

AIR INFILTRATION CENTRE - WIND PRESSURE WORKSHOP
Brussels, Belgium
21-22 March 1984

Are
1417.
#2012

PAPER 5

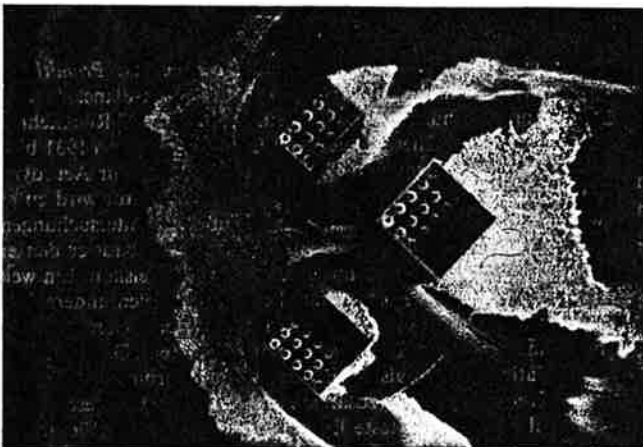
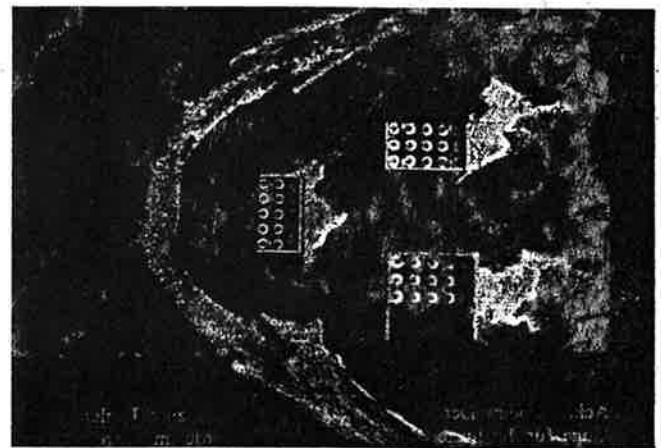
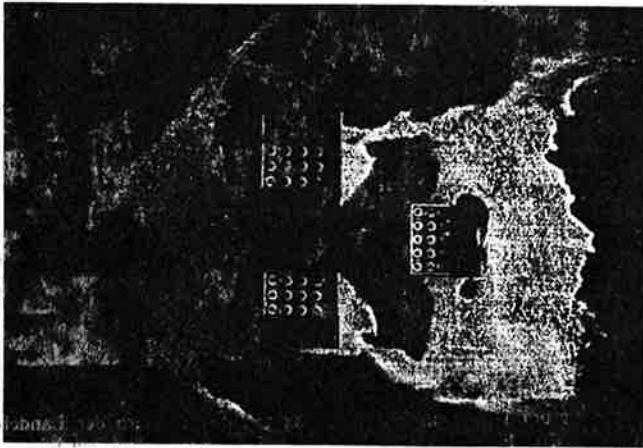
AERODYNAMIC INTERFERENCE BETWEEN TALL BUILDINGS -
WIND TUNNEL INVESTIGATIONS

PROF. S. PALFFY, DIPL.ING. ETH/SIA MEM.ASME
Consulting Engineer
Fluid Engineering
Geissberg-str. 47
CH 5400 Baden
Switzerland

Schweizerische Bauzeitung 36 (11), 16 March 1978
(Dedicated to Jakob Ackeret on his 80th birthday)

Berichtigung

Bei der Montage sind in Heft 11 (S. 197) vier Filme falsch angeordnet worden. Die richtige Reihenfolge zeigt die beiliegende Darstellung.



Es ist zu wünschen, dass künftig neben den Schadenfalluntersuchungen vermehrt eine gezielte und koordinierte Grundlagenforschung und Weiterentwicklung der Gebäudeaerodynamik im weitesten Sinne beginnt. Hierzu gehören auch die Probleme der *Fernheizwerke, kalorischen Kraftwerke und Kühltürme, Rauchgasausbreitung von Müllverbrennungsanlagen*, usw. Raumplaner, Architekten und Bauingenieure benötigen weitere Unterlagen von der Art der SIA-Normen. Diese lassen sich nicht mehr nebenbei von bereits bestehenden Institutionen erarbeiten, zumal deren Zielsetzung heute meist eine andere Art Aerodynamik ist. Es hat sich erwiesen, dass die Gebäudeaerodynamik nicht nur vom wissenschaftlichen Standpunkt aus betrachtet recht anregend und anspruchsvoll ist, sondern sie ist auch ein nicht mehr wegzudenkender Bestandteil für eine umweltgerechte und voraussichtliche Baupraxis. Dies erscheint durchaus berechtigt, wenn man bedenkt, dass Bauschäden, die durch Winde verursacht werden, nur noch durch glücklicherweise seltener auftretende Überschwemmungen und Erdbeben übertroffen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Ackeret J.: «Anwendung der Aerodynamik im Bauwesen.» Zeitschrift für Flugwissenschaften, Jg. 13/4, 1965.
- [2] Ackeret J. und Egli J.: «Über die Verwendung sehr kleiner Modelle für Winddruckversuche.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 1, 1966.
- [3] Wise A. F. E., Sexton D. E. und Lillywhite M. S. T.: «Studies of Air-flow Round Buildings.» Building Research 38.
- [4] Davenport A. G.: «The Treatment of Wind Loading on Tall Buildings.» Proc. of the Symp. on Tall Buildings, Southampton 1966.
- [5] Newberry C. W., Eaton K. J., Mayne J. R.: «Wind Loading of a Tall Building in an Urban Environment.» Symp. on Wind Effects on Buildings and Structures. Loughborough 1968.
- [6] Thomann H.: «Windwirkung auf Hochhäuser.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 8, 1974.

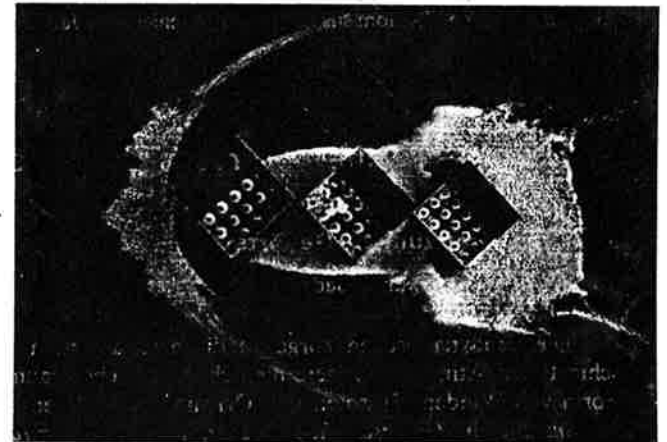


Bild 11 bis 15 (von links nach rechts). Grenzschichtstrukturen in unmittelbarer Bodennähe von Gebäudekomplexen

- [7] Truckenbrodt E.: «Windkanaluntersuchungen an Gebäuden mit rechteckigem Grundriss mit Flach- und Satteldächern.»
- [8] Haddon J. D.: «The Use of Wind-Tunnel Models for Determining the Wind Pressure on Buildings.» Civil Eng. and Public Works Review.
- [9] Krönke J.: «Untersuchungen im Windkanal über Gebäudeaerodynamik und Vorgänge in der atmosphärischen Grenzschicht.» Der Bauingenieur 48/3, 1973.
- [10] Eiffel G.: «Recherches expérimentales sur la résistance de l'air.» Paris 1907.
- [11] Kramer C., Gerhardt H. J.: «Windlasten auf Flachdächern.» BauBl. Heft 11, 1977.

Adresse des Verfassers: Prof. S. Pálffy, dipl. Masch.-Ing. ETH/MEM. ASME, Geissbergstr. 5400 Ennetbaden.

47



Ackeret beim Demonstrieren einer Methode zum Umlenken von Gasstrahlen um 180°, einer Vorrichtung zum Vermindern der Landebahnlänge für Jetflugzeuge. Die Aufnahme wurde im Jahre 1954 an der Tagung «200 Jahre Turbinentheorie von Leonhard Euler» gemacht

sind einige Beispiele der «Ackeretschen Pädagogik» in der ETH, im Technorama Winterthur und an der Höheren Technischen Lehranstalt in Brugg-Windisch noch vorhanden. Ackerets Anregungen zur Belebung des Hochschulunterrichts blieben in der Schweiz wie im Ausland nicht unbeachtet, so erfreuen sich die auf seine Anregung hin eingerichteten Freizeitwerkstätten an der ETH-Zürich bei allen Benützern aus der Hochschule grosser Beliebtheit.

Zahlreich sind die Institutionen und Gesellschaften, die heute dem Jubilar für seine zukunftsweisenden Anregungen danken, die Schulen und Institutionen Ackeretscher Prägung dringend benötigen.

Herbert Sprenger, Zürich

Jakob Ackeret wurde als Sohn eines Schlossers in Zürich-Riesbach geboren. Diplom als Maschineningenieur im Jahre 1920.

Nach einer Assistenzzeit bei Stodola geht er zu Prandtl an die «Aerodynamische Versuchsanstalt» (heute «Max-Planck-Institut für Strömungsforschung») in Göttingen. Im Jahre 1927 Rückkehr in die Schweiz; er wird Chefingenieur bei Escher-Wyss. Von 1931 bis 1967 wirkt er als Professor und Direktor des Instituts für Aerodynamik an der ETH-Zürich. Das von ihm aufgebaute Institut wird zu einem weltbekannten Forschungszentrum. Für die Untersuchungen im Gebiet der Hochgeschwindigkeits-Aerodynamik baut er den ersten Überschallkanal der Welt mit geschlossenem Kreislauf. Ein weiterer Schwerpunkt seiner Forschertätigkeit (neben vielen anderen) ist die Anwendung der Aerodynamik auf Probleme der Strömungsmaschinen und des Bauwesens (Norm SIA 160). Daneben setzt er seine Tätigkeit fort als Ingenieur; die Gasturbine mit geschlossenem Kreislauf, die er (zusammen mit C. Keller) vorgeschlagen hat, ist wohl seine bekannteste Erfindung. Nach seinem Rücktritt ist er weiter aktiv geblieben. Sein Hauptinteresse gilt nun Energieproblemen, den Fragen der Sicherheit von Kernkraftwerken, den vielen Alternativen in der Entwicklung der Energieerzeugung.

Aerodynamische Interferenz zwischen Hochhäusern – Untersuchungen im Windkanal

Jakob Ackeret zum 80. Geburtstag gewidmet

Von Sándor Pálffy, Ennetbaden*)

Die aerodynamischen Vorgänge, die in der untersten Luftschicht der Atmosphäre den menschlichen Lebensraum in Form von Winden, Stürmen und Orkanen beeinflussen, sind sog. *instationäre Grenzschicht-Phänome*, die neben ihrer *räumlichen* auch noch eine *zeitabhängige Struktur* aufweisen. Die letzte ist für rechnerische Zwecke nur statistisch erfassbar. Innerhalb der räumlichen Luftbewegung lassen sich zwei charakteristische Eigenschaften hervorheben:

1. Die Intensität (Strömungsgeschwindigkeit) nimmt mit wachsender Entfernung vom Erdboden zu, wobei im allgemeinen gleichzeitig auch der Turbulenzgrad abnimmt.

2. In unmittelbarer Nähe der Erdoberfläche beeinflusst deren Beschaffenheit entscheidend die räumliche Struktur der Bewegung, d.h. die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit und die damit zwangsläufig verbundene Druckverteilung (die letzte ist als Windlast bekannt).

*) Die Messungen wurden unter der Leitung des Autors von K. Blabol und M. Heimlicher, Ing.-Tech. HTL, im Rahmen ihrer Diplomarbeit an der *Abt. Maschinenbau der HTL Brugg-Windisch* durchgeführt.

