

Messung der Windlasten an einem kubischen Körper im natürlichen Wind und Vergleich der Ergebnisse mit Werten aus verschiedenen Windkanälen

T 1420

T 1420

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

T 1420: Messung der Windlasten an einem kubischen Körper im natürlichen Wind und Vergleich der Ergebnisse mit Werten aus verschiedenen Windkanälen.

3.35

Bericht-Nr. 84/31

MESSUNG DER WINDLASTEN AN EINEM KUBISCHEN KÖRPER IM
NATÜRLICHEN WIND UND VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT
WERTEN AUS VERSCHIEDENEN WINDKANÄLEN

Schlußbericht

A. Kaiser
A. Pernpeintner

LEHRSTUHL FÜR STRÖMUNGSMECHANIK
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

LEHRSTUHL FÜR STRÖMUNGSMECHANIK
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

"Messung der Windlasten an einem kubischen Körper im natürlichen
Wind und Vergleich der Ergebnisse mit Werten aus verschiedenen
Windkanälen"

Schlußbericht

München, den 14. Nov. 1984



(Prof.Dr.-Ing. R. Frimberger)



(Dr.-Ing. P. Schmid)

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Aenne Kaiser

Dr.-Ing. A. Pernpeintner

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen

1. Einleitung

2. Windlastmessungen

2.1 Versuchsgebäude

2.2 Meßeinrichtungen

2.2.1 Windmessung

2.2.2 Druckmessung

2.2.3 Datenerfassung und -verarbeitung

2.3 Meßergebnisse

2.3.1 Windmessung

2.3.2 Windlastmessung

Definition der aerodynamischen Beiwerte

Kraftbeiwerte

Druckbeiwerte

2.3.3 Vergleich der Feldmessungen mit Ergebnissen aus Windkanalversuchen mit turbulenzarmer Anströmung

3. Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabellen, Abbildungen

Bezeichnungen

A	Bezugsfläche
A_i	Teilfläche
A_x	Gebäudefläche senkrecht zur x-Achse
A_y	Gebäudefläche senkrecht zur y-Achse
A_z	Gebäudefläche senkrecht zur z-Achse
c_f	Kraftbeiwert
c_p	Druckbeiwert
c_{pi}	Druckbeiwert an der Meßstelle i
F	Kraft
H_b	Bezugshöhe
H_M	Modellhöhe
H_{10}	Gebäudehöhe 10 m
m	Anzahl der Meßstellen
n	Anzahl der Zeitschritte
p_A	Ausblasdruck (Abb. 6)
p	örtlicher Wanddruck
p_s	statischer Druck
q	Geschwindigkeitsdruck
q_{10}	Geschwindigkeitsdruck in Gebäudehöhe 10 m
Δt	Zeitintervall
T	Mittelungszeitraum
T_u	Turbulenzgrad
$U(z)$	Anströmgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe
U_b	Anströmgeschwindigkeit in Bezugshöhe

U_{HM}	Anströmgeschwindigkeit in Modellhöhe
U	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung
U_{10}	Anströmgeschwindigkeit in Gebäudehöhe 10 m
U_{δ}	Anströmgeschwindigkeit in Grenzschichthöhe
V	Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung
x, y, z	Koordinaten
x', y', z'	Koordinaten (Abb. 29)
x_k, y_l	Koordinaten der Meßstelle i
z_b	Bezugshöhe
α	Exponent der Potenzfunktion des Anströmprofils
β	Anströmrichtung
δ	Grenzschichtdicke
δ_v	Verdrängungsdicke
φ	Versperrungsgrad
ρ	Luftdichte

Indices und Abkürzungen

i	Meßstelle
j	Zeitschritt
x, y, z	Hinweis auf entsprechende Koordinatenrichtung
D	Dachfläche
N	Nordseite
O	Ostseite
S	Südseite
W	Westseite
∞	Hinweis auf ungestörte Anströmung

Messung der Windlasten an einem kubischen Körper im natürlichen Wind und Vergleich der Ergebnisse mit Werten aus verschiedenen Windkanälen

1. Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung in der Bautechnik und der mit ihr einhergehende Trend zur Materialkosteneinsparung erfordert für den Sicherheitsnachweis von Baukonstruktionen eine zuverlässige Einschätzung der Windlasten. Sofern es sich um nicht schwingungsfällige Bauwerke handelt, ist mit einer rein statisch wirkenden Windlast zu rechnen, die von der mittleren Windgeschwindigkeit, von Windprofil, von der Turbulenzintensität, von den Abmessungen des Baukörpers und dessen aerodynamischen Eigenschaften abhängt. Bei Starkwindsituationen werden Windprofil und Turbulenzintensität von der Oberflächenbeschaffenheit des bebauten Gebäudes geprägt. Die aerodynamischen Eigenschaften werden durch die sowohl von der Bauwerksgeometrie als auch von der Windstruktur selbst abhängigen aerodynamischen Lastbeiwerte ausgedrückt.

In der Baupraxis wird zur rechnerischen Bestimmung der Windlast in der Regel DIN 1055 Teil 4 herangezogen. Die hier angegebenen Beiwerte wurden von Windkanalmessungen abgeleitet, die mit turbulenzarmem, über der Höhe konstantem Geschwindigkeitsprofil, d.h. unter stark idealisierten Bedingungen, durchgeführt wurden.

Vergleichsmessungen bei einer dem natürlichen Wind nachgebildeten turbulenten Grenzschichtströmung zeigten, daß die Art der Anströmung entscheidenden Einfluß auf die Druckverteilung an kantigen Baukörpern ausübt, vgl. Castro und Robins [6], Laneville und Parkinson [13] und Barriga et al. [4], Corke und Nagib [7].

Während bei Anströmung mit völligem Geschwindigkeitsprofil sowohl am Dach als auch auf der Leeseite hohe, konstant verteilte Soglasten auftreten, verringert sich die Soglast bei simulierter atmosphärischer Grenzschichtströmung vor allem auf der Leeseite beträchtlich. Als zusätzlicher Einfluß tritt hierbei die Eintauchtiefe, d.h. das Verhältnis von Grenzschichtdicke und Gebäudehöhe auf, vgl. Bächlin et al. [3]. Windkanalmessungen an kubischen Körpern ergaben bei großen Eintauchtiefen, d.h. bei geringen Gebäudehöhen, eine Reduktion der Widerstandskraft um 25 %, vgl. Sakamoto und Arie [18]. Erhebliche Unterschiede weisen auch die Druckverteilungen am Dach auf. Mit Ausnahme an der Dachvorderkante stellen sich bei turbulentem Anströmprofil deutlich geringere Druckbeiwerte ein, vgl. Kramer [12]. Für die Windlastannahmen von Bauwerken ist dieses Ergebnis von besonderer Bedeutung, da bei der Mehrzahl der Gebäude solche Eintauchtiefen vorliegen.

Die wesentlichen Nachteile von Windkanalversuchen bestehen jedoch darin, daß einmal Versperrungseffekte aufgrund der räumlichen Begrenzung der Meßstrecke zu Verfälschungen der Ergebnisse führen können, zum anderen Windrichtungsschwankungen nicht simuliert werden können. Während der Versperrungseinfluß entweder durch geeignete Wahl der Modellgröße oder durch entsprechende Versperrungskorrekturen, vgl. Pucher [17] gering gehalten werden kann, bleibt der Einfluß der Windrichtungsschwankungen bei Modellmessungen a priori unberücksichtigt. Wünschenswert sind daher Windlastmessungen an der Großausführung.

Da einerseits die unter natürlichen Bedingungen zu untersuchenden Parameter wie Windrichtung und Böigkeit nicht frei wählbar sind, andererseits die Verfügbarkeit eines geeigneten Meßobjekts bzw. die Bestückung mit einer genügend großen Anzahl von Meßwertgebern problematisch ist, unterliegen solche Versuche naturgemäß gewissen Einschränkungen. Messungen von Matsui et al. [14] und Mayne und Walker [15] an einem Hochhaus mit rechteckigem Grundriß bestätigen zwar die im Windkanal bei entsprechend simulierter atmosphärischer

Grenzschicht erhaltenen Druckbeiwerte an der Luv- und Leeseite des Gebäudes, stellen jedoch durch die spezielle Umgebungsbebauung einen Sonderfall dar.

Die Mehrzahl der Gebäude liegt innerhalb der bodennahen Rauigkeitsschicht. Da hier keine meteorologischen Winddaten vorhanden sind, kommt der Ermittlung der Windbelastung für solche Bauwerke besondere Bedeutung zu.

Mit dem Ziel Windlastwerte für niedrige Wohngebäude zu erfassen, wurden von Eaton und Mayne [8] umfangreiche Messungen an Satteldachgebäuden mit Neigungswinkeln von 5° bis 45° durchgeführt und von Apperly et al. [2] und Tiedemann et al. [20] mit Windkanalmessungen verglichen.

Hier zeigte sich, daß übereinstimmende Druckverteilungen erhalten werden, wenn die Umgebungsbebauung im Modellversuch berücksichtigt wurde.

Zweck der vorliegenden Untersuchung ist die Ermittlung der Windlastbeiwerte an würfelförmigen Gebäuden. Insbesondere sollen diese Messungen ein Beurteilungskriterium für die Güte der in DIN 1055 Teil 45 angegebenen Lastbeiwerte liefern.

2. Windlastmessungen

2.1 Versuchsgebäude

Für die Untersuchungen stand ein speziell für Forschungszwecke in Fertigbauweise errichtetes würfelförmiges Gebäude mit einer Kantenlänge von 10 m zur Verfügung (Abb. 1). Abgesehen von der Eingangstüre und zwei Fenstern an der der Hauptwindrichtung abgewandten Ost- bzw. Nordfront waren die Fassaden unstrukturiert und glatt. Das Dach war mit einer Kiesschüttung der Körnung

16+32 mm versehen. Während die umlaufende Randeinfassung des Daches mit den Seitenwänden nahezu bündig abschloß, ragte sie nach oben ca. 10 cm über die Kiesschüttung hinaus.

Der Grund in der Umgebung des Baukörpers ist eben und wurde während der Meßperiode landwirtschaftlich genutzt. Während nach Osten hin in etwa 200 m Abstand eine lockere niedere Bebauung anschließt, ist das Gelände nach den anderen Richtungen, insbesondere in Hauptwindrichtung Südwest, weithin offen und unbebaut.

2.2 Meßeinrichtungen

2.2.1 Windmessung

Zur Messung der für die Windlasten maßgebenden Anströmbedingungen waren entsprechende Meßwertaufnehmer 50 m in westlicher Richtung vom Gebäude entfernt an einem 20 m hohen Mast installiert (Abb. 2 und 3).

Zur Bestimmung des W i n d g e s c h w i n d i g k e i t s - p r o f i l s waren 8 über der Masthöhe verteilte Schalenanemometer vorgesehen.

Darüberhinaus erfaßte ein Gill-UVW-Propeller-Anemometer in einer Höhe von 10 m die Geschwindigkeitskomponenten nach 3 orthogonalen Richtungen, aus denen die horizontale Bezugsgeschwindigkeit und die W i n d r i c h t u n g ermittelt wurden, vgl. Horst [9]. Die Windrichtung konnte zur Kontrolle außerdem direkt über je eine Windfahne in 9 m und 20.5 m Höhe bestimmt werden. Zur Messung der T e m p e r a t u r wurden 4 Widerstandsthermometer eingesetzt. Der als Referenzgröße wichtige s t a t i s c h e D r u c k der Anströmung wurde sowohl mit einer ins Erdreich oberflächenbündig eingelassenen Bodensonde (Abb. 4) als auch mit Hilfe einer statische Rohrsonde abgenommen, die an der Mastspitze in Verbindung mit der Windfahne drehbar installiert war, vgl. Brust, Baetke [5]. Nachdem sich eine gute Übereinstimmung der Meßwerte nach beiden Verfahren gezeigt hatte, wurde im weiteren als Referenzdruck der Wert herangezogen, der mit der gegenüber Witterungseinflüssen weniger anfälligen Bodensonde gewonnen wurde.

2.2.2 Druckmessung am Versuchsgebäude

An 155 ausgewählten Punkten an den Fassaden und am Dach des Gebäudes waren Druckmeßbohrungen vorgesehen, deren Lage aus Abb. 5 hervorgeht. Die der Hauptwindrichtung Südwest zugewandten Fassaden und das Dach waren wegen der hier zu erwartenden größeren Druckgradienten dichter bestückt als die leeseitigen Fassaden.

Die Meßbohrungen wurden aus Messingröhrchen mit einem Innendurchmesser von 1 mm gebildet, welche durch die Seitenwände geführt wurden und außen bündig abschlossen.

Auf dem Dach waren bündig mit der Oberfläche der Kiesschüttung runde Betonplatten (\emptyset 200 mm) verlegt, die zur Aufnahme der Messingröhrchen dienten.

Für die vorliegenden Messungen waren 50 in der Abb. 5 besonders gekennzeichnete Bohrungen über Schlauchleitungen von 35 (Fassaden) bis 45 cm (Dach) Länge mit elektrischen Druckmeßgebern verbunden. Die restlichen Bohrungen sollten bei späteren Messungen an Einzelfassaden berücksichtigt werden. Zur Eichung der Druckgeber diente eine vollautomatische Eichanlage, mit der es möglich war, zu beliebigen Zeiten definierte Drücke aufzugeben, um den Zusammenhang zwischen Meßgröße und Ausgangssignal zu bestimmen bzw. zu überprüfen. Darüberhinaus konnte, wenn nötig, in das Leitungssystem eingedrungenes Regenwasser zu vorgegebenen Zeiten ausgeblasen werden. Die Schemaskizze einer Druckmeßeinheit ist in Abb. 6 wiedergegeben. Die gesamte Druckmeßanlage wird eingehend von Kaiser [10] beschrieben.

2.2.3 Datenerfassung und -verarbeitung

Zur Datenerfassung diente eine im Meßgebäude installierte Prozeßrechenanlage (PERKIN ELMER 7/16), mit welcher die Analogmeßsignale simultan mit einer Abtastfrequenz von 10 Hz digital gewandelt und auf Magnetband gespeichert wurden. die Datenauf-

zeichnung erfolgte bei geeigneter Windrichtung nach Überschreiten eines einstellbaren Windgeschwindigkeitsschwellwerts für jeweils eine Stunde. Neben den 50 Druckwerten an der Gebäudeoberfläche wurden auch die verschiedenen meteorologischen Daten mit aufgezeichnet. Die weitere Verarbeitung der gespeicherten Binärdaten erfolgte off-line, wobei die einstündigen Meßreihen jeweils in sechs Zeitreihen von 10 Minuten Länge aufgeteilt wurden. Jeder achte Meßwert wurde hieraus zur Bildung eines 10 - M i n u t e n - M i t t e l w e r t e s herangezogen, was einer Abtastfrequenz von 1.25 Hz entspricht.

Diese Mittelwerte wurden für die weitere Berechnung insbesondere auch zur örtlichen Mittelwertbildung der Druckwerte verwendet, vgl. Kaiser [11].

2.3 Meßergebnisse

2.3.1 Windmessung

Aus den Anemometerdaten wurde das mittlere Windgeschwindigkeitsprofil über Grund gewonnen.

Sein Verlauf läßt sich durch ein Potenzgesetz der Form

$$\frac{\overline{U(z)}}{\overline{U_b}} = \left(\frac{z}{z_b}\right)^\alpha \quad (1)$$

beschreiben.

Hierbei sind unter $\overline{U(z)}$ und $\overline{U_b}$ die in der Höhe z bzw. in einer Bezugshöhe z_b gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten zu verstehen. Es gilt:

$$\overline{U(z)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U(z)_j \quad (2)$$

Die Anzahl der Zeitschritte $n = T/\Delta t = 750$ ergibt sich aus dem gewählten Mittelungszeitraum $T = 10$ min und dem aus der Abtastfrequenz von 1.25 Hz resultierenden Zeitintervall $\Delta t = 0.8$ sec.

Der Exponent α wurde mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet.

Bei der Ermittlung des jeweiligen Exponenten wurden die Meßdaten des Anemometers in 1 m Höhe nicht berücksichtigt, da sie zu stark von der örtlichen Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst werden. Bei einigen Meßreihen mußte wegen eines Geberausfalls auf den Meßwert von der Mastspitze (20.5 m) verzichtet werden. Die Abhängigkeit des α -Wertes von der mittleren Anströmgeschwindigkeit in 10 m Höhe ($U_{10} = \overline{U}_{10}$) ist in Abb. 7 dargestellt; es zeigt sich Übereinstimmung sowohl mit den über einen Zeitraum von 18 Jahren von Schroers und Lösslein [19] (Abb. 8) als auch von Plate [16] jeweils bei vergleichbarer Geländebeschaffenheit ermittelten α -Werten.

Der Geschwindigkeitsverlauf über der Höhe nach Gl. (1) ist für verschiedene α in Abb. 9 dargestellt.

2.3.2 Windlastmessung

- Definition der aerodynamischen Beiwerte.

Die allgemeine Definition der aerodynamischen Beiwerte lautet:

$$c_p = \frac{p - p_s}{q} = \frac{\Delta p}{q} \quad (\text{Druckbeiwert}) \quad (3)$$

$$c_f = \frac{F}{q \cdot A} \quad (\text{Kraftbeiwert}) \quad (4)$$

Hierbei stellen p den örtlichen Druck, p_s den statischen Druck der ungestörten Strömung, F die Kraft auf den Körper, A eine Bezugsfläche und q den Bezugsgeschwindigkeitsdruck dar.

