Wand des Strömungskanals künstlich aufzurauen. Die Effizienz der Rauigkeit hinsichtlich der Wärmeübertragungseigenschaften hängt dabei von der Form und Anordnung der Rauigkeitselemente ab.

Da die Wandrauigkeit durch die in der Strömung erzeugte höhere Turbulenz nicht nur den Wärmeübergang steigert, sondern auch zusätzlichen Druckverlust verursacht, ist es sinnvoll, optimale geometrische Formen und Anordnungen der künstlichen Rauigkeit zu verwenden, d.h. nicht mehr Turbulenz zu erzeugen, als zum Absenken der Wandtemperatur notwendig ist.

Dies erfordert jedoch detaillierte Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Effizienz und Geometrie der Wandrauigkeit.

Eine wichtige Größe, nämlich die, die den Druckverlust bestimmt, ist der Rauigkeitsparameter R , der aus isothermen Druckverlustmessungen oder aus Messungen der Geschwindigkeitsverteilung ermittelt werden kann. Im folgenden soll dieser Rauigkeitsparameter R für rechteckförmige Rauigkeiten näher untersucht werden.

Unter der Annahme universeller Geschwindigkeitsprofile an rauhen Kanalwänden nach Nikuradse /2/

$$u^+ = 2.5 \ln \frac{y}{h} + R \quad (1)$$

läßt sich der Reibungsbeiwert λ darstellen als Funktion des Geometrieparameters G , der relativen Dicke der Strömungsschicht L/h und des

Rauhigkeitsparameters R /3/:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 2.5 \ln L/h + R - G \quad (2)$$

Der Rauhigkeitsparameter R hängt von der Rauhigkeitsgeometrie ab.

In der Literatur findet man eine Vielzahl von Meßergebnissen aus Druckverlustuntersuchungen. Trotz der großen Zahl von experimentellen Ergebnissen fehlt bis heute eine allgemeine Beziehung zwischen dem Rauhigkeitsparameter R und den Größen, die die Geometrie von Rechteckrauhigkeiten beschreiben.

Ein wichtiger Grund dafür ist sicherlich, daß die Geometrie von Rechteckrauhigkeiten durch drei Parameter beschrieben werden muß (Abb. 1):

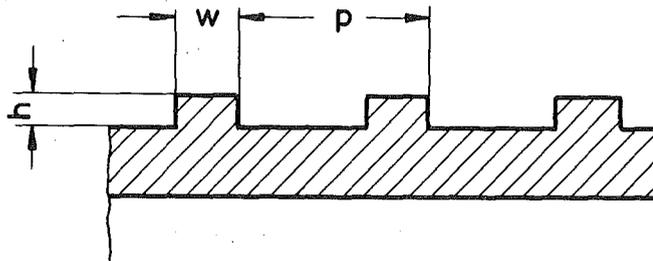


Abb. 1: Geometrieparameter für rechteckige Rauhigkeit

durch die Höhe der Rauhigkeit h , die Breite der Rauhigkeit w und den Abstand zweier Rauhigkeiten p . Dies erschwert die Bestimmung der Einflüsse der einzelnen Parameter aus den Meßdaten, da systematische Untersuchungen fehlen. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, daß die Untersuchungen an unterschiedlichen Kanälen wie Kreisrohr, parallelen Platten, Rechteckkanal, offenem Gerinne, sowie häufig an Ringspalten mit rauhem Innenrohr durchgeführt wurden.

Es ist daher nicht verwunderlich, daß erstmals durch Maubach /4/ ein Versuch unternommen wurde, in die Fülle der Daten eine Systematik zu bringen. Die von ihm entwickelte Methode /3/ ermöglichte es, die Einflüsse von Kanalgeometrie und Rauhigkeitsgeometrie durch die Verwendung des Rauhigkeitsparameters R zu trennen. Zwar war schon vorher die Übertragung von experimentellen Ergebnissen, z.B. von Reibungsbeiwerten der

durch Rauigkeiten beeinflussten Strömungsschicht, von einem Kanal auf einen anderen Kanal mit Hilfe der Hall-Transformation /5/ möglich. Untersuchungen von Wilkie et al. /6/ an einem Plattenkanal mit identischen und nichtidentischen Rauigkeiten zeigten jedoch, daß die Annahme der Koinzidenz von Maximalgeschwindigkeit und Nullschubspannung für die Anwendung der Hall-Transformation falsch war. Diese falsche Annahme führte dazu, daß die in Ringspalten mit rauhem Kernrohr gewonnenen transformierten Reibungsbeiwerte bei der Übertragung auf Stabbündel mit Korrekturfaktoren versehen werden mußten /7/. Abgesehen davon scheinen integrale Größen wie Reibungsbeiwert und hydraulischer Durchmesser zur Übertragung von Meßergebnissen nicht geeignet zu sein. Hierfür sollte eine Größe wie der Rauigkeitsparameter R, der ja auch im Geschwindigkeitsprofil auftritt, nützlicher sein.

Maubach /4/ konnte anhand der von ihm verwendeten Ergebnisse eine Abhängigkeit des Rauigkeitsparameters R von den dimensionslosen Geometrieparametern p/h und h/w in Diagrammform angeben. Meerwald /8/ teilte den Bereich der untersuchten p/h - und h/w -Werte auf und gab für verschiedene Bereiche von p/h und h/w Diagramme an, aus denen man die Abhängigkeit des Rauigkeitsparameters von p/h bzw. h/w entnehmen kann.

Eine Analyse von Wilkie's Druckverlustergebnissen /6/, die an einem Rechteckkanal mit identischer und nicht-identischer Wandrauigkeit gemessen wurden, ergab, daß die Rauigkeitshöhe h bezogen auf die Länge L des Geschwindigkeitsprofils von der rauhen Wand bis zur Position der Nullschubspannung einen wesentlichen Einfluß auf die Größe des Rauigkeitsparameters $R(h^+)$ hat /9/.

Eine Abhängigkeit des Rauigkeitsparameters von der relativen Rauigkeitshöhe h/L hatte sich bei den von Nikuradse /2/ an Kreisrohren ($L = \text{Rohr-radius}$) mit Sandrauigkeit durchgeführten Untersuchungen nicht ergeben, wenn man von den Ergebnissen für eine relative Rauigkeit $L/h = 507$ absieht. Für diese Rauigkeit bemerkte Nikuradse eine Abweichung und vermutete, daß "die Voraussetzung der geometrischen Ähnlichkeit wahrscheinlich nicht erfüllt war". Im Bereich des quadratischen Widerstandsgesetzes konnte Nikuradse die gemessenen Geschwindigkeitsprofile durch Gl. (1) oder

$$u^+ = 2.5 \ln y^+ + R - 2.5 \ln h^+ \quad (3)$$

gut beschreiben, wodurch die Abhängigkeit von der Rauigkeitshöhe gegeben war. Eine genaue Analyse der Nikuradse'schen Meßwerte zeigt jedoch, daß durch den letzten Term auf der rechten Seite der Gl. (3) nur eine näherungsweise Beschreibung der Abhängigkeit von der Rauigkeitshöhe möglich ist; denn der Rauigkeitsparameter R ist nicht völlig unabhängig von h/L . Da bei den Untersuchungen von Nikuradse keine vollkommene geometrische Ähnlichkeit vorlag, ist eine Abhängigkeit des Rauigkeitsparameters von h/L auch nicht überraschend. Unglücklicherweise wurde allerdings bei allen folgenden Untersuchungen künstlicher Rauigkeiten angenommen, daß die Abhängigkeit von der Rauigkeitshöhe bei anderen Rauigkeiten die gleiche wie bei der Nikuradse'schen Sandrauigkeit sei. Eine Literaturstudie über künstliche Rauigkeiten /10/ zeigt ebenso wie neuere Messungen an Rechteckrauigkeiten von Dalle Donne und Meerwald /11/, daß R im allgemeinen eine Funktion von h/L ist. Daß der Rauigkeitsparameter R bei voller geometrischer Abhängigkeit unabhängig vom gewählten Maßstab der Teststrecken ist, beweisen die Untersuchungen von Möbius /12/, der allerdings auch den Rohrdurchmesser im gleichen Maßstab wie die Rauigkeit veränderte und damit die Bedingung geometrischer Ähnlichkeit erfüllte. Damit muß ein weiterer Geometrieparameter, nämlich die Profillänge L des Geschwindigkeitsprofils über der Rauigkeit bis zum Ort der Nullschubspannung, bei der Auswertung der Literaturdaten berücksichtigt werden. Nur Dalle Donne und Meerwald /11/ berücksichtigen bislang alle Parameter und geben Beziehungen für den Rauigkeitsparameter R über einen großen Bereich der Geometrieparameter an.

Die Ermittlung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten für den Rauigkeitsparameter von Rechteckrauigkeiten wird außerdem dadurch erschwert, daß aufgrund von Abrundungen oder Abschrägungen (chamfer) der Rauigkeiten, die z.B. allein durch Fertigungstoleranzen verursacht sein können, eine beträchtliche Streuung der Rauigkeitsparameter ($\pm 20\%$) entsteht, wie Meerwald /8/ anhand der Untersuchungen von White und White /13/ ermittelte. Schließlich muß man feststellen: die Qualität der Meßdaten ist unterschiedlich, manche Ergebnisse sind widersprüchlich, einige sind schwer interpretierbar, da die experimentellen Bedingungen nicht immer klar angegeben sind. Trotz dieser Schwierigkeiten und Unzulänglichkeiten des Datenmaterials scheint eine Auswertung aller Meßdaten erforderlich zu sein

mit dem Ziel, die Gesetzmäßigkeiten des durch künstliche Rechteckrauhigkeiten verursachten Druckverlustverhaltens mit größerer Genauigkeit zu ermitteln, damit weitere experimentelle Untersuchungen entweder vermieden oder aber gezielter durchgeführt werden können, wie schon Sabersky /14/ forderte.

2. Auswertungsmethode

2.1 Voraussetzungen

Damit ein Vergleich zwischen den Ergebnissen möglich ist, die an unterschiedlichen Versuchsgeometrien gewonnen wurden, müssen alle Werte auf die gleiche Basis bezogen werden. Die in der Literatur publizierten Druckverlustergebnisse sind entweder für "root"- oder "tip"- oder andere Durchmesser der Rauigkeitselemente angegeben. Da unterschiedliche Bezugsabmessungen der Strömungskanäle zu unterschiedlichen Werten des Reibungsbeiwertes führen, wird in dieser Arbeit stets der volumetrische Durchmesser verwendet. Er entsteht durch "Einschmelzen" der Rauigkeiten. Die Länge des Geschwindigkeitsprofils wird entsprechend erhalten als Abstand zwischen der Nullschubspannungslinie und dem volumetrisch gemittelten Wandniveau. Diese Definitionen basieren auf den grundlegenden Arbeiten von Nikuradse /1/ und Schlichting /15/. Alle Reibungsbeiwerte und Reynoldszahlen wurden daher auf die volumetrischen Abmessungen übertragen.

Die Rauigkeitsparameter werden aus allen Meßergebnissen nach der gleichen Hypothese ermittelt, nämlich der Annahme universeller Geschwindigkeitsprofile. Für Untersuchungen an rauhen Kreisrohren kann der Rauigkeitsparameter R nach Gl. (1) aus Geschwindigkeitsprofilmessungen oder nach Gl. (2) aus Druckverlustmessungen ermittelt werden. Für Ringspalte und Rechteckkanäle wird die von Maubach entwickelte Nullschubspannungsmethode verwendet, die in /4/ ausführlich beschrieben ist. Sie basiert auf der Annahme zweier Geschwindigkeitsprofile, die von den gegenüberliegenden Wänden ausgehen, wobei für eine raue Wand Gl. (1) und für eine glatte Wand

$$u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5 \quad (4)$$

gilt. Der Schnittpunkt beider Profile wird als Ort der Nullschubspannung angesehen. Die Maubach-Methode wird einerseits wegen ihrer Einfachheit angewendet; andererseits stimmen die so ermittelten Ergebnisse sehr gut mit den Werten überein, die mit Hilfe der empirischen Methode von Warburton und Pirie /16/ berechnet werden. Neuere Untersuchungen an asymmetrischen Strömungsverteilungen und glatten Wänden zeigen darüberhinaus, daß die Abweichungen vom Wandgesetz (Gl. (4)) nicht so groß sind, wie vielfach angenommen wurde /17/. Da außerdem bei den bisherigen Untersuchungen an rauhen Wänden mit guter Näherung ein Wandgesetz gemessen wurde /18, 19, 20/, ist die Maubach-Methode auch von den Annahmen her gerechtfertigt.

Als weitere Einschränkung wurden nur die Daten zur Auswertung verwendet, für die eine "Rauigkeits"-Reynoldszahl $h^+ \geq 100$ bzw. $h^+ \geq 70$ vorlag. Dies wird als untere Grenze des voll-rauhen Bereiches angenommen, wo das quadratische Widerstandsgesetz und damit $R = \text{const}$ gilt, obwohl die Rauigkeitsparameter R bei einigen Versuchsergebnissen auch oberhalb dieser Grenzen nicht konstant waren /20/.

Alle Versuchsergebnisse wurden zur Auswertung herangezogen, soweit sie den Autoren bekannt sind. Einige Untersuchungsergebnisse sind nur in Form transformierter Reibungsbeiwerte und transformierter Reynoldszahlen veröffentlicht worden. Diese Daten konnten natürlich nur dann berücksichtigt werden, wenn die Transformationsmethode in allen Einzelheiten bekannt und die notwendigen Daten zur Rücktransformation angegeben waren. Leider ist das bei den meisten transformierten Werten nicht der Fall, so daß wertvolle Informationen verloren gehen.

2.2 Verfahrensweise

Ziel der Arbeit war, Beziehungen zu finden, die es erlauben, den Rauigkeitsparameter R aus der vorgegebenen Rauigkeitsgeometrie und der Dicke der Strömungsschicht zu berechnen.

In dimensionslosen Größen kann man diese Beziehung wie folgt ansetzen:

$$R = f(p/h, h/w, h/L) \quad (5)$$

Die Abhängigkeit des Rauheitsparameters von der relativen Rauigkeitshöhe h/L wird durch einen Polynomansatz berücksichtigt, der eine Beziehung zwischen R bei dem dazugehörigen h/L und einem fiktiven R_0 für $h/L \rightarrow 0$ herstellt. Für bestimmte Bezugswerte $h/w = k_1$, $p/h = k_2$ soll gelten

$$R_{k_1, k_2} - R_{0, k_1, k_2} = \sum_{k=2}^n z_k (h/L)^{k-1} \quad (6)$$

Daraus folgt dann für beliebige Werte von h/w und p/h :

$$R - R_0 = \frac{R_0}{R_{0, k_1, k_2}} \sum_{k=2}^n (h/L)^{k-1} \quad (7)$$

Der Polynomansatz weicht von der in /10/ vorgeschlagenen Form ab, erwies sich jedoch für die hier beschriebenen Auswertungen als zweckmäßiger. Das Problem ist damit durch Einführen des Parameters R_0 auf

$$R_0 = F(p/h, h/w) \quad (8)$$

vereinfacht.

Sämtliche Rechnungen wurden auf einem Computer vom Typ IBM 370/165 durchgeführt. Für die weitere Auswertung wurde die h/L -Abhängigkeit der R -Werte zunächst vernachlässigt. Mit Hilfe der Least-Square-Fit-Methode (LSF) wurden die Daten über h/w und p/h durch Polynome 2. bzw. 3. Grades approximiert und in eine ebene Wert-Matrix W eingeordnet.

Das Raster der Matrix wurde dabei örtlich der Verteilungsdichte der Meßpunkte angepaßt. Die bei der vorgenommenen Auswertung verwendete Matrix hatte die Dimension $W(p/h; h/w) = (39; 6)$.

Gleichzeitig mit der Wert-Matrix W wurde eine Gewichts-Matrix G erzeugt. Sie hat die Eigenschaft, daß jedes Element G_{ik} das Gewicht des zugeordneten Elementes W_{ik} der Wert-Matrix angibt. Das Gewicht entspricht der Anzahl der Meßpunkte, die das jeweilige Element der Wert-Matrix abdecken.

Durch eine kombinierte Auswertung der Wert- und Gewichtsmatrix mit Hilfe der LSF-Approximation wurden Polynome 2. Grades in h/w und Polynome 3. Grades in p/h erzeugt. Es wurde versucht, durch Polynome von höherem Grade eine bessere Anpassung an die Meßdaten zu erreichen; die Ergebnisse waren jedoch unbefriedigend, da sich keine konsistenten Abhängigkeiten ergaben. Die ermittelten Polynome ermöglichen es, alle Meßpunkte auf eine beliebig festgelegte Normierungsgeometrie $h/w = k_1$, $p/h = k_2$ zu transformieren. Die auf die Normierungsgeometrie bezogenen Meßpunkte liefern in 1. Näherung die Abhängigkeit des Rauigkeitsparameters R von der relativen Strömungsschichtdicke h/L , die mittels LSF-Approximation durch ein Polynom 2. Grades erfaßt wurde. Die Abhängigkeit ist deshalb von 1. Näherung, weil zur Transformation der Meßpunkte zunächst eine Wert-Matrix diente, die aus nicht h/L -bereinigten R -Werten hervorging. Die h/L -Abhängigkeit wurde dann iterativ verbessert, bis die bereinigten R -Werte nach der daraus gebildeten Wert-Matrix auf die Normierungsgeometrie umgerechnet eine h/L -Abhängigkeit unterhalb einer vorgegebenen Schranke aufwiesen.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung umfaßt die für Rechteckrauigkeiten ermittelten Daten von insgesamt 35 Autoren /6, 8, 11, 12, 15, 19 - 48/. Die Anzahl der berücksichtigten Meßpunkte beträgt 2449 für $h^+ \geq 100$ und 2671 für $h^+ \geq 70$. Tabelle I enthält eine Aufstellung der Teststrecken und der verwendeten Werte für den Rauigkeitsparameter. Das vorhandene Datenmaterial erstreckt sich über die folgenden Bereiche der Geometrieparameter:

$$\begin{aligned} 0.35 &\leq p/h \leq 196 \\ 0.02 &\leq h/w \leq 15.1 \\ 0.008 &\leq h/L \leq 0.997. \end{aligned}$$

Abb. 2 zeigt alle verwendeten Werte auf volumetrische Kanalabmessungen bezogen als Funktion des dimensionslosen Abstandes p/h . Insbesondere für kleine dimensionslose Rippenabstände p/h fächern die Meßwerte weit auf.

3.1 Auswertungsergebnisse und Diskussion

Wendet man auf alle Meßwerte das oben beschriebene Verfahren an, so kann die Geometrieabhängigkeit des Rauigkeitsparameters R_o von p/h und h/w durch Kurvenscharen dargestellt werden, die sich aus der ermittelten Matrix ergeben. Die Kurvenscharen sind für $h^+ \geq 100$ in Abb. 3a - c, für $h^+ \geq 70$ in Abb. 4a - c enthalten.

Abb. 3a zeigt den Rauigkeitsparameter als Funktion des dimensionslosen Rippenabstandes p/h mit dem Verhältnis von Höhe zu Breite h/w als Parameter. Die Werte des Rauigkeitsparameters sind gültig für $h/L \rightarrow 0$; d.h. für eine unendlich dicke Strömungsschicht über der rauhen Oberfläche. Innerhalb des dargestellten Bereichs $0.3 \leq h/w \leq 8$ zeigt sich, daß der Rauigkeitsparameter umso kleiner ist, je größer h/w ist; oder anders ausgedrückt, der Reibungsbeiwert für die Strömung über einer rauhen Oberfläche ist umso größer, je dünner das Rauigkeitselement ist. Diese Abhängigkeit von der Geometrie des Einzelements wird schwächer bei großen Abstandsverhältnissen p/h . Der jeweils kleinste Wert des Rauigkeitsparameters verschiebt sich mit wachsendem h/w zu kleinerem p/h . Im Bereich $0.3 \leq h/w \leq 15$ kann das Minimum des Rauigkeitsparameters durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$(p/h)_{R=\min} = 9.9 \cdot (h/w)^{-.345}. \quad (9)$$

Mit Hilfe dieser Beziehung ist es möglich, für vorgegebenes h/w den Rippenabstand zu berechnen, für den sich der größte Druckverlust ergibt.

Die Abb. 3b und 3c zeigen die in Abb. 3a dargestellten Rauigkeitsparameter in anderer Form, nämlich als Funktion der dimensionslosen Rippenhöhe h/w mit p/h als Parameter. Die Kurven veranschaulichen, daß der Einfluß der Rippenteilung p/h auf die Größe des Rauigkeitsparameters den Einfluß der Rippenbreite übertrifft. Ihre gleichmäßige Aufteilung bestätigt die Lage der in Abb. 3a gezeigten Kurvenschar. Für $h^+ \geq 70$ (Abb. 4a - c) liegen die Kurven unwesentlich höher als für $h^+ \geq 100$. Dieser Tatbestand läßt sich aus dem Ansteigen der Rauigkeitsfunktion bei kleineren Rauigkeits-Reynoldszahlen h^+ erklären /2/.

Werden alle verwendeten Meßwerte für $h^+ \geq 100$ mit Hilfe der entwickelten Matrix auf einen festen Wert von $h/w = k_1 = 1.4622$ normiert, erhält man Abb. 5. Vergleicht man Abb. 5 mit Abb. 2, so erkennt man deutlich die verringerte Streubreite der Meßpunkte. Andererseits muß ebenfalls festgestellt werden, daß noch eine erhebliche Streubreite verbleibt. Der Grund dafür liegt in den oben erwähnten Unsicherheiten. Der Wert von $h/w = 1.4622$ ergab sich als mittlerer Wert im h/w -Bereich der Meßwerte.

Alle dargestellten Meßpunkte wurden bereits um die bei der Auswertung ermittelte Abhängigkeit vom Verhältnis der Rauigkeitshöhe zur Länge des Geschwindigkeitsprofils h/L reduziert. Diese Abhängigkeit ist in Abb. 6a für $h^+ \geq 100$, in Abb. 6b für $h^+ \geq 70$ dargestellt. Hierfür wurden die Meßwerte auf $h/w = k_1 = 1.4622$ und $p/h = k_2 = 10$ normiert. Das durch LSF-Approximation gewonnene Polynom 2. Grades lautet für $h^+ \geq 100$:

$$R_{k_1, k_2} = 2.900 + 1.490 h/L - 1.972 (h/L)^2 \quad (10a)$$

und hat ein Maximum bei $h/L = 0.38$.

Für $h^+ \geq 70$ ergibt sich entsprechend:

$$R_{k_1, k_2} = 2.941 + 1.068 h/L - 2.065 (h/L)^2 \quad (10b)$$

mit einem Maximum bei $h/L = 0.26$.

Wie aus der Darstellung ersichtlich ist die Abhängigkeit des Rauigkeitsparameters vom Verhältnis Rauigkeitshöhe zu Profillänge bei Rechteckrippen relativ schwach verglichen mit anderen Rauigkeitsformen /10/. Man muß allerdings berücksichtigen, daß sich der absolute Wert dieser Abhängigkeit mit der Größe des Rauigkeitsparameters verändert, weil alle Werte normiert sind. Zwischen den Bereichen $h^+ \geq 100$ und $h^+ \geq 70$ sind nur geringfügige Unterschiede vorhanden. Die Differenzen bezüglich der Abszissen der Maxima erklären sich durch den ausgeprägt flachen Kurvenverlauf.

Daß der Verlauf der Gl. (10) und (11) kein Zufallsergebnis ist, was man aufgrund der starken Streuung der Meßpunkte annehmen könnte, ergibt sich aus der detaillierten Analyse der Ergebnisse einzelner Autoren. Bei einer derartigen Analyse sind zufällige Fehler weitgehend ausgeschlossen, und es zeigt sich, daß bei kleinen h/L -Werten ein Anstieg, bei größeren ein Abfall von R auftritt /28, 35, 44/, was sich auch bei den Nikuradse'schen Untersuchungen an Sandrauhigkeiten /2/ ergibt.

Der Verlauf durch ein Maximum erklärt sich wahrscheinlich durch zwei gegenläufige Effekte, die beide mit der vereinbarten Definition des volumetrischen Durchmessers zusammenhängen. Durch diese Vereinbarung wird der Ursprung des Geschwindigkeitsprofils festgelegt. Das Geschwindigkeitsprofil über einer rauhen Wand wird angenommen als Mittelwert aus der Geschwindigkeitsverteilung direkt über der Rippe und in den Zwischenräumen. Wächst nun die Höhe der Rippe relativ zur Länge des Geschwindigkeitsprofils, so ist leicht einzusehen, daß der tatsächliche Ursprung des gemittelten Geschwindigkeitsprofils in Richtung Strömung verschoben ist. Das bedeutet, daß die dimensionslosen Geschwindigkeitsprofile nach Gl. (1) wegen des dann kleineren Wandabstandes y angehoben sind und der Rauheitsparameter R dadurch größer wird, was auch der Fall ist.