Infolge der Entwicklung im Hochbauwesen hat in den vergangenen Jahren sowohl die durchschnittliche, wie auch die individuelle Bauhöhe nebst der Siedlungsdichte wesentlich zugenommen. Somit wurde der menschliche Lebensraum – vor allem in den Städten – in Bereiche erweitert, in denen der Aerodynamik vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss, besonders dann, wenn neben der *Sicherheit der Bauten* auch auf die *Qualität der Biosphäre* Wert gelegt wird. Gerade auf diesem Gebiet sind aber in der letzten Zeit vermehrt Probleme aufgetreten. Die Komplexität der Bewegungsstruktur der Luft verhindert eine genaue mathematische Erfassung, weshalb auch keine allgemein gültigen Lösungen gefunden werden konnten, die eine genaue Vorausberechnung der aerodynamischen Vorgänge und damit der Windbelastung ermöglichen würde. Es ist in dieser Situation naheliegend, die Lösung mittels Versuchen vor allem an verkleinerten Modellen zu suchen.

Die zumeist national festgelegten «Winddrucknormen», die keine vollkommene Übereinstimmung aufweisen, sind Ergebnisse experimenteller Forschungstätigkeit. Sie enthalten

meistens zeitliche Mittelwerte und ermöglichen eine Abschätzung der zu erwartenden aerodynamischen Kräfte. Besonders zu erwähnen sind die DIN-Norm 1055 und die Norm SIA 160. Die letzte ist hinsichtlich Zahlenangaben und Bauformen sehr ausführlich – für ihre Zuverlässigkeit zeugt, dass sie u.a. bei der Projektierung des Vertical Assembly Building auf Cape Kennedy berücksichtigt wurde.

In bezug auf Erscheinungen der Interferenz, also der gegenseitigen Beeinflussung benachbarter Bauten, enthalten die erwähnten Normen keine Angaben.

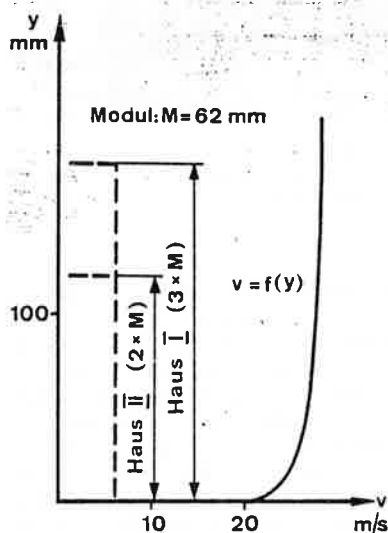


Bild 1. Geschwindigkeitsprofil

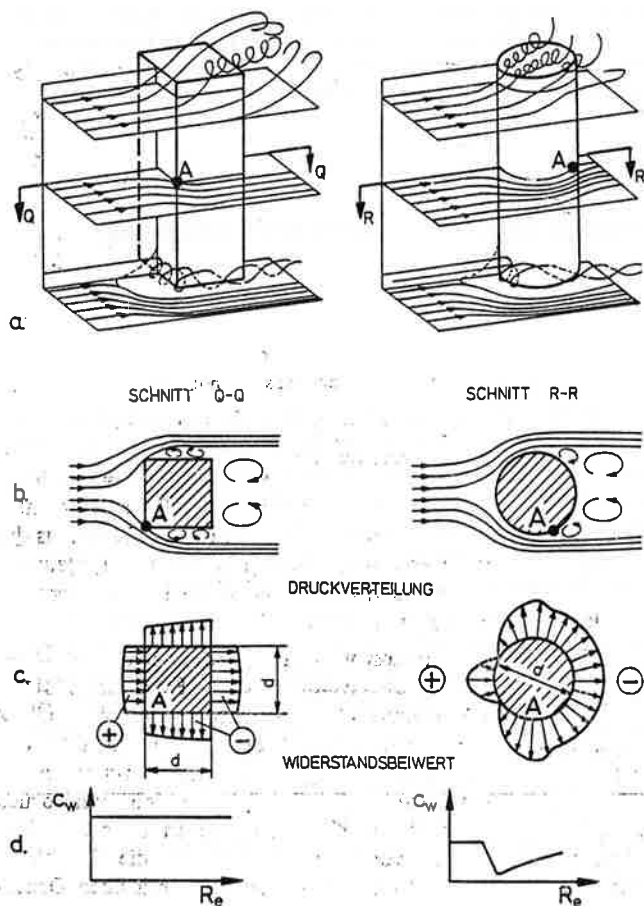


Bild 2. Umströmung von Körpern

Modellversuche

Mit Hilfe der nachstehend beschriebenen Modellversuche wurde versucht, die dreidimensionale Umströmung ganzer Gebäudeformationen in einem grossen Winkelbereich zu erfassen. Wegweisende Arbeiten zu diesem Themakreis sind veröffentlicht worden von Ackeret [1, 2], Egli [2], Wise, Sexton und Lillywhite [3], Davenport [4] bzw. Newberry, Eaton und Mayne [5]. Der untersuchte Problembereich ist von grosser Bedeutung für klimatisierte oder zumindest für zwangsbelüftete Hochhäuser. Die Druck- und damit verbundenen Geschwindigkeitsverteilungen um einen Gebäudekomplex beeinflussen über die Öffnungen der Luftführungsschächte die Funktionsfähigkeit der Klimaanlage, den Wärmehaushalt im Gebäude, die Rauchgasausbreitung und nicht zuletzt die Luftbewegung in unmittelbarer Umgebung der Gebäude und ihrer Eingänge, also die Zonen für Fussgänger und Kinderspielplätze. Es darf nicht vergessen werden, dass auch Schäden an Gebäuden infolge zeitlich veränderlicher, lokaler Druckverteilungen entstehen, wie es von Thomann [6] gezeigt wurde.

Über die Berechtigung aerodynamischer Modellversuche in Windkanälen soll an dieser Stelle nicht eingehend berichtet, sondern lediglich auf die Arbeiten von Truckenbrodt [7], Haddon [8], Ackeret und Egli [2] und Krönke [9] hingewiesen werden. Es zeigt sich anhand dieser Arbeiten, dass solche Versuche im Massstab 1:250 und sogar darunter recht zuverlässig sind, wenn auf eine grosse Genauigkeit verzichtet wird. Begnügt man sich mit einer Genauigkeit von 5 bis 10 Prozent und verzichtet auf die Analogie der Reynoldszahl, was bei scharfkantigen Objekten möglich ist, so können bereits auch einfache, kleinere Freistrah-Windkanäle für die Versuche benützt werden. Dabei werden unter stationären Verhältnissen Geschwindigkeits- und Druckverhältnisse ermittelt, die also nicht alle aerodynamischen Vorgänge erfassen, jedoch wertvolle Aufschlüsse geben für Architekten und Raumplaner, z.B. über die Eignung von Baumaterialien der Leichtbautechnik oder über die prinzipielle Anordnung von Gebäuden in einem Komplex.

Der für die Versuche benützte Freistrah-Windkanal hat einen viereckigen Querschnitt von 350 x 450 mm, die erzeugte konstante und turbulente Geschwindigkeitsverteilung ist im Bild 1 dargestellt.

Die gemittelte, ungestörte Luftgeschwindigkeit betrug $\bar{v}_\infty = 27,0$ m/s oder rund 100 km/h. Sie wurde als Referenzgrösse für die Ermittlung der dimensionslosen Druckziffer c_p herangezogen:

$$c_p = \frac{p - p_0}{q} = \frac{\Delta p}{q} = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} \bar{v}_\infty^2}$$

Dabei sind:

- p : örtlich gemessener statischer Druck
- p_0 : atmosphärischer Bezugsdruck
- ρ : die dem Luftzustand entsprechende Luftdichte

Um der Vielfalt der Bautechnik Rechnung zu tragen, wurden die Modelle, die einen quadratischen Grundriss von $M \times M$ ($M = 62$ mm) aufweisen, aus kubischen Modulen aufgebaut, ihre Position konnte an einer in den Luftstrom drehbaren Scheibe schachbrettförmig in einem $3M \times 3M$ grossen Feld durch einfaches Umstecken beliebig verändert werden. Das nicht benützte Feld wurde sorgfältig abgedeckt, die maximale Modellhöhe betrug das dreifache der Modulhöhe, d.h. $H = 186$ mm. Die auf diese Höhe bezogene Reynoldszahl ist definitionsgemäss:

$$R_{eH} = \frac{\bar{v}_\infty \cdot H}{\nu} = 360000 \quad H = 3 M$$

Dabei ist ν die kinematische Zähigkeit der Luft. Die Messungen des statischen Druckes erfolgten an jeder Modul-

seite an 25 über Höhe und Breite gleichmässig verteilten Messstellen (5×5) mittels Präzisions-Vielfachmanometer.

Die Werte der ermittelten Druckziffern c_p sind graphisch dreidimensional so dargestellt, dass die jeweilige Druckverteilung an einer Hauswand in deren Projektion stets von aussen her betrachtet werden kann.

Grundsätzliches über Umströmung von Körpern

Im Bild 2a ist qualitativ die stationäre Umströmung zweier für das Hochbauwesen typischer Formen durch eine wirkliche, d.h. reibungsbehaftete, zum Boden parallele Strömung dargestellt. Dasselbe Bild kann übrigens auch als eine Kurzzeit-Aufnahme einer instationären Strömung aufgefasst werden. Die örtlichen Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke – die im beschleunigenden Zustromgebiet miteinander durch die Energiegleichung verbunden sind – hängen von der Verdrängungsintensität der einzelnen Objekte ab. Die Eigenschaften der Strömung erfasst in erster Linie die bereits definierte Reynoldszahl, die vom Luftstrom das Verhältnis der Trägheits- zu den Reibungskräften wiedergibt. Bleiben der Luftzustand und die Dimensionen des angeströmten Objektes unverändert, so ist die Änderung der Re -Zahl direkt proportional zu der Geschwindigkeitsänderung. Obwohl die Kinematik der Luftbewegung in beiden gezeigten Fällen (kantige und runde Säule) auf den ersten Blick sehr ähnlich erscheint, besteht aerodynamisch gesehen ein wesentlicher Unterschied. Ein Vergleich der Schnitte Q-Q und R-R im Bild 2b zeigt, dass die Ablösung der Strömung (Punkt A) eines prismatischen Körpers längs einer scharfen Kante erfolgt, wogegen die Ablösung bei zylindrisch-abgerundeten Körpern längs geometrisch nicht definierten Mantellinien eintritt. Der Ablösepunkt an scharfen Kanten bleibt weitgehend unabhängig von der Grösse der Geschwindigkeit am gleichen Ort. Dagegen verschiebt die Ablösezone längs gerundeter Mantelflächen mit zunehmender Geschwindigkeit stromabwärts. Der Ablösungs-ort seinerseits hat einen entscheidenden Einfluss sowohl auf die Druckverteilung über die Körperoberflächen (Bild 2c), als auch auf die Wirbelstruktur im sog. «Totraum». Diese zwei Faktoren bestimmen den stationären und zeitlich veränderlichen Widerstand jedes angeströmten Körpers. Die Konstanz des Widerstandsbeiwertes c_w bei veränderlicher Re -Zahl für ein Bauwerk mit Kanten lässt sich mit der unveränderten Lage der Ablösung ebenso gut erklären wie die Unbeständigkeit des c_w -Wertes für gerundete Baukörper (Bild 2d).