In vorliegendem Bericht werden die Beiwerte als 10-Minuten-Mittelwerte angegeben, d.h. zu ihrer Bestimmung wurden entsprechende Mittelwerte \overline{p} , \overline{F} und \overline{q} verwendet.

Geschwindigkeitsdruck und Fläche bedürfen dabei einer genaueren Definition:

$$q = \overline{q}_{10} = \frac{1}{2} \rho \overline{U_{10}^2} \quad (\text{Geschwindigkeitsdruck in 10 m Höhe}) \quad (5)$$

Hierbei ist $\overline{U_{10}^2}$ aus den Signalen für die Horizontalkomponenten U und V des Gill-Anemometers zu berechnen:

$$\overline{U_{10}^2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (U^2 + V^2) \quad (6)$$

Die Dichte ρ wird mit dem 10-Minuten-Mittelwert der Temperatur auf 9 m Höhe gebildet.

Als Bezugsfläche A wird die Gebäudeprojektionsfläche $A = 100 \text{ m}^2$ gewählt.

Zur Berechnung der jeweiligen zeitlich gemittelten Gesamtkräfte F müssen die auf Teilflächen A_i wirkenden mittleren Druckkräfte aufsummiert werden.

$$\overline{F} = \sum_{i=1}^m A_i \overline{\Delta p}_i = \sum_{i=1}^m A_i \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j \right)_i \quad (7)$$

Für A_i gilt nach Abb. 10:

$$A_i = x_K \cdot y_1 \quad (8)$$

Dabei sind mit x_K und y_1 die Koordinaten der Meßstelle i bezeichnet. Damit wird

$$x_K = \frac{x_{K+1} - x_{K-1}}{2} \quad (9a)$$

$$y_1 = \frac{y_{1+1} - y_{1-1}}{2} \quad (9b)$$

Die Summierung muß über alle zur jeweiligen Krafrichtung normal stehenden Teilflächen erfolgen.

Aus Gründen der Vereinfachung wird im weiteren auf die Kennzeichnung der zeitlichen Mittelwerte durch Querstriche verzichtet.

Die Kraftbeiwerte in x, y, z-Richtung lauten somit

$$c_{fx} = \frac{F_x}{q_{10} \cdot A} \quad (10a)$$

$$c_{fy} = \frac{F_y}{q_{10} \cdot A} \quad (10b)$$

$$c_{fz} = \frac{F_z}{q_{10} \cdot A} \quad (10c)$$

Die zeitlich gemittelten Druckbeiwerte an der Stelle i werden zu

$$c_{pi} = \frac{\Delta P_i}{q_{10}} \quad (11)$$

Bei den jeweils über eine Gebäudefläche gemittelten Druckbeiwerten ist zu unterscheiden:

$$c_{pW} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{m_W} c_{pi} \cdot A_i \quad (\text{über Westseite gemittelter Druckbeiwert}) \quad (12a)$$

$$c_{pS} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{m_S} c_{pi} \cdot A_i \quad (\text{über Südseite gemittelter Druckbeiwert}) \quad (12b)$$

$$c_{pO} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{m_O} c_{pi} \cdot A_i \quad (\text{über Ostseite gemittelter Druckbeiwert}) \quad (12c)$$

$$c_{pN} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{m_N} c_{pi} \cdot A_i \quad (\text{über Nordseite gemittelter Druckbeiwert}) \quad (12d)$$

$$c_{pD} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{m_D} c_{pi} \cdot A_i \quad (\text{über dem Dach gemittelter Druckbeiwert}) \quad (12e)$$

Mit m_W , m_S , m_O , m_N , m_D wird die Anzahl der auf der betreffenden Gebäudefläche angebrachten Druckmeßstellen bezeichnet.

In den folgenden Absätzen werden die eigenen Meßergebnisse beschrieben und mit denen anderer Autoren verglichen. Der Vergleich mit Ergebnissen von Pucher [17] erfolgt entsprechend der Aufgabenstellung in einem gesonderten Kapitel.

Kraftbeiwerte

Zur Ermittlung der Kraftbeiwerte wurde ein gebäudfestes Koordinatensystem entsprechend Abb. 11 gewählt. Die Abhängigkeit der gemessenen c_{fx} -, c_{fy} - und c_{fz} -Werte vom Anströmwinkel β ist in Abb. 12-14 dargestellt.

Aufgrund der unterschiedlichen Anströmbedingungen ergibt sich eine mehr oder weniger ausgeprägte Streuung der Meßpunkte. Zahlenmäßige Angaben beziehen sich im Weiteren stets auf Werte, die in der Mitte des Streubereiches liegen. Gemessene Extremwerte gehen aus den Abbildungen hervor.

In x-Richtung (Abb. 12) stellt sich für kleine Anströmwinkel ein Kraftbeiwert von $c_{fx} \approx 0.9$ ein. Dieser c_{fx} -Wert wird im Mittel bis zu Winkeln von $\beta = 30^\circ$ nur unwesentlich überschritten und liegt deutlich unter dem in DIN 1055 Teil 45 angegebenen Wert von

$$c_{fx} = 1.2.$$

Für $\beta > 30^\circ$ ist eine Abnahme der c_{fx} -Werte zu verzeichnen.

In y-Richtung (Abb. 13) geht wegen des symmetrischen Strömungsverlaufes bezüglich der x-Achse bei $\beta = 0$ der Kraftbeiwert $c_{fy} \rightarrow 0$. Im Bereich von $5^\circ < \beta < 30^\circ$ zeigt sich ein linearer Anstieg. Bei $\beta = 45^\circ$ findet man ein zur Dachdiagonalen symmetrisches Strömungsbild vor. Die c_{fx} - und c_{fy} -Werte müssen hier übereinstimmen ($c_{fx} = c_{fy} \approx 0.85$). Die Norm gibt für diesen Fall $c_{fx} = c_{fy} = 0.8$ an.

Für Winkel $\beta > 45^\circ$ lassen sich die c_{fy} -Werte aus den c_{fx} -Werten der Abb. 12 gemäß der Vorschrift $c_{fy}(\beta) = c_{fx}(90^\circ - \beta)$ bestimmen. Für die Ermittlung der c_{fx} -Werte im Bereich $\beta > 45^\circ$ ist entsprechend vorzugehen. Es gilt: $c_{fx}(\beta) = c_{fy}(90^\circ - \beta)$.

Die Kraftbeiwerte in z-Richtung sind in Abb. 14 dargestellt. Der Maximalwert tritt im Bereich der Normalanströmung mit $c_{fz, \max} \approx 0.7$ auf. Die geringste Soglast ergibt sich bei Anströmung über Eck ($c_{fz} = 0.55 - 0.6$).

Aus Gründen der Symmetrie treten weitere Maxima und Minima bei Anströmwinkel von $\beta = 90^\circ, 180^\circ$ und 270° bzw. bei $\beta = 135^\circ, 225^\circ$ und 315° auf. In der Norm sind keine entsprechenden c_{fz} -Werte angegeben.

Meßergebnisse aus Windkanaluntersuchungen mit vergleichbaren Randbedingungen sind in den Abb. 15 und 16 wiedergegeben. Es ist im Verlauf der c_{fx} -, c_{fy} - und c_{fz} -Kurven eine gute qualitative Übereinstimmung mit den an der Großausführung gewonnenen Ergebnissen festzustellen. Betragsmäßig treten jedoch zum Teil deutliche Abweichungen auf, die auf unterschiedliche Versuchsbedingungen, z.B. hinsichtlich der Reynoldszahl, der Kanalversperrung, des Grenzschichtverlaufes, der Eintauchtiefen des Modells in die Grenzschicht und der Richtungsschwankungen der Anströmung zurückzuführen sind. Eine Gegenüberstellung von Normwerten und Ergebnissen aus Feld- bzw. Windkanalmessungen ist in Tab. 1 wiedergegeben.

Druckbeiwerte

Mittlere Druckbeiwerte an Gebäudeflächen.

Die Gesamtbelastung auf einzelnen Wände bzw. auf das Dach kann aus den flächengemittelten Druckbeiwerten gewonnen werden, vgl. Gl. (12). Die Abhängigkeit dieser Werte vom Anströmwinkel β ist aus den Abb. 17 - 21 zu ersehen, wobei die Zuordnung von Anströmwinkel und Gebäudeflächen aus Abb. 11 hervorgeht.

In Abb. 17 sind die Druckbeiwerte für die Gebäudewestseite aufgetragen. Definitionsgemäß liegt diese Wand für den dargestellten Winkelbereich im Luv. Maximale Druckbelastung tritt für $0^\circ < \beta < 20^\circ$ auf. Mit $c_{pW} \approx 0.62$ liegt der zugehörige Beiwert gegenüber dem Normwert von $c_p = 0.8$ deutlich niedriger.

Die Süd- und Nordseite des Gebäudes stellen bei kleinen Anström winkeln windparallele Gebäudeflächen dar und liegen somit im Ablösebereich der Strömung innerhalb dessen negative Druckbeiwerte auftreten. Mit wachsendem Anströmwinkel gelangt die Südseite in Bereiche höheren Druckes, vgl. Abb. 18. Der Übergang von negativen zu positiven Druckbeiwerten findet bei $\beta \approx 25^\circ$ statt.

Bei $\beta = 45^\circ$ treten aufgrund der hier symmetrischen Umströmung des Gebäudes an Süd- und Westseite gleiche Druckbeiwerte auf.

Die Nordseite liegt auch für größere Anströmwinkel im Ablösegebiet. Die Druckbeiwerte sind im dargestellten Winkelbereich deshalb stets negativ. Die größte Soglast ($c_{pN,max} \approx -0.7$) tritt für Anströmwinkel um $\beta = 0^\circ$ auf, vgl. Abb. 19.

Die bei Normalanströmung ($\beta = 0^\circ$) im Lee liegende Ostseite zeigt bei Anström winkeln $0^\circ < \beta < 50^\circ$ negative Beiwerte zwischen $c_{pO} = -0.5$ und $c_{pO} = -0.3$, vgl. Abb. 20.

Die Druckbeiwerte am Dach entsprechen dem Betrag nach den Kraftbeiwerten c_{fz} . Während die DIN 1055 für Flachdächer einen Druckbeiwert $c_{pD} = -0.6$ angibt, läßt sich für die Großausführung aus Abb. 21 ein maximaler Wert von $c_{pD} = -0.75$ bei $\beta = 0^\circ$ ermitteln. Mit steigendem Anströmwinkel nimmt die Sogbelastung geringfügig ab bis zu einem Wert $c_{pD} = -0.55$ bei $\beta = 45^\circ$.

Eine Gegenüberstellung der Druckbeiwerte nach DIN 1055 Teil 45 und den aus der Feldmessung für $\beta = 0^\circ$ gewonnenen mittleren Werten zeigt Tab. 2. Zusätzlich werden hier die Beiwerte für die jeweils gemessene Maximalbelastung angegeben. Es zeigt sich, daß die Norm für die Lastannahmen an den Seitenwänden zu hohe Beiwerte angibt, während für das Dach zu geringe Werte angesetzt werden.

Druckverteilung an Mittelschnitten

Mittlere Druckbeiwerte können keine Information über örtlich auftretende Windlasten liefern. Zur Beurteilung von Spitzenbelastungen sind deshalb Angaben über Druckverteilungen innerhalb einer betrachteten Fläche erforderlich.

In diesem Kapitel werden die Druckverteilungen entlang der vertikalen und horizontalen Mittelschnitte an den Gebäudeflächen (W, S, O, N, D) bei Normalanströmung ($\beta = 0^\circ$) und bei Übereckanströmung ($\beta = 45^\circ$) beschrieben. Bei der Darstellung der Ergebnisse wurden dabei jeweils die Werte von drei Zeitreihen berücksichtigt.

Die bei den Messungen vorliegenden Anströmbedingungen sind in Tabelle 3 zusammengestellt, wobei die einzelnen Zeitreihen mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet sind. Die Ergebnisse werden jeweils mit Werten von Windkanalversuchen verglichen. Die gewählten Mittelschnitte und Anströmrichtungen sind aus den entsprechenden Abbildungen ersichtlich.

In Abb. 22 ist die Druckverteilung im Mittelschnitt durch Westseite und Dach dargestellt, wobei die Streuung der drei Meßwerte durch eine Schraffur verdeutlicht ist. An der Westseite zeigt sich sowohl für Normal- als auch für Übereckanströmung konstanter Verlauf des Druckes, wogegen am Dach für beide Anströmrichtungen deutliche Sogspitzen mit Werten bis zu $c_{pD} = -1.25$ auftreten.

Die Druckverteilung im Mittelschnitt entlang der Dach-, Süd- und Nordfläche (D, S, N) des Gebäudes ist in Abb. 23 aufgetragen. Die bei Normalanströmung auftretende Ablösung an den luvseitigen Gebäudekanten hat eine Sogbelastung an dem hier gewählten Mittelschnitt zur Folge. An den Seitenflächen des Gebäudes (S und N) stellt sich eine Soglast von $c_p \approx -0.7$ ein; der Maximalwert ($c_p = -1.05$) tritt am Dach auf. Die starke Streuung der Meßwerte bei nahezu gleicher Anströmrichtung weist hier auf eine Abhängigkeit der Beiwerte vom Anströmprofil hin.

Bei Übereckanströmung herrscht an der Südseite (S) des Gebäudes Druckbelastung. Aufgrund der symmetrischen Umströmung des Gebäudes ist diese Druckverteilung mit der Belastung an der Westseite vergleichbar (siehe Abb. 22). Auf der Dachfläche treten im Bereich der windzugewandten Kanten Unterdrücke bis $c_p = -1.2$ auf. An der Nordseite (N) herrscht abgelöste Strömung, die Druckverteilung ist gleichmäßig.

Windkanalergebnisse von Castro/Robins [6] stimmen bei Normalanströmung an der Luvseite (W) gut mit den Feldmessungen überein. An der im Ablösegebiet liegende Südseite stellt man dagegen erhebliche Abweichungen fest. Gleiches gilt für die Dachlasten im Schnitt quer zur Strömungsrichtung. Aus dem Schnitt parallel zur Windrichtung sind Sogspitzen ersichtlich, die im Windkanalversuch geringer ausfallen als an der Großausführung und zur luvseitigen Dachkante verschoben sind, vgl. Abb. 23 bzw. 24.

Bei Übereckanströmung stellen Castro und Robins an den Luvseiten trotz symmetrischer Anströmbedingung stark voneinander abweichende Druckverteilungen fest, vgl. Abb. 25. Die Autoren führen dies auf die instabile Lage des Staupunkts auf der Luvkante zurück. Geringste Störungen in der Strömung bewirken eine Verschiebung des Staupunktes zu der einen oder anderen Seite hin. In der Großausführung wechselt auf Grund ständiger Windrichtungsschwankungen die Staupunktlage. Die zeitlichen Mittelwerte stimmen mit den arithmetischen Mittel der Druckbeiwerte an Süd- und Westseite aus den Windkanalversuchen überein.

Die Sogspitzen an der Dachvorderkante sind von gleicher Größe wie in der Natur, wogegen die Sogbeiwerte im Leebereich des Daches im Windkanalversuch höher liegen.

Die Druckverteilung entlang des horizontalen Mittelschnitts an drei Seitenflächen des Versuchsgebäudes ist in Abb. 26 dargestellt. Bei Normalanströmung ist die Druckverteilung an der luvseitigen Gebäudefläche (W) symmetrisch; das Maximum liegt

in der Mitte. An den windparallelen Gebäudeflächen treten luvseitig ablösungsbedingte Unterdrücke bis $c_p = -0.9$ auf. In Strömungsrichtung nimmt die Soglast bis auf $c_p = -0.4$ ab. Auf der Gebäuderückseite (0) stellt sich ein konstanter Druckverlauf ein.

Bei Übereckanströmung verläuft die Druckverteilung entlang der luvseitigen Gebäudeflächen (W und S) zur Luvkante symmetrisch. Die Leeseite (0) liegt im Ablösegebiet der Strömung. Die Druckbeiwerte sind hier negativ.

Der Vergleich der Feldmessungen mit Ergebnissen von Castro und Robins (vgl. Abb. 27) zeigt bei Normalanströmung gute qualitative Übereinstimmung. Die Belastung sowohl im Druck- als auch im Sogbereich ist jedoch geringer als an der Großausführung (Abb. 26).

Im Falle der Übereckanströmung (vgl. Abb. 28) stimmen die arithmetischen Mittelwerte der beiden luvseitigen Gebäudeflächen (W und S) mit den in der Natur gemessenen Werten überein (Abb. 26). Die Sogbelastung an den Leeseiten (O, N) ist höher als an der Großausführung.

Bei der Auswertung der Feldmessungen wurden lediglich Anströmungen berücksichtigt, die normal zu einer Gebäudewand ($\beta = 0^\circ$) oder in Richtung der Dachdiagonalen ($\beta = 45^\circ$) verliefen. Windkanalmessungen an Würfeln bei unterschiedlichen Anströmungen im Winkelbereich von 5° - 45° zeigen, daß extreme Belastungsfälle durch die beiden gewählten Windrichtungen erfaßt werden, vgl. Abb. 29. Bei solchen Gebäudegeometrien ist daher eine Beschränkung der Windlastvorschriften auf Normal- und Übereckanströmung zulässig.

2.2.3 Vergleich der Feldmessung mit Ergebnissen aus Windkanalversuchen mit turbulenzarmer Anströmung

In der Baupraxis treten Gebäudeformen auf, die mitunter stark von der Würfelform abweichen. Für solche Bauwerke liegen zahlreiche Untersuchungen vor, die jedoch in Windkanälen mit turbulenzarmen, über der Höhe gleichmäßig verteiltem Geschwindigkeitsprofil durchgeführt wurden.