Ein gegenläufiger Effekt tritt bei sehr großen h/L -Werten auf. Zwischen den Rippen entsteht dann ein Totwasser-Gebiet. Durch die Definition des volumetrischen Durchmessers werden diese Strömungseinflüsse nicht berücksichtigt, und der aus Messungen ermittelte Reibungsbeiwert wird wegen des zu groß angenommenen Strömungsquerschnittes und hydraulischen Durchmessers zu groß wegen

$$\lambda \sim F^2 \cdot D \quad (11)$$

Der zu große Reibungsbeiwert bewirkt andererseits einen zu kleinen Rauheitsparameter R nach Gl. (2). Vermutlich würde keine Abhängigkeit des Rauheitsparameters R von h/L auftreten, wenn der Durchmesser und der Strömungsquerschnitt und damit auch der Ursprung des Geschwindigkeitsprofils stets den vorliegenden Strömungsverhältnissen angepaßt werden könnten, was aber aus naheliegenden Gründen nicht möglich ist.

3.2 Vergleich mit Meßwerten

Die Abbildungen 7a - q zeigen einen Vergleich der Meßwerte aus der Literatur, die um den h/L-Effekt nach Gl. (10) bereinigt wurden, mit der aus allen Meßwerten entwickelten Abhängigkeit des Rauigkeitsparameters von p/h. Es wurden jeweils alle Meßwerte für $h^+ \geq 100$ innerhalb $(0.96 - 1.04) \cdot h/w$ berücksichtigt. Für $h^+ \geq 70$ ergaben sich im Wesentlichen die gleichen Bilder. Sie wurden nicht wiedergegeben bis auf eine Ausnahme, Abb. 7d, die im Vergleich mit Abb. 7c die Güte der Kurvenanpassung im unteren h/w-Bereich demonstriert.

Da im Gebiet $0.96 \leq h/w \leq 1.04$ die meisten Meßpunkte existieren, wurden für $h/w = 1$ der Übersichtlichkeit halber drei Diagramme gezeichnet (Abb. 7f, g, h).

Die Meßwerte stimmen mit dem Kurvenverlauf recht gut überein, wenn man die zahlreichen Fehlermöglichkeiten ins Auge faßt. Bei der Beurteilung der Streubreite der Meßpunkte ist auch zu bedenken, daß ein bestimmter Meßfehler des Reibungsbeiwertes einen größeren Fehler im Rauigkeitsparameter zur Folge hat. Dies gilt insbesondere für kleine Werte von R, d.h. für eine starke Rauigkeit, wie man durch Anwendung von Gl. (2) leicht verifizieren kann.

Schließlich sollte noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die Kurven nicht nur aus den jeweils zum Vergleich abgebildeten Meßpunkten, sondern aus der Wert- und Gewichts-Matrix und damit aus der Gesamtheit aller ausgewerteten Daten hervorgehen. Da die Elemente der Wert-Matrix durch horizontale und vertikale Fit-Operationen miteinander verknüpft sind (vgl. 2.2), muß die Größe der Ausgangsdaten den gesamten Bereich dieser Matrix der Gewichtsverteilung entsprechend beeinflussen.

So erklärt sich, daß einzelne Kurven nicht den Verlauf zeigen, der mit den abgebildeten Meßpunkten die kleinste Summe der Fehlerquadrate erzeugt (Abb. 7a, j, n).

3.3 Analytische Darstellung und Anwendung der Ergebnisse

Damit man die ermittelten Abhängigkeiten in einfacher Weise auf praktische Probleme anwenden kann, wird die in Abb. 3 gezeigte Kurvenschar in die Form einer Gleichung gebracht. Als Näherung ergibt sich:

$$R_o = a_1(p/h)^{a_2} + a_3(p/h)^{a_4} \quad (12)$$

mit

$$\begin{aligned} a_1 &= 18.5 \quad (h/w)^{-0.9475} \\ a_2 &= -1.143 \quad (h/w)^{-0.147} \\ a_3 &= 0.33 \quad (h/w)^{0.1483} \\ a_4 &= 0.758 \quad (h/w)^{-0.11} \end{aligned}$$

und folgendem Gültigkeitsbereich:

$$\begin{aligned} 1 &\leq p/h \leq 40 \\ 0.3 &\leq h/w \leq 8 \\ R_o &\leq 10 \end{aligned}$$

Die gefundene analytische Beziehung wird in Abb. 8 zusammen mit den Originalkurven dargestellt. Die maximale Abweichung der mit Gl. (12) berechneten Werte von dem aus der Matrix ermittelten Verlauf beträgt etwa 10 %.

Wird für eine gegebene Rauigkeit der Reibungsbeiwert gesucht, so kann der Rauigkeitsparameter R_o für $h/L = 0$ nach Gl. (12) errechnet werden. Für den gegebenen h/L -Wert erhält man dann den Rauigkeitsparameter zu:

$$R = R_o + \frac{R_o}{R_{o_{k_1, k_2}}} (R_{k_1, k_2} - R_{o_{k_1, k_2}}). \quad (13)$$

Um die Anwendung zu erleichtern, wird das Verfahren an einem einfachen Beispiel erläutert:

Gesucht sei der Reibungsbeiwert eines rauhen Rohres mit den Abmessungen:

$$D_{vol} = 100 \text{ mm}; h = 10 \text{ mm}; w = 20 \text{ mm}; p = 40 \text{ mm}$$

für vollrauhe Strömung. Nach Gl. (12) findet man für $h/w = 0.5$ und $p/h = 4$ den Wert $R_o = 7.10$ und aus Gl. (10) für $h/L = 0.2$ den Wert $R_{k_1, k_2} = 3.12$.

Damit ergibt sich nach Gl. (13) der Rauigkeitsparameter

$$R = 7.10 + 7.10/2.90 (3.12 - 2.90) = 7.64$$

Nach Gl. (2) findet man dann mit $G = 3.75$ für rauhe Rohre /3/
 $\sqrt{8/\lambda} = 2.5 \ln 5 + 7.64 - 3.75$ oder $\lambda = 0.1277$.

3.3 Vergleich mit Beziehungen aus der Literatur

In der Literatur sind nur sehrwenige verallgemeinernde Aussagen über die Abhängigkeit des Rauigkeitsparameters von der Geometrie der Einzelrauigkeit bekannt. Zum Vergleich mit den hier gefundenen Gesetzmäßigkeiten werden deshalb nur die Angaben von Maubach /4/ sowie von Dalle Donne und Meerwald /11/ verwendet.

Die Abb. 9 zeigt einen Vergleich der aus der Matrix berechneten mit den von Maubach angegebenen Kurven, wobei der Rauigkeitsparameter als Funktion von p/h für verschiedene h/w dargestellt ist.

Beide Kurvenscharen zeigen qualitativ den gleichen Verlauf; sie liegen bei großem p/h dicht gedrängt und fächern bei kleinem p/h stark auf. Eine gute Übereinstimmung ist für $h/w = 1$ und außerdem für $p/h \approx 10$ zu erkennen.

Insgesamt ergeben sich jedoch beträchtliche Abweichungen. Die Hauptursache für diese Abweichungen besteht sicherlich darin, daß Maubach seine Angaben auf die Ergebnisse von nur 8 Autoren stützt. Dabei liegen die berücksichtigten Daten zweier Autoren /49, 50/ in transformierter Form vor, so daß ihre Auswertung nur unter gewissen Annahmen möglich ist. Diese Daten wurden in der vorliegenden Arbeit nicht mitverwendet. Außerdem sind die von Maubach benutzten Literaturangaben weder auf eine einheitliche Basis (z.B. volumetrischer Durchmesser) bezogen, noch ist ein Einfluß von h/L berücksichtigt worden.

Der Vergleich mit den Ergebnissen von Dalle Donne und Meerwald /11/ ist in den Abb. 10 und 11 dargestellt. Es werden jeweils die h/L -bereinigten Rauigkeitsparameter verglichen, wobei für die neuen Beziehungen Gl. (12) benutzt wird. Die Angaben von Dalle Donne und Meerwald in Abb. 10 stimmen für kleine p/h und kleine h/w recht gut mit den hier gefundenen Gesetzmäßigkeiten überein. Dagegen resultieren erhebliche Abweichungen für große h/w bei kleinen p/h . Der Grund dafür mag darin liegen, daß sich die neuen Gesetzmäßigkeiten auf einer größeren Anzahl von Meßwerten - besonders in diesem Bereich - abstützen.

Zur Steigerung des Wärmeübergangs eignen sich Rechteckrippen in dem Bereich allerdings nicht, da sich zwischen den Rippen eine Totwasserschicht

ausbildet, die die Wärmeabfuhr stark hemmt. Wichtiger für die Verbesserung des Wärmeübergangs durch künstliche Rauigkeiten ist der p/h -Bereich, in welchem der Rauigkeitsparameter ein Minimum durchläuft ($8 < p/h < 12$). Hier weichen die Angaben von Dalle Donne und Meerwald jedoch ebenfalls nicht unerheblich ab; vor allem stört die Inkonsistenz bei $p/h = 8$. Für große Werte von p/h liegen die neuen Kurven wesentlich enger zusammen. Dies erscheint auch vernünftig, da der Einfluß der Einzelrippe bei großen Abständen schwindet. Die Ursache für die starke Auffächerung der Angaben nach /11/ ist offenbar in der zu groß angenommenen h/L -Abhängigkeit zu suchen, welche bewirkt, daß bei der Datenreduktion, besonders bei großen h/w , zu kleine R -Werte erzeugt werden.

Dalle Donne und Meerwald stützen ihre Angaben wie Maubach auf Rauigkeitsparameter, die sich als Mittelwert aus den Meßreihen der einzelnen Untersuchungen ergaben. Die Auswertung wurde ohne eine entsprechende Wichtung mit der Anzahl der Meßpunkte durchgeführt, im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit, bei der erstmals die Wichtung aller Meßergebnisse vorgenommen wurde. Insgesamt gesehen demonstriert Abb. 10 den Fortschritt, der für die Beschreibung der Geometrieabhängigkeit des Rauigkeitsparameters durch diese Arbeit erzielt wurde.

Für einen weiteren Vergleich mit den Angaben nach /11/ wird der von Dalle Donne und Meerwald /51/ eingeführte Rauigkeits-Geometrieparameter p^2/hw benutzt (Abb. 11). Wie die Darstellung zeigt, erhält man mit Gl. (12) ein Kurvennetzwerk mit den Variablen p/h und h/w , in welchem sich der nach /11/ gezeichnete Polygonzug wie eine Mittelwertbildung ausnimmt. Die starke Auffächerung der Kurven veranschaulicht, daß sich der Parameter p^2/hw nicht dazu eignet, Meßwerte von Rechteckrauigkeiten zu korrelieren.

4. Schlußfolgerungen

Die durchgeführte Analyse aller den Autoren bekannten Meßergebnisse an Rechteckrauigkeiten hat gezeigt, daß für vollrauhe Strömung eine allgemeine Gesetzmäßigkeit des Rauigkeitsparameters R als Funktion der Geometrie angegeben werden kann. Die gefundene Gesetzmäßigkeit ist in einem sehr großen Bereich der drei Geometrieparameter gültig; diese sind das Verhältnis von Höhe zu Breite h/w , das Verhältnis von Abstand

zu Höhe p/h und das Verhältnis von Höhe der Rauigkeit zur Länge des Geschwindigkeitsprofils h/L . Für die Auswertung der Meßergebnisse ist eine Vereinbarung über die Kanalabmessungen erforderlich. Hier wurde stets der volumetrische Durchmesser verwendet. Damit ein Vergleich der Meßergebnisse von unterschiedlichen Strömungskanälen möglich ist, muß stets die gleiche Transformations-Methode verwendet werden; dies ist hier die Maubach-Methode.

Der Druckverlust in Kanälen mit Rechteckrauigkeiten kann mit den gefundenen Beziehungen berechnet werden. Die Genauigkeit dieser Beziehungen ist abhängig von den geometrischen Toleranzen der Rauigkeitselemente, von der Qualität der Meßwerte der einzelnen Untersuchungen, von der Transformationsmethode sowie schließlich von der Annahme, daß für eine genügend hohe "Rauigkeits-Reynoldszahl" h^+ (hier $h^+ \geq 100$ bzw. $h^+ \geq 70$) ein quadratisches Widerstandsgesetz gilt. Für eine höhere Genauigkeit der angegebenen Beziehungen sind sicherlich noch systematische experimentelle Untersuchungen erforderlich über einen großen Bereich von h^+ sowie für den Übergangsbereich zwischen hydraulisch glatter und vollrauer Strömung. Derartige Untersuchungen könnten von großem Wert für die Anwendung von künstlichen Rauigkeiten in wärmeübertragenden Apparaten sein.

Nomenklatur

a_i	Koeffizient bzw. Exponent
G	Geometrieparameter
h	Höhe der Rauigkeitselemente
$h^+ = \frac{h u^*}{\nu}$	dimensionslose Rauigkeitshöhe, "Rauigkeits-Reynoldszahl"
L	Länge des Geschwindigkeitsprofils zwischen Wand und Nullschubspannungslinie
p	Abstand der Rauigkeitselemente (vgl. Abb. 1)
R	Rauigkeitsparameter
Re	Reynoldszahl
u^*	Schubspannungsgeschwindigkeit
u^+	dimensionslose Geschwindigkeit
w	Breite der Rauigkeitselemente
y	Wandabstand
$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu}$	dimensionsloser Wandabstand
z	Koeffizient für h/L-Effekt
λ	Reibungsbeiwert
ν	kinematische Zähigkeit

Indizes:

o	bezogen auf $h/L = 0$
k_1	bezogen auf $h/w = k_1$
k_2	bezogen auf $h/w = k_2$

Literatur

1. Gasbrüter-Memorandum, Ergebnisse einer Untersuchung über die Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit eines gasgekühlten schnellen Brüters, Rep. KFK 1375, EUR 4575 d, JÜL 744-RG (1971).
2. J. NIKURADSE, Strömungsgesetze in rauhen Rohren, VDI-Forschungsheft 361 (1933).
3. K. MAUBACH, Reibungsgesetze turbulenter Strömungen. Chemie-Ingenieur-Technik 42 (15), 995-1004 (1970).
4. K. MAUBACH, Rough annulus pressure drop - Interpretation of experiments and recalculation for square ribs, "Zürich Club" Gas Cooled Fast Reactor Heat Transfer Meeting, Würenlingen, Switzerland (1970); cf. Int. J. Heat Mass Transfer 15, 2489-2498 (1972).
5. W.B. HALL, Heat transfer in channels composed of rough and smooth surfaces, J. Mech. Engng Sci. 4, 287-291 (1962).
6. D. WILKIE, M. COWIN, P. BURNETT and T. BURGOYNE, Friction factor measurements in a rectangular channel with walls of identical and non-identical roughness, Int. J. Heat Mass Transfer 10, 611-621 (1967).
7. V. WALKER, L. WHITE and P. BURNETT, Forced convection heat transfer for parallel flow through a roughened rod cluster, Int. J. Heat Mass Transfer 15, 403-424 (1972).
8. E. MEERWALD, Druckverlust und Wärmeübergang an glatten und rauhen Flächen bei hohen Temperaturen und turbulenter Strömung, und deren Darstellung durch universelle Gesetze, Diss. Univ. Karlsruhe, Externer Bericht 4/71-29 Kernforschungszentrum Karlsruhe (1971).
9. W. BAUMANN and K. REHME, Pressure drop performance of artificial roughness as a function of roughness geometry, NEA-GCFR Specialist Meeting on Core Performance, Studsvik (Sweden) (1973).

10. W. BAUMANN, Pressure drop performance of artificial roughness as a function of roughness geometry, Proc. Int. Meeting on Reactor Heat Transfer, Karlsruhe, pp. 155-174 (1973).
11. M. DALLE DONNE and E. MEERWALD, Heat transfer and friction correlations for surfaces roughened by transversal ribs, NEA-GCFR Specialist Meeting on Core Performance, Studsvik (Sweden) (1973).
12. H. MÖBIUS, Experimentelle Untersuchung des Widerstandes und der Geschwindigkeitsverteilung in Rohren mit regelmäßig angeordneten Rauigkeiten bei turbulenter Strömung, Physikal. Zeitschrift 41, 202-225 (1940).
13. W.J. WHITE and L. WHITE, The effect of rib profile on heat transfer and pressure loss properties of transversely ribbed roughened surfaces, "Zürich Club" Gas Cooled Fast Reactor, Heat Transfer Meeting (1970).
14. R.H. SABERSKY, Heat transfer in the seventies, Int. J. Heat Mass Transfer 15, 1927-1949 (1971).
15. H. SCHLICHTING, Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeitsproblem, Ing. Arch. 7, 1-34 (1936).
16. C. WARBURTON and M.A.M. PIRIE, An improved method for analysing heat transfer and pressure drop tests on roughened rods in smooth channels, Rep. RD/B/N2621 of C.E.G.B. Berkeley, U.K. (1973).
17. K. REHME, Turbulent flow in smooth concentric annuli with small radius ratios, J. Fluid Mech. 64 (2), 263-287 (1974).
18. K. HANJALIC and B.E. LAUNDER, Fully-developed flow in rectangular ducts of non-uniform surface texture, I - An experimental investigation Rep. TWF/TN/48 of Imperial College, London (1968).
19. C.J. LAWN and M.J. HAMLIN, Velocity measurements in roughened annuli, Rep. RD/B/N-1278 C.E.G.B. Berkeley, U.K. (1969).

20. M.D. MILLIONSHCHIKOV, V.I. SUBBOTIN, M.KH. IBRAGIMOV, G.S. TARANOV, L.L. KOBZAR', I.P. GOMONOV and A.R. SOKOLOVSKII, Untersuchung der Geschwindigkeitsfelder und Druckverlustbeiwerte in Rohren mit künstlicher Wandrauhigkeit, Fiziko-energeticheskii institut, Obninsk, Rep. FEI-385 (1973); cf. LA-Übers. Nr. 0436 (1973-4) Kernforschungszentrum Karlsruhe.
21. H. BRAUER, Strömungswiderstand und Wärmeübergang bei Ringspalten mit rauhen Kernrohren, Atomenergie 6 (4), 152-161 (1961).
22. F.W. BRAUN (JR) and J.G. KNUDSEN, Pressure drop in annuli containing transverse fin tubes, Chem. Eng. Progr. 48 (10), 517-522 (1952).
23. B. COLLINSON, Friction factor of roughened fuel pins in both laminar and turbulent flow regions, Proc. Int. Meeting on Reactor Heat Transfer, Karlsruhe, pp. 54-62 (1973).
24. M. DALLE DONNE and E. MEERWALD, Heat transfer from rough surfaces, latest results, ENEA Heat Transfer Specialist Meeting, Windscale, U.K. (1972).
25. A. DRAYCOTT and K.R. LAWTHORPE, Improvement of fuel element heat transfer by use of roughened surfaces and the application to a 7-rod cluster, Int. Devel. in Heat Transfer 1961/62, pp. 543-552, A.S.M.E. (1962).
26. F. DURST, On turbulent flow through annular passages with smooth and rough cores, Ph.D. Thesis Univ. of London (1968).
27. O.S. FEDYNSKII, Increasing the heat transfer rate during the flow of water in an annular space, Rep. AEC-tr-4511, 44-56 (1959).
28. G. FEURSTEIN and H. RAMPF, Der Einfluß rechteckiger Rauigkeiten auf den Wärmeübergang und den Druckabfall in turbulenter Ringspaltströmung, Wärme- und Stoffübertragung 2 (1), 19-30 (1969).

29. J. GARGAUD and G. PAUMARD, Amélioration du transfert de chaleur par l'emploi de surfaces corruguées, Rep. CEA-R-2464 (1964).
30. M. HUDINA, Der Einfluß der Form der Rauigkeit auf das thermohydraulische Verhalten gerippter Oberflächen, Proc. Int. Meeting on Reactor Heat Transfer, Karlsruhe, pp. 111-131 (1973).
31. B. KJELLSTRÖM and S. HEDBERG, On shear stress distributions for flow in smooth or partially rough annuli, Rep. AE-243, AB Atomenergi, Stockholm, (1966).
32. B. KJELLSTRÖM, Influence of surface roughness on heat transfer and pressure drop in turbulent flow, Rep. AE-RTL-819, AB Atomenergi, Stockholm, (1965).
33. R. KOCH, Druckverlust und Wärmeübergang bei verwirbelter Strömung, VDI-Forschungsheft No. 469 (1958).
34. C.J. LEE, Investigation of flow parameters for a series of concentric rough pin and smooth channel assemblies, Rep. RD/B/N-2404 C.E.G.B. Berkeley, U.K. (1972).
35. F.A. MASSEY (JR.), Heat transfer and flow in annuli having artificially roughened inner surfaces, Ph.D. Thesis Univ. of Wisconsin (1966).
36. W. NUNNER, Wärmeübergang und Druckabfall in rauhen Rohren, VDI-Forschungsheft No. 455 (1956).
37. R.W. POWELL, Flow in a channel of definite roughness, Am. Soc. Civ. Engrs. 1944, pp. 1521 - 1544 (1944).
38. E.W. SAMS, Experimental investigation of average heat and friction coefficients for air, Rep. NACA-RM-E 52 D17 (1952).
39. D.W. SAVAGE, The effect of surface roughness on heat and momentum transfer, Ph.D. Thesis, Purdue Univ. (1961).
40. D.W. SAVAGE and J.E. MYERS, The effect of artificial surface roughness on heat and momentum transfer, A.I.Ch.E. Journal 9, 694-702 (1963).

41. N. SHERIFF, P. GUMLEY and J. FRANCE, Heat transfer characteristics of roughened surfaces, Chem. and Process Engng. 9, 624-629 (1964).
42. E. SKUPINSKI, Wärmeübergang und Druckverlust bei künstlicher Verwirbelung und künstlichen Wandrauigkeiten, Diss. TH Aachen (1961).
43. M.J. STEPHENS, Investigation of flow in a concentric annulus with smooth outer wall and rough inner wall, part 1: Transverse rib type roughness, Rep. RD/B/N-1535 C.E.G.B. Berkeley, U.K. (1970).
44. T. UEDA and I. HARADA, Experiment of heat transfer on the surfaces with transverse fins for flow direction, Bulletin of JSME 7 (28) pp. 759-768 (1964).
45. M.A.P. WATSON, The performance of a square rib type of heat transfer surface, Rep. RD/B/N-1738 C.E.G.B. Berkeley, U.K. 1970).
46. R.L. WEBB, Turbulent heat transfer in tubes having two-dimensional roughness, including the effect of Prandtl number, Ph.D. Univ. of Minnesota (1969).
47. D. WILKIE, Forced convection heat transfer from surfaces roughened by transverse ribs, Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf. Chicago vol. 1, pp. 1-19 (1966).
48. R. WINKEL, Die Wasserbewegung in Leitungen mit Ringspalt-Durchflußquerschnitt (Labyrinthdichtungen), ZAMM 3 (4), 251-257 (1923).
49. G.F. HEWITT, Interpretation of pressure drop data from an annular channel, AERE-R 4340 (1964).
50. V. KAUL and M. VON KISS, Forced convection heat transfer and pressure drop in artificially roughened flow passages, Neue Technik 6, 297 (1964).
51. M. DALLE DONNE and E. MEERWALD, Heat Transfer from surfaces roughened by thread-type ribs at high temperatures, Proc. 1970 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford Univ. Press, Stanford, Calif. (1970).