Diese Überlegungen lassen erkennen, dass Hochhäuser, die ausgeprägt scharfe Kanten und grosse ebene Flächen besitzen, aerodynamisch mit Modellen einfacher zu untersuchen sind als jene, die im Grunde genommen eine strömungstechnisch günstigere Form haben. Wie bereits *Eiffel* [10] haben auch *Ackeret* und *Egli* [1, 2] gezeigt, dass bei kantigen Bauformen die Reynolds-Bedingung der Modellgesetze

$$Re_{\text{Modell}} = Re_{\text{Ausführung}}$$

zum Beurteilen stationärer Belastungen in einem weiten Bereich verändert werden darf, eine Bedingung, die Modelluntersuchungen wesentlich vereinfacht und verbilligt.

Druckverteilung an einem alleinstehenden Hochhaus bei Anströmung in gesamtem Winkelbereich

Bild 3 zeigt die Druckverteilung auf dem Dach und den Aussenwänden eines alleinstehenden Hochhauses von quadratischem Grundriss bei ungestörter horizontaler Anströmung in Richtung einer Flächennormale. Zu bemerken ist die starke dreidimensionale Wölbung der Druckverteilung an der Stauseite, sowie der nach oben zunehmende Unterdruck im Totraumbereich. Diese Druckverteilung bestätigt die durch die

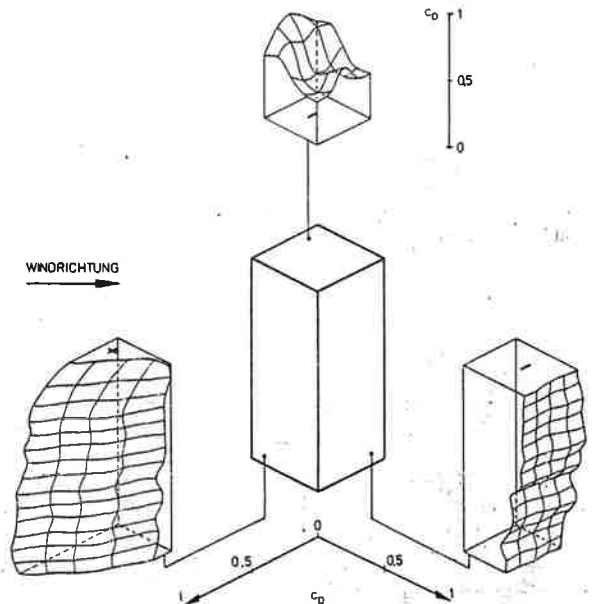
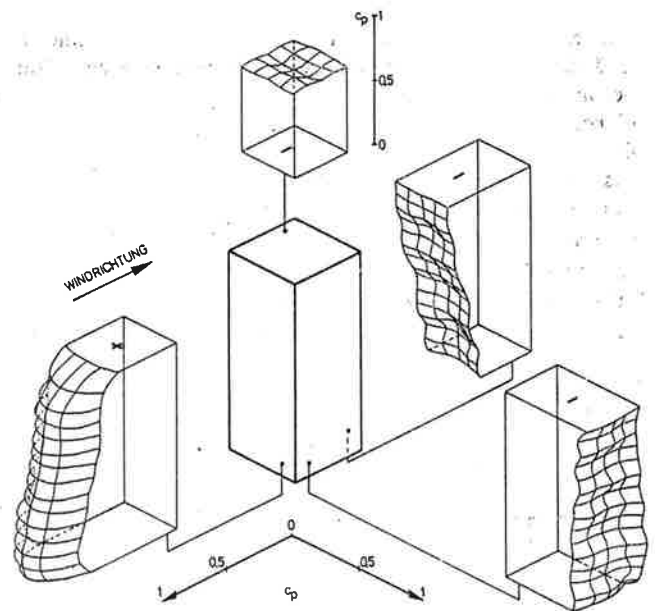


Bild 3 und 4. Alleinstehendes Hochhaus. Windlasten

SIA-Norm empfohlenen Mittelwerte, nämlich $c_p = +0,9$ für die Staufassade und $c_p = -0,8$ für die Dachfläche, also konstante und für die Gesamtflächen gültigen Ziffern. Aus der Druckverteilung ist erkennbar, dass die Luft in unmittelbarer Nähe des Gebäudes auch eine vertikal nach oben gerichtete Umlenkung erfahren muss.

Bild 4 zeigt die ungestörte Anströmung unter $\varphi = 45^\circ$ zur Seitenflächennormale, also in Richtung der Hochkante. Hinter dieser Kante entstehen links und rechts ausgeprägte Überdrücke von $c_p = +0,8$, die in Strömungsrichtung über den beiden Gebäudefassaden bis zu den stromabwärts folgenden Kanten praktisch linear bis zum ungestörten Umgebungsdruck abnehmen. Hinter diesen Kanten entstehen über den Lee-flächen Unterdrücke von etwa $c_p = -0,7$; die SIA-Norm empfiehlt $c_p = -1,0$ und berücksichtigt damit auch Druckschwankungen infolge Wirbelbildung. Die Druckverteilung über der Dachfläche ist asymmetrisch, lässt aber ein ähnliches

Wirbelsystem erkennen wie jenes, das auf der Saugseite stark angestellter Deltaflügel beobachtet werden kann. Die Asymmetrie kann auf die Turbulenzverteilung der Anströmung zurückgeführt werden. Kramer und Gerhardt [11] behandeln diese Strömungsart eingehend.

Wenn keine ausgeprägte Windrichtung vorherrscht, können für die Planer lokale Druckmessungen im gesamten Winkelbereich der Anströmung nützlich sein. Anhand von Polardiagrammen (Bild 5) lassen sich örtlich zu erwartende Extremwerte ermitteln.

Solche Extremwerte dienen zur Beurteilung der Festigkeit und zur Wahl von Isoliermaterialien für Fenster. Das im Bild 5 dargestellte Polardiagramm wurde in drei Fünfteln der gesamten Modellhöhe ($H = 186 \text{ mm}$) aufgenommen. Im Diagramm sind wegen der Übersichtlichkeit nur drei Kurven eingezeichnet, die fehlenden zwei (rechts der Mitte) lassen sich aber leicht erstellen durch sinngemässe Spiegelung an der Symmetrieachse $0^\circ\text{--}180^\circ$.

Interferenz zwischen zwei Hochhäusern ungleicher Höhe

Für diese Versuchsreihe wurden zwei Modelle benützt, die mit Haus I und Haus II bezeichnet sind. Bei gleichem quadratischen Grundriss $M \times M$ betragen die entsprechenden Höhen $H_I = 3 M$ bzw. $H_{II} = 2 M$. Der Abstand der zueinander parallel stehenden Modelle betrug grundsätzlich « M », d.h. eine Modullänge.

Beide Häuser werden nach Bild 6 von hinten in Richtung der Flächennormalen angeströmt. Die Druckverteilungen um die beiden Häuser zeigen bis auf die benachbarten Seitenflächen C und D ähnliche Verläufe wie die des einzelnen Hauses, wobei aber das niedrigere Haus an der Dachfläche eine um rund 50 Prozent grössere Beanspruchung erfährt als das höhere. Auffallend gross ist der Druckgradient an der Seite C, wo an der Vorderkante eine Druckziffer von $c_p = -1,0$ existiert. Dieser Wert liegt rund 40 Prozent höher als jener, der von der SIA-Norm für ein alleinstehendes Haus empfohlen wird und für ein solches entsprechend Bild 3 auch bestätigt werden konnte.

Von besonderem Interesse ist bei dieser Konfiguration die Frage, welchen Einfluss eine Veränderung des Gebäudeabstandes auf die Druckverteilung hat. Im Bild 7 sind die Druckamplituden, die in drei verschiedenen horizontalen Ebenen 1, 2 und 3 jeweils in 5 Punkten gemessen wurden für verschiedene d/b -Verhältnisse quantitativ dargestellt. Das Diagramm zeigt am Modell örtlich gemessene statistische Druckschwankungsbereiche; es möchte (ohne Anspruch auf grosse Genauigkeit) lediglich auf die Gefahr von durch Windkräfte erzeugten örtlichen Oszillationen hinweisen bei Variation des Häuserabstandes. Bei der Interpretation der Messergebnisse darf nicht ausser acht gelassen werden, dass instationäre Vorgänge dieser Art am Modell in schnellerer Reihenfolge ablaufen als an der Grossausführung.

Im Bild 8 ist die Druckverteilung um die Häuser I und II bei freier Anströmung unter $\varphi = 45^\circ$ dargestellt. Überraschend gross ist die Belastung der Dachfläche F, die aus Gründen der Anschaulichkeit 90° um ihre vertikale Achse gedreht dargestellt ist. Die grösste an dieser Fläche gemessene lokale Druckziffer beträgt $c_p = -1,8$. Der Wert ist wesentlich höher als jener in Bild 4 für ein alleinstehendes Haus. Die besonders ungünstige Wechselbeanspruchung der Seite C ist auf die Wirkung der Hochkante zwischen den Flächen E und D zurückzuführen. Sie bildet die Stelle der Ablösung.

Die Bilder 9 und 10 zeigen die Druckverteilung an den Häusern I und II in Reihenformation, wobei die freie Anströmung in die Fluchtlinie der Gebäude erfolgt. Diese An-