Zur Beurteilung der Qualität dieser Messungen werden die in der Natur gewonnenen Ergebnisse mit Windkanalmessungen verglichen, die von Pucher [17] an einem Würfel bei unterschiedlichem Versperrungsgrad und nahezu völligen Profilen durchgeführt wurden, vgl. Abb. 30 - 33. Die Abbildungen zeigen, daß der Versperrungsgrad von erheblichem Einfluß sein kann. Aufgrund des unbegrenzten Strömungsfeldes tritt in der Natur keine Versperrung auf ($\varphi = 0$). Der Vergleich mit Windkanalergebnissen bei sehr kleinen Versperrungen zeigt für die mittleren Druckbeiwerte an den einzelnen Gebäudeflächen z.T. erhebliche Abweichungen. In Abb. 34 sind Druckverteilungen entlang eines vertikalen Mittelschnittes einander gegenübergestellt.

Die Druckbeiwerte sind mit Ausnahme des luvseitigen Dachbereichs an der Großausführung niedriger als am Windkanalmodell. An der Luvseite (Westseite) stimmt der Verlauf der Druckverteilungen nur qualitativ überein.

3. Zusammenfassung

An einem würfelförmigen freistehenden Gebäude mit der Kantenlänge 10 m wurden die Winddrücke bei unterschiedlichen Anströmrichtungen gemessen. Die statische Windlast wird in Form von mittleren Kraft- und Druckbeiwerten angegeben. Die Messungen werden mit den Windlastannahmen in DIN 1055 sowie mit Ergebnissen aus Wind-

kanalversuchen verglichen. Es zeigte sich, daß die Kraftbeiwerte in der Windlastnorm bei Anströmung über Eck nur unwesentlich überschritten, bei Normalströmung ($\beta = 0^\circ$) jedoch um 25 % unterschritten werden. Die mittleren Druckbeiwerte der Seitenflächen werden in der Norm höher, am Dach dagegen um 25 % zu gering angesetzt. Der Vergleich mit Windkanalmessungen zeigte, daß die sich am Gebäude einstellende Druckverteilung vom Anströmprofil beeinflußt wird. Zur Verbesserung der Übertragbarkeit von Modellmessungen ist deshalb eine Simulation der natürlichen Grenzschicht erforderlich.

Literaturverzeichnis

- [1] Akins, R.E., Peterka, J.A., Cermak, J.E.: Mean force and moment coefficients for buildings in turbulent boundary layers. J. of Industrial Aerodynamics 2, 1977, S. 195-209
- [2] Apperley, L., Surry, D., Stathopoulos, T., Davenport, A.G.: Comparative measurements of wind pressure on a model of the full-scale experimental house at Aylesbury, England. J. of Industrial Aerodynamics 4, 1979, S. 207-228.
- [3] Bächlin, W., Plate, E.J., Kamarga, A.: Influence of the ratio of building height to boundary layer thickness and of the approach flow velocity profile on the roof pressure distribution of cubical buildings. 5th Colloquium on Industrial Aerodynamics, Aachen 82, Part 1, S. 1-12.
- [4] Barriga, A.R., Crowe, M.T., Roberson, J.A.: Pressure distribution on a square cylinder at a small angle of attack in a turbulent cross flow. Fourth Int. Conference on Wind Effects on Building and Structures, September 1975.
- [5] Brust, H., Baetke, F.: Messung und Auswertung instationärer Winddruckverteilungen am Fernsehturm München. Beiträge zur Anwendung der Aeroelastik im Bauwesen, Heft 16, 1982.
- [6] Castro, I.P., Robins, A.G.: The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. Journal of Fluid Mechanics, 1977, Vol. 79, S. 307-335.
- [7] Corke, T.C., Nagib, H.M.: Wind loads on a building model in a family of surface layers. J. of Industrial Aerodynamics, 5, 1979, S. 159-177.

- [8] Eaton, K.J., Mayne, J.R.: The Measurements of Wind Pressures on Two-storey Houses at Aylesbury. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 1, 1975, S. 67-109.
- [9] Horst, T.W.: A computer algorithm for correcting noncosine response in the Gill anemometer. Batelle Northwest Lab. report, BNWL-1651-1, 1978.
- [10] Kaiser, A.: Messung der Windlasten an einem kubischen Körper im natürlichen Wind und Vergleich der Ergebnisse mit Werten aus verschiedenen Windkanälen. 1. Zwischenbericht. Bericht Nr. 82/9, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, TU München, 1982.
- [11] Kaiser, A.: Messung der Windlasten an einem kubischen Körper im natürlichen Wind und Vergleich der Ergebnisse mit Werten aus verschiedenen Windkanälen. 2. Zwischenbericht. Bericht Nr. 83/1, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, TU München, 1983.
- [12] Kramer, C.: Untersuchungen zur Windbelastung von Flachdächern. *Der Bauingenieur* 50, 1975, S. 125-132.
- [13] Laneville, A., Parkinson, G.V.: Effects of Turbulence on Galloping of Bluff Cylinders. *Proceedings Wind Effects on Buildings and Structures*, Tokyo, 1971.
- [14] Matsui, G., Suda, K., Higuchi, K.: Full-Scale measurement of wind pressures acting on a high-rise building of rectangular plan. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10, 1982, S. 267-286.
- [15] Mayne, J.R., Walker, G.R.: The response of glazing to wind pressure. *Building Research Establishment CP 44/76*, June 1976.

- [16] Plate, E.J.: Aerodynamic Characteristics of Atmospheric Boundary Layers, USDOW Technical Information Center, Oak Ridge, Tennessee, USA, May 1971.

- [17] Pucher, P.: Experimentelle Untersuchungen an Würfeln und Quadern zur Bestimmung des Versperrungseinflusses in Windkanälen mit offener Meßstrecke. Lehrstuhl für Strömungsmechanik, TU München, Bericht Nr. 78/20, 1978.

- [18] Sakamoto, H., Arie, M.: Flow around a cubic body immersed in a turbulent boundary layer. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 9, 1982, S. 275-293.

- [19] Schroers, H., Lösslein, H.: Extremwertextrapolation und Windprofile bei Starkwind und Sturm. Meteorologische Rundschau 36, Oktober 83, S. 205-213.

- [20] Tielemann, H.W., Akins, R.E., Sparks, P.R.: A comparison of wind-tunnel and full-scale wind pressure measurements on low-rise structures. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 8, 1981, S. 3-19.

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabellen

- Tab. 1 Vergleich der Kraftbeiwerte bei Normalanströmung und Übereckanströmung
- Tab. 2 Über die einzelnen Gebäudeflächen gemittelte Druckbeiwerte bei Normalanströmung ($\beta = 0^\circ$)
- Tab. 3 Anströmbedingungen bei Normalanströmung und bei Übereckanströmung

Abbildungen

- Abb. 1 Ansicht des Versuchsgebäudes von Osten und Westen
- Abb. 2 Relative Lage des Mastes mit Sondenhalterungen und der statischen Bodensonde
- Abb. 3 Mast zur Windgeschwindigkeits- und Temperaturmessung
- Abb. 4 Statische Bodensonde
- Abb. 5 Anordnung der Druckmeßstellen
- Abb. 6 Prinzipschema einer Druckmeßeinheit
- Abb. 7 Exponent α in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit U_{10}
- Abb. 8 Exponent α in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit U_{10} nach Schroers/Lösslein [18]
- Abb. 9 Windgeschwindigkeitsprofile
- Abb. 10 Definitionsskizze der Teilfläche A_i

- Abb. 11 Festlegung des Koordinatensystems
- Abb. 12 Kraftbeiwert c_{fx} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β
- Abb. 13 Kraftbeiwert c_{fy} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β
- Abb. 14 Kraftbeiwert c_{fz} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β
- Abb. 15 Kraftbeiwerte c_{fx} , c_{fy} , c_{fz} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β nach Atkin/Peterka/Cermak [1]
- Abb. 16 Kraftbeiwert in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β nach Sakamoto/Arie [18]
- Abb. 17 Druckbeiwert c_{pw} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β
- Abb. 18 Druckbeiwert c_{ps} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β
- Abb. 19 Druckbeiwert c_{pn} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β
- Abb. 20 Druckbeiwert c_{po} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β
- Abb. 21 Druckbeiwert c_{pd} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β
- Abb. 22 Druckverteilung längs der Mittelschnitte an Westseite und Dach bei Normal- und Übereckanströmung
- Abb. 23 Druckverteilung längs der Mittelschnitte an Südseite, Dach und Nordseite bei Normal- und Übereckanströmung

- Abb. 24 Druckverteilung längs der vertikalen Mittelschnitte bei Normalanströmung nach Castro/Robins [6]
- Abb. 25 Druckverteilung längs der vertikalen Mittelschnitte bei Übereckanströmung nach Castro/Robins [6]
- Abb. 26 Druckverteilung längs der Mittelschnitte an Westseite, Südseite und Ostseite bei Normal- und Übereckanströmung
- Abb. 27 Druckverteilung längs der horizontalen Mittelschnitte bei Normalanströmung nach Castro/Robins [6]
- Abb. 28 Druckverteilung längs der horizontalen Mittelschnitte bei Übereckanströmung nach Castro/Robins [6]
- Abb. 29 Druckverteilung längs der horizontalen Mittelschnitte nach Sakamoto/Arie [18]
- Abb. 30 Mittlere Druckbeiwerte an der Luvseite (Westseite) an Großausführung und Modell nach Pucher [17]
- Abb. 31 Mittlere Druckbeiwerte an der Leeseite (Ostseite) an Großausführung und Modell nach Pucher [17]
- Abb. 32 Mittlere Druckbeiwerte am Dach an Großausführung und Modell nach Pucher [17]
- Abb. 33 Mittlere Druckbeiwerte an der Südseite an Großausführung und Modell nach Pucher [17]
- Abb. 34 Druckverteilung längs der Mittelschnitte an Großausführung und Modell nach Pucher [17]

	c_{fx}		c_{fy}		c_{fz}	
	$\beta=0^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=45^\circ$
DIN 1055 Teil 4	1,2	0,8	0	0,8	—	—
Akins et al. [1]	1,25	1,1	0	1,1	1,0	0,75
Sakamoto et al. [18]	0,8 ($\beta=5^\circ$)	0,7	-0,02 ($\beta=5^\circ$)	0,7	—	—
Großausführung	0,9	0,85	0	0,85	0,75	0,55

Tab. 1: Vergleich der Kraftbeiwerte bei Normal- und Übereckanströmung

Gebäudefläche	DIN 1055 Teil 4	Großausführung		
	c_p	$c_p(\beta=0^\circ)$	$c_{p,max}, c_{p,min}$	β
Westseite (Luv)	+0,8	+0,62	+0,67	24°
Südseite	-0,8	-0,71	-0,71	0°
Ostseite (Lee)	-0,5	-0,29	-0,44	24°
Nordseite	-0,8	-0,7	-0,74	9°
Dach	-0,6	-0,75	-0,77	11°

Tab. 2: Über die einzelnen Gebäudeflächen gemittelte Druckbeiwerte bei Normalanströmung

Symbol	$\beta [^\circ]$	$U_{10} [\text{m/s}]$	$\alpha [-]$
□	0	6.8	0.13
γ	358	10.4	0.18
+	356	13.6	0.15
□	41	12.6	0.16
×	45	12.6	0.16
△	47	12.8	0.15

Tab. 3: Anströmbedingungen bei Normal- und Übereckanströmung



Abb. 1: Ansicht des Versuchsgebäudes Osten (oben)
und von Westen

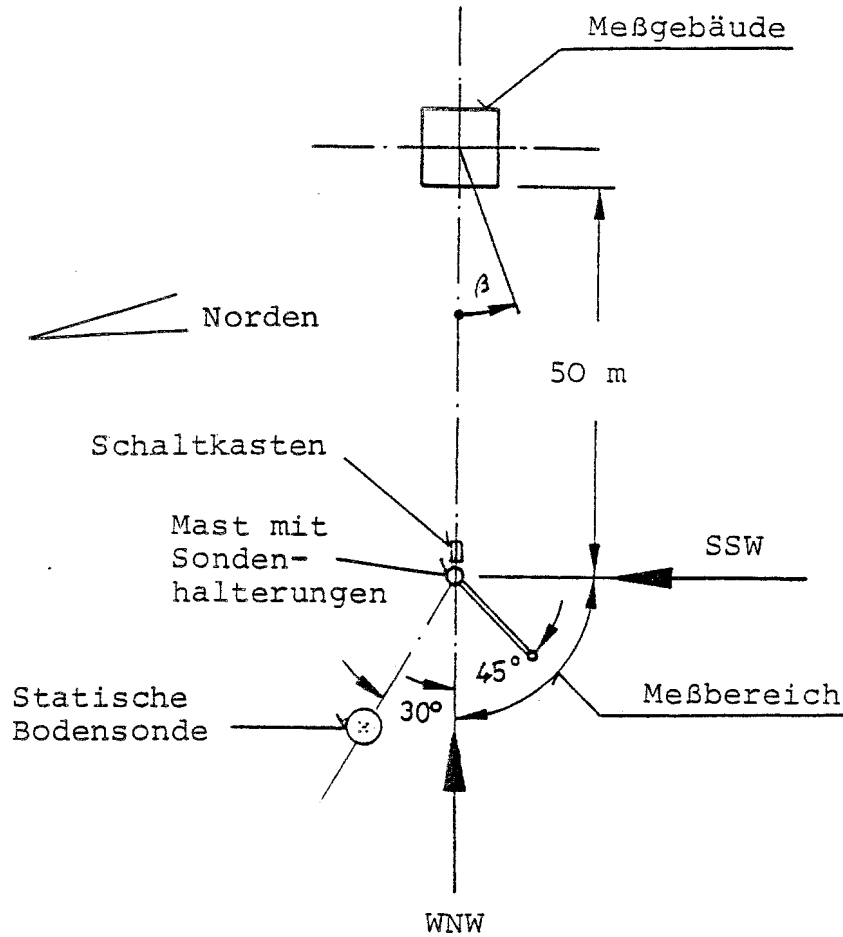


Abb. 2 : Relative Lage des Mastes mit Sondenhalterungen und der statischen Bodensonde