Tabelle I

Vergleich zwischen gemessenen und gerechneten Werten des Rauigkeits-
parameters R

Erläuterungen

Autor	siehe Autorenliste
P	Abstand der Rauigkeitselemente
H	Höhe der Rauigkeitselemente
B	Breite der Rauigkeitselemente
L	Länge des Geschwindigkeitsprofils zwischen Wand und Nullschubspannungslinie
N	Anzahl der Meßpunkte pro Testreihe
R_{MESS}	Rauigkeitsparameter R, aus Messungen er- mittelt
R_{RECHN}	Rauigkeitsparameter R, berechnet
$\text{DIFF} = \frac{R_{\text{MESS}} - R_{\text{RECHN}}}{R_{\text{RECHN}}} \cdot 100$	relativer Fehler des Rauigkeitsparameters

Autorenliste

Nr.	Autor	Lit.	Ringspalt	Rohr	Platten
1	H. Brauer	/21/	+		
2	F.W. Braun, J.G. Knudsen	/22/	+		
3	F.W. Braun, J.G. Knudsen	/22/	+		
4	B. Collinson	/23/	+		
5	A. Draycott, K.R. Lawther	/25/	+		
6	F. Durst	/26/	+		
7	O.S. Fedynskii	/27/	+		
8	G. Feurstein, H. Rampf	/28/	+		
9	J. Gargaud, G. Paumard	/29/		+	
10	J. Gargaud, G. Paumard	/29/	+		
11	M. Hudina	/30/	+		
12	B. Kjellström, S. Hedberg	/31/	+		
13	B. Kjellström	/32/	+		
14	R. Koch	/33/		+	
15	C.J. Lawn, M.J. Hamlin	/19/	+		
16	C.J. Lee	/34/	+		
17	F.A. Massey	/35/	+		
18	M.D. Millionshchikov et al.	/20/		+	
19	H. Möbius	/12/		+	
20	W. Nunner	/36/		+	
21	E.W. Sams	/38/		+	
22	D.W. Savage	/39/		+	
23	N. Sheriff et al.	/41/	+		
24	E. Skupinski	/42/		+	
25	E. Skupinski	/42/	+		
26	M.J. Stephens	/43/	+		
27	M.A.P. Watson	/45/	+		
28	R.L. Webb	/46/		+	
29	D. Wilkie	/47/	+		
30	R. Winkel	/48/	+		
31	T. Ueda, I. Harada	/44/			+
32	D. Wilkie et al.	/ 6/			+
33	R.W. Powell	/37/			+
35	H. Schlichting	/15/			+
36	M. Dalle Donne, E. Meerwald	/24/	+		
37	M. Dalle Donne, E. Meerwald	/11/	+		

AUTOR	P/H	H/B	H/L	N	R MESS	R RECHN	DIFF O/O
2	0.35	10.00	0.717	25	4.08	5.13	-20.49
2	0.40	15.10	0.997	5	2.93	2.70	8.42
31	0.51	12.50	0.888	1	3.12	3.17	-1.40
31	0.51	12.50	0.786	1	3.22	3.39	-4.93
31	0.51	12.50	0.706	1	3.30	3.53	-6.40
2	0.57	15.10	0.943	27	2.65	2.57	2.83
2	0.60	10.00	0.641	18	3.34	3.84	-13.03
31	0.62	10.23	0.989	1	3.07	2.99	2.55
31	0.62	10.23	0.841	1	3.25	3.37	-3.72
31	0.62	10.23	0.732	1	3.36	3.59	-6.37
31	0.62	10.23	0.652	1	3.63	3.71	-2.11
31	0.62	12.25	0.992	1	2.91	2.67	9.03
31	0.62	12.25	0.864	1	3.09	2.97	4.18
31	0.62	12.25	0.728	2	3.30	3.21	2.86
2	0.70	5.00	0.385	24	6.39	6.09	4.95
3	0.75	15.10	0.918	36	2.36	2.43	-2.62
31	0.81	7.83	0.775	1	3.54	3.54	-0.02
31	0.81	7.83	0.661	1	3.81	3.73	2.12
31	0.81	7.83	0.577	1	4.05	3.82	6.01
31	0.81	12.16	0.966	1	2.85	2.42	17.56
31	0.81	12.16	0.847	1	3.00	2.66	12.88
31	0.81	12.16	0.719	2	3.29	2.86	15.09
2	0.85	10.00	0.622	29	3.33	3.15	5.76
22	0.92	4.00	0.263	3	5.17	6.13	-15.67
31	1.02	12.56	0.945	1	2.83	2.21	27.70
31	1.02	12.56	0.830	1	3.03	2.41	25.62
31	1.02	12.56	0.707	2	3.39	2.58	31.41
31	1.02	6.19	0.892	1	3.48	3.30	5.40
31	1.02	6.19	0.715	1	4.01	3.67	9.08
31	1.02	6.19	0.597	1	4.32	3.83	12.60
31	1.02	6.19	0.513	1	4.43	3.91	13.40
9	1.13	1.60	0.033	5	11.17	11.68	-4.40
3	1.14	10.00	0.620	40	2.83	2.69	5.14
8	1.17	2.50	0.155	10	8.49	8.14	4.27
22	1.19	5.33	0.345	32	4.15	4.01	3.51
2	1.20	5.00	0.336	34	4.14	4.19	-1.40
31	1.32	4.80	0.840	1	4.08	3.56	14.74
31	1.32	4.80	0.651	1	4.79	3.91	22.50
31	1.32	4.80	0.538	1	5.50	4.03	36.35
31	1.32	4.80	0.458	1	5.87	4.08	43.65
22	1.38	2.67	0.172	6	5.06	6.76	-25.09
3	1.40	15.10	0.868	33	2.09	2.16	-3.00
21	1.45	1.38	0.026	2	7.79	10.84	-28.11
22	1.58	4.00	0.256	13	4.90	4.20	16.69
9	1.62	1.60	0.032	5	11.49	8.55	34.32
8	1.67	2.50	0.149	9	7.74	6.08	27.32
2	1.71	5.00	0.312	26	2.81	3.34	-15.94
8	1.75	1.67	0.106	4	8.84	8.01	10.31
13	1.84	4.07	0.024	3	5.81	3.49	66.25
13	1.85	3.77	0.034	3	5.96	3.73	59.94
5	2.00	1.00	0.035	6	9.29	9.84	-5.57

AUTOR	P/H	H/B	H/L	N	R MESS	R RECHN	DIFF O/O
5	2.00	1.00	0.129	7	11.09	10.20	8.64
5	2.00	1.00	0.045	5	9.26	9.88	-6.30
23	2.00	1.00	0.075	1	12.07	10.01	20.58
23	2.00	1.00	0.038	1	9.29	9.85	-5.67
1	2.00	1.00	0.126	2	9.04	10.19	-11.26
18	2.00	1.18	0.067	26	10.31	9.17	12.44
25	2.00	1.00	0.212	7	9.04	10.43	-13.33
5	2.00	1.00	0.068	4	10.30	9.97	3.33
21	2.05	1.12	0.039	3	9.96	9.15	8.77
31	2.08	3.03	0.714	1	4.29	4.15	3.35
31	2.08	3.03	0.519	1	5.31	4.41	20.31
31	2.08	3.03	0.409	1	5.72	4.46	28.24
31	2.08	3.03	0.333	1	5.41	4.46	21.25
3	2.12	10.00	0.583	31	1.94	2.10	-7.30
22	2.19	5.33	0.338	17	3.59	2.78	29.09
3	2.28	5.00	0.322	30	2.86	2.85	0.36
22	2.38	2.67	0.169	16	4.13	4.38	-5.67
8	2.50	2.50	0.132	8	4.81	4.38	9.65
8	2.50	1.67	0.096	7	6.32	5.86	7.83
9	2.60	1.67	0.020	5	7.32	5.49	33.42
9	2.62	1.60	0.032	5	6.99	5.63	24.04
3	2.72	15.10	0.841	33	1.88	1.96	-4.02
22	2.75	1.33	0.084	10	4.49	6.25	-28.12
1	3.00	1.00	0.111	2	6.41	6.88	-6.84
25	3.00	1.00	0.188	7	6.43	7.04	-8.65
22	3.19	5.33	0.335	16	3.22	2.40	34.02
8	3.33	2.50	0.127	9	3.87	3.58	8.23
8	3.50	0.83	0.051	2	6.78	6.46	4.88
9	3.60	1.67	0.020	5	4.18	4.21	-0.77
8	3.75	1.67	0.088	9	3.82	4.21	-9.16
14	3.92	5.00	0.202	4	3.64	2.33	56.45
14	3.92	10.00	0.403	6	3.11	1.99	56.88
13	3.93	1.72	0.020	3	2.95	3.87	-23.82
35	4.00	1.00	0.043	5	5.36	5.14	4.32
36	4.00	1.00	0.059	2	5.00	5.17	-3.36
37	4.00	1.00	0.120	1	5.20	5.29	-1.78
37	4.00	1.00	0.250	1	6.55	5.47	19.84
13	4.02	1.98	0.030	3	2.29	3.53	-35.14
3	4.06	15.10	0.831	39	1.81	1.92	-5.66
37	4.06	1.64	0.026	1	2.65	3.91	-32.16
37	4.06	1.64	0.035	1	2.65	3.92	-32.45
3	4.11	10.00	0.572	47	1.67	1.94	-14.13
3	4.23	5.00	0.306	31	1.81	2.34	-22.51
22	4.25	4.00	0.251	17	3.23	2.59	24.94
1	4.33	1.00	0.101	3	3.74	4.91	-23.78
9	4.60	1.67	0.020	5	3.53	3.56	-0.80
22	4.75	1.33	0.083	14	3.49	3.92	-10.92
37	4.86	0.82	0.031	1	3.85	4.79	-19.70
9	5.00	1.00	0.012	4	3.82	4.21	-9.34
1	5.00	1.00	0.177	3	3.71	4.48	-17.15
9	5.00	1.00	0.012	1	4.18	4.21	-0.81

AUTOR	P/H	H/B	H/L	V	R MESS	R RECHN	DIFF O/O
8	5.00	1.67	0.085	6	3.03	3.49	-13.04
8	5.00	0.83	0.046	4	4.24	4.69	-9.51
31	5.00	1.26	0.465	1	5.14	4.08	25.91
31	5.00	1.26	0.287	1	4.65	4.08	13.96
31	5.00	1.26	0.210	1	4.64	4.03	15.13
31	5.00	1.26	0.165	1	4.32	3.99	8.33
29	5.08	1.00	0.019	2	3.01	4.18	-28.05
29	5.12	1.00	0.029	4	3.10	4.17	-25.61
22	5.19	5.33	0.333	18	2.92	2.28	27.92
3	5.38	15.10	0.830	38	1.87	1.94	-3.58
37	5.77	1.73	0.036	1	1.95	3.14	-37.90
35	6.00	1.00	0.024	9	3.27	3.75	-12.61
35	6.00	1.00	0.049	4	3.36	3.79	-11.38
35	6.00	1.00	0.111	4	3.39	3.88	-12.60
3	6.13	10.00	0.566	34	1.67	2.08	-19.69
22	6.38	2.67	0.166	17	2.99	2.74	9.13
27	6.49	1.00	0.055	6	2.38	3.64	-34.64
7	6.62	1.00	0.105	9	3.01	3.67	-18.04
8	6.67	2.50	0.120	9	2.48	2.74	-9.74
35	6.67	10.00	0.081	6	1.90	2.05	-7.56
22	6.92	4.00	0.249	15	2.89	2.54	13.76
9	7.00	1.00	0.012	4	3.71	3.44	7.91
9	7.00	1.00	0.008	5	2.79	3.43	-18.86
9	7.00	1.00	0.012	1	3.43	3.44	-0.40
29	7.10	1.00	0.029	4	2.48	3.45	-28.08
17	7.11	1.06	0.193	42	2.63	3.55	-25.91
17	7.11	1.06	0.306	27	3.02	3.62	-16.44
17	7.11	1.06	0.102	31	2.47	3.46	-28.50
16	7.15	1.00	0.112	9	3.68	3.56	3.56
16	7.15	1.00	0.054	5	3.21	3.48	-7.62
16	7.15	1.00	0.039	6	3.17	3.46	-8.27
27	7.19	1.00	0.035	12	2.69	3.44	-21.79
26	7.20	1.00	0.045	6	3.00	3.45	-13.19
15	7.20	1.00	0.053	4	3.11	3.47	-10.38
15	7.20	1.00	0.061	3	3.02	3.48	-13.31
15	7.20	1.00	0.037	3	1.98	3.44	-42.55
15	7.20	1.00	0.017	4	2.48	3.41	-27.14
15	7.20	1.00	0.031	7	1.81	3.43	-47.31
16	7.20	1.00	0.022	2	2.77	3.42	-19.00
4	7.20	1.00	0.041	2	2.49	3.45	-27.80
15	7.20	1.00	0.021	1	2.38	3.42	-30.34
4	7.20	1.00	0.043	4	2.54	3.45	-26.44
15	7.20	1.00	0.037	3	2.37	3.44	-31.19
15	7.20	1.00	0.055	5	2.88	3.47	-16.92
15	7.20	1.00	0.059	4	2.86	3.48	-17.58
15	7.20	1.00	0.039	6	2.98	3.45	-13.63
15	7.21	1.00	0.054	7	3.27	3.47	-5.69
27	7.22	1.00	0.023	6	2.15	3.42	-36.95
29	7.23	1.00	0.019	4	1.93	3.41	-43.45
15	7.30	1.00	0.018	2	2.11	3.39	-37.91
15	7.30	1.00	0.011	2	1.79	3.38	-47.06

AUTOR	P/H	H/B	H/L	N	R MESS	R RECHN	DIFF O/O
15	7.30	1.00	0.017	5	2.23	3.39	-34.34
15	7.40	1.00	0.019	1	2.63	3.38	-22.18
16	7.40	1.00	0.013	1	2.76	3.37	-18.06
15	7.40	1.00	0.020	3	2.66	3.38	-21.30
16	7.40	1.00	0.065	5	3.41	3.45	-1.04
13	7.92	0.34	0.041	5	5.97	4.89	22.06
3	8.12	10.00	0.568	39	1.87	2.26	-16.99
13	8.15	0.97	0.011	1	2.10	3.29	-36.22
22	8.19	5.33	0.332	18	2.79	2.49	12.06
3	8.22	5.00	0.305	27	1.91	2.52	-24.19
13	8.25	0.87	0.019	3	1.91	3.41	-44.07
31	8.33	0.76	0.333	1	5.22	3.85	35.61
31	8.33	0.76	0.192	1	4.45	3.77	17.93
31	8.33	0.76	0.138	1	4.39	3.72	17.97
31	8.33	0.76	0.105	1	3.68	3.68	0.06
13	8.50	0.97	0.050	3	2.17	3.33	-34.73
6	8.50	0.97	0.051	6	2.28	3.33	-31.56
13	8.62	0.92	0.034	6	2.21	3.34	-33.80
6	8.63	0.93	0.035	11	2.62	3.34	-21.48
19	8.65	2.20	0.222	31	2.98	2.93	1.64
22	8.75	1.33	0.083	9	3.10	3.09	0.53
1	9.33	1.00	0.096	3	2.72	3.32	-18.23
29	9.45	1.00	0.029	4	2.56	3.23	-20.83
29	9.54	1.00	0.020	3	2.53	3.21	-21.14
1	9.67	1.00	0.168	3	2.45	3.39	-27.86
14	9.80	5.00	0.201	3	3.37	2.63	28.20
14	9.80	1.00	0.081	1	3.83	3.30	16.10
14	9.80	5.00	0.201	2	3.14	2.63	19.24
14	9.80	10.00	0.401	6	2.90	2.47	17.45
35	9.90	1.68	0.038	16	3.07	2.96	3.65
19	10.00	1.00	0.101	33	3.63	3.29	10.10
8	10.00	0.83	0.044	5	2.78	3.38	-17.59
8	10.00	1.67	0.083	6	2.62	3.03	-13.54
28	10.00	0.97	0.020	2	3.66	3.23	13.08
28	10.00	1.94	0.040	4	3.23	2.90	11.51
30	10.00	0.20	0.432	4	5.87	5.18	13.44
30	10.00	0.40	0.586	5	3.75	4.19	-10.70
8	10.00	1.67	0.086	1	2.59	3.03	-14.71
32	10.00	1.00	0.043	2	2.77	3.25	-14.71
32	10.00	1.00	0.064	2	3.22	3.27	-1.64
35	10.00	1.00	0.024	8	3.52	3.22	9.39
8	10.00	1.67	0.084	2	2.60	3.03	-14.12
10	10.00	1.00	0.058	4	3.21	3.27	-1.78
8	10.00	0.42	0.023	1	3.04	3.93	-22.82
9	10.00	1.00	0.020	2	3.43	3.21	6.76
9	10.00	1.00	0.032	1	3.94	3.23	21.88
10	10.00	1.00	0.061	3	3.66	3.27	11.93
9	10.00	1.00	0.020	9	3.59	3.21	11.81
9	10.00	1.00	0.008	5	4.11	3.19	28.84
28	10.00	3.87	0.080	6	3.14	2.66	18.40
9	10.00	1.00	0.032	5	3.53	3.23	9.26

AUTOR	P/H	H/B	H/L	N	R MESS	R RECHN	DIFF 0/0
19	10.03	1.00	0.101	30	3.60	3.32	8.26
13	10.69	0.76	0.008	1	2.22	3.38	-34.22
22	10.92	4.00	0.249	17	2.98	2.85	4.48
25	11.00	1.00	0.156	6	3.05	3.40	-10.27
24	11.10	2.00	0.202	12	3.45	3.12	10.74
24	11.10	4.00	0.403	10	2.97	2.90	2.55
22	12.75	1.33	0.083	10	3.22	3.30	-2.29
35	12.90	10.33	0.085	5	2.08	2.61	-20.15
22	13.19	5.33	0.331	17	2.84	3.00	-5.50
7	13.31	1.00	0.104	4	2.96	3.49	-15.25
17	14.21	1.06	0.099	1	2.86	3.54	-19.08
17	14.21	1.06	0.106	8	3.40	3.55	-4.29
17	14.21	1.06	0.197	16	3.53	3.64	-3.14
17	14.21	1.06	0.312	3	4.16	3.71	12.13
17	14.21	1.06	0.200	8	3.65	3.65	0.01
17	14.21	1.06	0.105	6	3.06	3.55	-13.65
17	14.21	1.06	0.311	4	4.06	3.71	9.53
17	14.21	1.06	0.211	1	4.05	3.66	10.70
17	14.21	1.06	0.306	6	4.02	3.71	8.35
17	14.21	1.06	0.104	6	3.22	3.55	-9.27
17	14.21	1.06	0.312	8	4.07	3.71	9.85
24	14.30	4.00	0.402	8	3.06	3.21	-4.53
9	15.00	1.00	0.012	4	4.98	3.51	41.93
8	15.00	1.67	0.085	11	3.08	3.42	-10.05
9	15.00	1.00	0.008	4	4.41	3.50	26.07
13	15.42	0.55	0.035	3	3.51	3.79	-7.41
10	15.62	1.00	0.095	6	3.74	3.70	1.12
13	15.87	0.50	0.020	3	3.45	3.83	-10.01
10	15.00	1.00	0.114	2	3.72	3.76	-1.20
10	16.00	1.00	0.064	2	3.88	3.69	5.17
10	16.00	1.00	0.116	2	3.68	3.76	-2.15
36	16.08	2.65	0.056	12	3.34	3.33	0.17
22	16.38	2.67	0.165	12	3.34	3.49	-4.30
7	16.62	1.00	0.105	2	3.18	3.82	-16.55
13	17.57	0.26	0.021	2	4.39	4.07	7.84
1	17.67	1.00	0.099	4	3.76	3.92	-4.16
1	18.33	1.00	0.173	2	3.41	4.09	-16.49
35	18.75	10.67	0.089	5	3.48	3.05	14.03
13	18.77	0.44	0.009	2	3.23	4.09	-20.98
19	18.99	1.00	0.101	27	4.35	4.08	6.57
19	19.01	1.00	0.060	21	4.48	4.01	11.84
19	19.05	1.00	0.100	30	4.31	4.07	5.82
19	19.35	0.98	0.039	20	4.71	4.01	17.36
14	19.60	1.00	0.080	1	4.72	4.10	15.14
19	19.60	0.97	0.029	17	5.00	4.02	24.19
33	19.96	1.00	0.039	1	4.36	4.07	7.08
33	19.96	1.00	0.032	1	4.41	4.06	8.67
33	19.96	1.00	0.102	1	5.64	4.18	35.05
33	19.96	1.00	0.071	1	4.99	4.13	20.88
33	19.96	1.00	0.053	1	5.51	4.10	34.48
33	19.96	1.00	0.036	2	7.47	4.07	83.88

AUTOR	P/H	H/B	H/L	V	R MESS	R RECHN	DIFF O/O
33	19.96	1.00	0.088	1	4.04	4.16	-2.77
33	19.96	1.00	0.068	1	4.25	4.12	3.09
33	19.96	1.00	0.051	2	4.67	4.09	14.10
33	19.96	1.00	0.032	1	6.80	4.06	67.52
8	20.00	0.83	0.047	1	3.85	4.14	-6.92
24	20.00	4.00	0.402	9	3.33	3.74	-11.08
8	20.00	0.42	0.024	1	4.43	4.25	4.31
28	20.00	1.94	0.040	6	4.41	3.80	15.94
8	20.00	0.83	0.045	3	3.93	4.14	-4.95
33	20.02	1.00	0.083	1	4.16	4.15	0.17
33	20.02	1.00	0.064	1	4.42	4.12	7.24
33	20.02	1.00	0.055	1	4.40	4.11	7.13
33	20.02	1.00	0.200	1	5.01	4.30	16.39
33	20.02	1.00	0.136	1	4.72	4.23	11.55
33	20.02	1.00	0.113	1	4.98	4.20	18.58
33	20.02	1.00	0.081	1	4.85	4.15	16.87
33	20.02	1.00	0.068	1	4.70	4.13	13.83
33	20.02	1.00	0.149	1	5.39	4.25	26.90
33	20.02	1.00	0.113	1	5.11	4.20	21.70
33	20.02	1.00	0.090	1	5.07	4.16	21.75
33	20.02	1.00	0.068	1	4.83	4.13	16.96
33	20.02	1.00	0.148	1	4.69	4.25	10.45
33	20.02	1.00	0.111	1	4.73	4.20	12.72
33	20.02	1.00	0.090	1	4.79	4.17	15.01
33	20.02	1.00	0.074	1	4.72	4.14	14.06
33	20.02	1.00	0.066	1	4.80	4.13	16.34
20	20.45	0.80	0.080	15	4.71	4.26	10.67
25	21.00	1.00	0.162	4	4.53	4.37	3.47
24	22.20	2.00	0.201	9	4.15	4.22	-1.52
13	23.42	0.34	0.013	2	4.64	4.55	1.93
13	23.51	0.09	0.026	3	5.91	4.48	32.07
13	27.51	0.31	0.022	3	5.28	5.03	4.94
13	27.80	1.03	0.021	4	5.22	4.88	6.82
17	28.42	1.06	0.329	6	5.74	5.35	7.27
17	28.42	1.06	0.108	2	5.05	5.12	-1.24
17	28.42	1.06	0.219	6	5.96	5.27	13.08
17	28.42	1.06	0.337	5	5.77	5.35	7.90
17	28.42	1.06	0.234	1	6.79	5.29	28.32
17	28.42	1.06	0.110	6	5.04	5.12	-1.50
17	28.42	1.06	0.317	1	5.68	5.34	6.31
17	28.42	1.06	0.117	3	5.33	5.13	3.85
17	28.42	1.06	0.111	3	5.02	5.12	-2.05
17	28.42	1.06	0.328	6	5.76	5.35	7.71
17	28.42	1.06	0.221	1	5.71	5.28	8.26
17	28.42	1.06	0.331	7	5.87	5.35	9.76
17	28.42	1.06	0.216	4	6.24	5.27	18.47
17	28.42	1.06	0.344	2	6.10	5.35	14.03
17	28.42	1.06	0.212	4	5.94	5.26	12.77
17	28.42	1.06	0.314	2	5.54	5.34	3.74
17	28.42	1.06	0.115	3	5.26	5.13	2.67
17	28.42	1.06	0.211	2	5.70	5.26	8.23