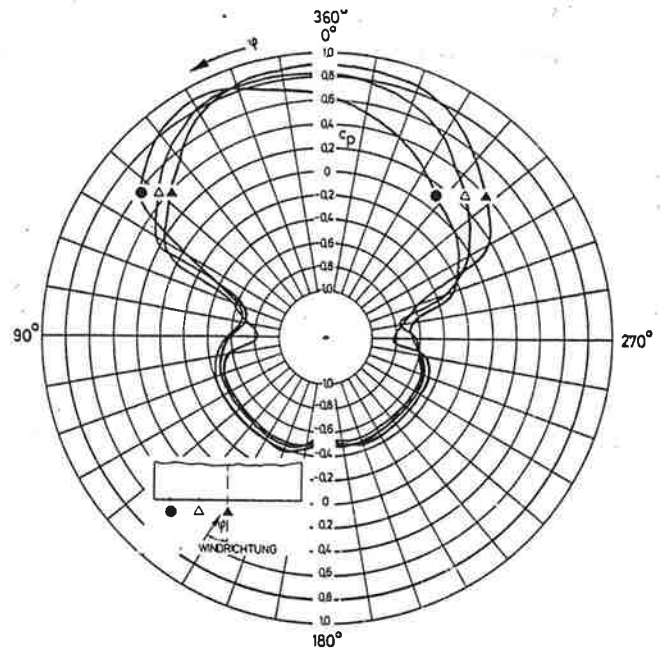


Bild 5. Polardiagramm für ein alleinstehendes Hochhaus

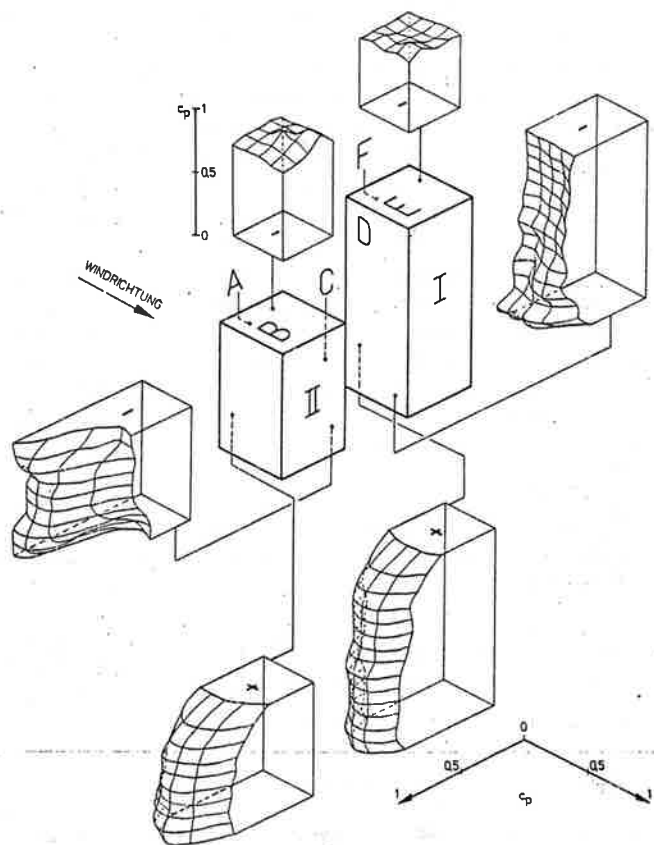


Bild 6. Interferenz zwischen zwei Hochhäusern bei senkrechter Anströmung

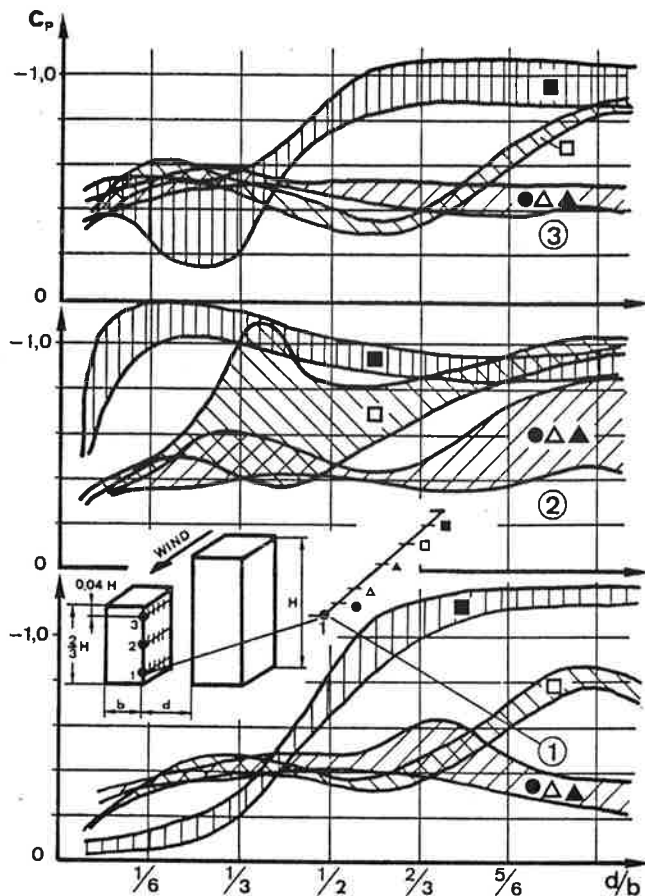


Bild 7. Druckamplituden in Abhängigkeit des Gebäudeabstandes

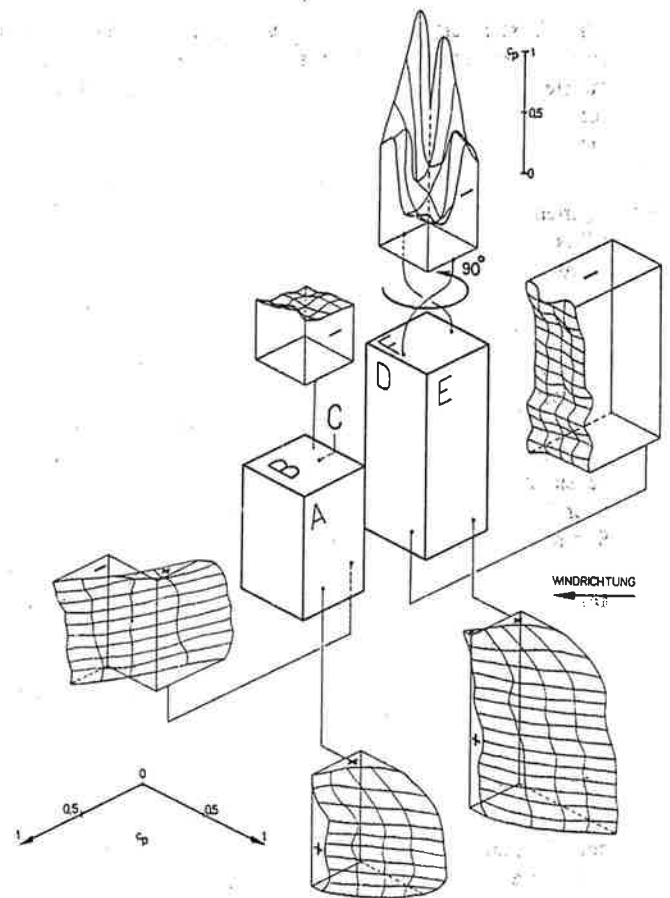


Bild 8. Interferenz zwischen zwei Hochhäusern bei Anströmung unter 45°

ordnung soll die Auswirkung des «Windschattens» auf den Druckaufbau klären helfen.

Im Bild 9 befindet sich das niedrigere Haus im «Windschatten» des höheren und übt erwartungsgemäss praktisch keinen Einfluss auf den Druckaufbau von Haus I aus. Umgekehrt lässt sich erkennen, dass *Haus II auf allen seinen Seiten auf Unterdruck beansprucht wird*. Am stärksten ist die Fläche C beansprucht, alle anderen Seiten zeigen gegenüber einem alleinstehenden Haus eine merkliche Entlastung.

Bild 10 zeigt die umgekehrte Reihenfolge von Bild 9. Das niedrigere Haus II erweist sich vor dem höheren Haus I als Störquelle. Von einer Windschattenwirkung kann nur mit Vorbehalt gesprochen werden. Die Vorzeichen wechselnde Beanspruchung der gegenüberliegenden Seiten C und D ist Folge der Stauwirkung der Fläche C in ihrem oberen Bereich. Wie mit Rauchversuchen sichtbar gemacht werden konnte, wird die Strömung in dieser Region teilweise auch nach unten abgelenkt, wodurch in der Bodennähe zwischen den beiden Häusern eine «Luftwalze» entsteht. Dies hat zur Folge, dass im unteren Bereich der Fläche D positive c_p -Werte zu finden sind. Die wechselhafte Druckverteilung, die bei physiologischen Vorgängen eine Rolle spielen könnte, übertrifft in keinem Bereich die von der SIA-Norm empfohlenen Werte.

Strömungsbilder

Weil die heute vorliegende Theorie der Gebäudeaerodynamik – auf die bereits *Ackeret* hingewiesen hat – nur in Ausnahmefällen eine quantitativ befriedigende Vorausberechnung liefern kann, müssen in der Zukunft die Möglich-

keiten der Modellversuchstechnik vermehrt genutzt werden. Strömungsbilder erlauben eine genauere Betrachtung der Vorgänge, weshalb sie neben der Problemidentifizierung oft auch zu dessen Lösung beitragen können. Allerdings muss dabei vorausgesetzt werden, dass sie bei ausreichend grossen Reynoldszahlen unter Zuhilfenahme geeigneter Techniken für die Sichtbarmachung der Strömung gewonnen werden.

Die Bilder 11–15 zeigen *Grenzschichtstrukturen in unmittelbarer Bodennähe*, die bei verschiedenen Konfigurationen von drei Hochhäusern auftreten, die einen sog. Gebäudekomplex bilden. Die Anströmung der Gebäude erfolgt in allen Bildern von links nach rechts, die hellen Stellen markieren die sog. *Totraumbereiche*. Gut erkennbar sind Zonen mit reduzierten und erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten sowie Spuren von Wirbeln. Auffallend breit im Verhältnis zu den Hausabmessungen sind die von den Gebäuden verursachten *Störströmungen* in Bodennähe.

Zusammenfassung

Die besprochenen Versuche sollen den in der Baubranche tätigen Fachleuten einen vertieften Einblick in jene aerodynamischen Vorgänge vermitteln, die oft wegen fehlender Kenntnisse zu *unerwarteten Schäden* führen. Um kurzfristig ein Ziel zu erreichen, wurden einfache Mittel benützt. Da zum vornherein feststand, dass nicht alle Details vom Modell auf eine Grossausführung übertragbar sind, wurde vorerst auf ein der Wirklichkeit besser entsprechendes Windprofil verzichtet. Das Vorgehen ist berechtigt und liefert für die Praxis brauchbare Resultate, die, mit den richtigen Vorzeichen versehen, die

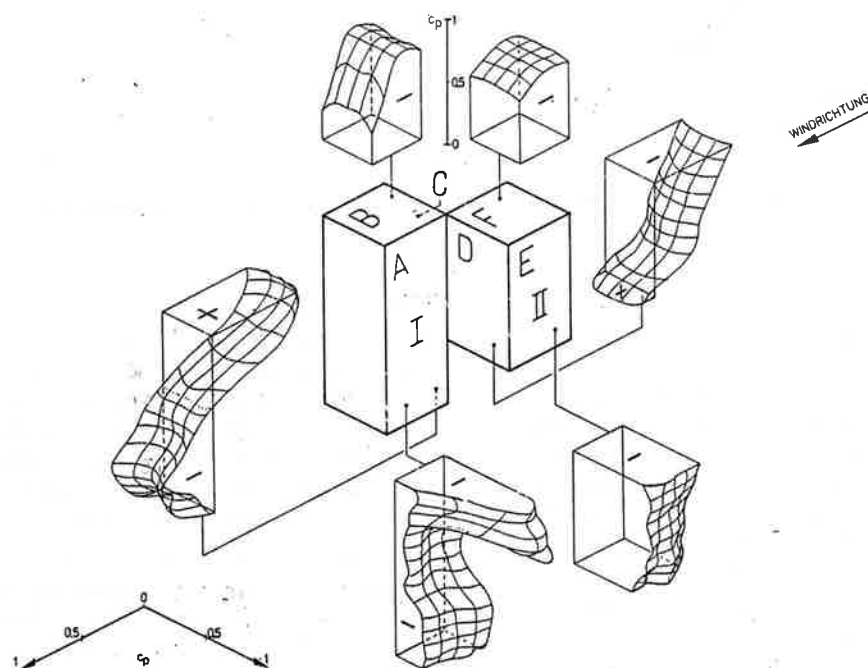
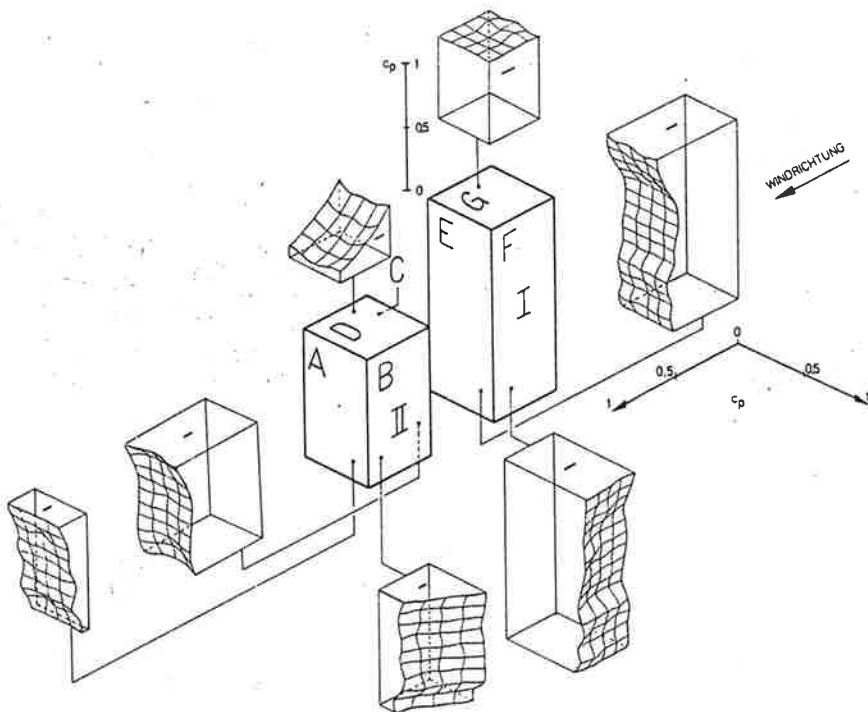


Bild 9 und 10. Windschattenwirkung in Reihenform von Hochhäusern

Größenordnung der jeweiligen Windlast angeben und auf besonders gefährdete Stellen hinweisen. Mit anderen Worten, sie ermöglichen das Wichtigste, nämlich latente Gefahr im voraus zu erkennen und dadurch Schaden zu vermeiden.