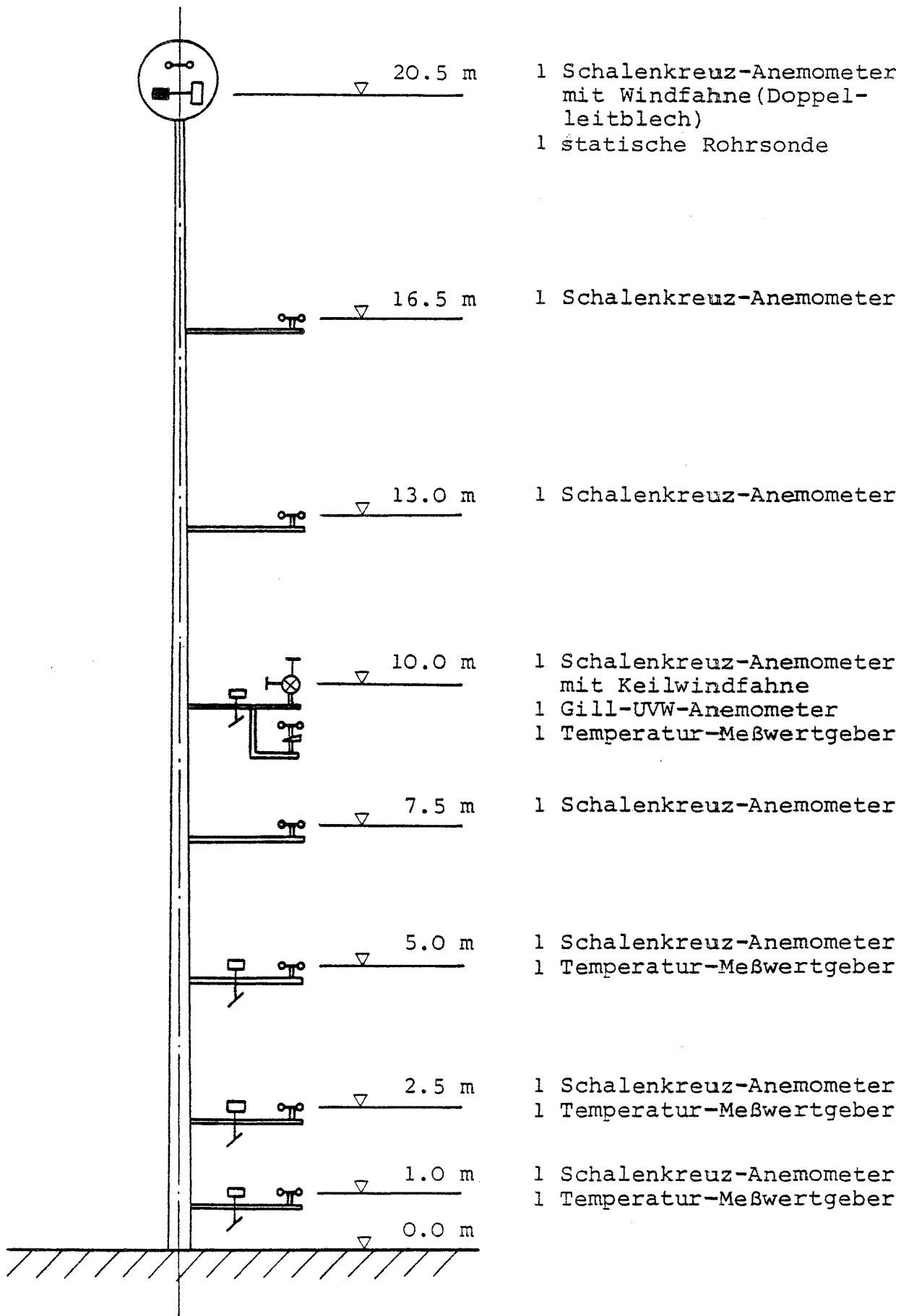


Abb. 3 : Mast zur Windgeschwindigkeits- und Temperaturmessung

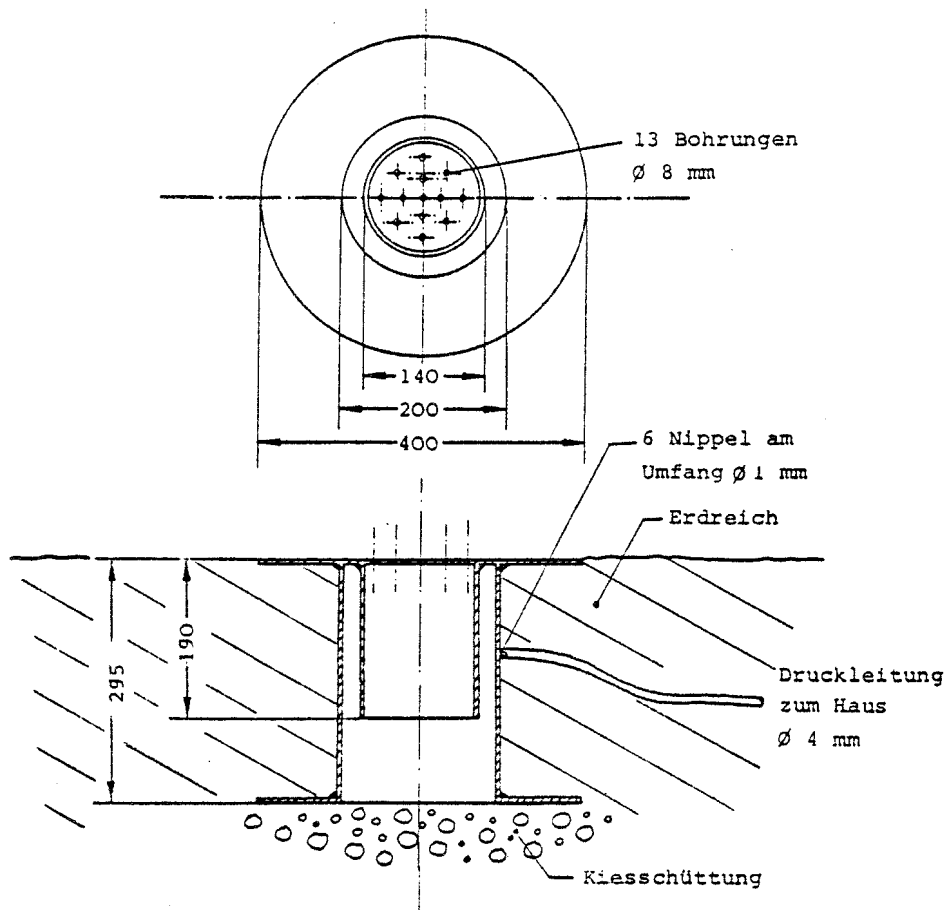
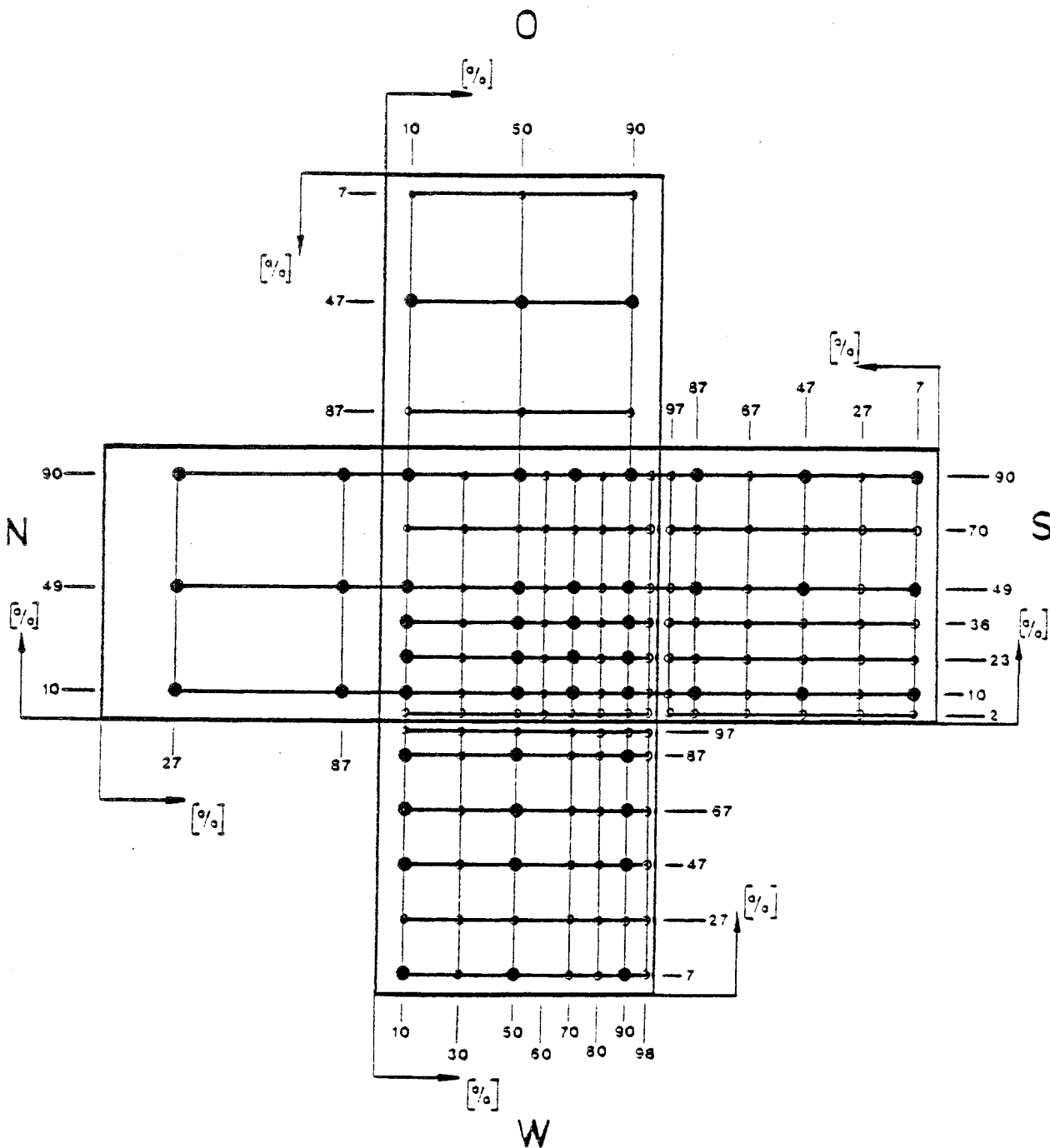


Abb. 4: Statische Bodensonde



	Anzahl der Druckmeßbohrungen bei Gesamtflächenmessung	Anzahl der Druckmeßbohrungen bei Einzelflächenmessung
	● -Meßstellen bestückt	alle Meßstellen bestückt
Westen	12	42
Süden	9	42
Osten	3	9
Norden	6	6
Dach	20	56

Abb. 5 : Anordnung der Druckmeßstellen

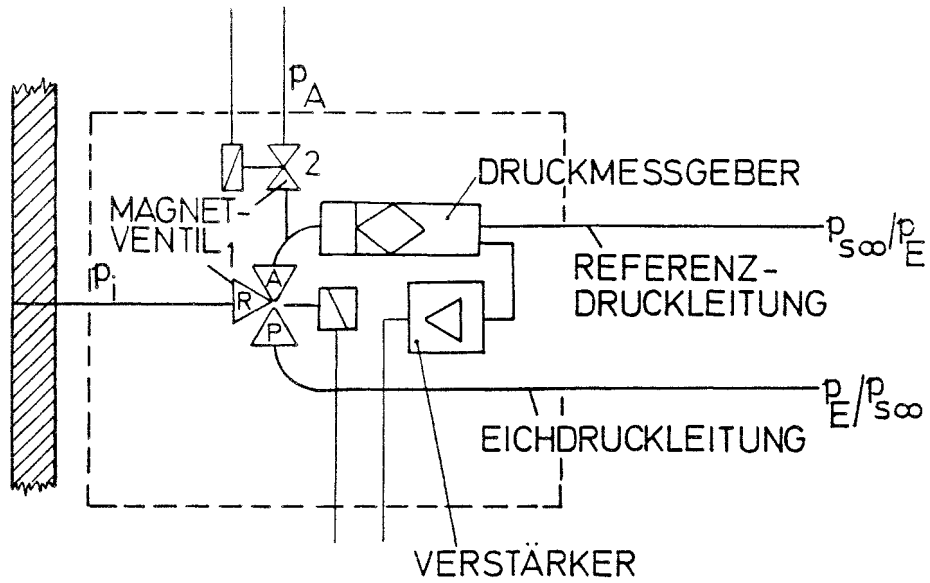


Abb. 6 : Prinzipschema einer Druckmeßeinheit

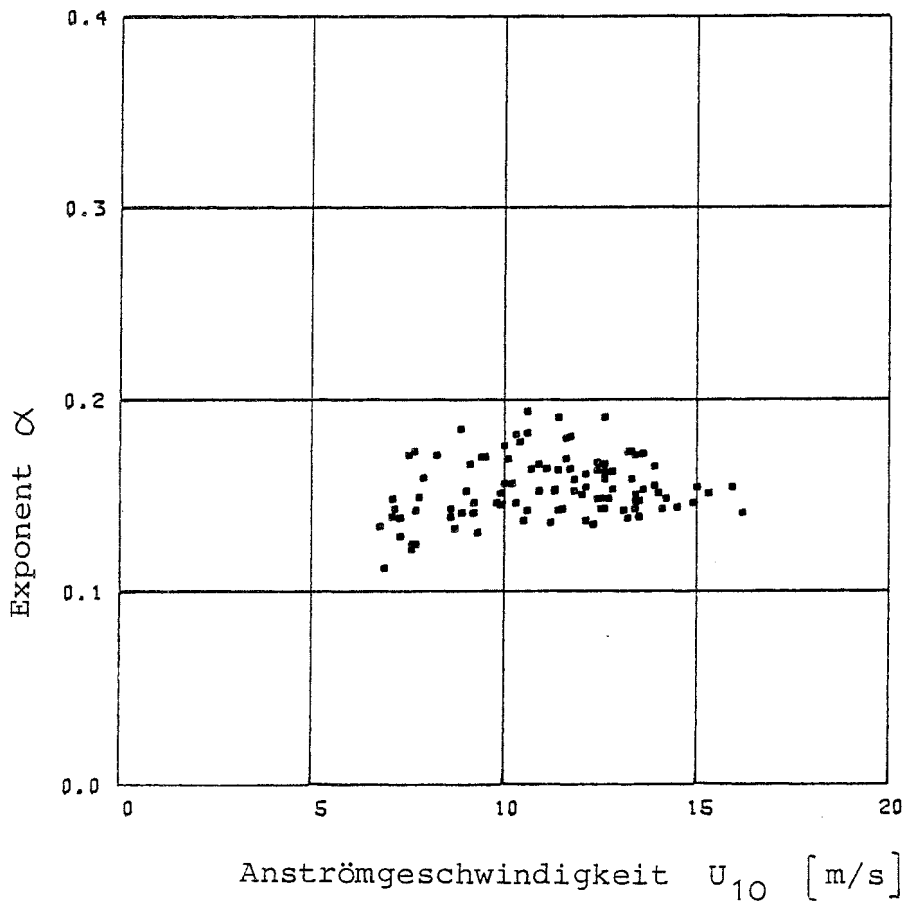


Abb. 7 : Exponent α in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit U_{10}

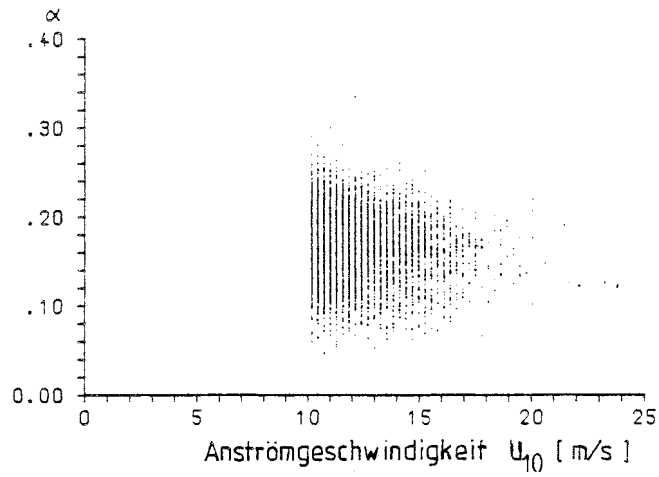


Abb. 8 : Exponent α in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit U_{10} nach Schroers/Lösslein [19]

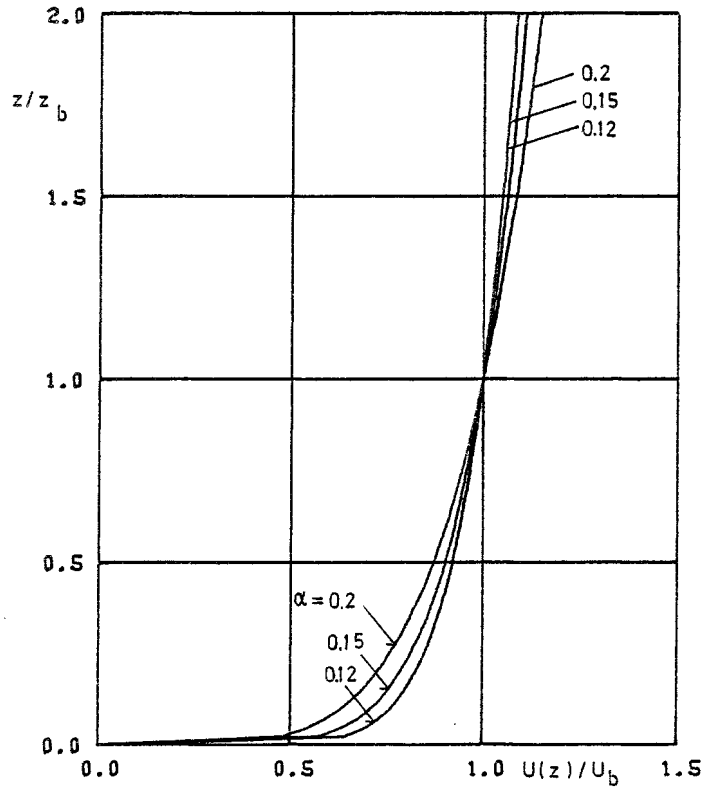


Abb. 9: Windgeschwindigkeitsprofile nach Gl. (1)