AUTOR	P/H	H/B	H/L	N	R MESS	R RECHN	DIFF O/O
17	28.42	1.06	0.112	1	4.92	5.12	-4.01
17	28.42	1.06	0.215	1	6.02	5.27	14.17
17	28.42	1.06	0.119	1	5.20	5.13	1.21
17	28.42	1.06	0.220	1	6.19	5.27	17.31
17	28.42	1.06	0.120	1	5.57	5.14	8.41
19	29.50	0.99	0.140	29	4.72	5.26	-10.32
36	29.67	2.70	0.060	13	4.97	4.53	9.90
8	30.00	0.83	0.048	3	5.34	5.20	2.71
19	31.90	0.60	0.060	23	6.49	5.53	17.45
14	32.70	10.00	0.400	3	3.64	4.15	-12.38
24	33.30	4.00	0.401	13	3.84	4.76	-19.46
1	34.33	1.00	0.101	2	4.78	5.65	-15.35
1	34.67	1.00	0.181	2	4.89	5.82	-15.87
19	36.99	1.00	0.100	30	5.56	5.94	-6.31
33	39.91	1.00	0.064	2	5.76	6.03	-4.47
33	39.91	1.00	0.053	1	6.19	6.01	3.05
33	39.91	1.00	0.228	1	5.16	6.34	-18.56
33	39.91	1.00	0.156	1	5.89	6.23	-5.46
33	39.91	1.00	0.124	1	6.17	6.17	-0.00
33	39.91	1.00	0.088	1	6.15	6.09	0.97
33	39.91	1.00	0.075	1	6.10	6.06	0.63
33	39.91	1.00	0.062	1	6.29	6.03	4.35
33	39.91	1.00	0.194	1	5.53	6.29	-12.10
33	39.91	1.00	0.169	1	5.66	6.25	-9.47
33	39.91	1.00	0.139	1	5.52	6.20	-10.96
33	39.91	1.00	0.114	2	5.42	6.15	-11.84
33	39.91	1.00	0.082	2	5.48	6.08	-9.74
33	39.91	1.00	0.066	2	5.97	6.04	-1.06
33	39.91	1.00	0.122	1	5.95	6.17	-3.50
33	39.91	1.00	0.088	1	5.45	6.09	-10.55
33	39.91	1.00	0.073	1	5.23	6.06	-13.63
24	40.00	2.00	0.200	1	5.12	5.70	-10.10
8	40.00	0.42	0.025	1	5.98	6.37	-6.07
24	40.00	2.00	0.200	11	5.16	5.70	-9.42
33	40.02	1.00	0.054	1	6.51	6.02	8.22
33	40.02	1.00	0.042	1	6.41	5.99	7.08
33	40.02	1.00	0.033	2	6.26	5.96	5.12
33	40.02	1.00	0.028	1	6.37	5.95	7.11
33	40.02	1.00	0.094	1	5.99	6.11	-2.03
33	40.02	1.00	0.069	1	6.28	6.06	3.72
28	40.14	1.94	0.040	4	6.40	5.43	17.81
25	41.00	1.00	0.176	3	6.29	6.35	-1.02
36	47.25	1.70	0.043	12	6.55	5.99	9.33
18	60.00	0.05	0.017	9	9.46	9.57	-1.20
18	60.00	0.03	0.017	6	10.30	10.01	2.93
18	60.00	0.05	0.017	2	9.45	9.57	-1.30
18	60.00	0.03	0.017	1	10.15	10.01	1.37
18	60.00	0.05	0.017	1	8.93	9.57	-6.67
18	60.00	0.03	0.017	4	10.45	10.01	4.45
36	61.46	1.05	0.022	1	8.80	7.27	21.03
37	61.46	1.05	0.028	1	7.05	7.29	-3.32

AUTOR	P/H	H/B	H/L	N	R MESS	R RECHN	DIFF 0/0
37	61.46	1.05	0.061	1	7.60	7.40	2.71
37	61.46	1.05	0.133	1	8.20	7.60	7.93
19	64.02	0.30	0.030	13	10.67	8.61	23.90
14	65.00	5.00	0.200	2	5.77	6.04	-4.38
24	66.60	2.00	0.200	10	6.28	7.14	-12.08
1	67.67	1.00	0.109	2	6.89	7.85	-12.22
1	68.00	1.00	0.195	2	7.15	8.06	-11.40
14	78.40	1.00	0.080	1	8.15	8.22	-0.78
33	79.94	1.00	0.030	1	8.48	8.10	4.67
33	79.94	1.00	0.083	1	8.31	8.29	0.29
33	79.94	1.00	0.066	1	7.97	8.23	-3.17
33	79.94	1.00	0.032	1	7.17	8.11	-11.59
33	79.94	1.00	0.052	1	7.62	8.18	-6.86
33	79.94	1.00	0.039	1	7.25	8.13	-10.88
33	80.03	1.00	0.081	1	8.41	8.28	1.52
33	80.03	1.00	0.090	1	7.81	8.31	-6.05
33	80.03	1.00	0.061	2	8.11	8.22	-1.29
33	80.03	1.00	0.067	2	7.53	8.24	-8.58
33	80.03	1.00	0.137	1	7.12	8.45	-15.72
33	80.03	1.00	0.108	1	7.86	8.37	-6.06
33	80.03	1.00	0.139	1	7.39	8.45	-12.57
33	80.03	1.00	0.125	1	7.79	8.41	-7.42
33	80.03	1.00	0.095	1	7.27	8.33	-12.71
33	80.03	1.00	0.055	1	7.97	8.19	-2.74
33	80.03	1.00	0.078	2	7.51	8.27	-9.18
14	98.00	10.00	0.400	3	5.27	6.36	-17.16
14	156.80	1.00	0.080	1	10.64	9.90	7.53
33	159.98	1.00	0.035	1	9.43	9.74	-3.18
33	159.98	1.00	0.073	1	10.75	9.90	8.56
33	159.98	1.00	0.087	1	9.81	9.95	-1.45
33	159.98	1.00	0.032	1	10.49	9.73	7.84
33	159.98	1.00	0.044	1	9.50	9.78	-2.85
33	159.98	1.00	0.054	1	9.89	9.82	0.69
14	196.00	5.00	0.200	2	8.99	8.59	4.64

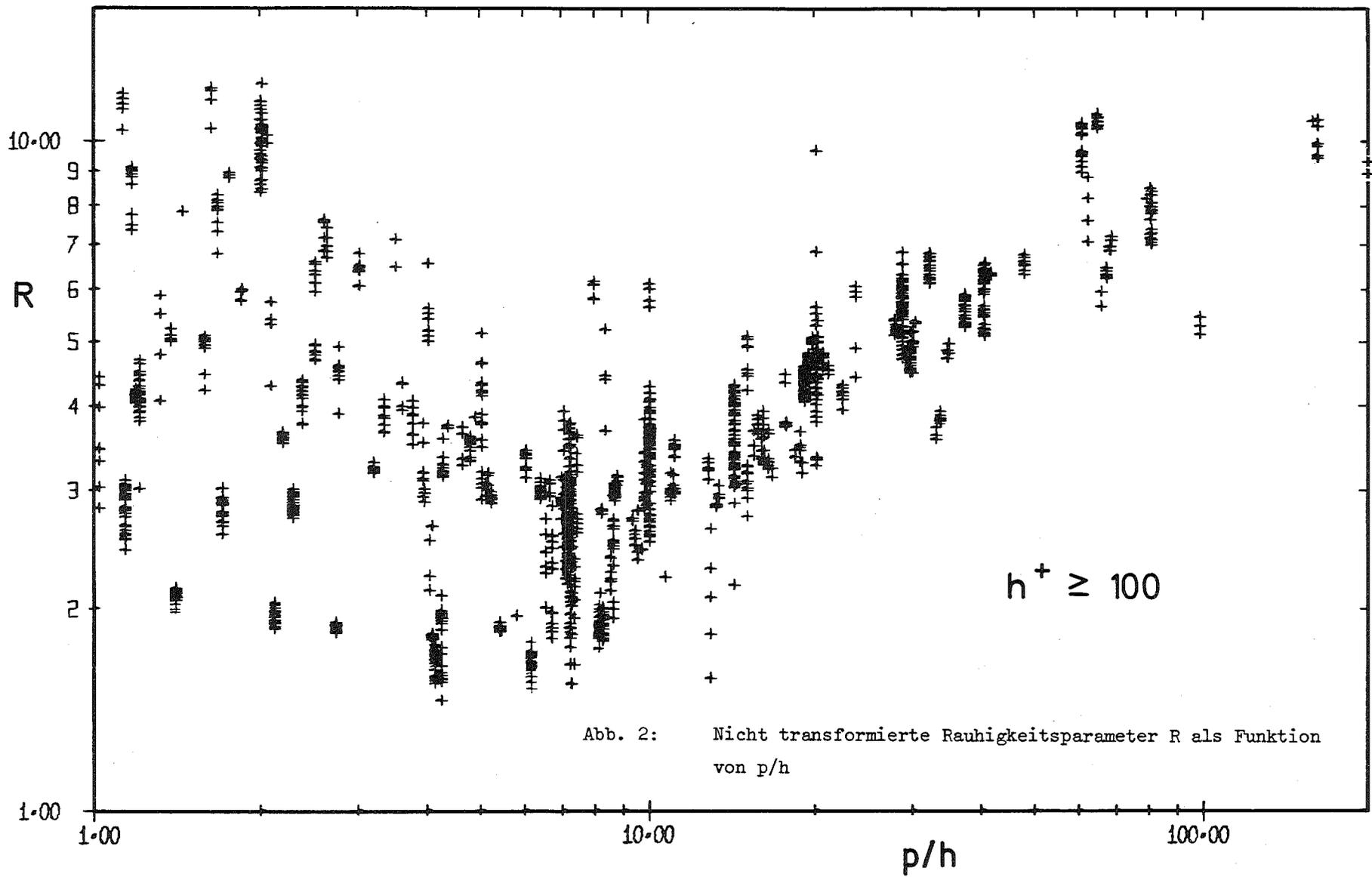


Abb. 2: Nicht transformierte Rauigkeitsparameter R als Funktion von p/h

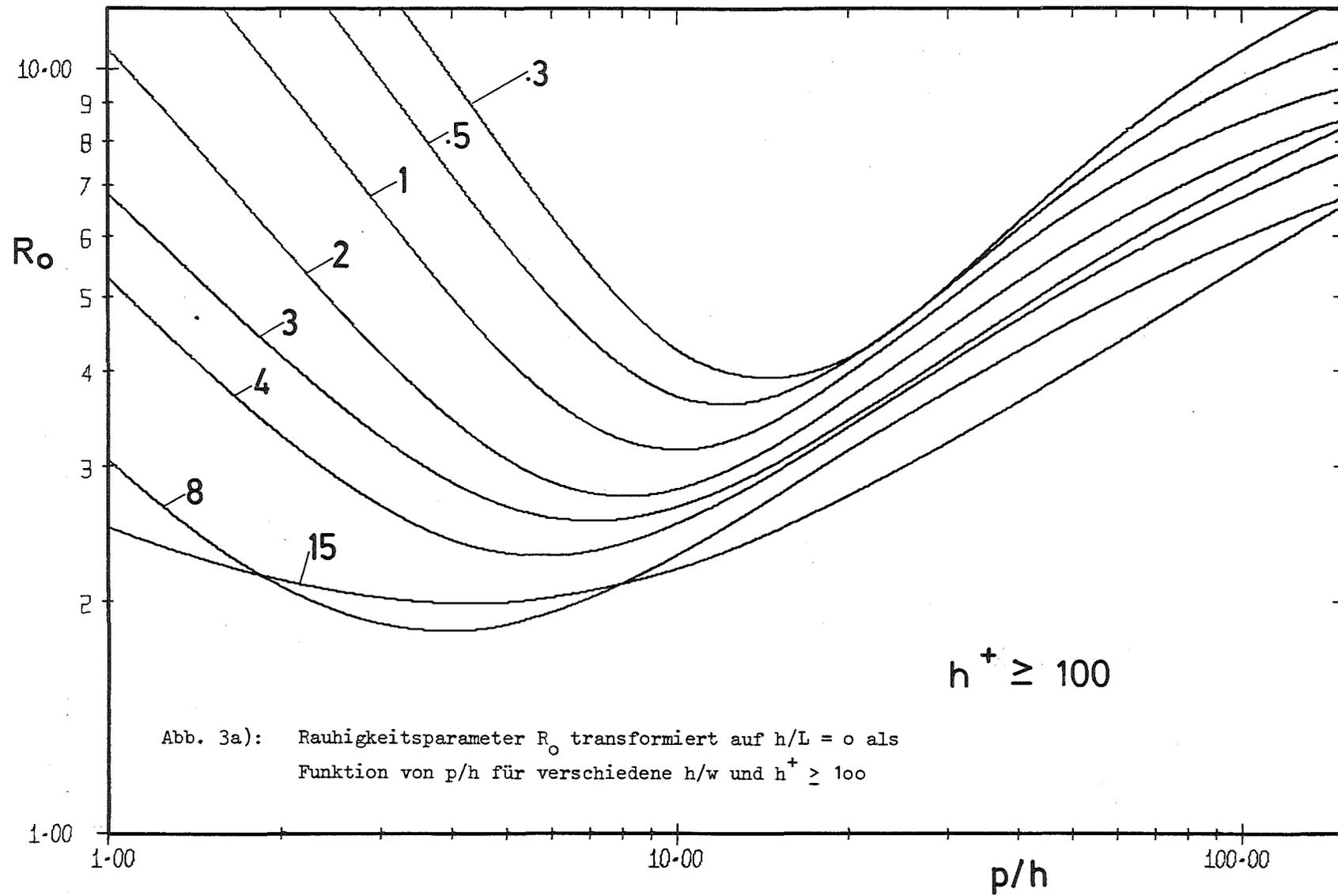
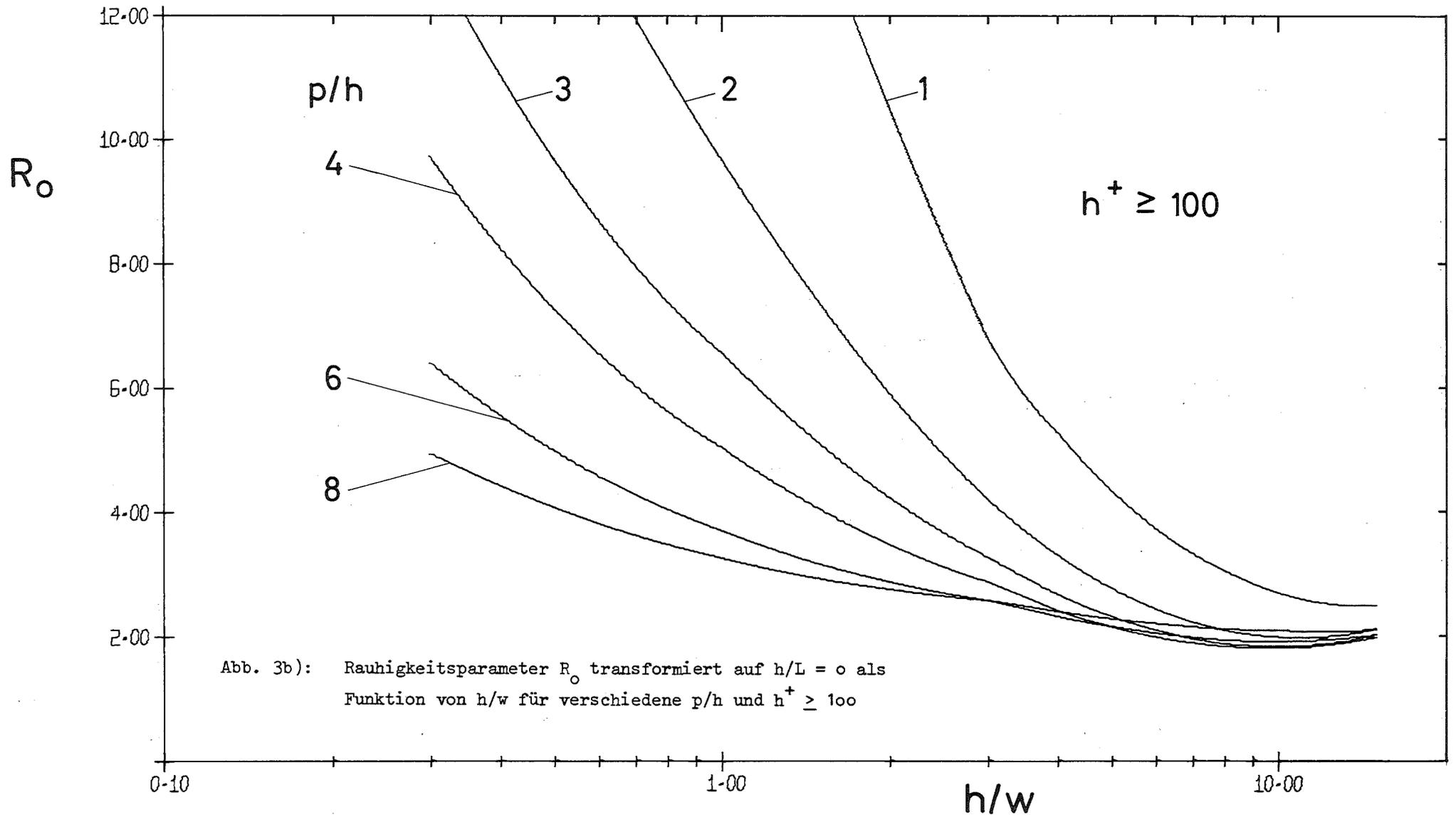
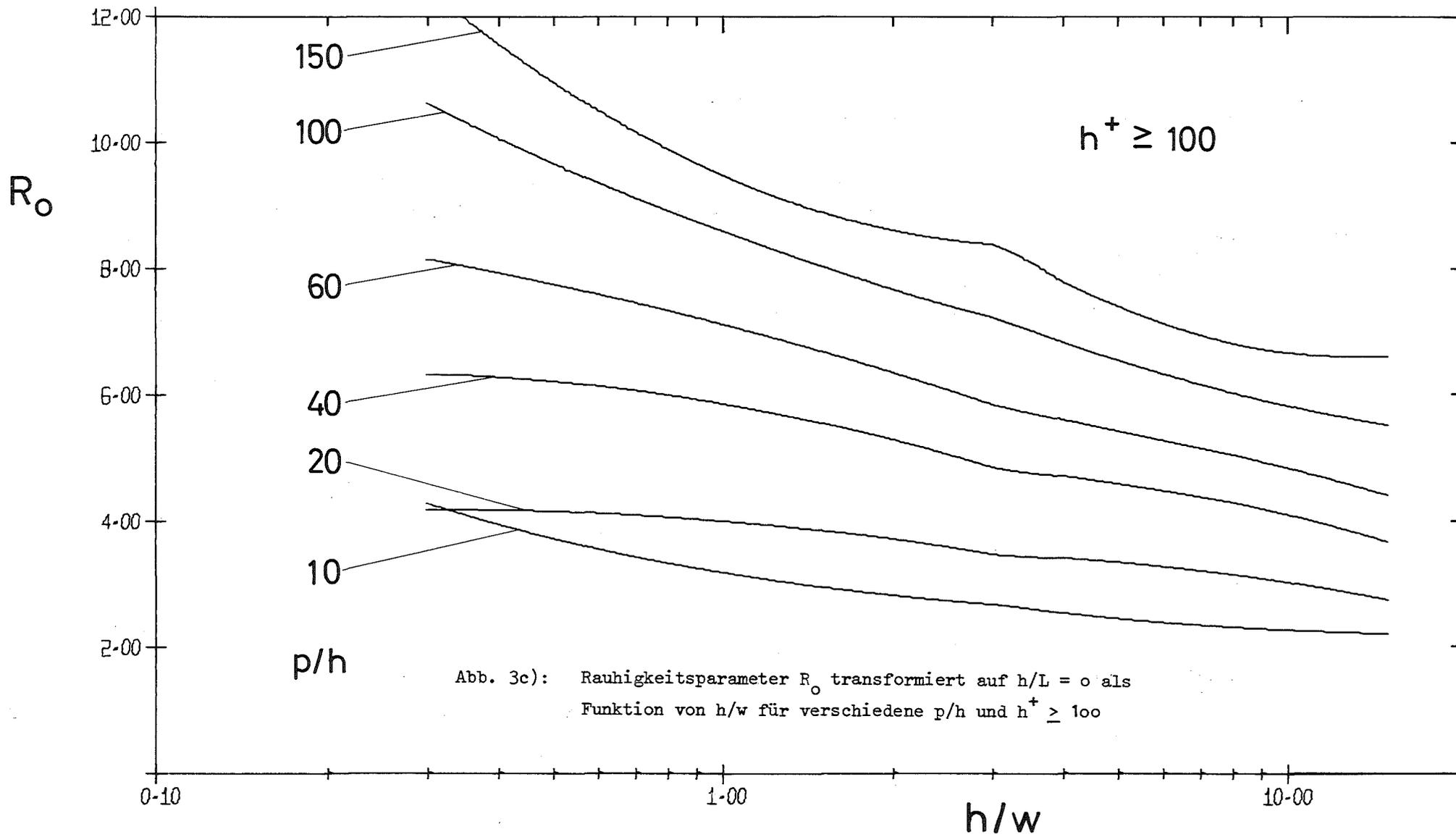


Abb. 3a): Rauigkeitsparameter R_0 transformiert auf $h/L = 0$ als
 Funktion von p/h für verschiedene h/w und $h^+ \geq 100$





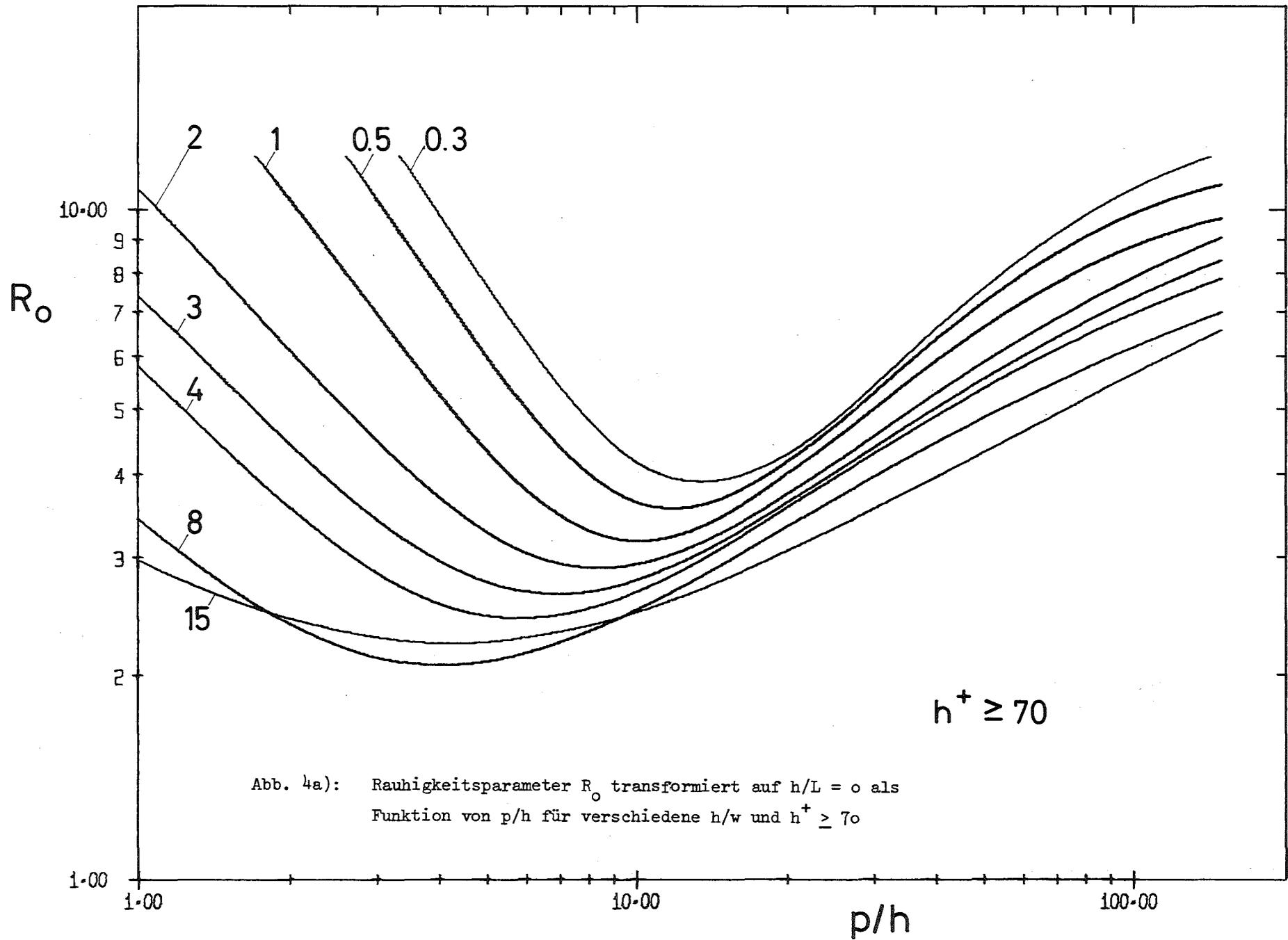


Abb. 4a): Rauheitsparameter R_0 transformiert auf $h/L = 0$ als Funktion von p/h für verschiedene h/w und $h^+ \geq 70$