Schlussbemerkung

Die Gebäudeaerodynamik umfasst nach wie vor ein Gebiet mit noch vielen ungelösten Aufgaben. Obwohl die ersten wissenschaftlichen Messergebnisse von *Eiffel* [10] schon kurz nach der Jahrhundertwende vorlagen und die Zielsetzungen von den Aerodynamikern der damaligen Zeit recht klar definiert worden sind, geschah im Vergleich zu andern Wissenszweigen auf diesem Gebiet – vielleicht wegen fehlender Initiative der Bauindustrie – recht wenig. Es erscheint mir an dieser Stelle angebracht, heute daran zu erinnern, worauf *Ackeret* im Jahre 1965 hingewiesen hat:

- Da eine *Zusammenarbeit fast ganz fehlt*, wird nicht selten *Doppelarbeit* geleistet.
- Es wäre zu erwägen, ein *Zentrum für Winddruckforschung*, vielleicht in europäischem Rahmen zu schaffen.
- Das stark vernachlässigte Gebiet der *meteorologischen Sturm-aerodynamik* müsste gepflegt, eine *Schadenübersicht* aufgestellt und der gegenseitige Austausch von Erfahrungen organisiert werden.
- Die weitere Arbeit wird vor allem in *experimenteller* Richtung fortschreiten müssen.

Besonders zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang die Anstrengungen, die in *Österreich* unternommen wurden. Neben dem *Bau eines Windkanals für gebäudeaerodynamische Untersuchungen* finden seit 1971 auch Vorlesungen über *Aerodynamik von Bauwerken* an der *TH Wien* statt.

The aerodynamic processes which influence the lower layers of the atmosphere in the human living space in the form of winds, storms and hurricanes are called non-stationary boundary layer phenomena which, in addition to their spatial structure, also have a time-dependent structure. The latter can be calculated only statistically. Within the spatial movement of air two characteristic properties stand out:

- The intensity (flow rate) increases with increasing distance from the ground while, in general, the degree of turbulence decreases.
- In the immediate vicinity of the ground their nature is decisively influenced by the spatial structure of the surroundings and the consequent pressure distribution (the latter is known as the wind load).

In recent years, as a consequence of the development in high-rise architecture, the cross-sectional dimensions as well as the height of the individual buildings have increased substantially along with the population density. The human living space, particularly in towns, has therefore increased to the extent that greater attention must be paid to aerodynamics, especially when the quality of the biosphere is considered in addition to the safety of buildings. Increased problems have already arisen in this field. The complexity of the movement structure of the air prevents a precise mathematical treatment, whence no generally valid solution has been found to permit a precise prediction of the aerodynamic processes, and therefore of the wind load. In this situation it is obvious that the solutions must be sought by means of experiments on reduced models.

Most nationally established wind pressure standards, which do not show complete agreement, are the result of experimental research. They mostly contain a time average and make it possible to estimate the aerodynamic forces to be expected. Specially to be mentioned are the DIN Standard 1055 and the Standard SIA 160. The latter is very detailed: evidence of its reliability is *inter alia* that it was taken into account in planning the vertical assembly building at Cape Kennedy.

In respect of interference, i.e. the mutual effect of adjacent buildings, the standards give no data.

1. Model Experiments

With the help of the model experiments described below, it is intended to cover the 3-dimensional flow round whole building formations over a wide angular range. Initial work on this theme has been published by Ackeret^{1,2}; Egli²; Wise, Sexton and Lillywhite³; Davenport⁴; and Newberry, Eaton and Mayne⁵. The problem field studied is of great importance for airconditioning or at least for forced ventilation of high buildings. The pressure and consequent velocity distribution round a building complex affect the openings of the air shafts and thus the function of the airconditioning, the heat economy of the building, the dispersion of smoke and, not least, the air movement in the immediate neighbourhood of the

buildings and their entrances and thus pedestrian areas and playgrounds. It must not be forgotten that damage to the buildings may also occur as the result of transient local pressure distributions, as has been shown by Thomann⁶.

The validation of aerodynamic model research in wind tunnels will not be treated here in detail, but only the work of Truckenbrodt⁷; Haddon⁸; Ackaret and Egli²; and Krönke⁹. It was shown in these works that such studies on model scales of 1:250 and even less are quite reliable if great precision is not needed. If one needs greater precision than 5 to 10% and ignores the analogy of the Reynolds number, which is possible with acute angled objects, even smaller free-flow wind tunnels can be used. Thus, under stationary conditions, the velocity and pressure conditions, while not covering all aerodynamic processes, give valuable information for the architect and town planner on, for example, the suitability of building material for light building or on the principle arrangement of buildings in a complex.

The free-flow wind tunnel used in these studies has a rectangular cross-section of 350 x 450 mm which produces the constant and turbulent velocity distribution shown in Figure 1.

The mean, undisturbed air velocity was

$$\bar{v}_{\infty} = 27.0 \text{ m/s}$$

or about 100 km/h. It is used as a reference for the pressure coefficient C_p .

$$C_p = \frac{p - p_0}{q} = \frac{\Delta p}{q} = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} v_{\infty}^2}$$

where p = locally measured static pressure
 p_0 = atmosphere reference pressure
 ρ = air density corresponding to the air condition

To cover the diversity of building calculation, the model which covered a square plate of $M \times M$ ($M = 62 \text{ mm}$) built of cubic modules could be changed by simple sticking. The unused field was carefully covered. The maximum model height is 3 times the module height, i.e. 186 mm. The Reynolds number for this height is by definition

$$Re_H = \frac{\bar{v}_{\infty} \cdot H}{\nu} = 360000 \quad H = 3M$$

where ν = the kinematic viscosity of the air.

The static pressure was measured on each module side at 25 points distributed over height and width (5 x 5) with a precision multi-manometer.

The values of the calculated pressure coefficients C_p are presented 3-dimensionally so that the pressure distribution on a house wall in its projection can always be considered from outside.

2. Basics of Flow Around Bodies

Figure 2a shows qualitatively the stationary flow around two typical forms for high building through a real, i.e. frictional, flow parallel to the ground. The same figure can also be regarded as a short time record of an instantaneous flow. The local flow velocities and pressures in the accelerated influx region, which are related to one another in the energy equation, depend on the displacement intensity of the individual object. The properties of the flow comprise mainly the already defined Reynolds number which gives the ratio of the inertia to the friction forces. If the air conditions and the object remain unchanged, the Reynolds number is proportional to the change of velocity. Although the kinematics in both cases (angular and round columns) appear very similar at first sight, when considered aerodynamically there is a substantial difference. A comparison of the sections Q-Q and R-R in Figure 2b shows that, with a prismatic column, the separation occurs along a sharp edge, whereas with a cylindrical body it occurs along defined envelope lines. The separation point at sharp edges remains essentially independent of the magnitude of the velocity at any point. On the contrary, with rounded envelope surfaces it moves downstream with increasing velocity. The separation point has a decisive effect on the pressure distribution over the surfaces of the body (see Figure 2c) as well as on the vortex structure in the so-called wake. These two factors determine the stationary and time varying resistance of any body immersed in a flow. The constancy of the resistance coefficient C_w with changing Re number for a building with corners is as well accounted for by the unvarying site of the flow separation as the variation of the C_w value for rounded buildings (see Figure 2d).

These considerations show that high buildings which have sharp corners and large flat faces are easier to study aerodynamically with models than those which basically have a more favourable aerodynamic form. Eiffel¹⁰, and Ackeret and Egli^{1,2} have shown that, with angled building forms, the Reynolds conditions of the model law

$$Re_{\text{model}} = Re_{\text{design}}$$

for the estimation of stationary loads can be varied over a wide range - a condition which substantially simplifies and reduces the cost of model studies.

3. Pressure Distribution on an Isolated Building with Flow Over the Whole Angular Range

Figure 3 shows the pressure distribution over the roof and outer walls of an isolated tall building of square ground plan with undisturbed horizontal flow in the direction normal to a face. One should note the strong 3-dimensional curvature of the pressure distribution on the input side as well as the upward increasing negative pressure in the wake region. This pressure distribution confirms the mean value recommended by the SIA standard, i.e. $C_p = +0.9$ for the windward face and -0.8 for the roof, namely constant coefficients valid for the entire surfaces. From the pressure distribution it can be seen that the air in the immediate neighbourhood of the building must undergo a change of direction vertically upwards.

Figure 4 shows the undisturbed flow at $\phi = 45^\circ$ to the side face normal, i.e. in the direction of the long edge. Behind these edges are marked over-pressures of $C_p = +0.8$ which decrease over the two building faces to the downstream corners almost linearly to the undisturbed ambient pressure. Behind these edges over the lee faces underpressures of about $C_p = -0.7$ are generated: the SIA standard recommends $C_p = -1.0$ and thus takes account of pressure variations due to turbulence. The pressure distribution over the roof is asymmetric and shows a turbulence system like the spread delta wing on the suction side. The asymmetry can be attributed to the turbulence distribution. Kramer and Gerhardt¹¹ treat this type of flow in detail.

When there is no predominant wind direction, local pressure measurements over the whole angular range can be used by the planner. By means of a polar diagram (see Figure 5), local extreme values can be estimated.

Such extreme values can be used for estimation of the strength and choice of insulating material for windows. The polar diagram in Figure 5 was recorded in fifths of the total model height ($H = 186 \text{ mm}$). In the diagram, for the sake of clarity, only three curves are shown. The missing curves, right of centre, can be easily reproduced by reflection at the axis of symmetry 0° - 180° .

4. Interference Between High Buildings of Unequal Height

For this series of experiments two models were used, indicated as building 1 and building 2. With the same square ground plan $M \times M$, the corresponding heights were $H_I = 3M$ and $H_{II} = 2M$. The distance between the parallel models was basically 'M', i.e. 1 module length.

The flow on both buildings was from behind in the direction of the face normals. The pressure distribution round both buildings shows on the side faces C and D a similar pattern to that of the individual building, but the shorter building experiences about 50% greater load than the taller. The pressure gradient at the side C is surprisingly high where there is a pressure coefficient of $C_p = -1.0$ at the front corner. This value is about 40% higher than that of the SIA standard for an isolated building and for one such is confirmed by Figure 3.

Of special interest for this configuration is the question of what influence a change in the building distance has on the pressure distribution. Figure 7 shows quantitatively the pressure amplitudes measured in three horizontal planes 1, 2 and 3 for five points at any given time for different d/b ratios. The diagram shows areas of local pressure fluctuation measured on the model. This could, without claim to great precision, simply show the danger of local oscillations due to wind forces with variation of the building distance. In interpreting the measurements, it must not be forgotten that non-stationary processes of this kind occur more rapidly in the model than with full scale buildings.

Figure 8 shows the pressure distribution round buildings I and II with free flow at $\alpha = 45^\circ$. The load on the roof F is surprisingly high which, for reasons of clarity, is shown rotated 90° about its vertical axis. The highest measured local pressure coefficient on this surface is $C_p = -1.8$. The value is substantially greater than in Figure 4 for an isolated building. The particularly unfavourable alternating load on side C is attributable to the effect of the high edges between the faces E and D. They form the points of separation.

Figures 9 and 10 show the pressure distribution at buildings I and II in row formation, where the free flow occurs along the line of the buildings. This arrangement should help to clarify the effect of wind shadow on the pressure pattern.