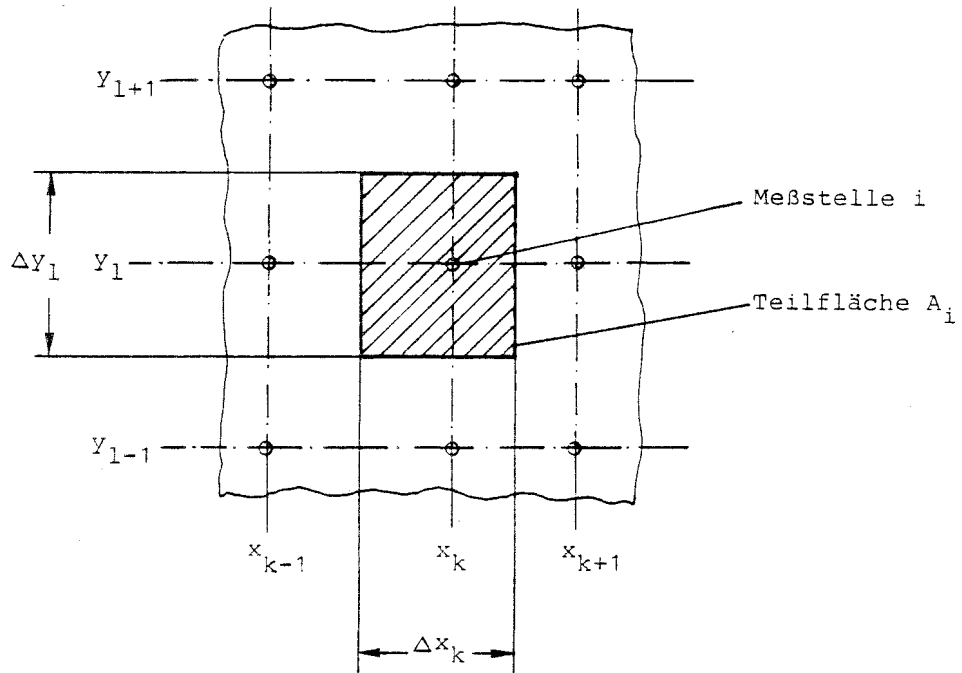


Abb. 10: Definitionsskizze der Teilfläche A_i

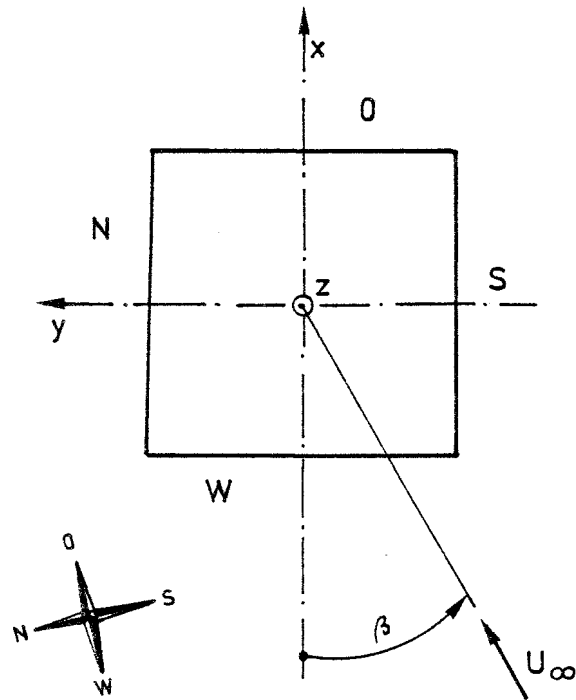


Abb. 11: Festlegung des Koordinatensystems

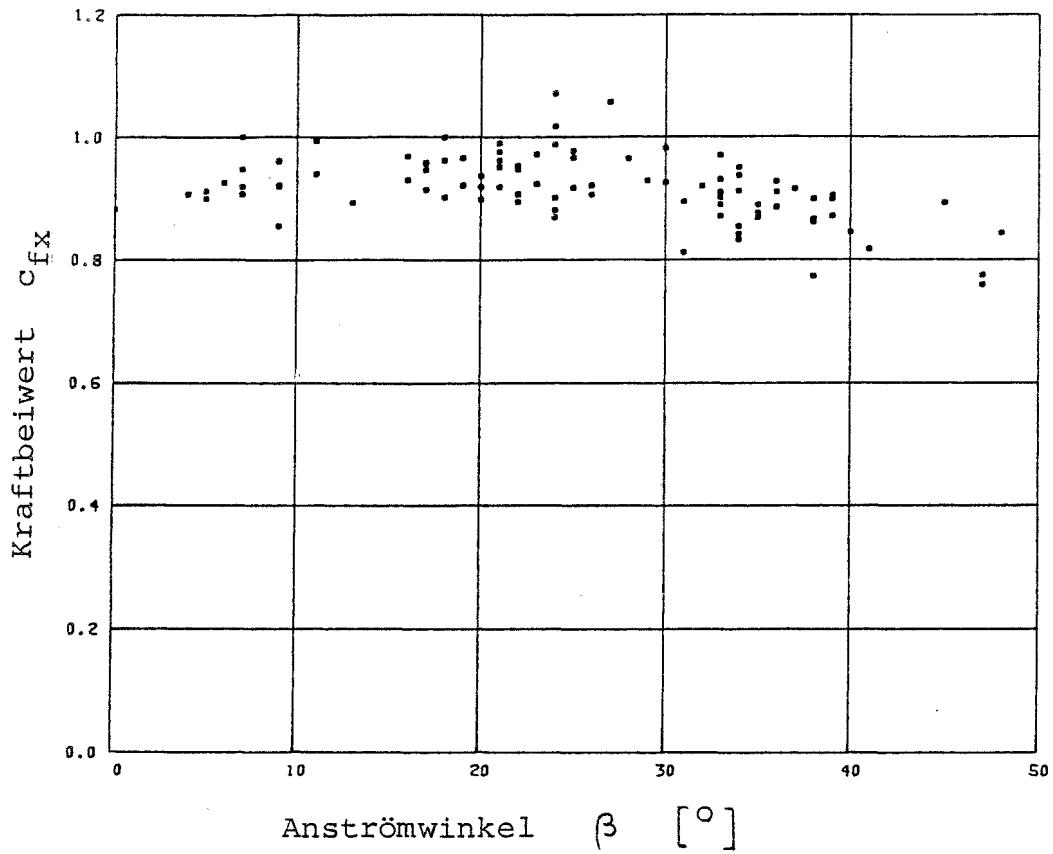


Abb. 12: Kraftbeiwert c_{fx} in Abhängigkeit vom Anström-
winkel β

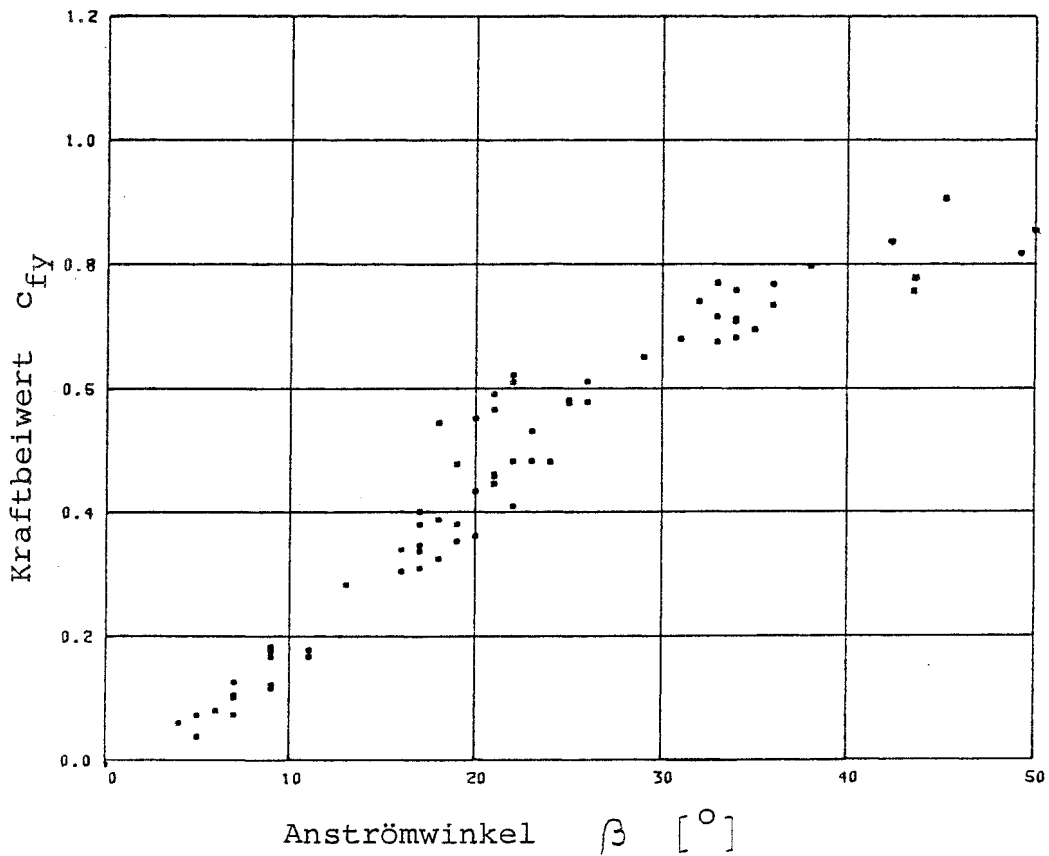


Abb. 13: Kraftbeiwert c_{fy} in Abhängigkeit vom Anström-
winkel β

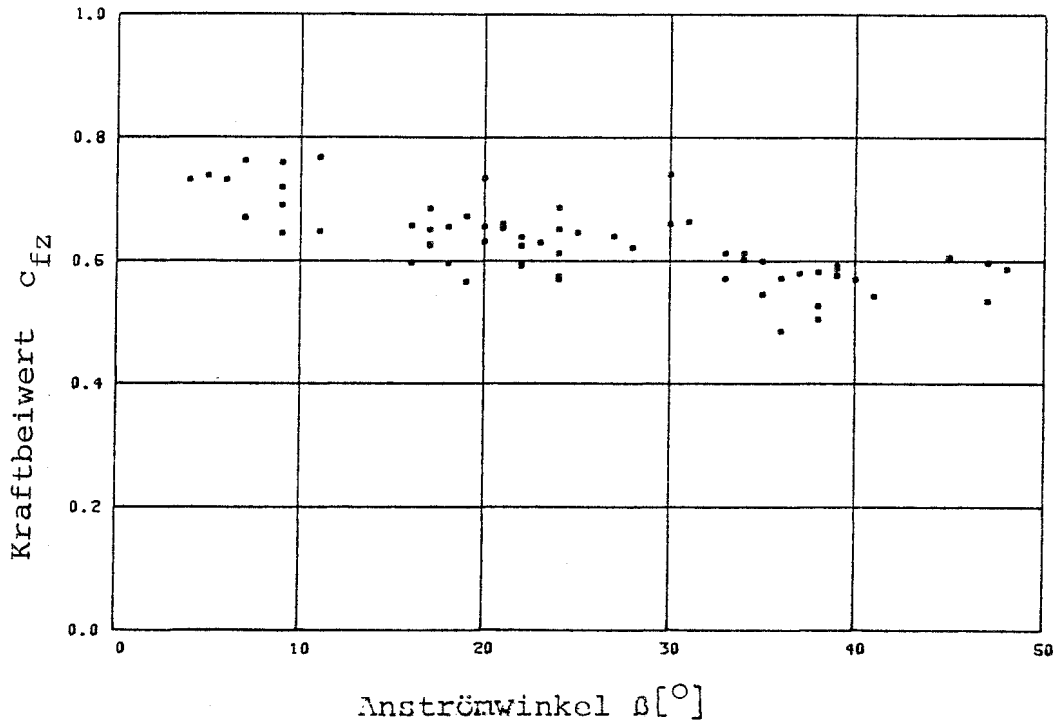


Abb. 14: Kraftbeiwert c_{fz} in Abhängigkeit vom Anström-
winkel β

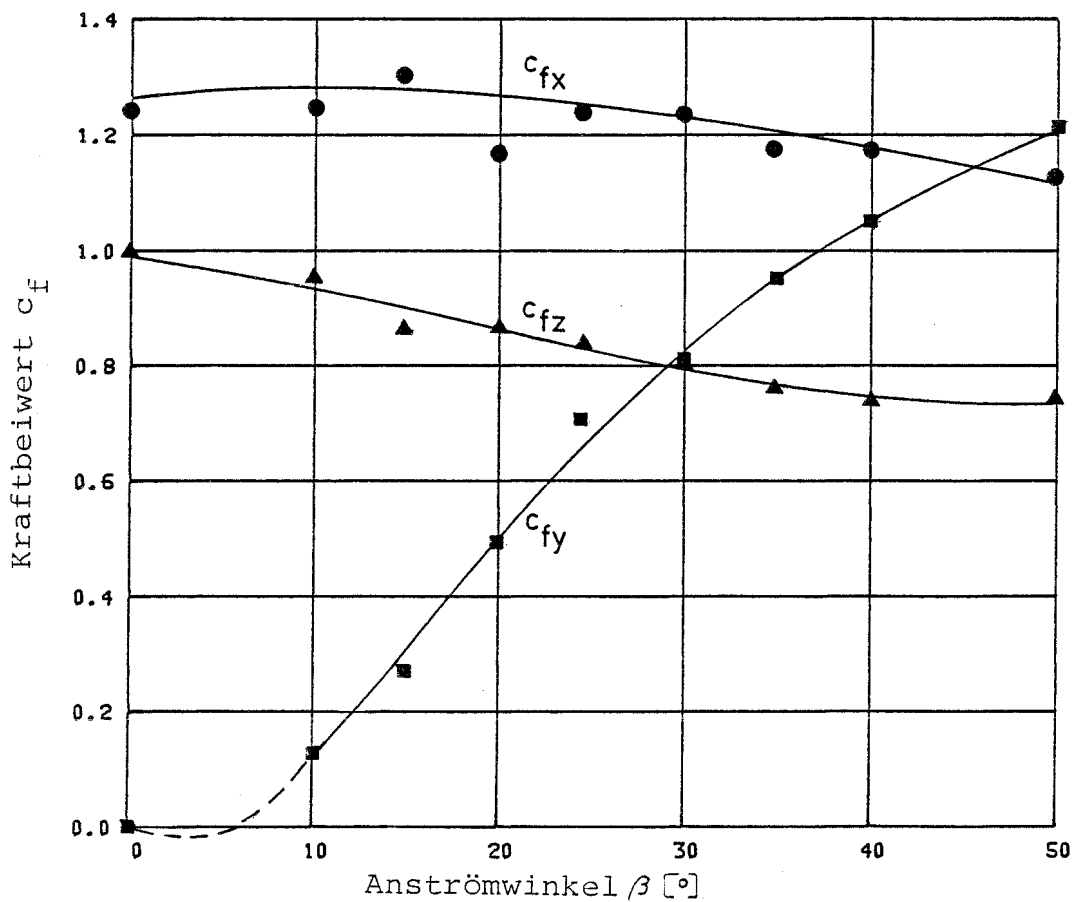


Abb. 15: Kraftbeiwerte in Abhängigkeit vom Anströmwinkel
nach Akins et al. [1] ($\delta/H_M = 5$, $\alpha = 0,12$)

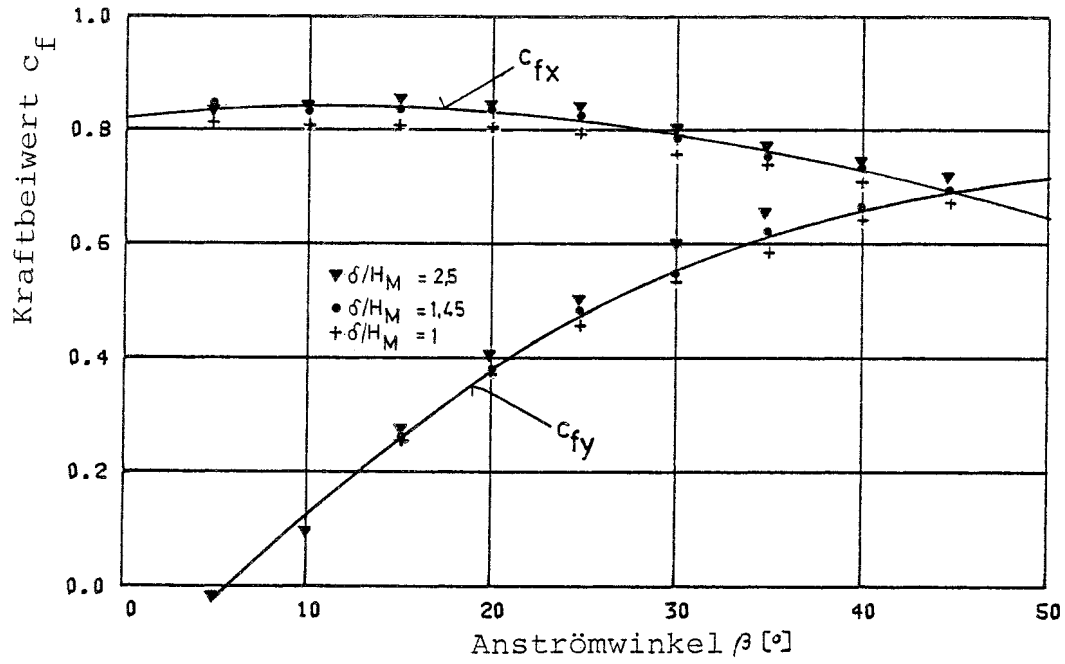


Abb.16: Kraftbeiwerte in Abhängigkeit vom Anströmwinkel nach Sakamoto et al. [18] ($\alpha \approx 0,17$)

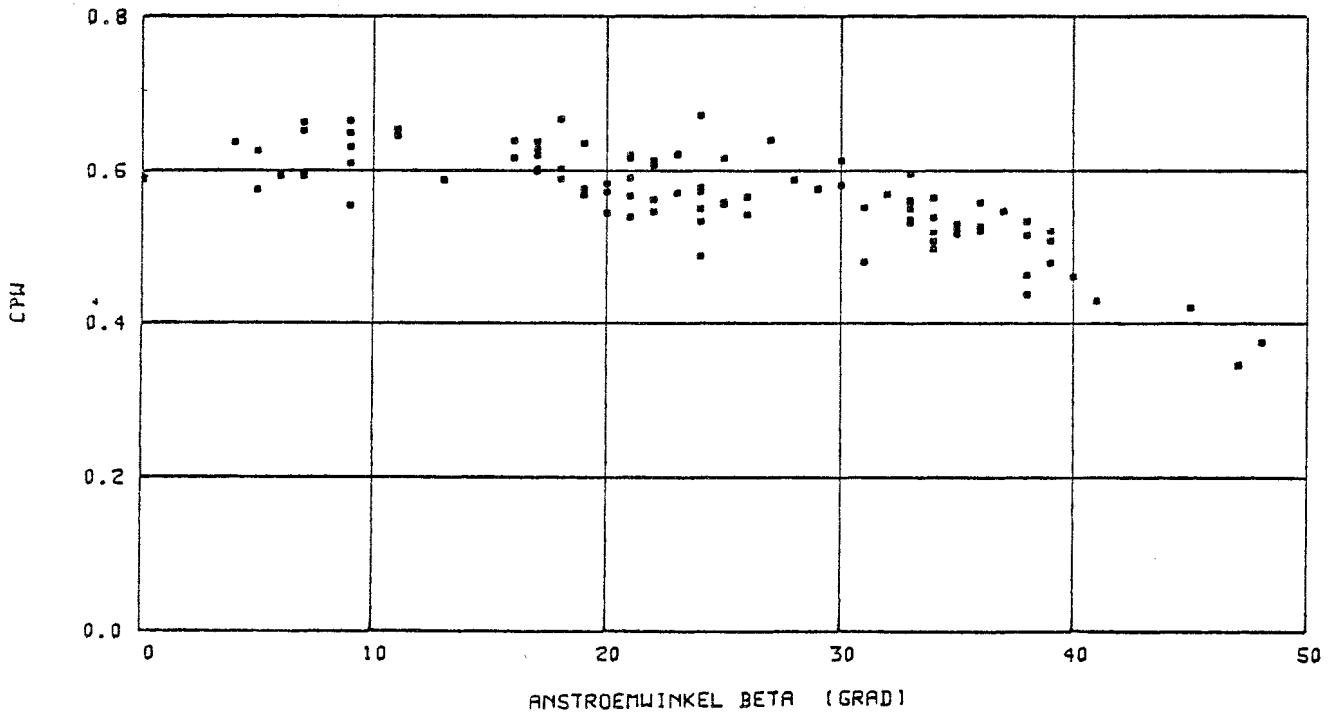


Abb.17: Druckbeiwerte c_{pW} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β