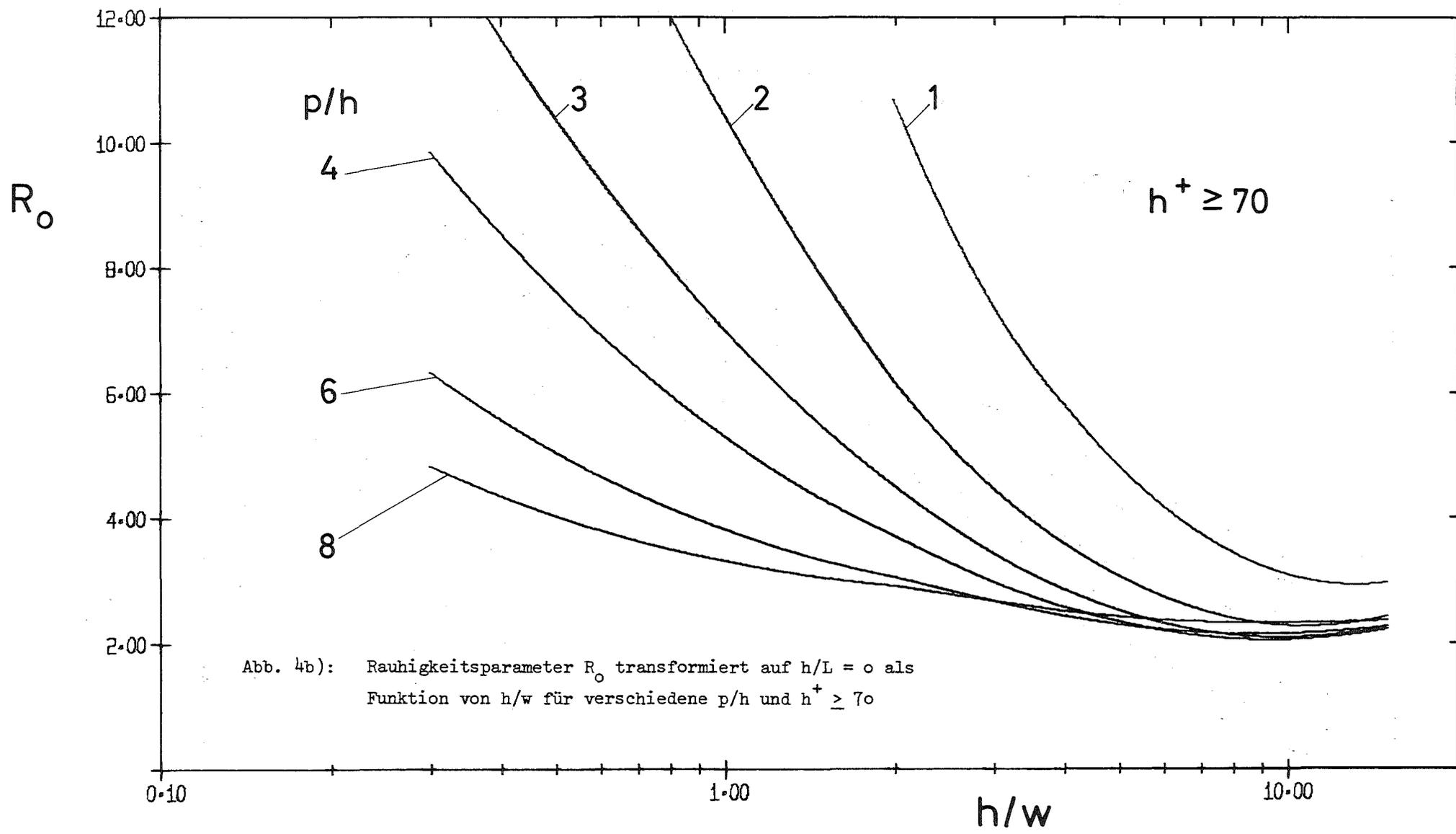


Abb. 4b): Rauigkeitsparameter R_o transformiert auf $h/L = 0$ als Funktion von h/w für verschiedene p/h und $h^+ \geq 70$

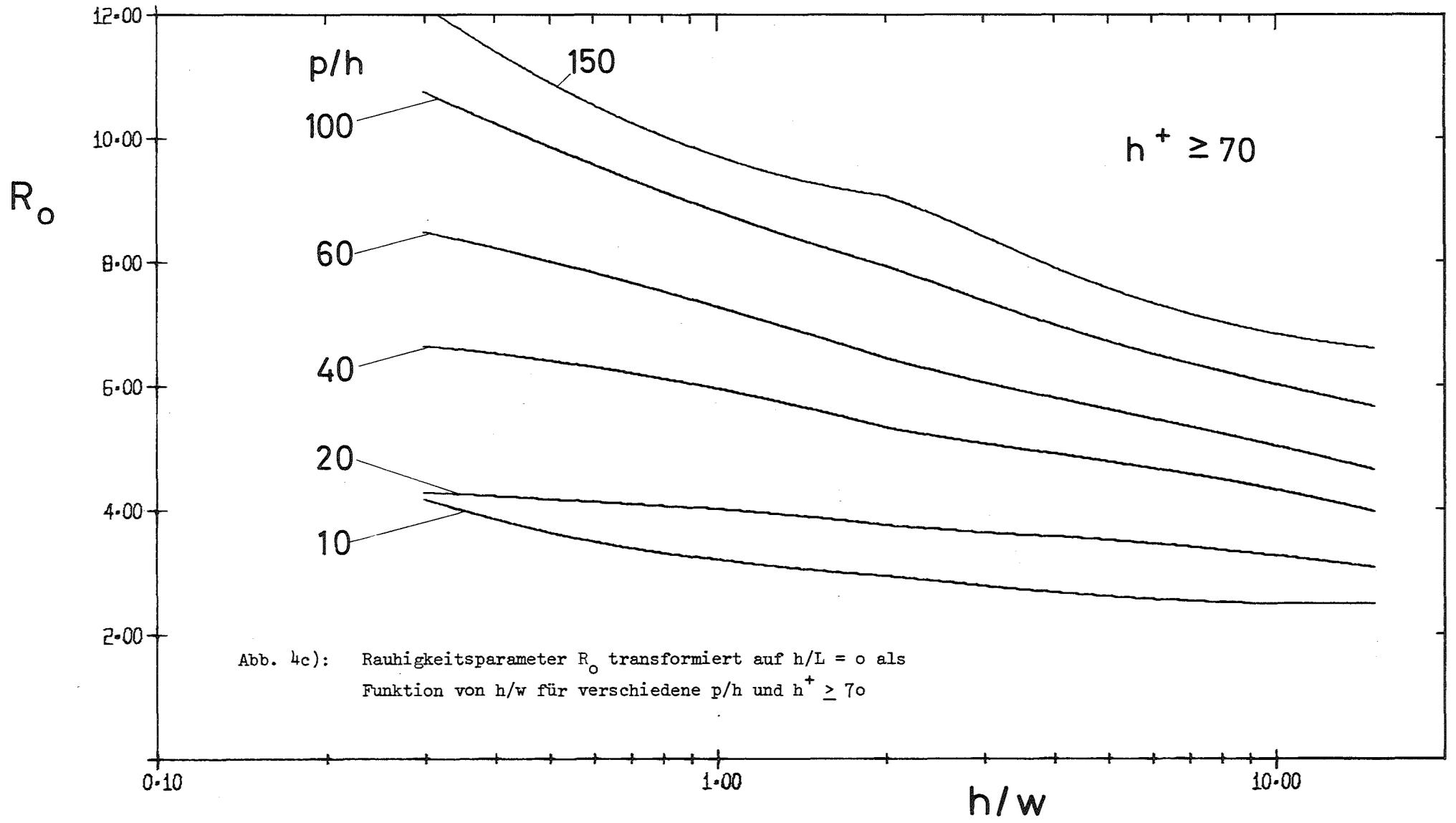


Abb. 4c): Rauheitsparameter R_o transformiert auf $h/L = 0$ als Funktion von h/w für verschiedene p/h und $h^+ \geq 70$

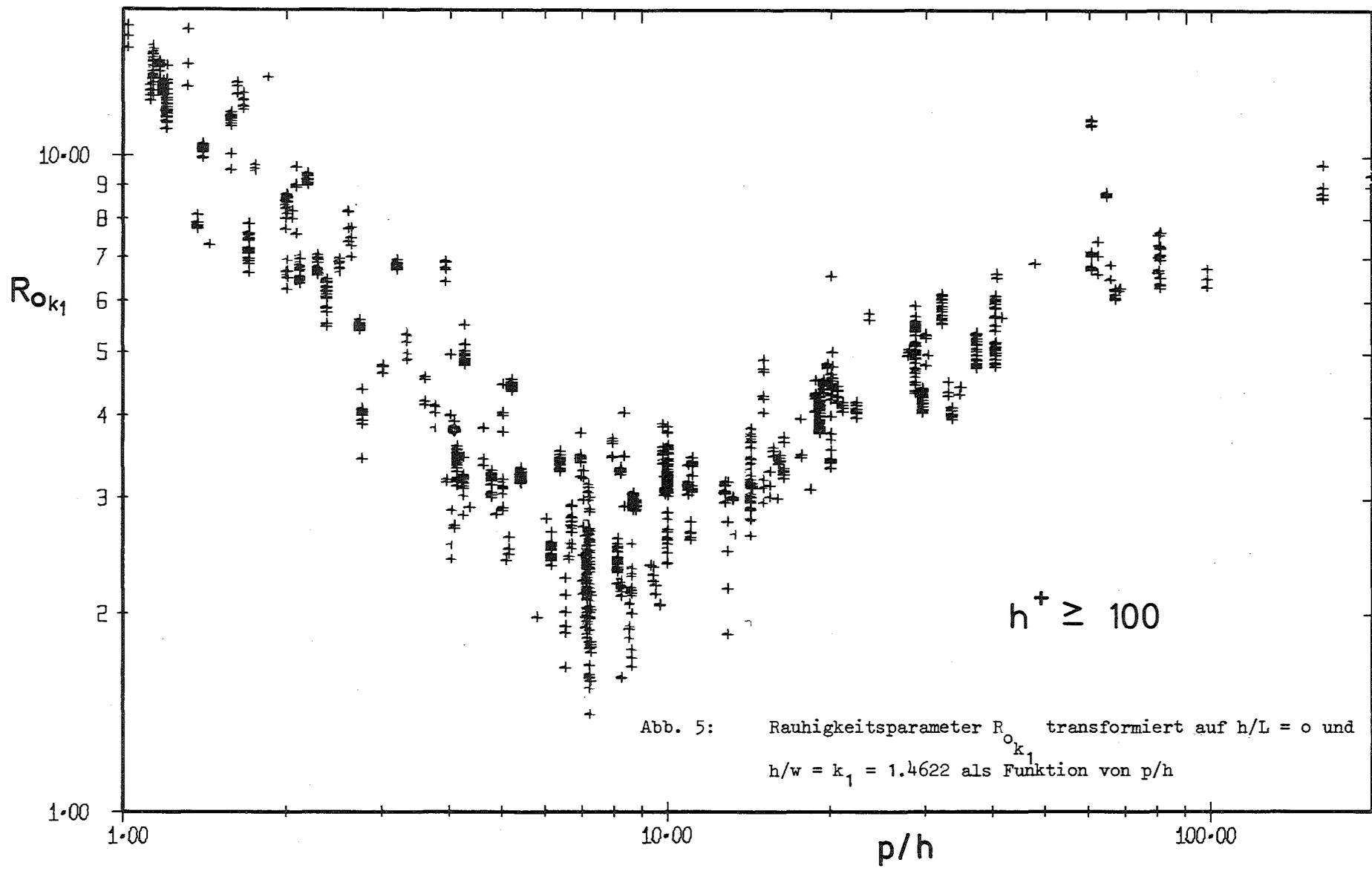
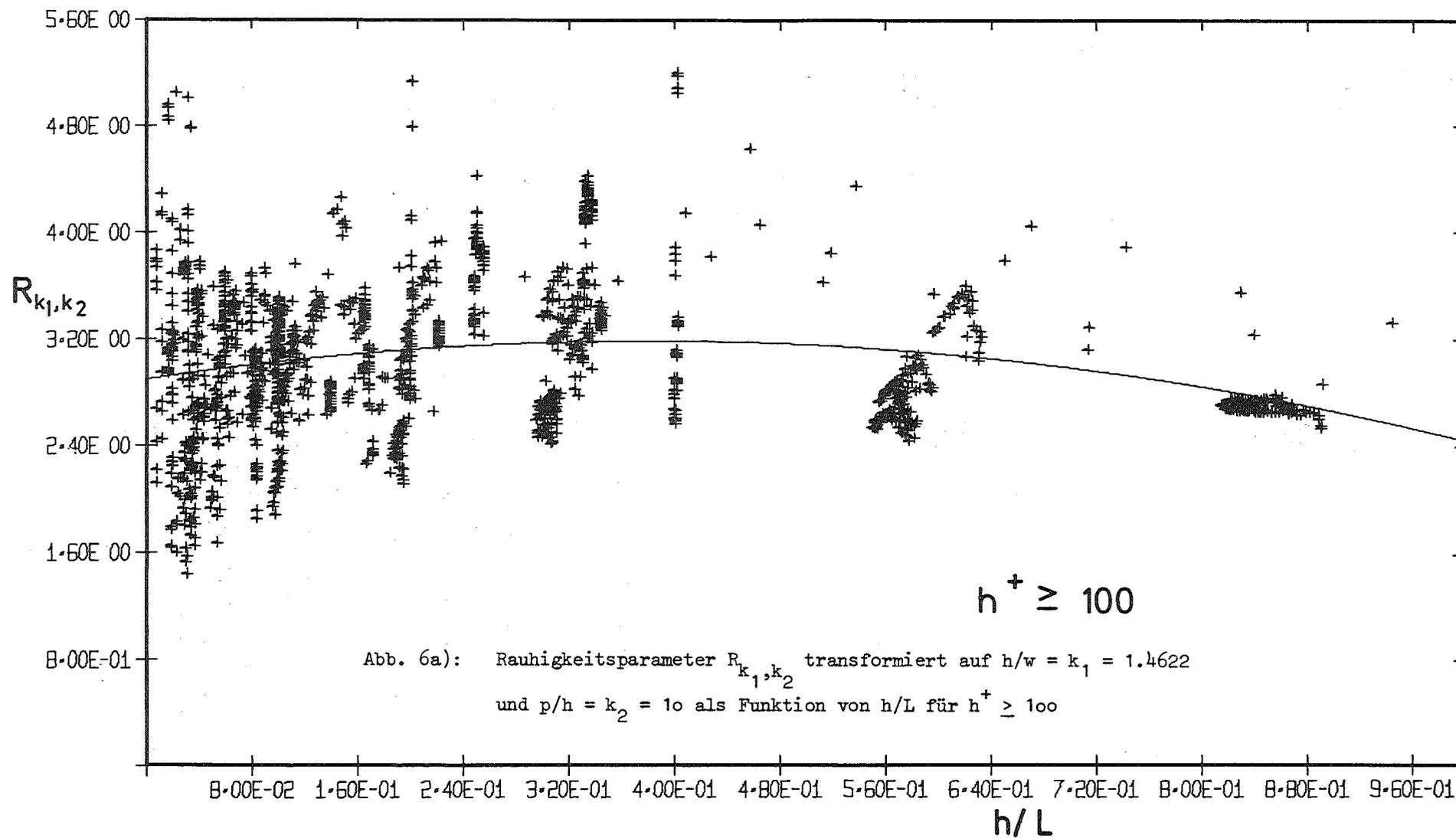
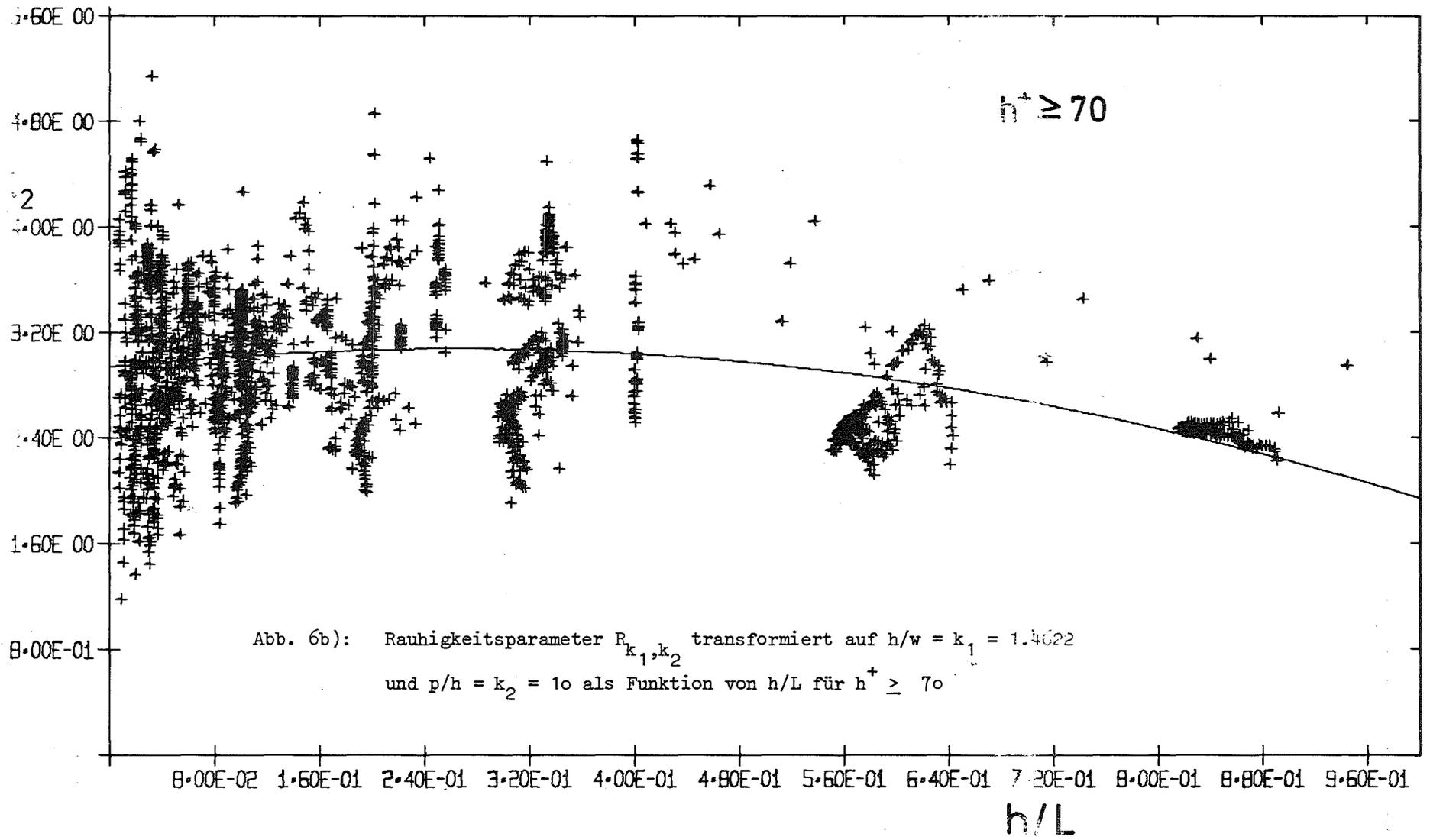
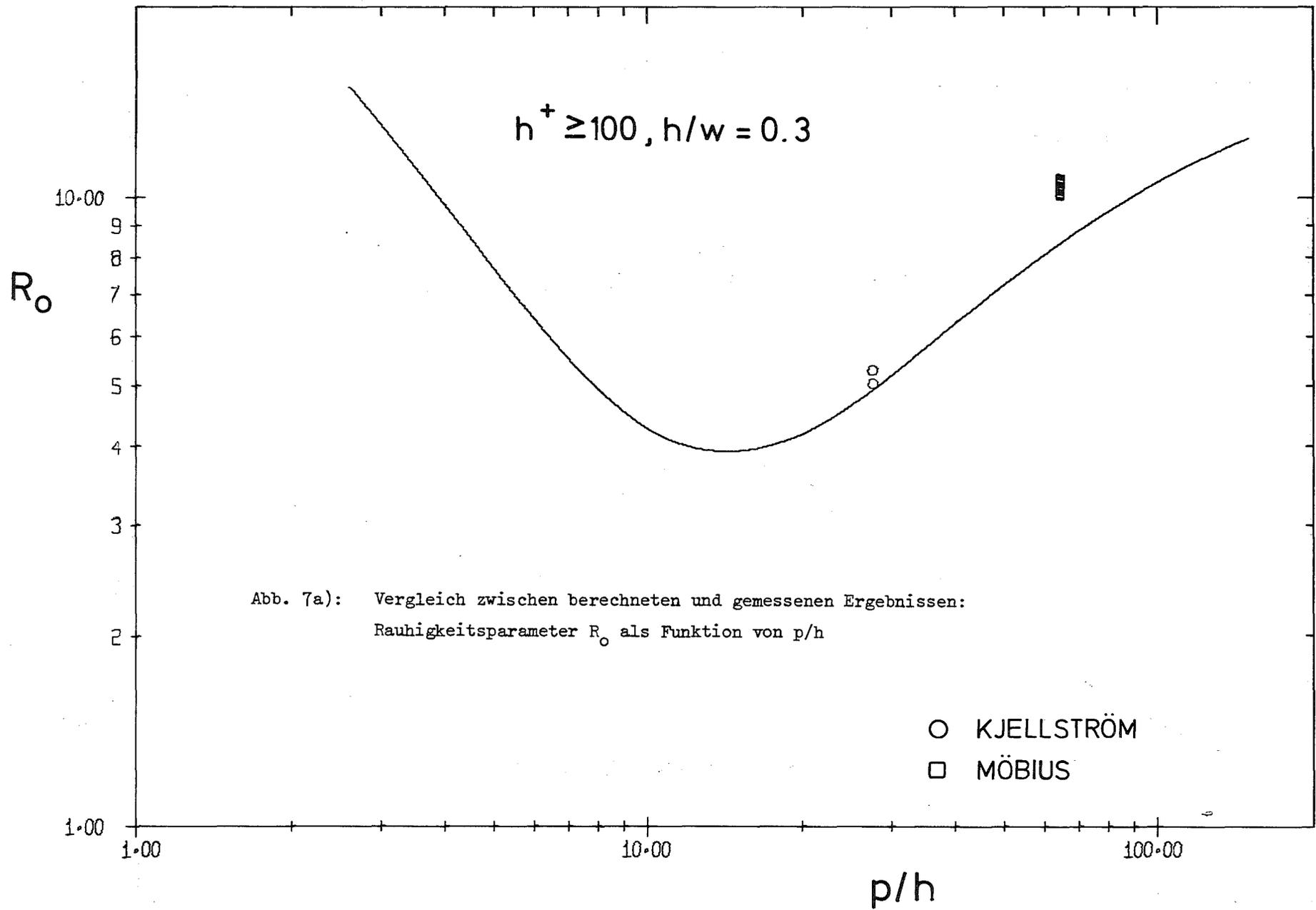


Abb. 5: Rauigkeitsparameter R_{0k_1} transformiert auf $h/L = 0$ und $h/w = k_1 = 1.4622$ als Funktion von p/h