In Figure 9 the shorter building is in the wind shadow of the taller and, as expected, exerts almost no effect on the pressure pattern of building I. Conversely, building II is subjected on all sides to underpressure. Face C is most heavily loaded; all other sides show appreciable deloading in comparison with an isolated building.

Figure 10 shows the reversed sequence of Figure 9. The shorter building II proves to be a source of disturbance in front of the taller building I. It can be described as a wind shadow effect only with reservation. The sign of alternating load on the adjacent sides C and D is the result of the damming effect of the side C in the upper region. As can be shown by smoke tests, the flow in this region is partly turned downwards whereby an eddy occurs near the ground between the two buildings. The result of this is that positive C_p values are found in the lower region of face D. The variable pressure distribution, which can have a psychological effect, does not exceed the values recommended in the SIA standard in any region.

5. Flow Patterns

Because the current theory of building aerodynamics as already indicated by Ackeret can only give a satisfactory quantitative prediction in exceptional circumstances, in future model experiments will have to be used more and more. Flow patterns give a precise picture of the processes which, in addition to identifying the problem, can often contribute to its solution. Above all, it must be assumed that they are recorded with adequately high Reynolds numbers and with suitable techniques for making the flow visible.

Figures 11 to 15 show boundary structures close to the ground which occur with various configurations of three tall buildings - the building complex. The flow of the buildings in all the figures is left to right, the light points mark the dead zones. Zones with reduced and increased flow velocities are easily seen as well as traces of eddies. The disturbed flows are surprisingly wide close to the ground compared with the dimensions of the buildings.

6. Summary

The experiments described are intended to give specialists in the building sector a deeper insight into all aerodynamic processes where lack of knowledge often leads to damage. In order briefly to achieve an aim, simple means are used. Since it was found from the start that not all details of the model could be transferred to full scale, initially the efficiency of better corresponding wind profile is omitted. The process is validated and, provided with proper signs, the magnitude of the wind load is given and specially endangered areas indicated, i.e. latent dangers are predicted and damage is avoided.

7. Conclusions

Building aerodynamics covers, as before, a field with many unsolved problems. Although the first scientific measurements by Eiffel¹⁰ before the turn of the century are available and the objective of aerodynamics at that time was quite clear, in comparison with other branches of science in this area little was done. It seems to me apt at this point to remember how Ackert indicated in 1965

- since there is almost no co-operative work, work is often duplicated.
- a centre for wind pressure research should be created, possibly in Europe.
- the badly neglected field of meteorological storm aerodynamics must be attended to and a damage inspectorate set up and mutual exchange of experience organised.
- further work will have to be mainly experimental.

In this connection special mention must be made of work done in Austria. In addition to the construction of a wind tunnel for building aerodynamic studies.

It is desirable that in the future, in addition to accident investigations, aimed and co-ordinated basic research and development of building aerodynamics in the widest sense should begin. To this category also belongs the problems of remote heating plant, heat-power stations, cooling towers, flue gas dispersion from waste burning plant, etc. Town planners, architects and building engineers require further consideration of the nature of the SIA standards. These should no longer be

drawn up by established institutions but their aim is now another form of aerodynamics. It has been found that, not only from the scientific point of view, building aerodynamics is exciting but is no longer an ignorable constituent of environmentally correct and careful building. This seems completely justified when it is considered that wind damage to buildings is exceeded only by the fortunately rare floods and earthquakes.

Bibliography

1. Ackeret, J.
Use of aerodynamics in buildings
J. for Flight Science, 13/4 1965
2. Ackeret, J. and Egli, J.
The use of small models for wind tunnel studies.
Schweiss. Bauzeitung No.1 1966
3. Wise, A.F.E., Sexton, D.E. and Lillywhite, M.S.T.
Studies of air flow around buildings
Building Res. 38
4. Davenport, A.G.
The treatment of wind loadings on tall buildings.
Proc. Symp. Tall Buildings, Southampton 1966
5. Newbury, C.W., Eaton, K.J. and Mayne, J.R.
Wind loading of a tall building in an urban environment.
Symp. on Wind Effectd on Buildings and Structures, Loughborough 1968
6. Thomann, H.
Wind effect on tall houses
Schweiz. Bauzeitung 8 1974
7. Truckenbrodt, E.
Wind tunnel studies on buildings with rectangular ground plan with flat and saddle roofs.
8. Haddon, J.D.
The use of wind tunnel models for determining the wind pressure on buildings.
Civil Eng. and Public Works Rev.
9. Krönke, J.
Studies in the wind tunnel on building aerodynamics and processes in the atmospheric boundary layer.
Bau. Ingenieur 11, 1973
10. Eiffel, E.G.
Experimental studies on the resistance of air
Paris 1907
11. Kramer, C., Gerhardt, H.J.
Wind loads on flat roofs
Bau. Bl. 11 1977

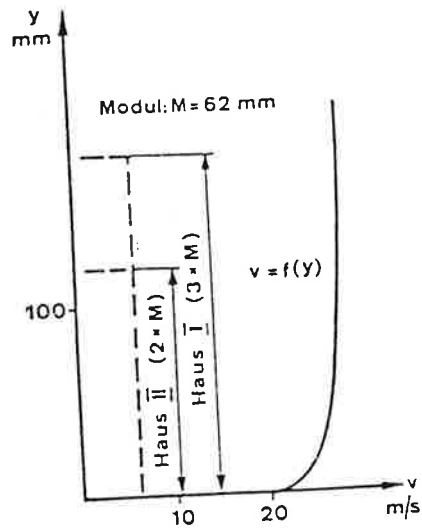


Fig.1 Velocity profile

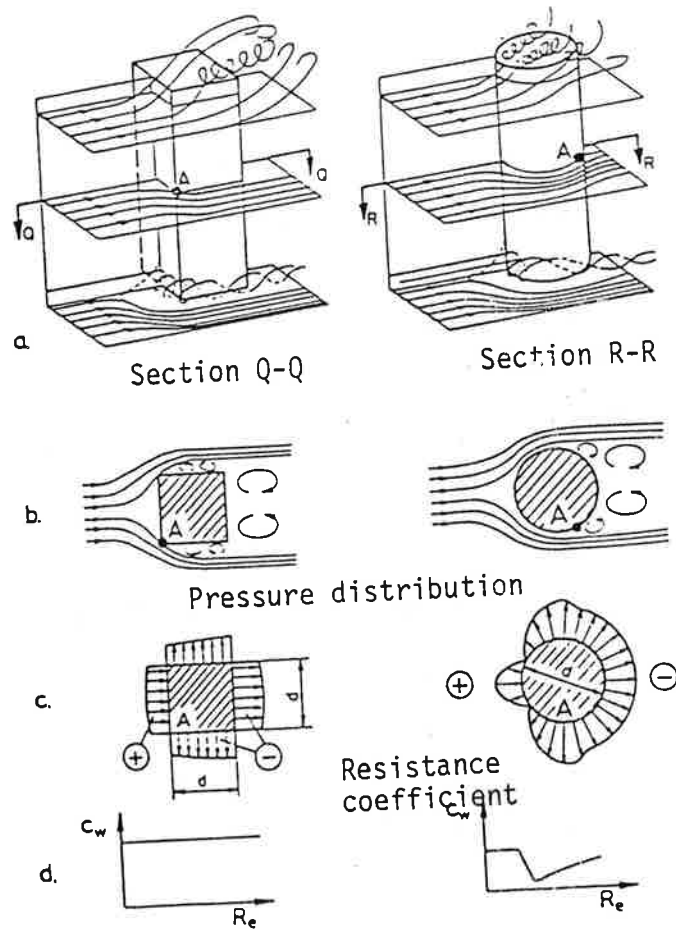


Fig.2 Flow around bodies

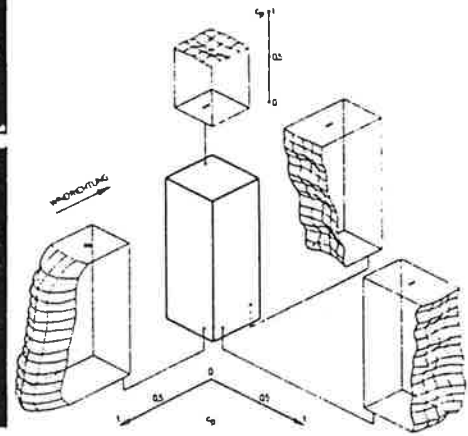
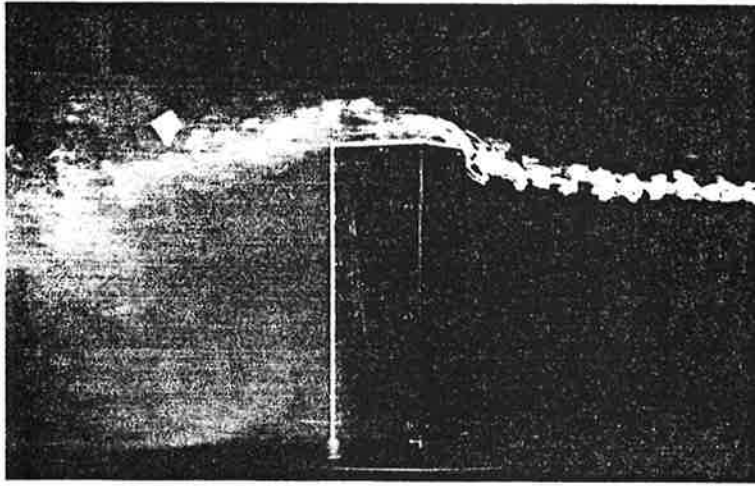


Fig.3 Isolated tall buildings - wind normal to face

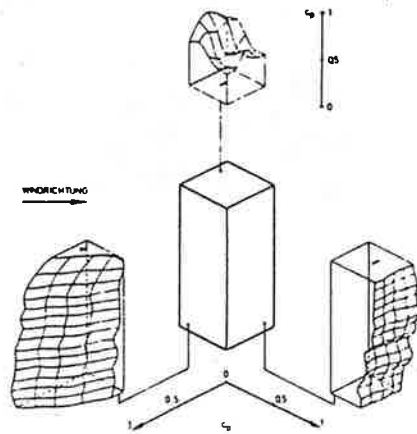
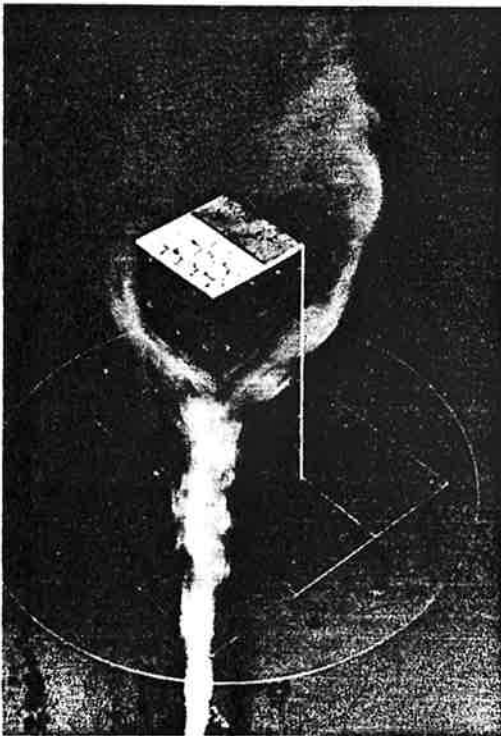