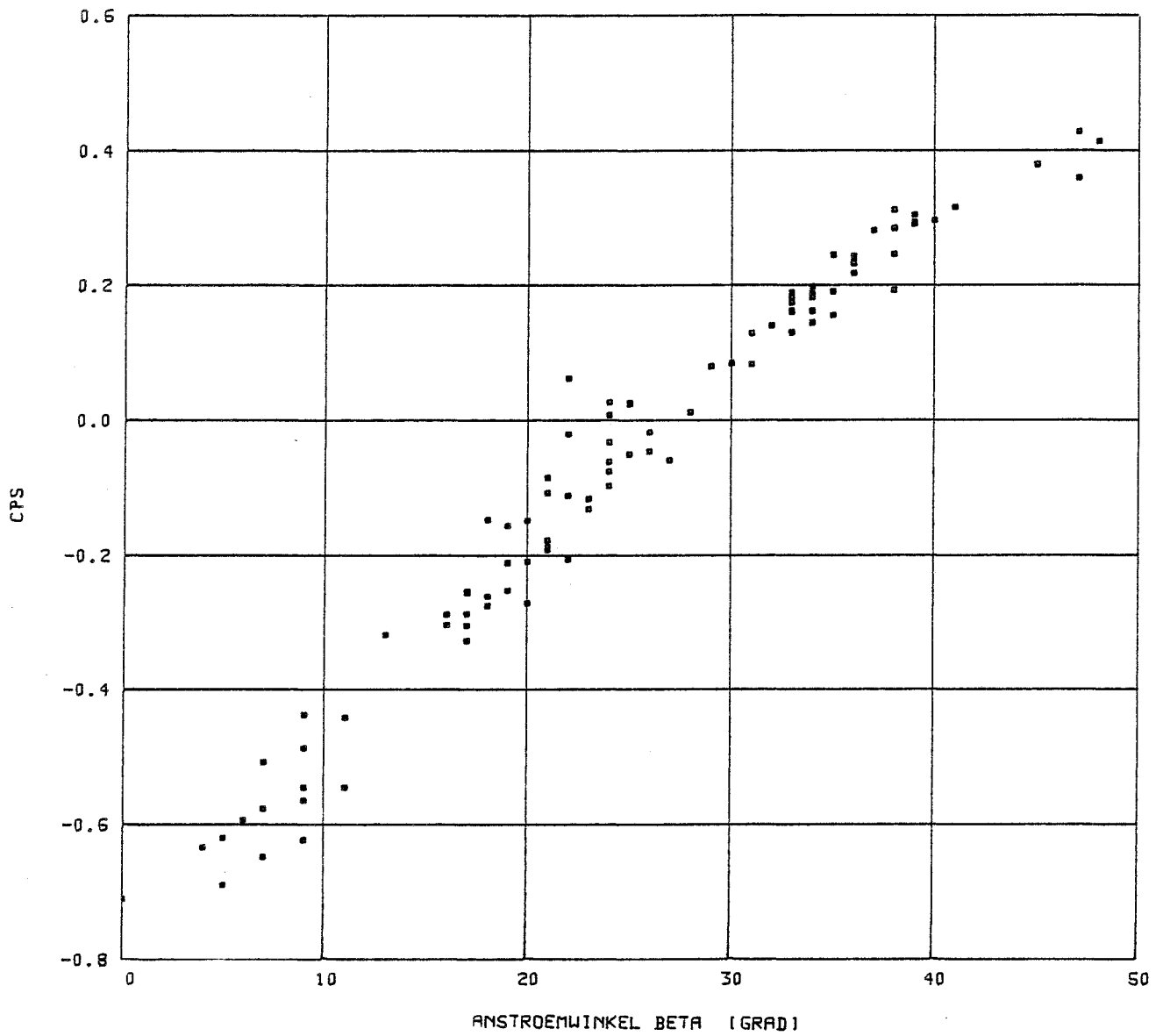


Abb. 18 : Druckbeiwert c_{ps} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β

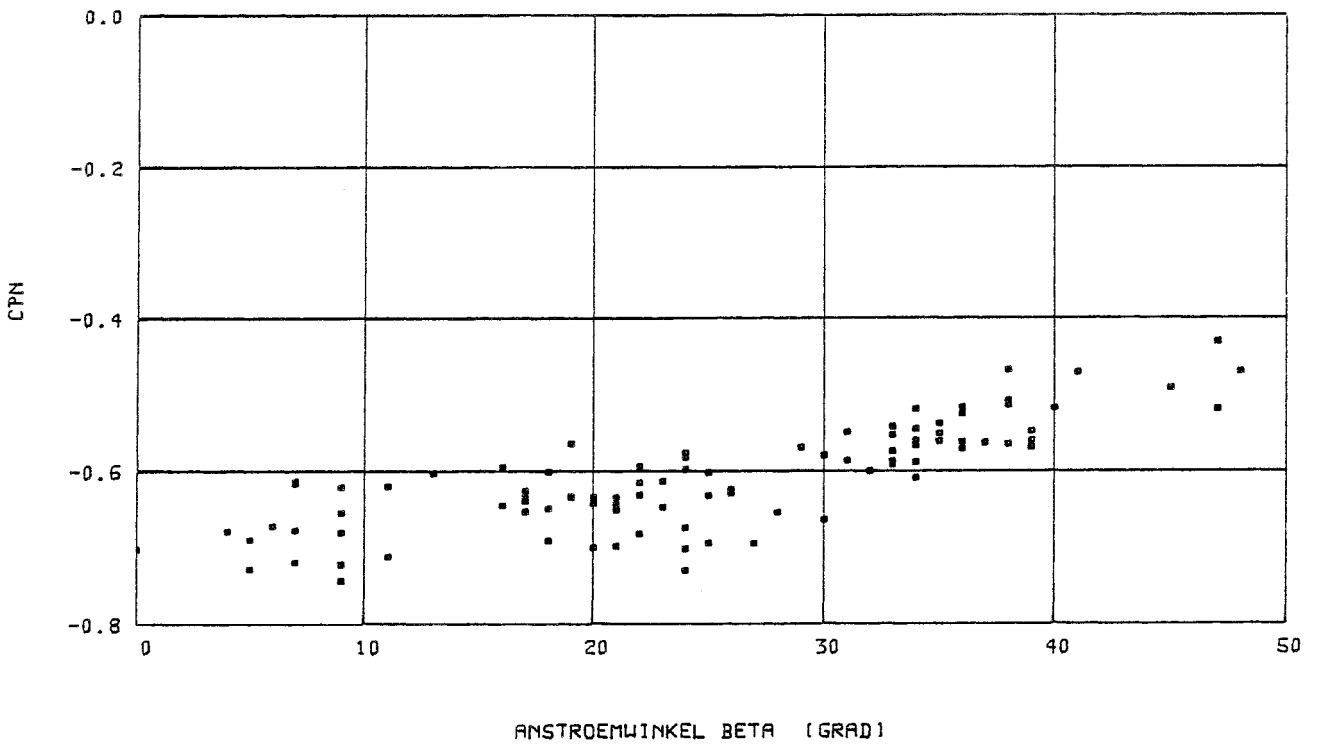


Abb. 19 : Druckbeiwert c_{pN} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β

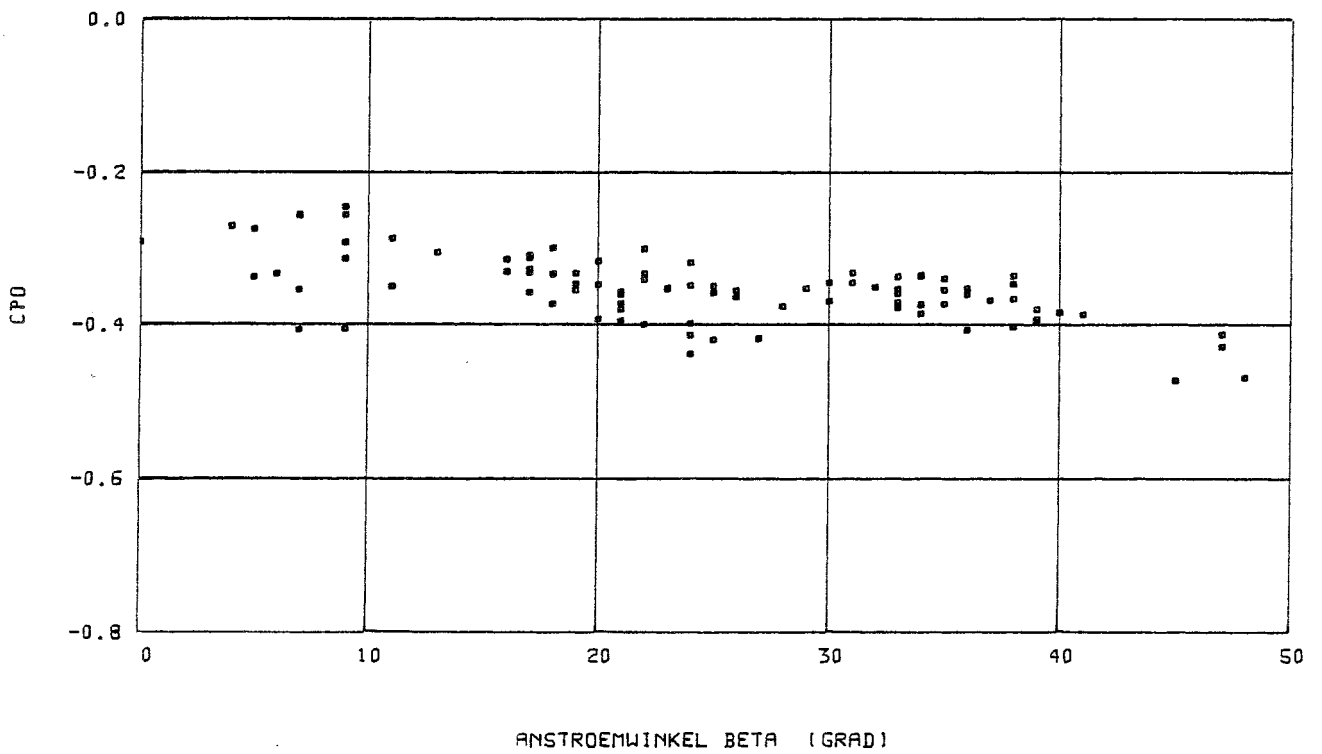


Abb. 20 : Druckbeiwert c_{pD} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β

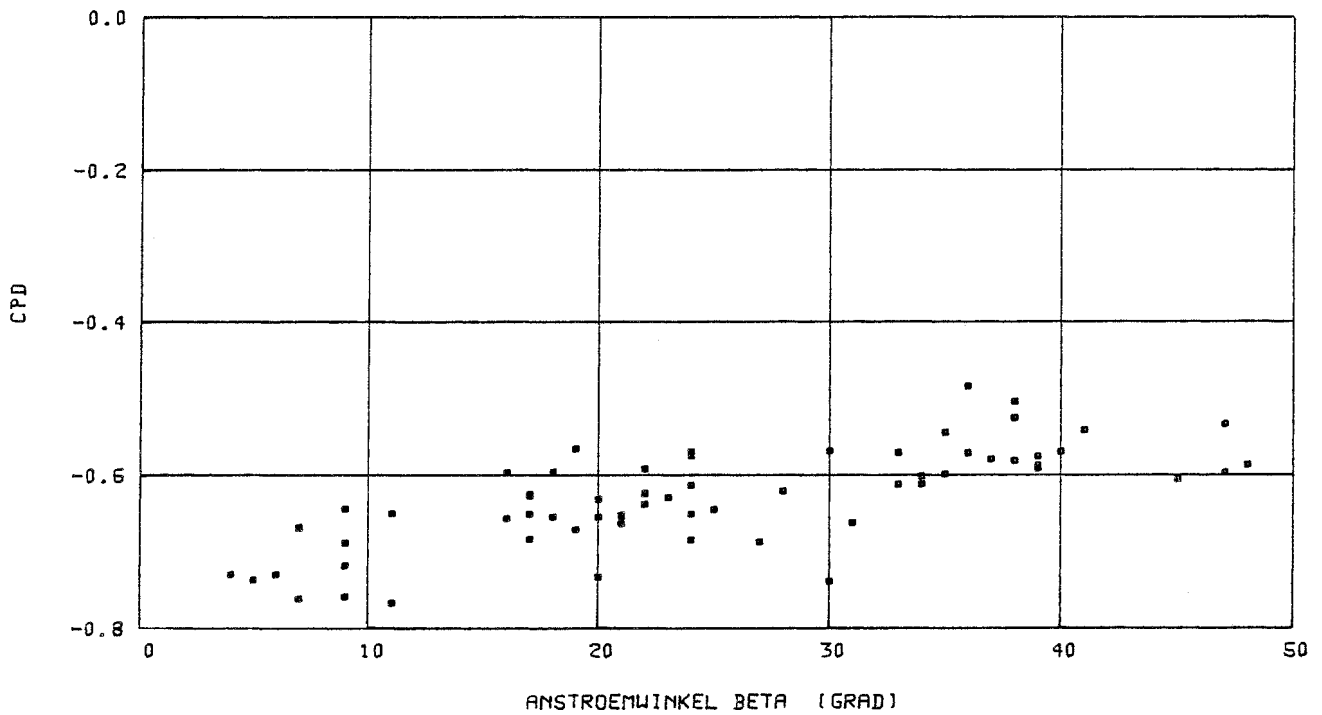


Abb. 21 : Druckbeiwert c_{pD} in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β

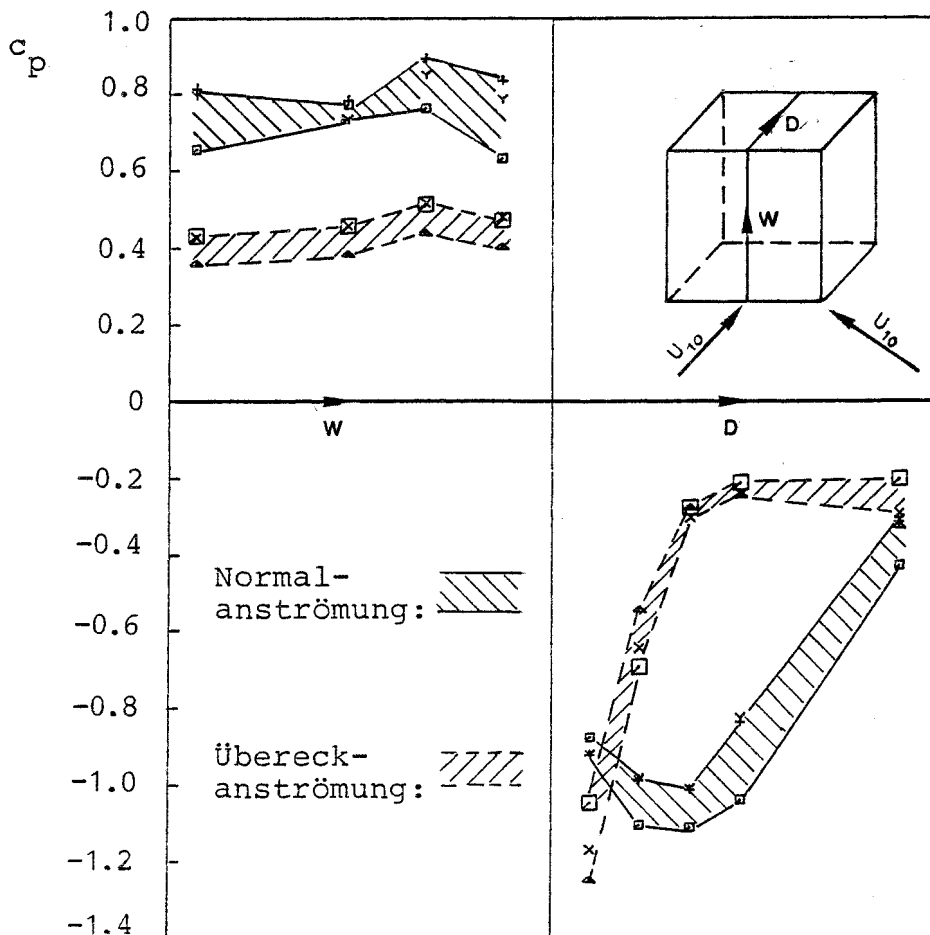


Abb. 22 : Druckverteilung längs der Mittelschnitte an Westseite und Dach bei Normal- u. Übereckanströmung