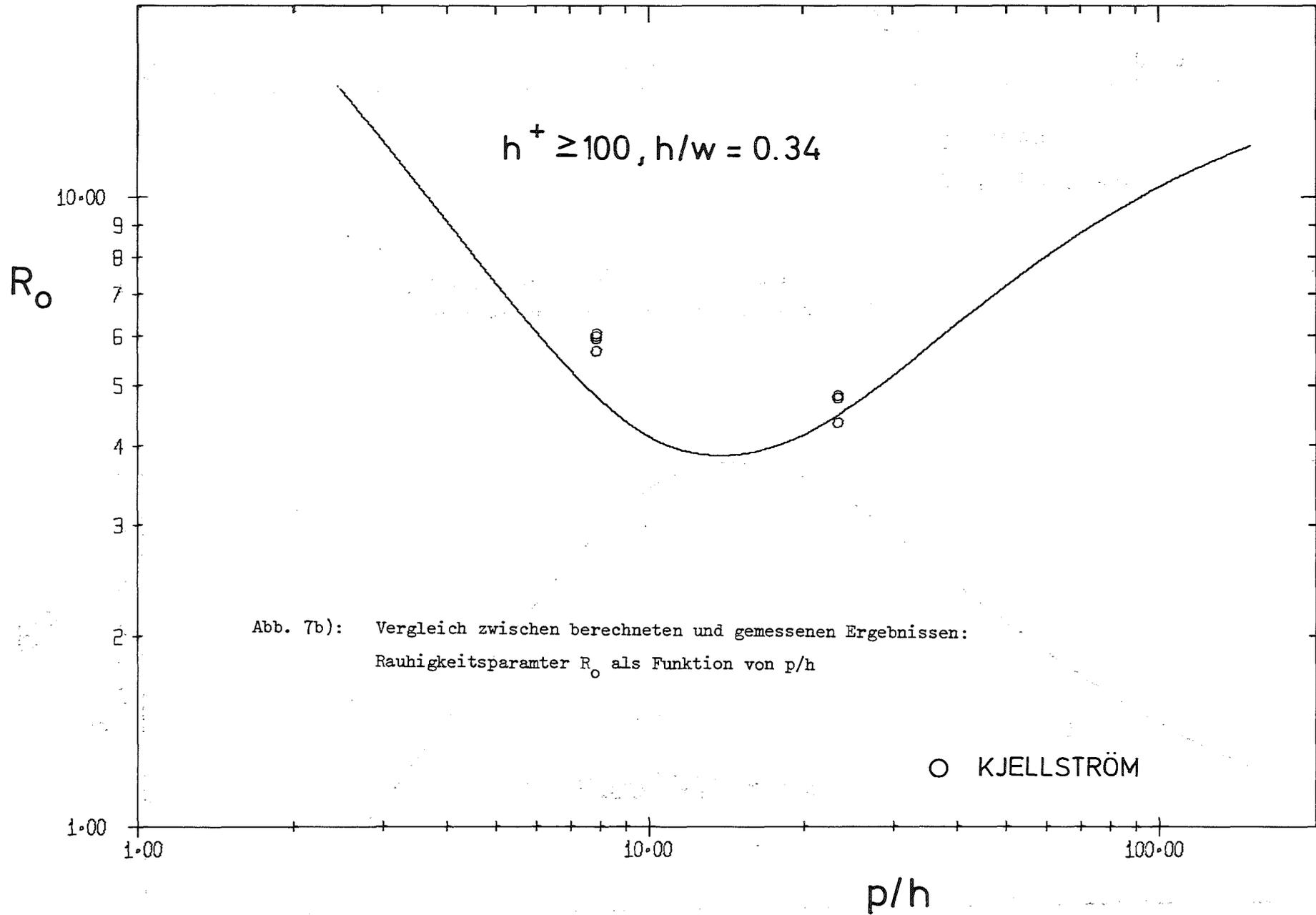
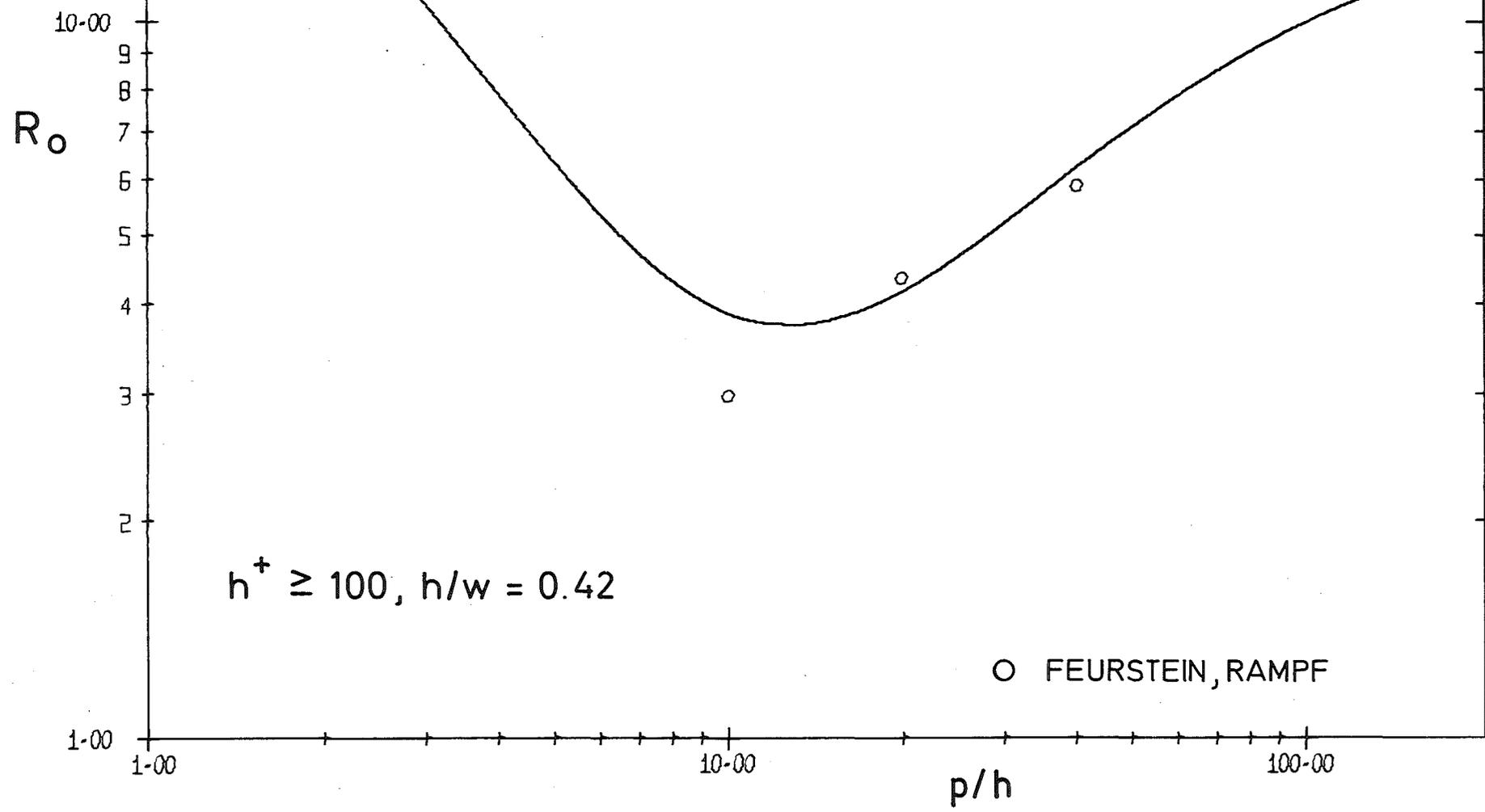


Abb. 7c): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h



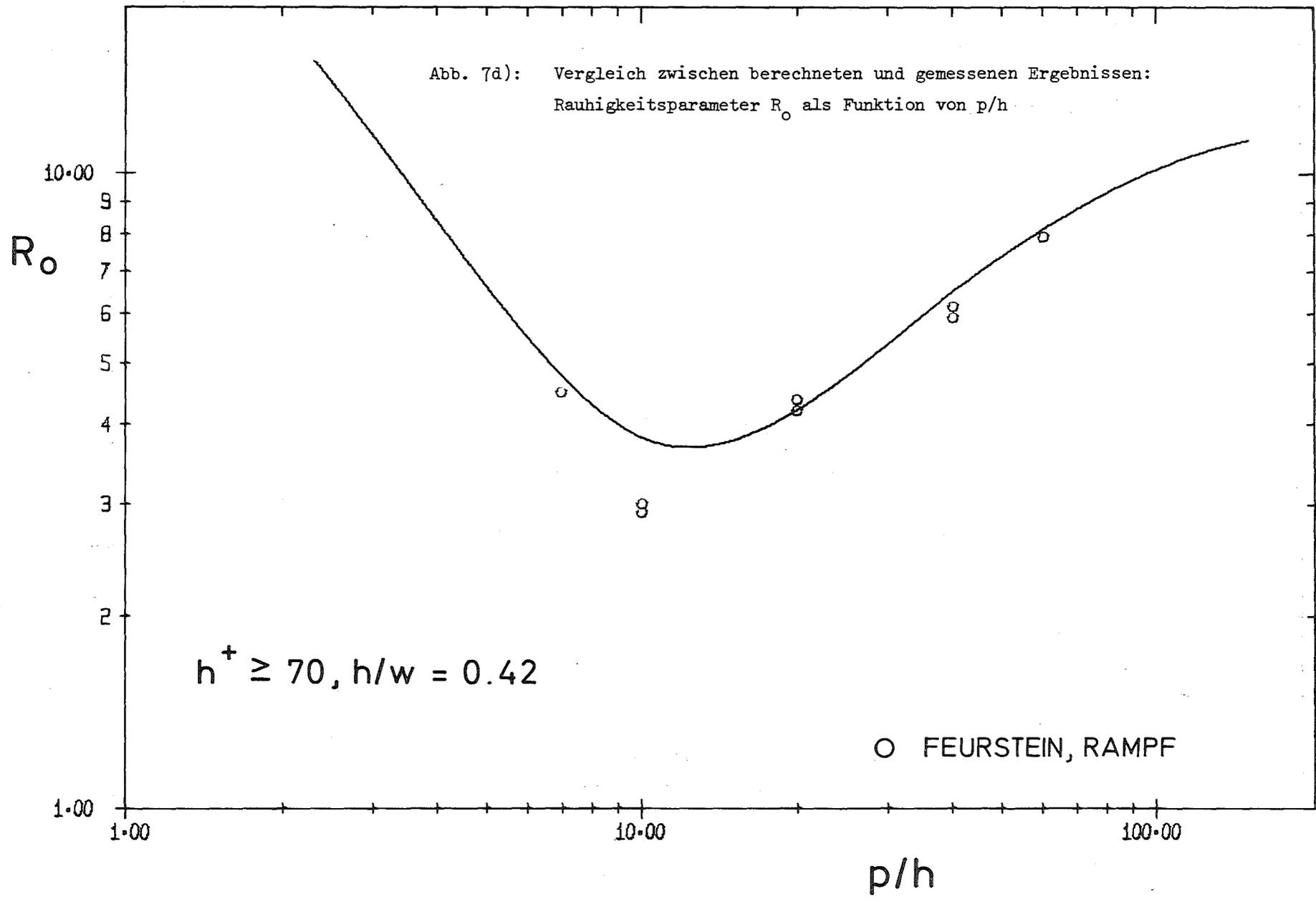


Abb. 7e): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauhigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

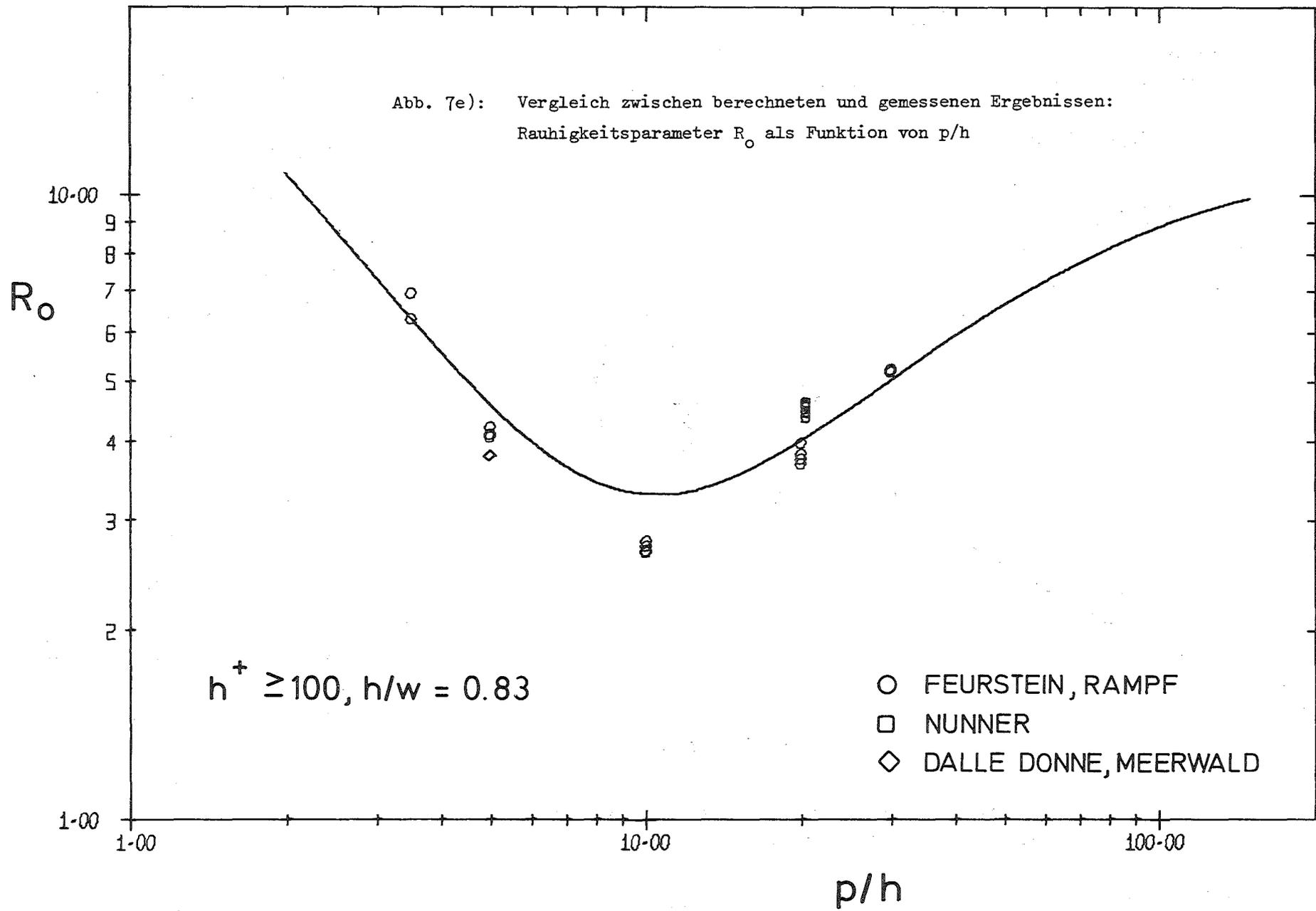


Abb. 7f): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
 Rauigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

$$h^+ \geq 100, h/w = 1.0$$

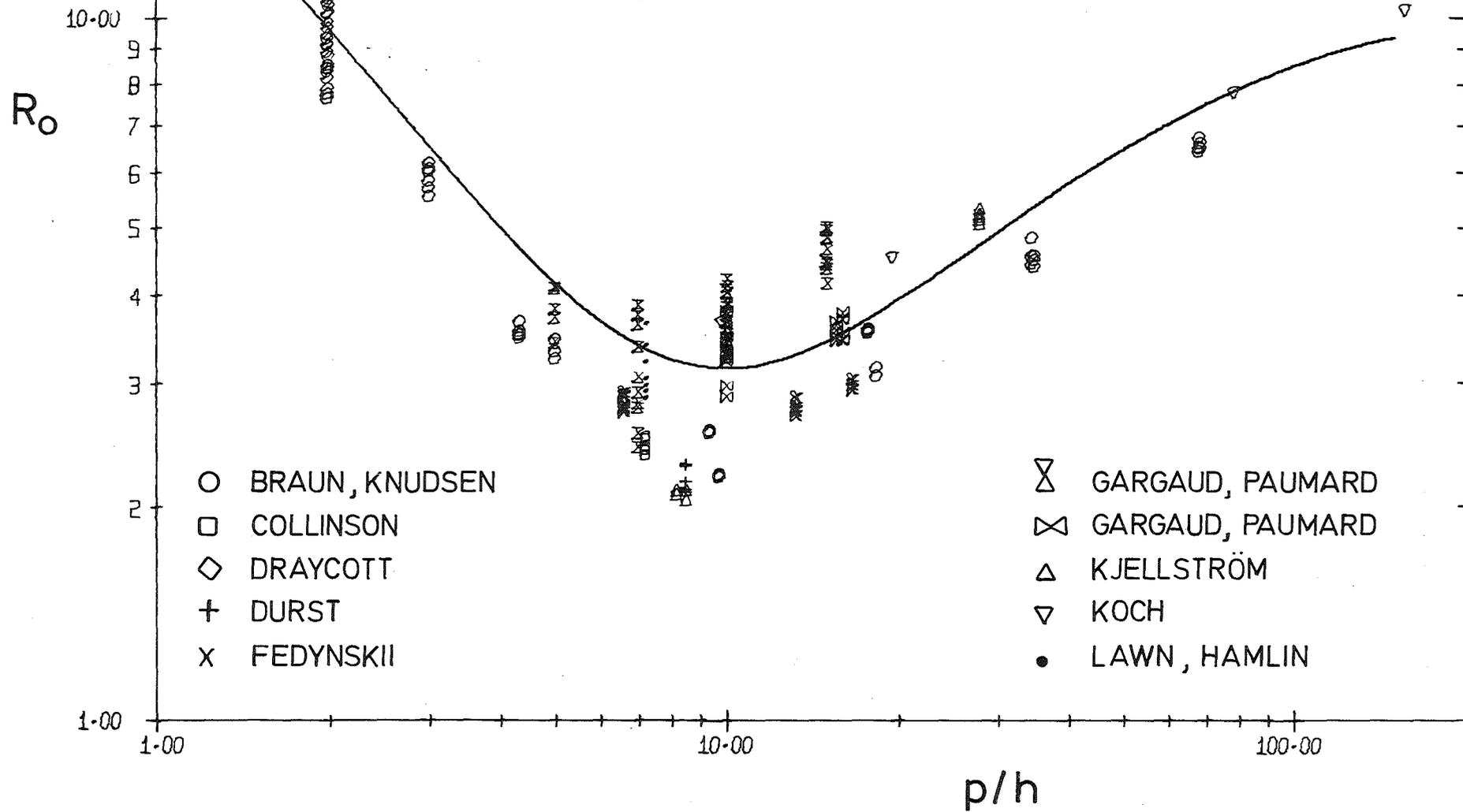
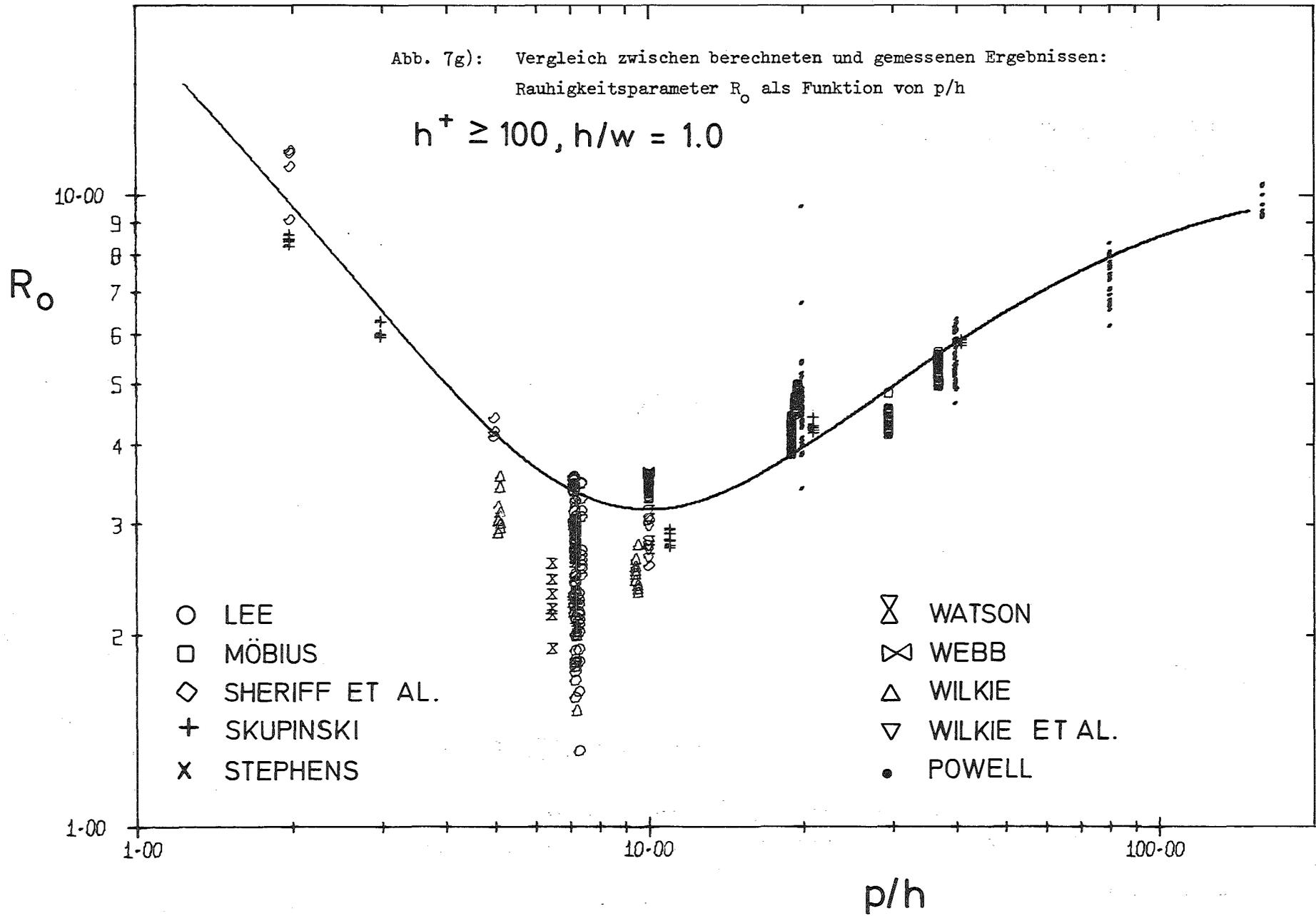


Abb. 7g): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
 Rauigkeitsparameter R_0 als Funktion von p/h

$$h^+ \geq 100, h/w = 1.0$$



- LEE
- MÖBIUS
- ◇ SHERIFF ET AL.
- + SKUPINSKI
- x STEPHENS

- △ WATSON
- △ WEBB
- △ WILKIE
- ▽ WILKIE ET AL.
- POWELL

Abb. 7h): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

$$h^+ \geq 100, h/w = 1.0$$

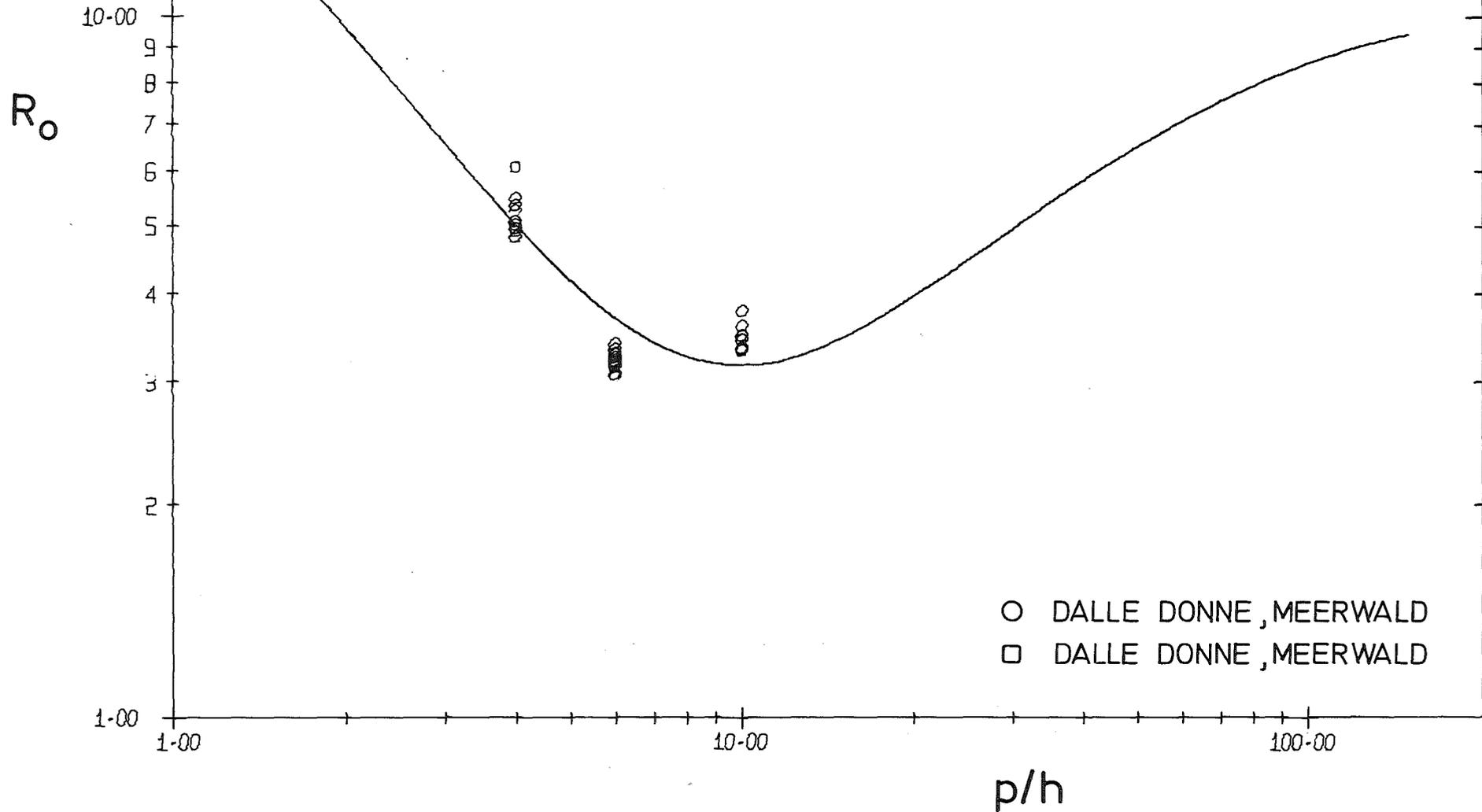
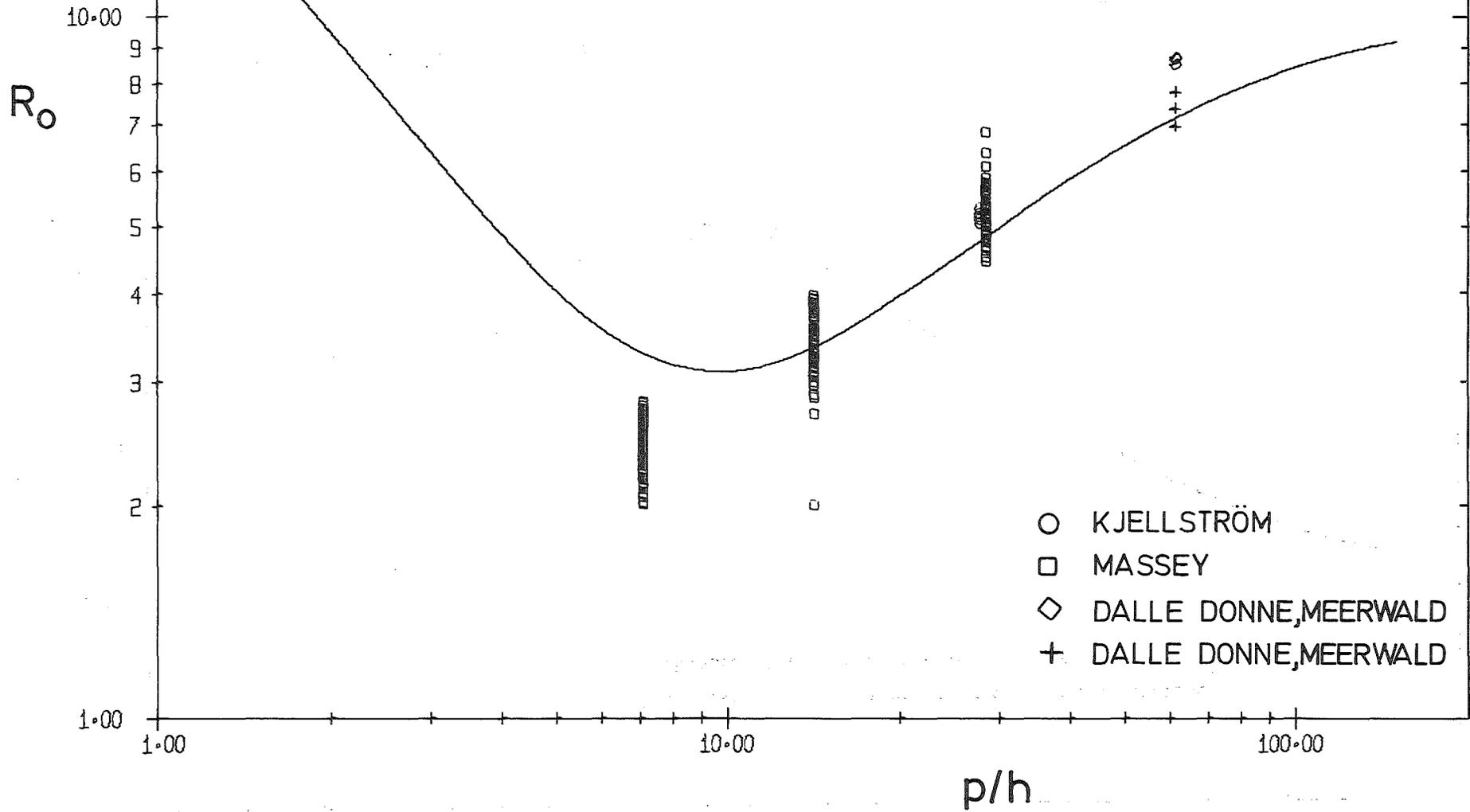