Fig.4 Isolated tall buildings - wind incident to corner

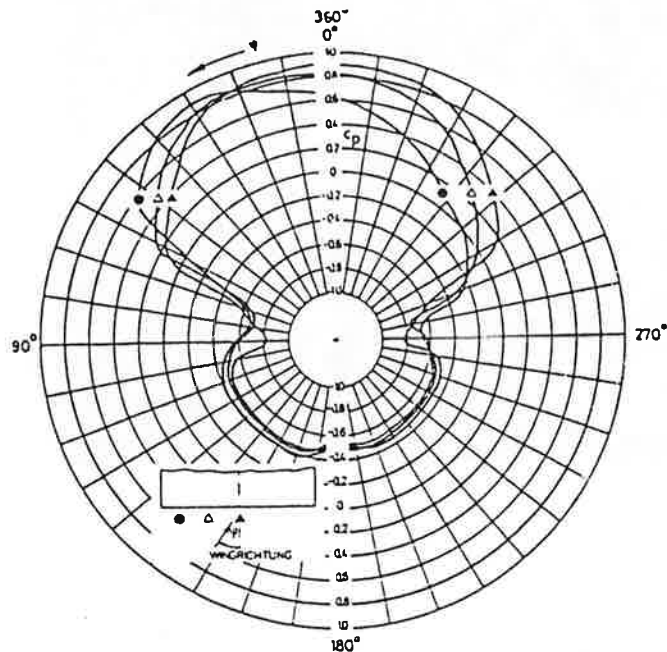


Fig. 5 Polar diagram for an isolated tall building

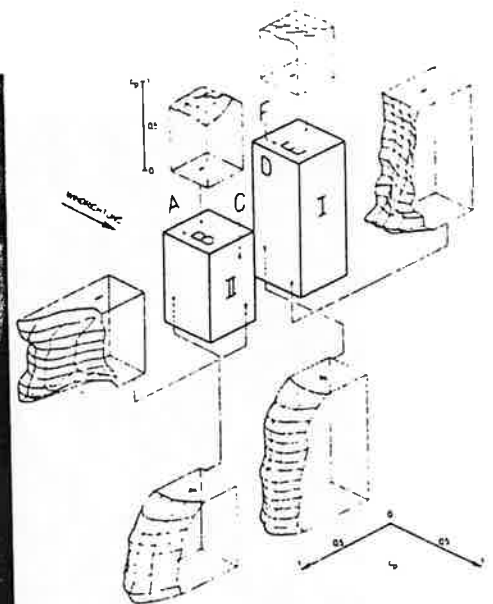
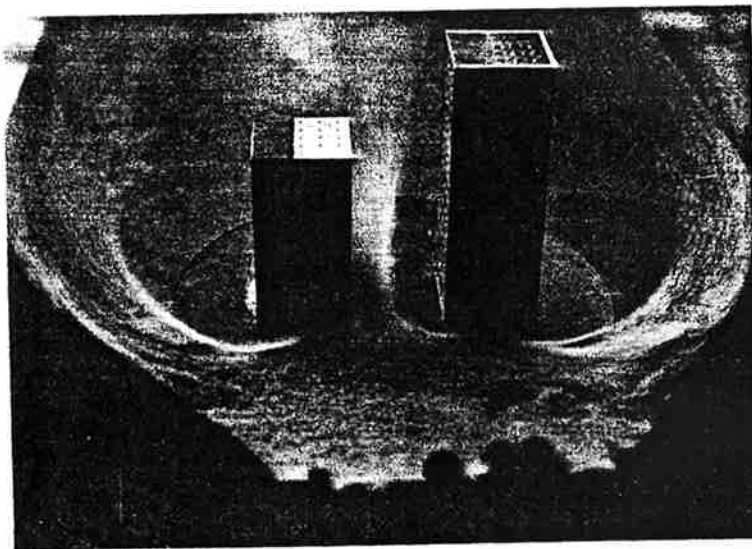


Fig. 6 Interference between two tall buildings with perpendicular approach flow

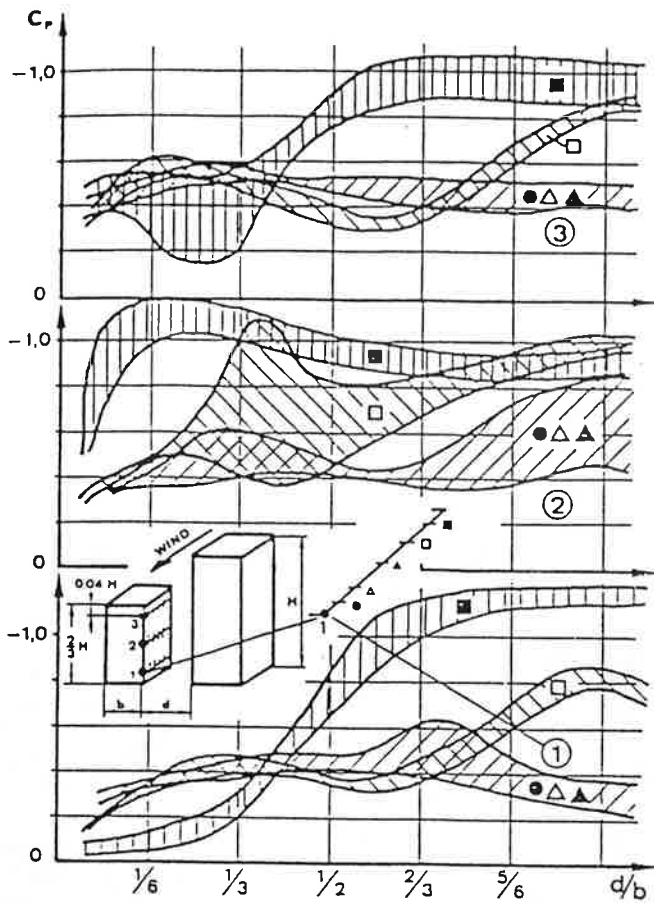


Fig. 7 Pressure amplitudes as a function of the separation of the buildings

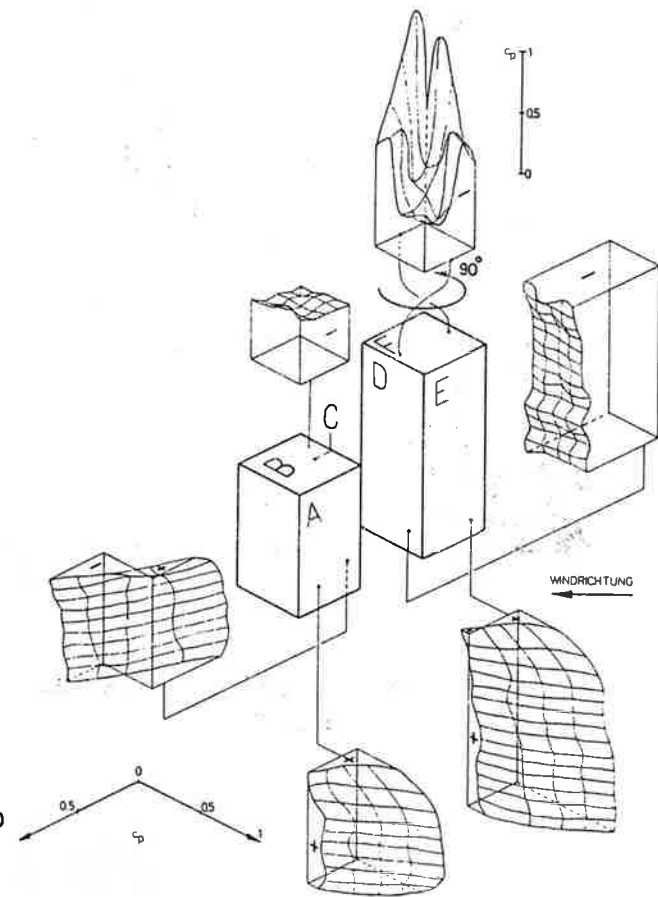


Fig. 8 Interference between two tall buildings with approach flow at 45°

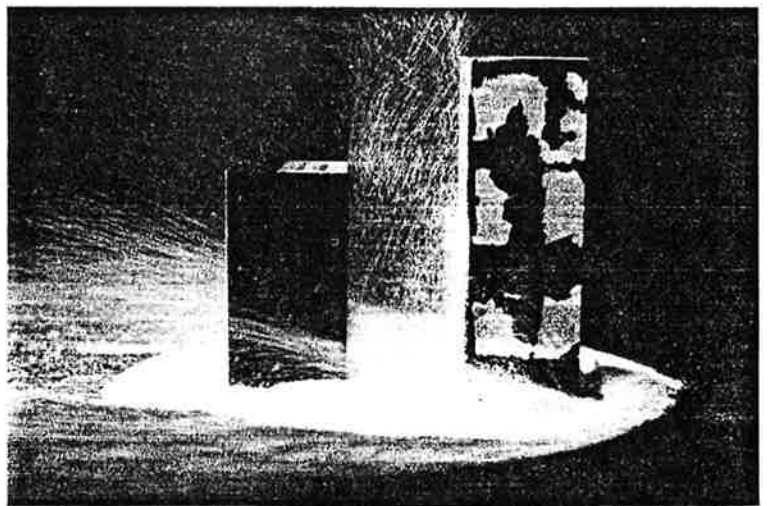
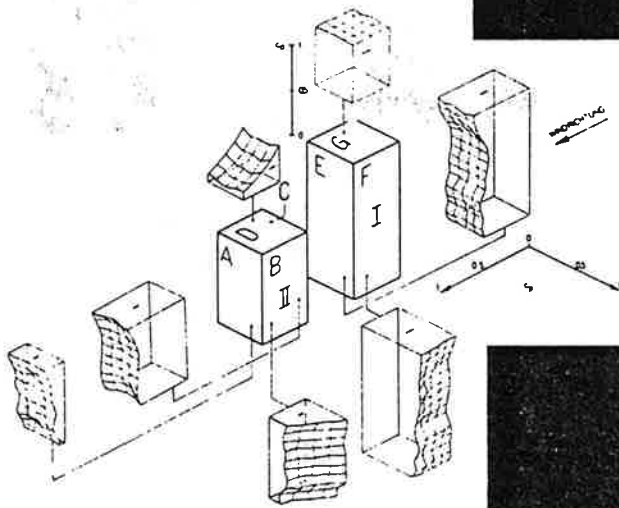
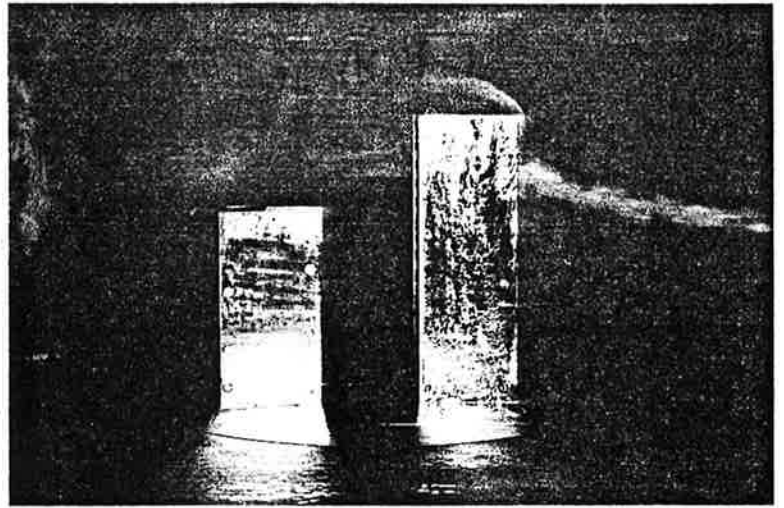
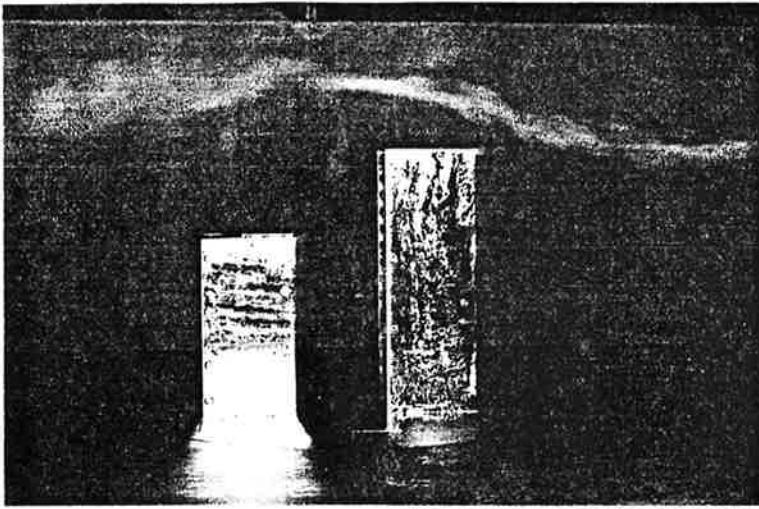