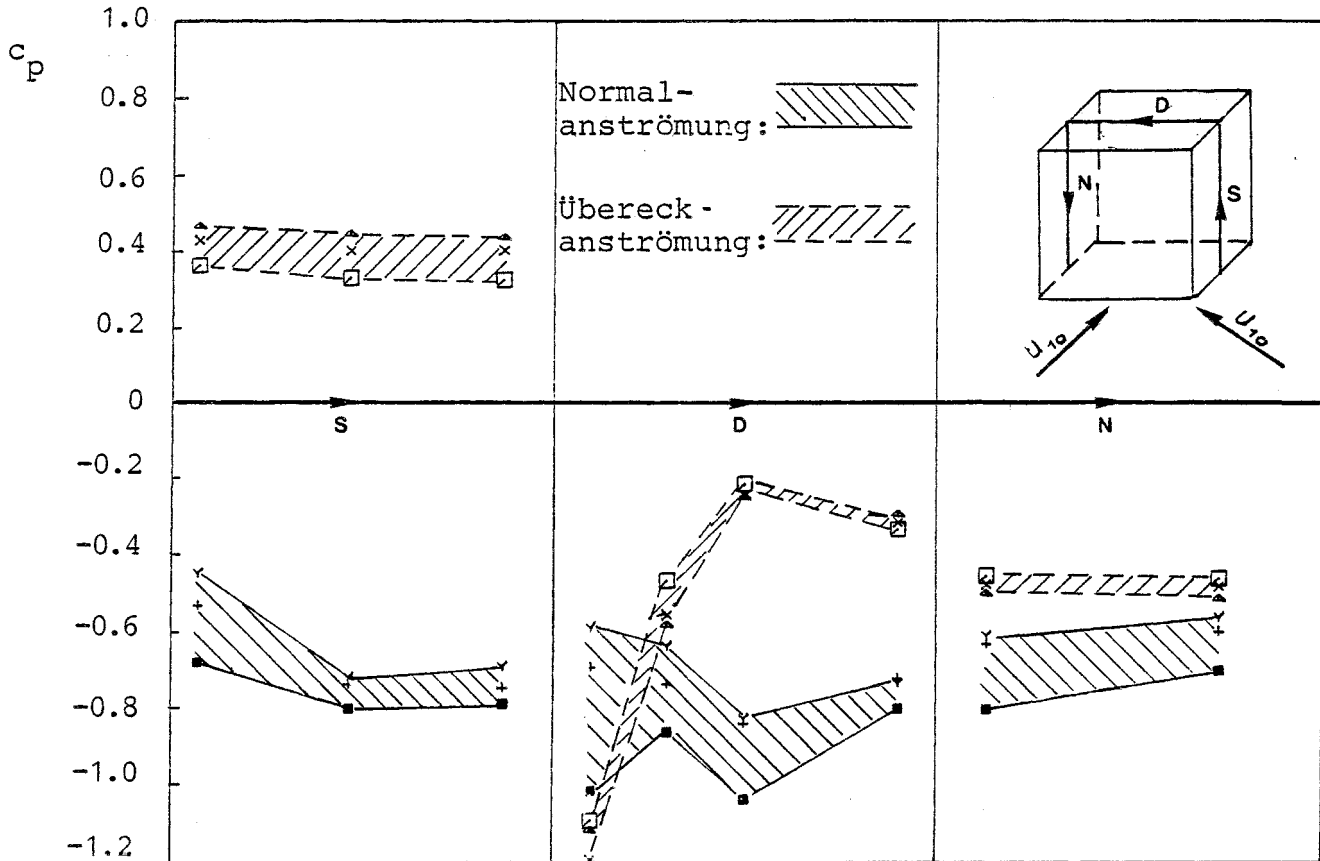


Abb. 23 : Druckverteilung längs der Mittelschnitte an Südseite, Dach und Nordseite bei Normal- und Übereckanströmung

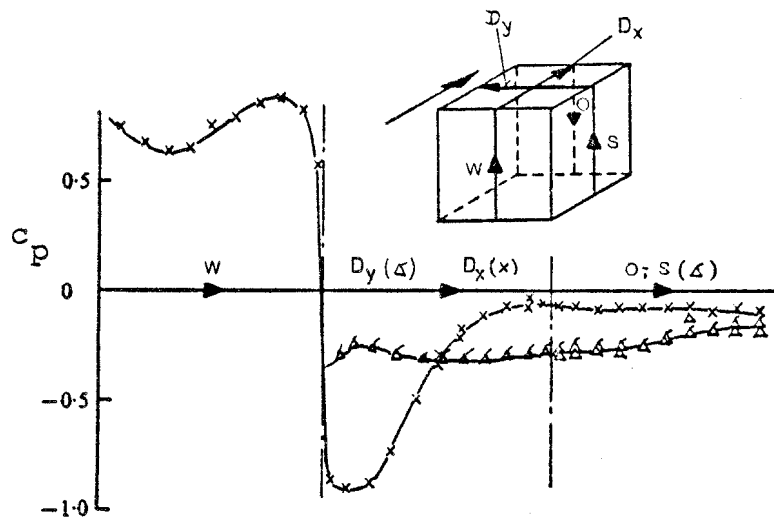


Abb. 24 : Druckverteilung längs der vertikalen Mittelschnitte bei Normalanströmung nach Castro/Robins [6]

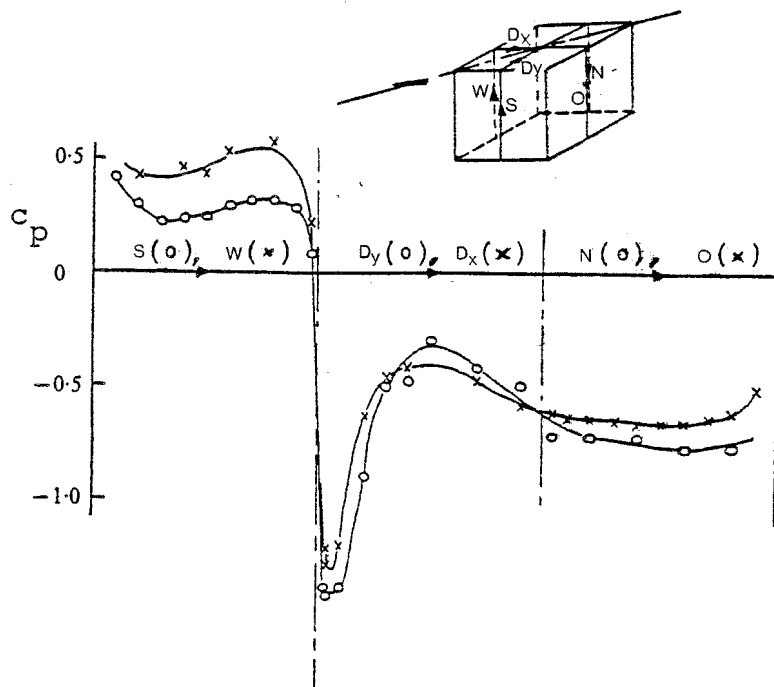


Abb. 25 : Druckverteilung längs der vertikalen Mittelschnitte bei Übereckanströmung nach Castro/Robins [6]

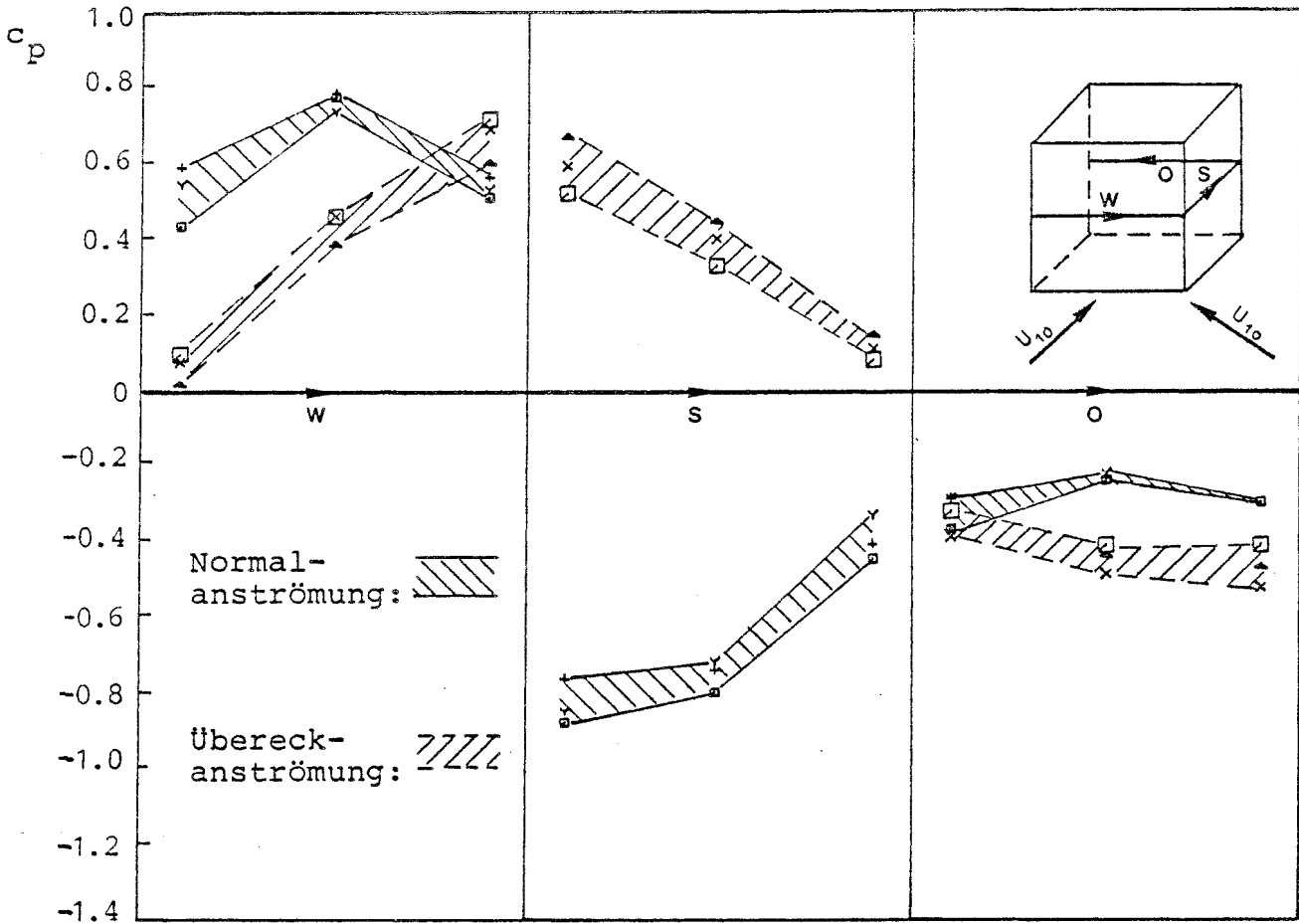


Abb. 26 : Druckverteilung längs der Mittelschnitte an Westseite, Südseite und Ostseite bei Normal- und Übereckanströmung

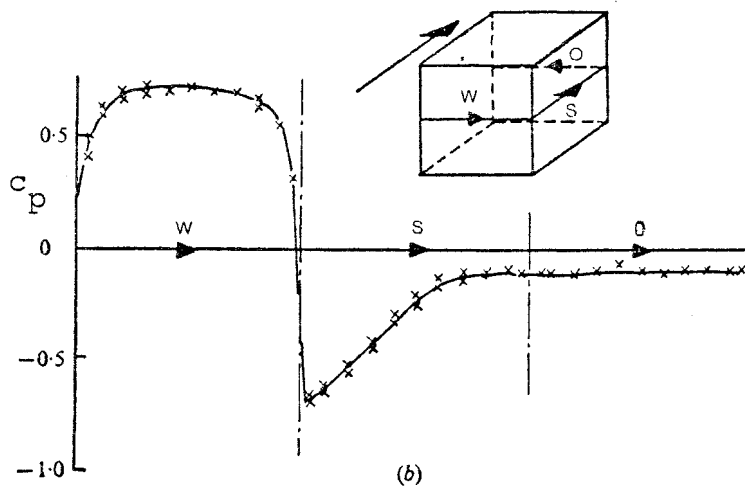


Abb. 27 : Druckverteilung längs der horizontalen Mittelschnitte bei Normalanströmung nach Castro/Robins [6]

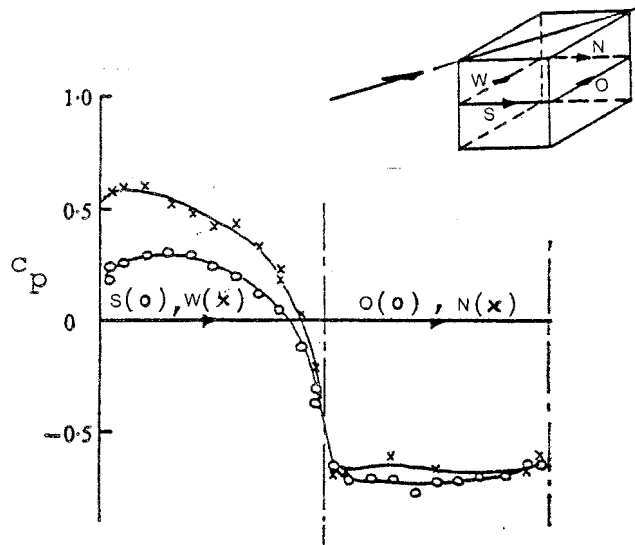


Abb. 28 : Druckverteilung längs der horizontalen Mittelschnitte bei Übereckanströmung nach Castro/Robins [6]

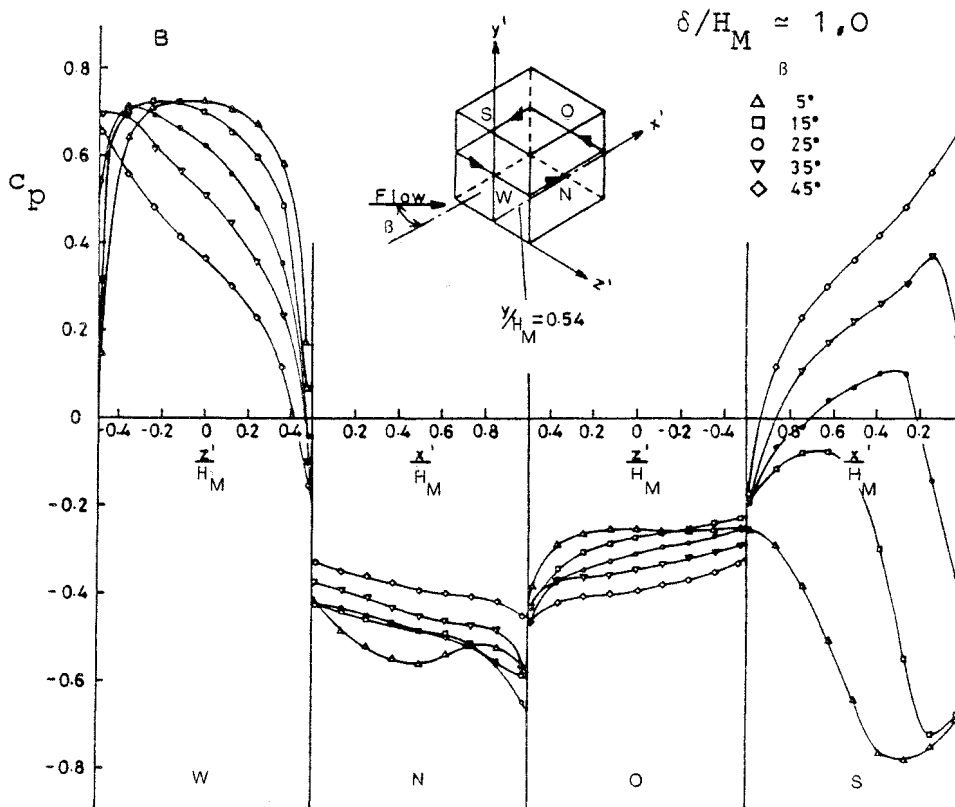


Abb. 29 : Druckverteilung längs der horizontalen Mittelschnitte nach Sakamoto/Arie [18]