Abb. 7i): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

$$h^+ \geq 100, h/w = 1.06$$



- KJELLSTRÖM
- MASSEY
- ◇ DALLE DONNE, MEERWALD
- + DALLE DONNE, MEERWALD

Abb. 7j): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauhigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

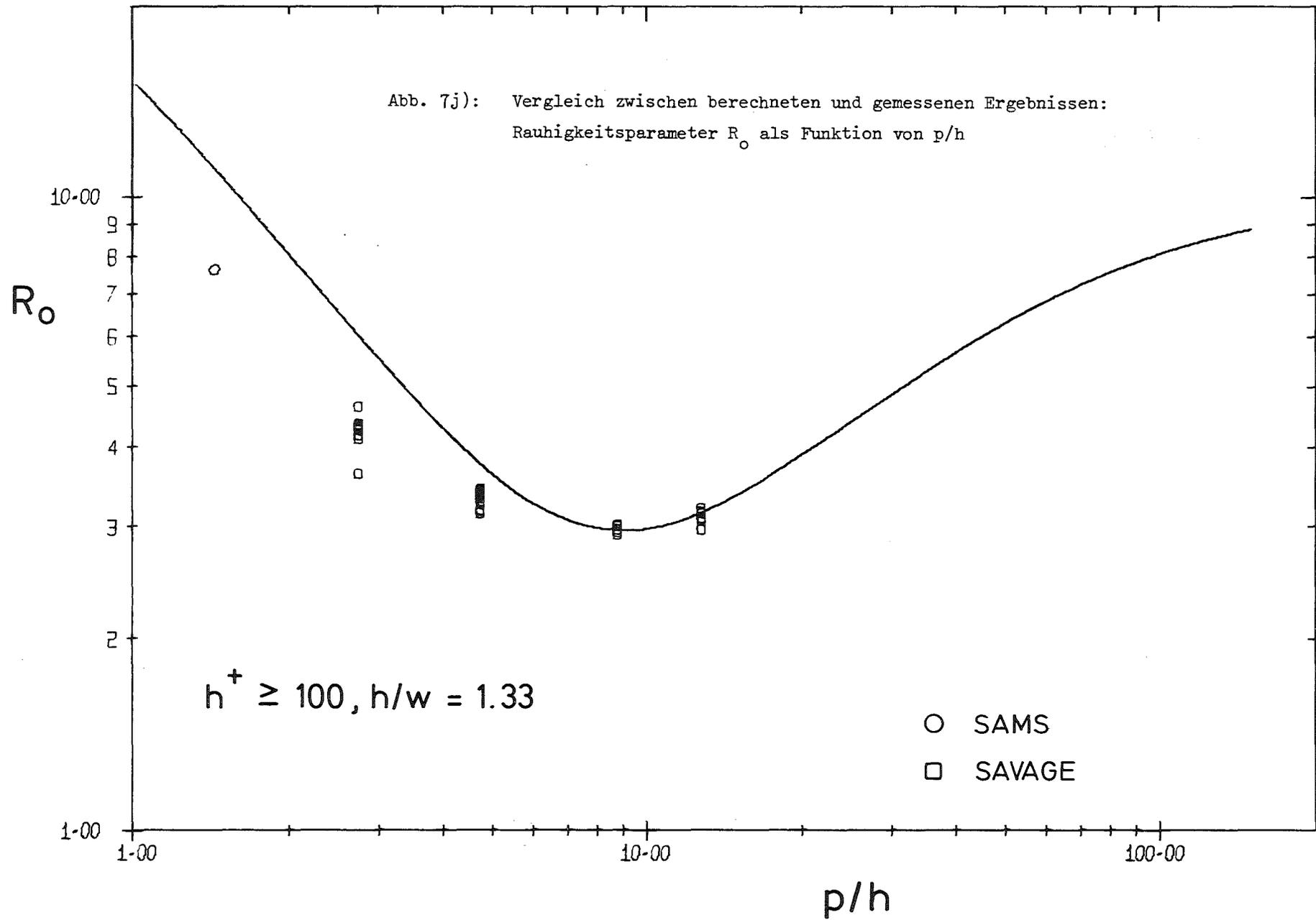


Abb. 7k): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauhigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

$$h^+ \geq 100, h/w = 1.68$$

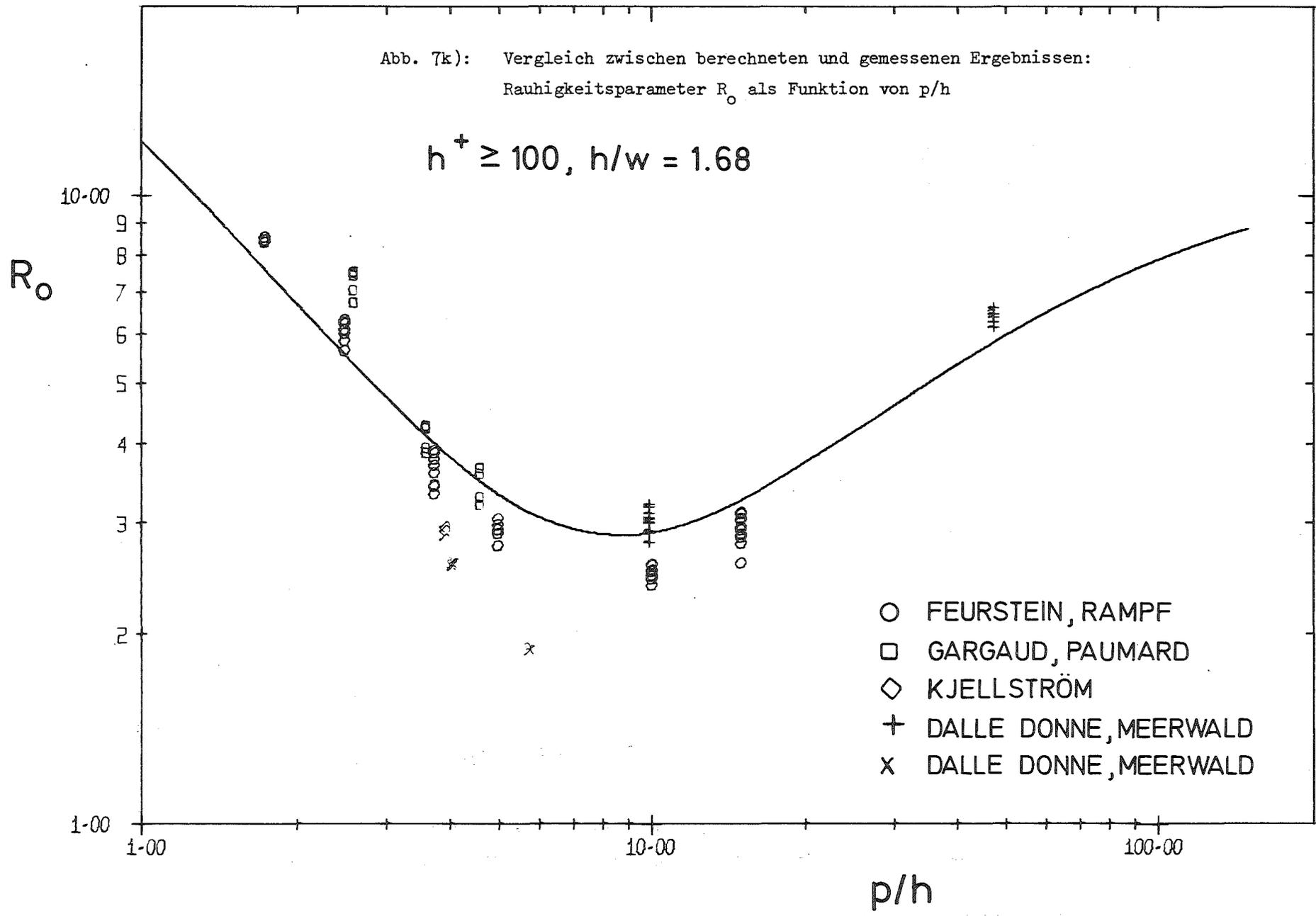
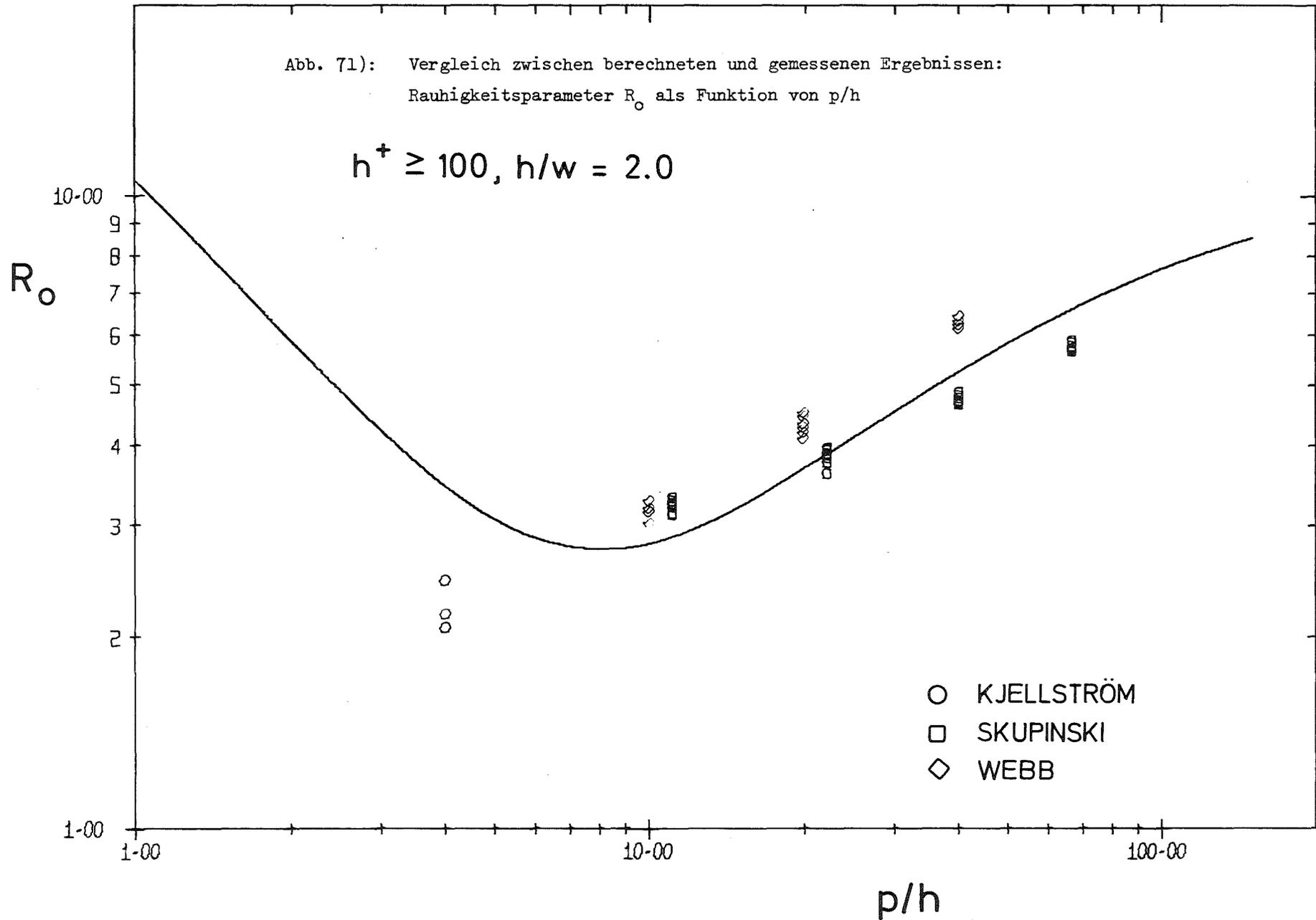
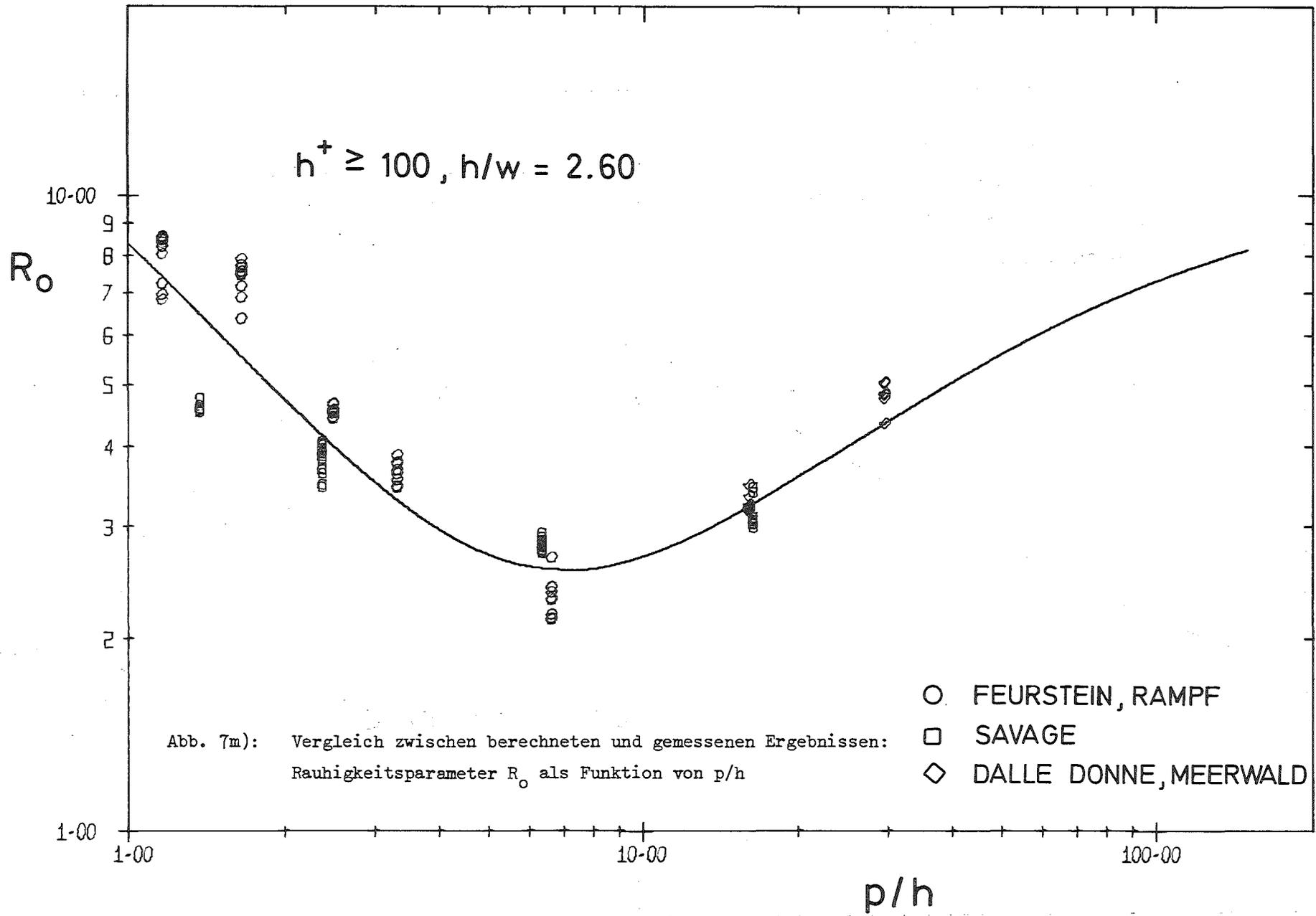