Fig. 9. Wind shelter effect of tall buildings in row formation - taller building upwind

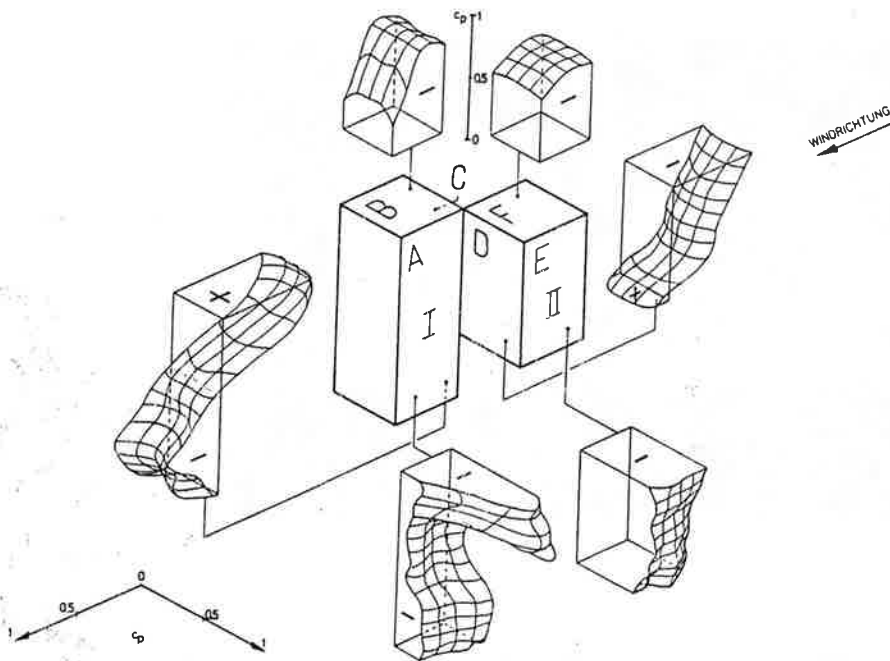
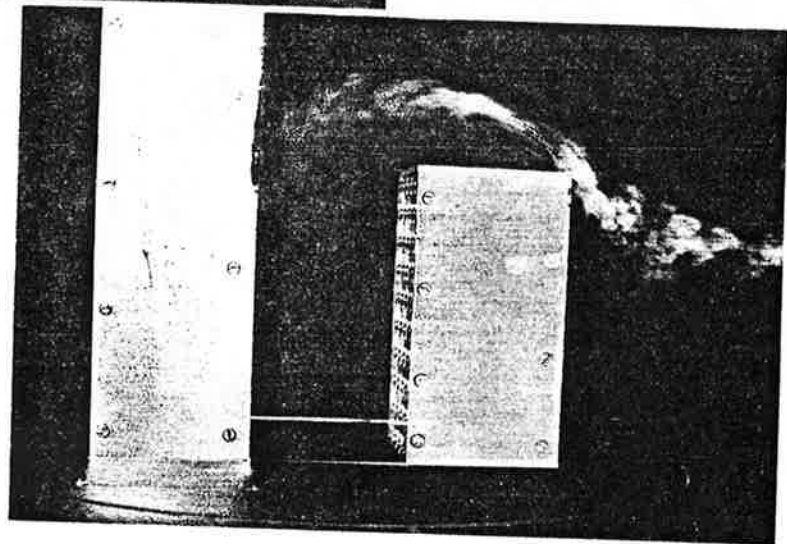
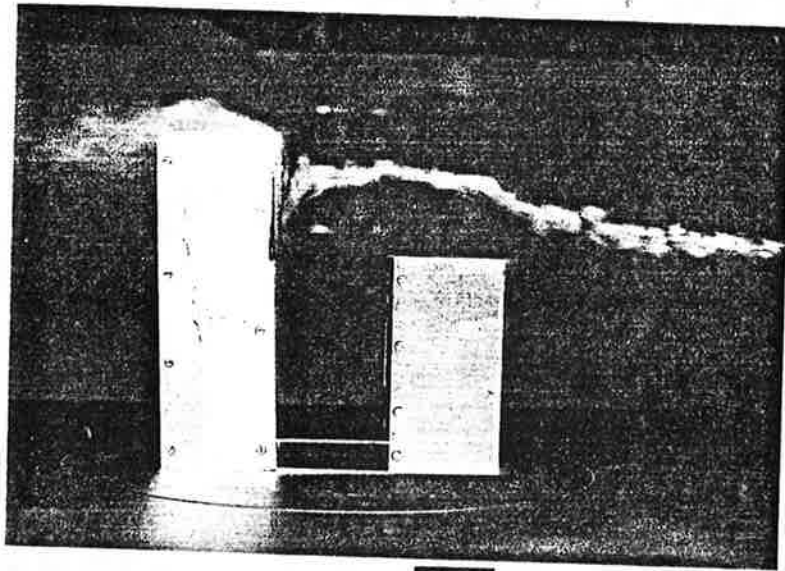


Fig. 10 Wind shelter effect of tall buildings in row formation - taller building downwind.

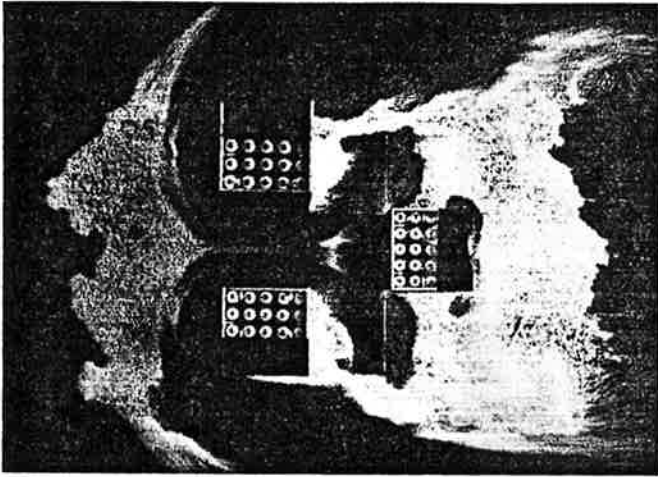


Fig. 11

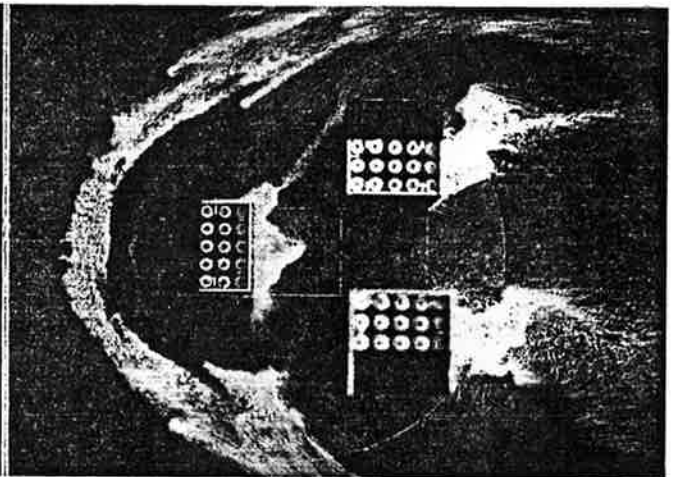


Fig. 12

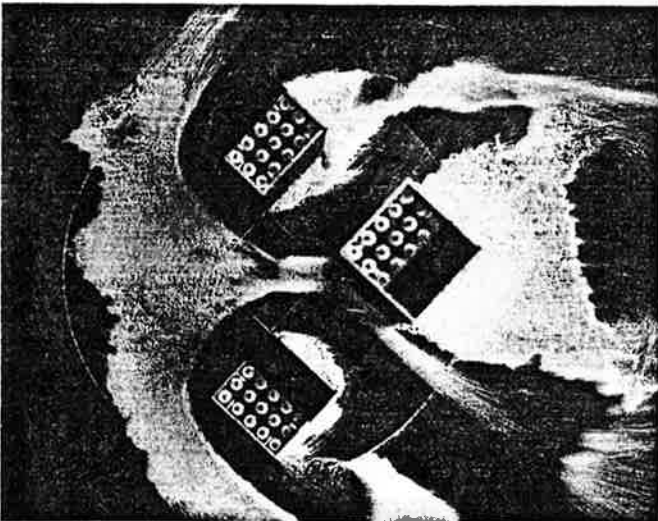


Fig. 13

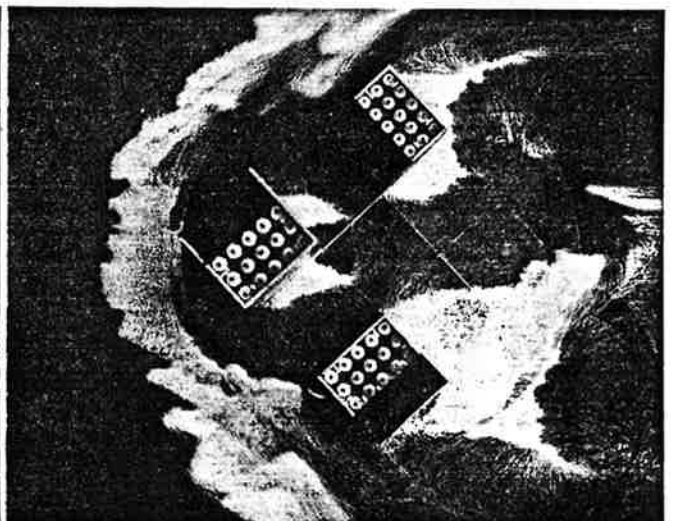


Fig. 14

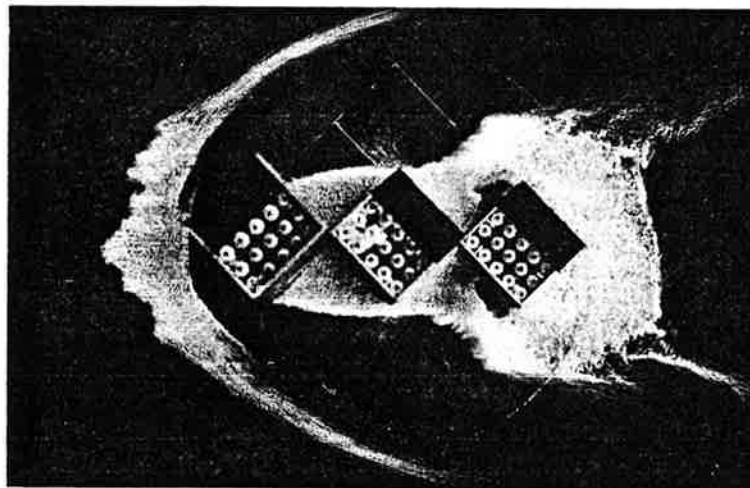


Fig. 15

Figs. 11 to 15 Structure of the boundary layer in the immediate vicinity of the ground for complex building arrays.