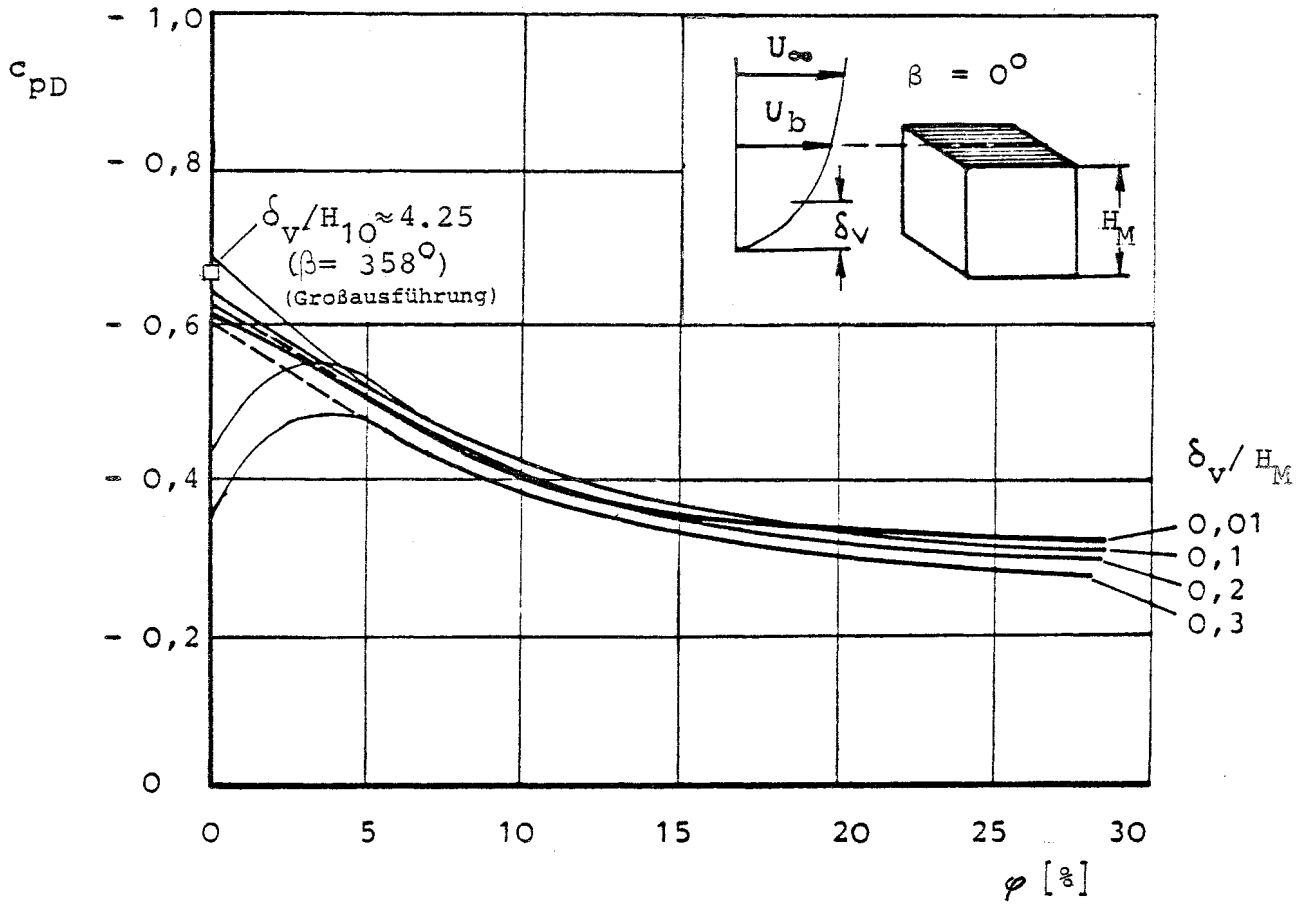


Abb. 32: Mittlere Druckbeiwerte am Dach an Großausführung und Modell nach Pucher [17]

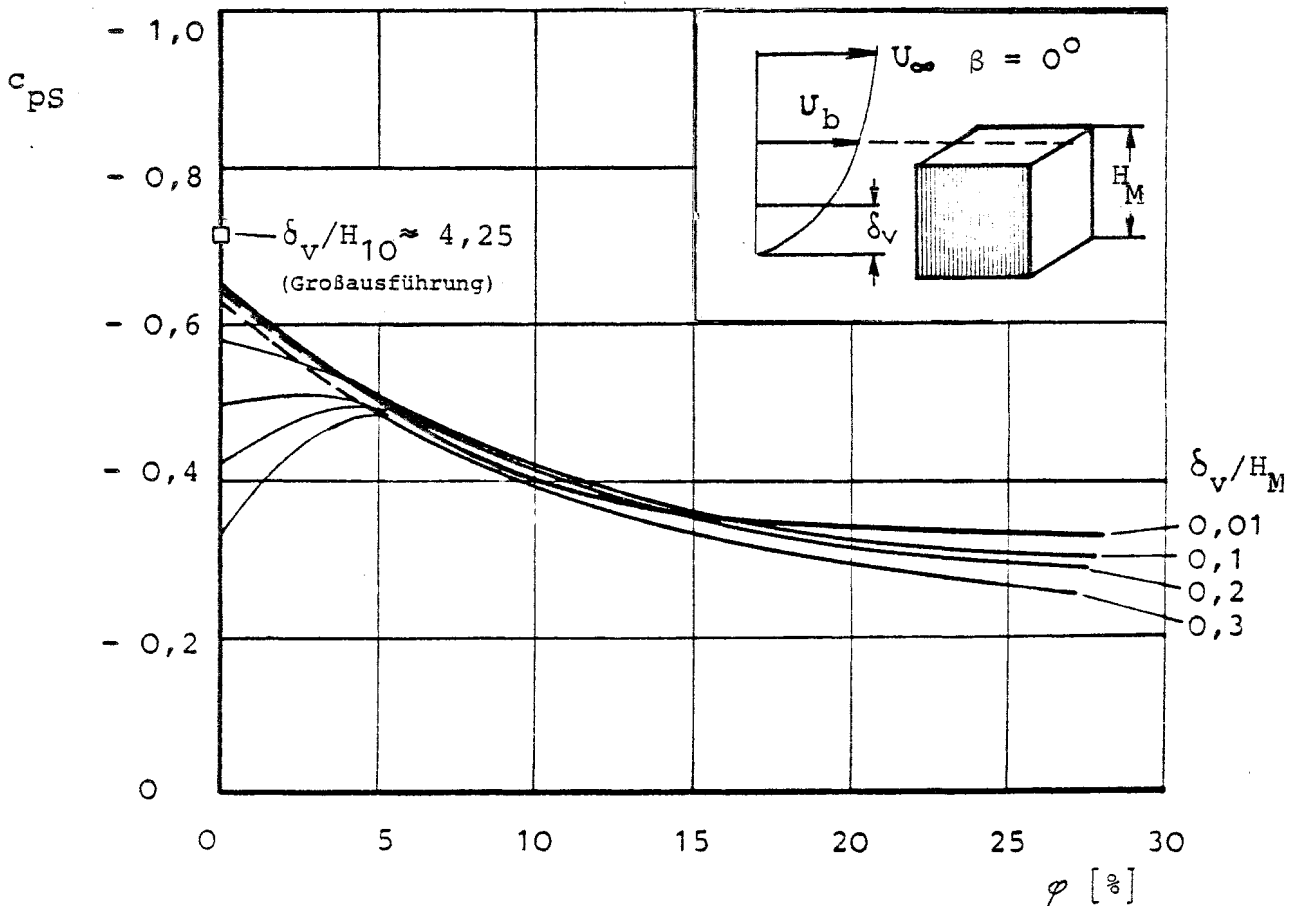


Abb. 33: Mittlere Druckbeiwerte an der Südseite an Großausführung und Modell nach Pucher [17]

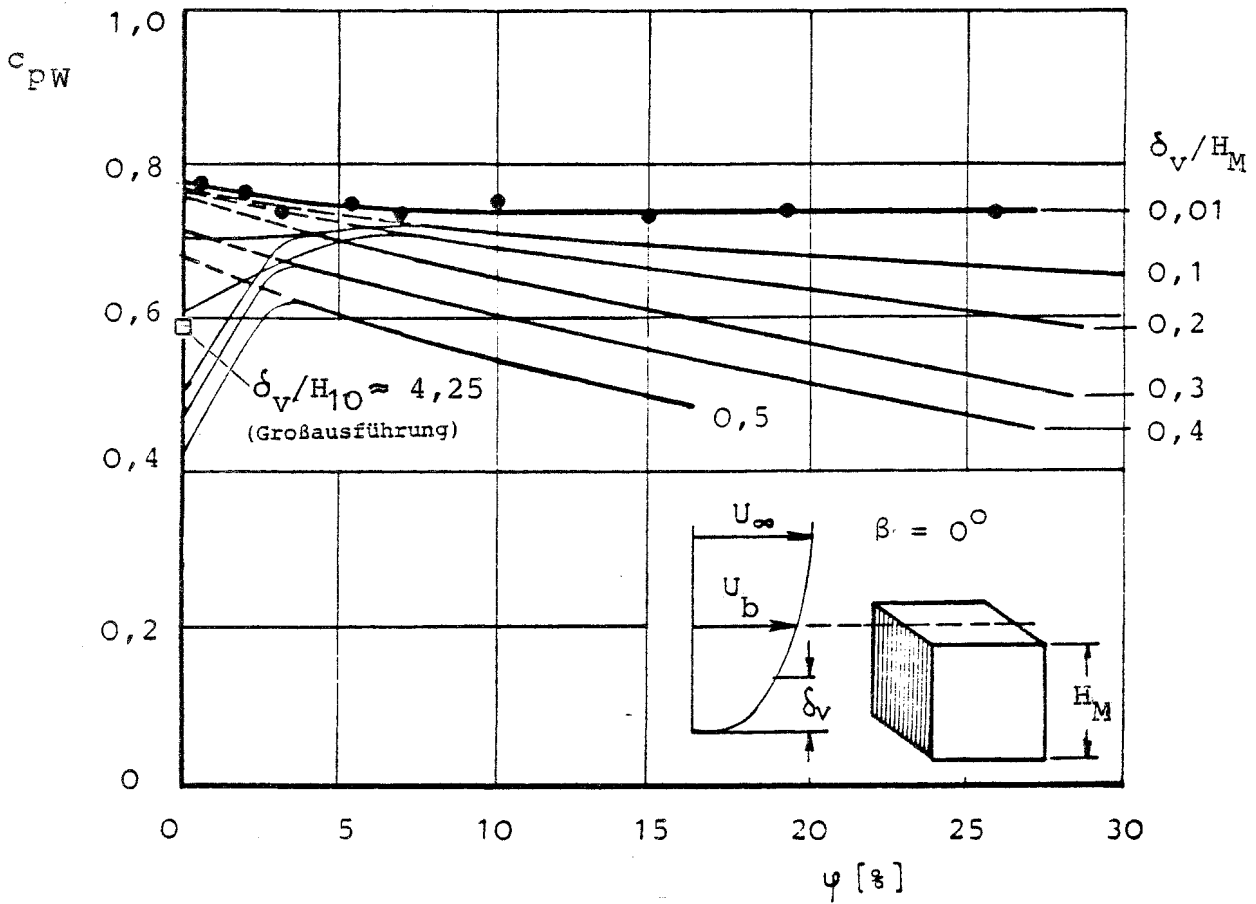


Abb. 30: Mittlere Druckbeiwerte an der Luvseite (Westseite) an Großausführung und Modell nach Pucher [17]

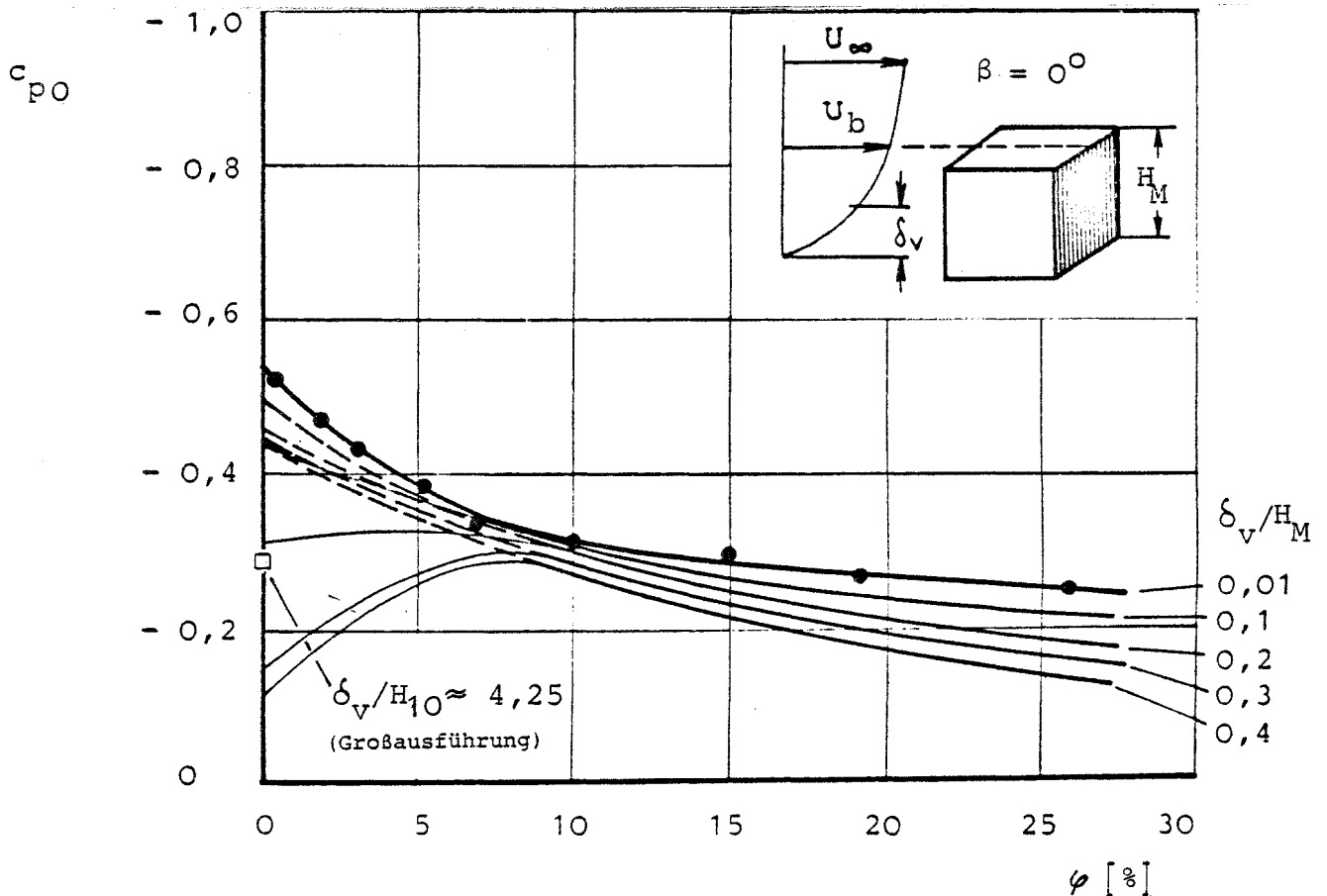


Abb. 31: Mittlere Druckbeiwerte an der Leeseite (Ostseite) an Großausführung und Modell nach Pucher [17]

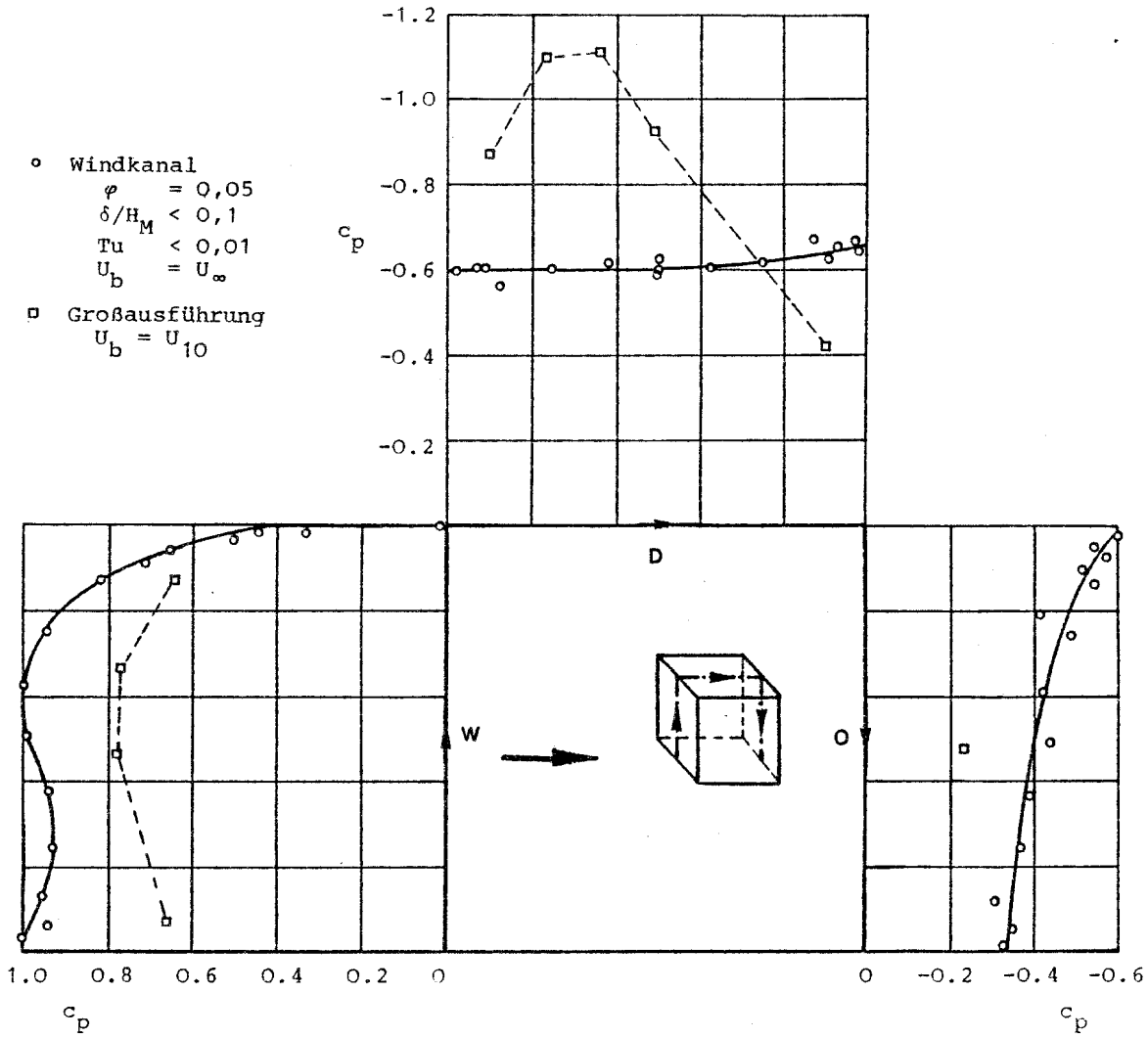


Abb. 34 : Druckverteilung längs der Mittelschnitte an Großausführung und Modell nach Pucher [17]