Abb. 71): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

$$h^+ \geq 100, h/w = 2.0$$





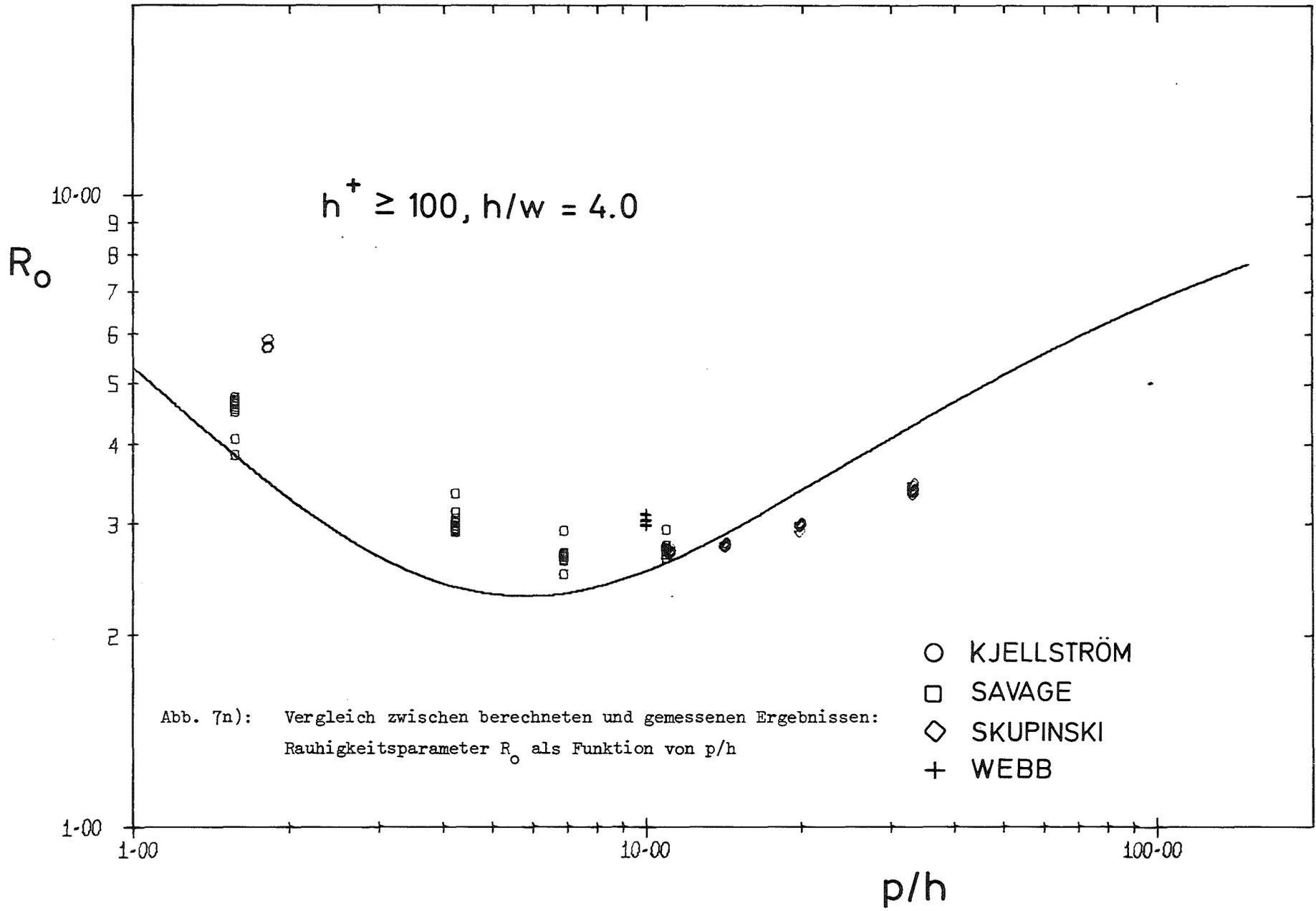


Abb. 70): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

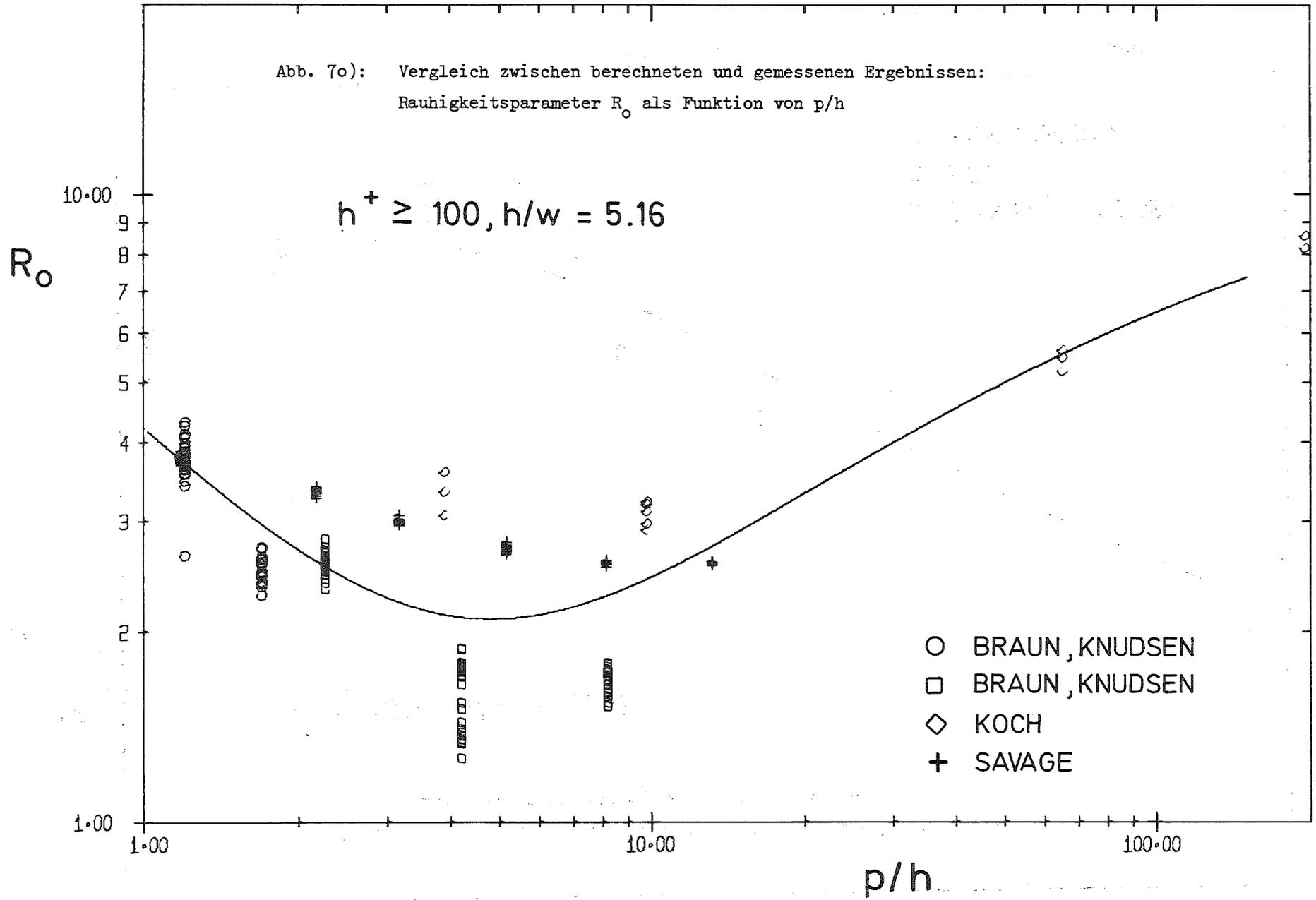


Abb. 7p): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

$$h^+ \geq 100, h/w = 10.33$$

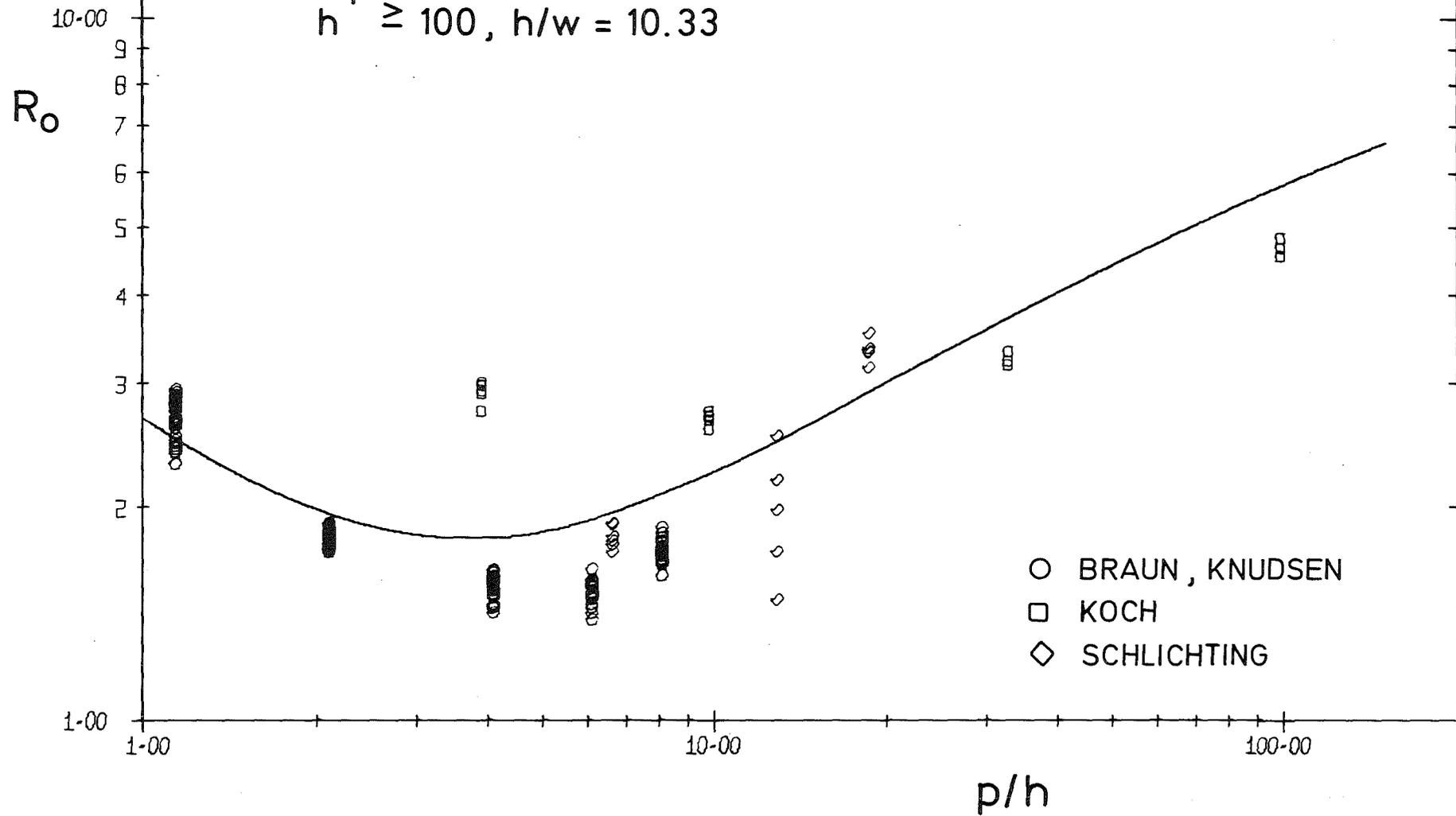
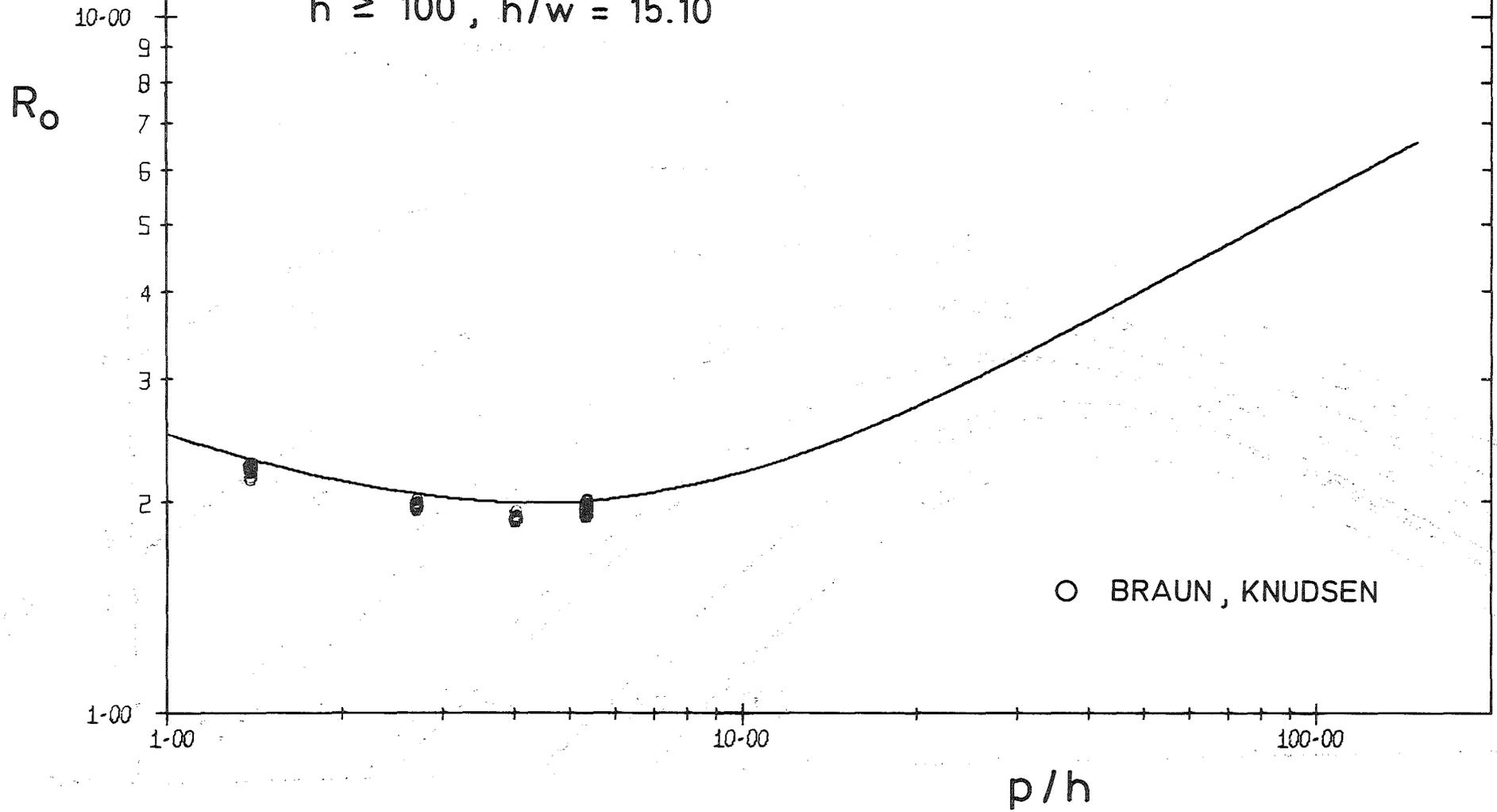
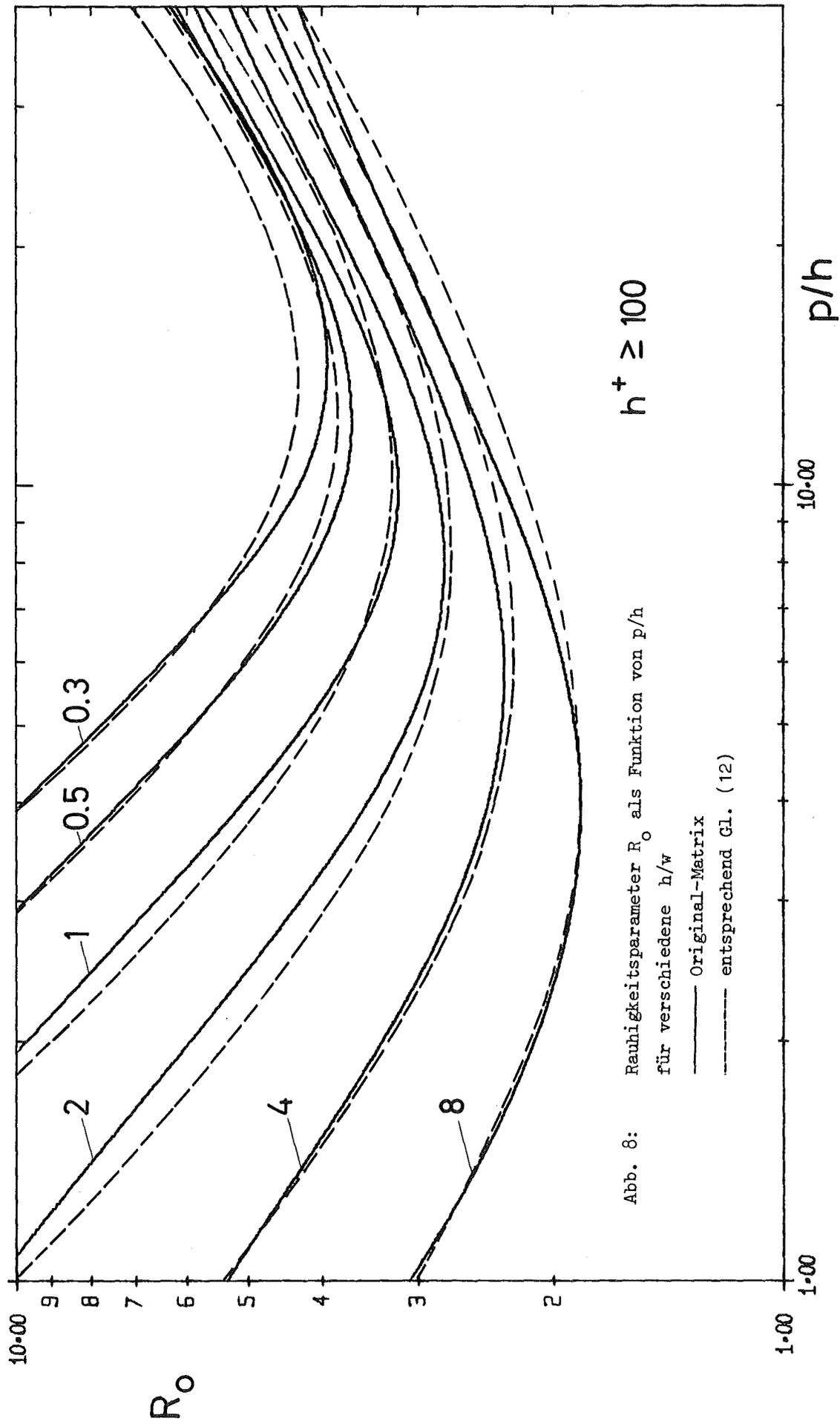
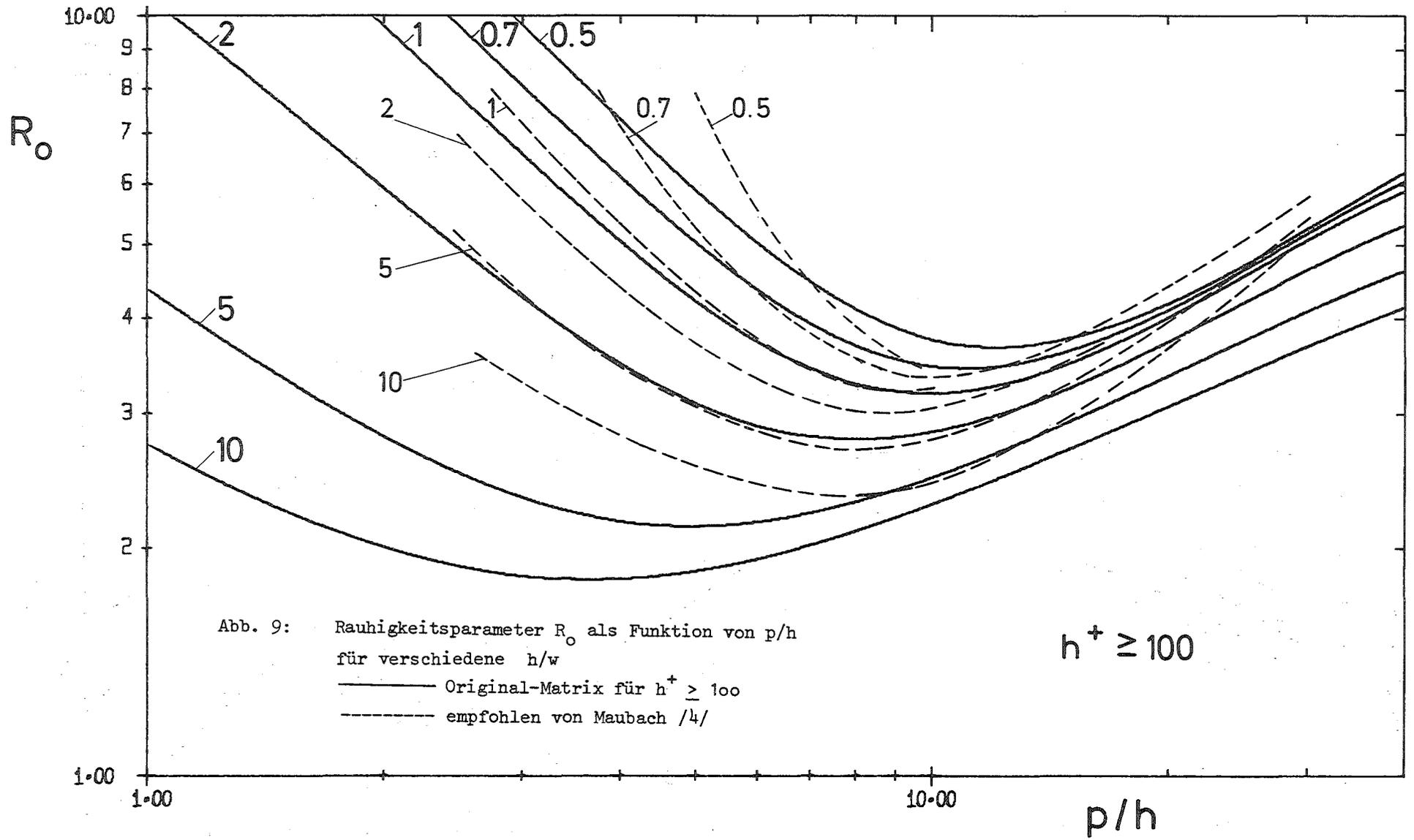


Abb. 7q): Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen:
Rauigkeitsparameter R_o als Funktion von p/h

$h^+ \geq 100$, $h/w = 15.10$







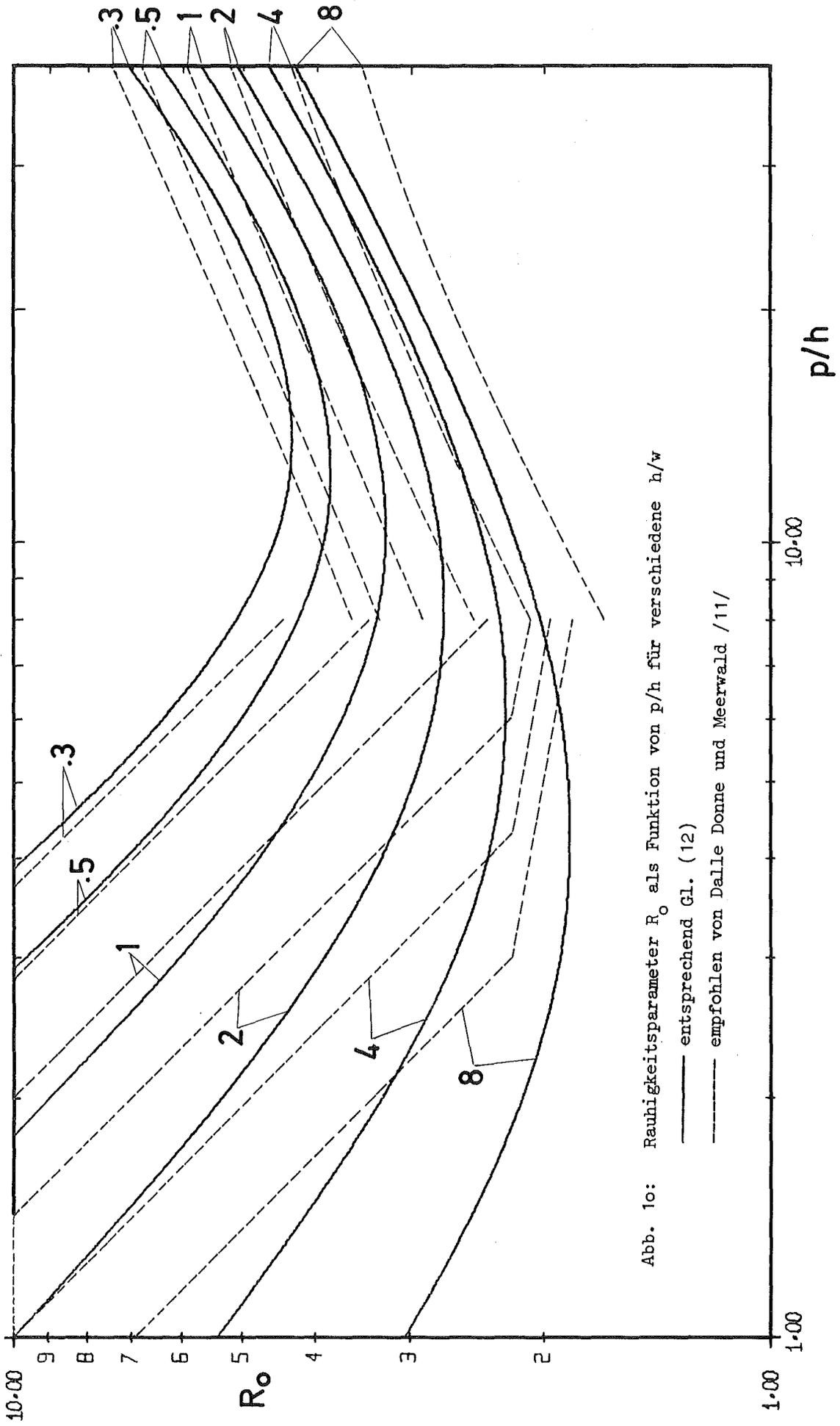


Abb. 10: Rauheitsparameter R_0 als Funktion von p/h für verschiedene h/w
 ——— entsprechend Gl. (12)
 - - - - - empfohlen von Dalje Donne und Meerwald / 11/

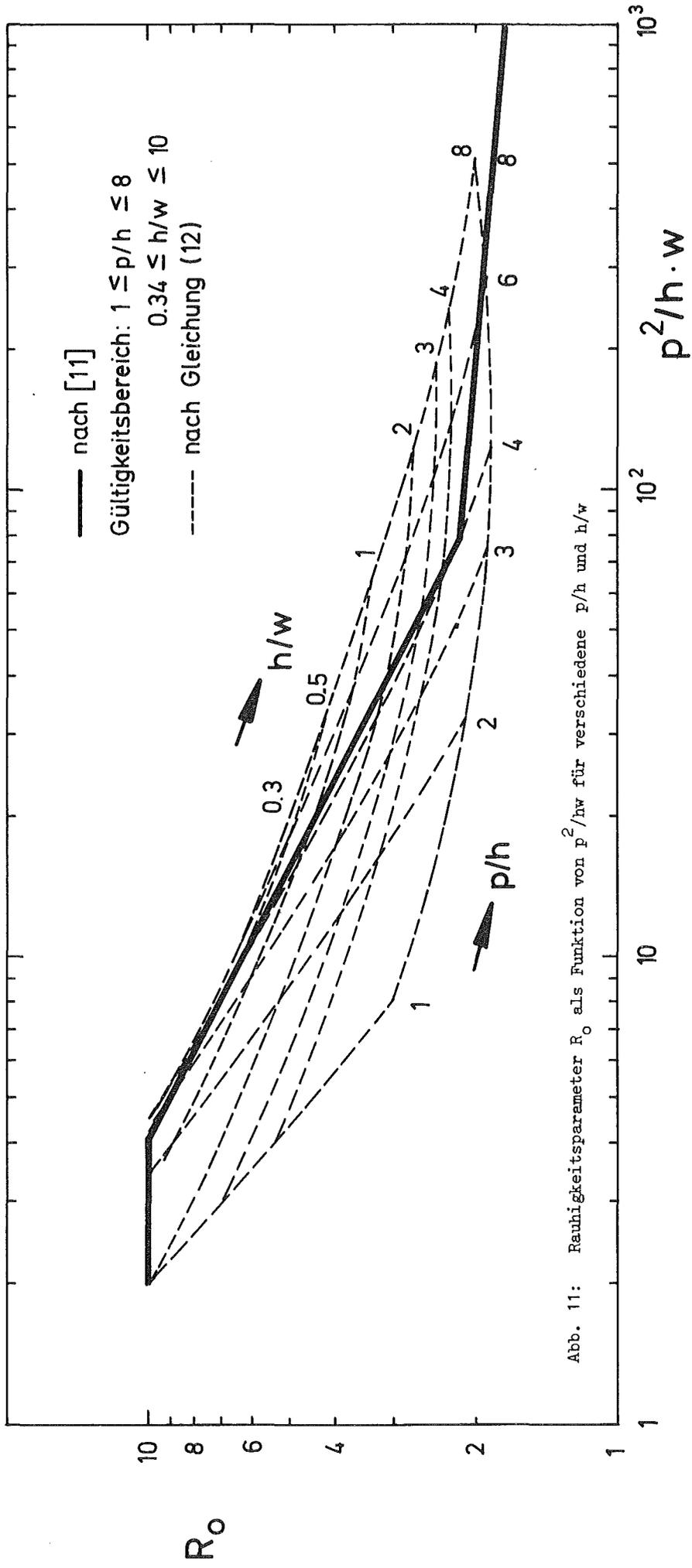


Abb. 11: Rauheitsparameter R_0 als Funktion von p^2/hw für verschiedene p/h und h/w