



Business Park E.T.V.
Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn
The Netherlands

www.mep.tno.nl

T +31 55 549 34 93
F +31 55 541 98 37
info@mep.tno.nl

TNO-report

R 2001/369

**Die Ermittlung von Bemessungswindlasten von
Gebäuden im Windkanal**

Date August 2001

Authors G.Th. Visser¹⁾ TNO-MEP
C.P.W. Geurts TNO Bouw
P. van Staalduinen TNO Bouw

Order no. 03000

Keywords

Intended for This article has been published in Bautechnik 78 (2001), Heft 1

¹⁾ Autor dieses Beitrags:
Dipl.-Ing. Gerard Th. Visser, TNO-MEP, Postbus 342, 7300 AH Apeldoorn,
Niederlande
Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Abteilung 'Milieukwaliteit en Analyse' von
TNO-MEP. Seit 1975 bei TNO als Projektleiter mit Windkanaluntersuchungen
beschäftigt

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm or
any other means without the previous written consent of TNO.

In case this report was drafted on instructions, the rights and obligations of contracting parties are
subject to either the Standard Conditions for Research Instructions given to TNO, or the relevant
agreement concluded between the contracting parties.

Submitting the report for inspection to parties who have a direct interest is permitted.

© 2001 TNO

Zusammenfassung

Die Windlasten eines Gebäudes lassen sich anhand von Normen ermitteln. Bei diesen Normen mussten Vereinfachungen vorgenommen werden, weil es zum Beispiel nicht möglich ist, alle möglichen Gebäudeformen und -abmessungen in Normen aufzunehmen. Bei einer von der Norm abweichenden Gebäudeform muß dieses Gebäude zu einer Form schematisiert werden, die in der Norm beschrieben wird. Im allgemeinen führt dies zu einer konservativen Bestimmung der Bemessungswindlasten. Auch der Einfluss eines komplexen städtischen Umfelds oder eines Hochhauses in der unmittelbaren Nähe lässt sich nicht anhand der Norm errechnen. In bestimmten Fällen, wie bei zwei unmittelbar benachbarten Gebäuden, können die Windlasten höher sein, als die Norm angibt. Wenn dann anhand der Norm vorgegangen würde, könnte dies zu einer unsicheren Konstruktion führen. In Windkanaluntersuchungen lassen sich die Wechselwirkungen sofort ermitteln. Die können dann im Entwurf mit einbezogen werden.

Hier wird angegeben, wie eine solche Windkanaluntersuchung durchzuführen ist und wie die Ergebnisse zu Bemessungswindlasten verarbeitet werden können. Aus einigen hier gegebenen Beispiele geht hervor, dass die Bemessungswindlasten an Gebäuden, die nicht unmittelbar in Normen beschrieben werden oder die nur nach starker Schematisierung mit Normen berechnet werden können, sich hervorragend in Windkanaluntersuchungen ermitteln lassen. Dadurch kann die Berechnung und damit die Baukonstruktion von Gebäuden optimal vorgenommen werden.

Determination of design wind loads on buildings by wind tunnel tests

Wind load on buildings can be calculated by means of standards. As it is e.g. not possible for all conceivable shapes and dimensions of buildings to be included in standards, it was necessary to make simplifications. The concept of a non-standard building has to be converted schematically into a standard shape. This generally results in a conservative determination of the design wind load. The effect of a complex urban environment or the proximity of a high-rise building cannot be included in the calculations on the basis of standards, either. In certain cases the wind load can be higher than is provided for in the standard, e.g. if two buildings stand very close to each other. Adherence to the standard could then result in structural unsafety. Wind tunnel tests are used to instantly determine the interactions so that they can be considered in the design.

This article describes how such wind tunnel tests are to be made and how the results can be processed into design wind load values. A few examples given here demonstrate that wind tunnel tests are very suitable to determine the design wind load on non-standard buildings or on buildings that require a high degree of schematization before standards can be applied. By doing so, the calculation as well as the structural design of buildings can be optimized.

Inhaltsangabe

Zusammenfassung	2
1. Einleitung	4
2. Windlasten gemäß den Bauvorschriften	6
3. Windkanaluntersuchungen	8
3.1 Atmosphärischer Grenzschichtwindkanal	8
3.2 Modellieren von Gebäuden mit ihrer Umgebung	9
3.3 Messtechnik der Belastungsermittlung	11
3.3.1 Winddruckmessungen	11
3.3.2 Windkraftmessungen	12
3.4 Verarbeitung der Windkanaldaten zu Bemessungswindlasten	12
3.4.1 Extremwertanalyse	12
3.4.2 Einfluss künftiger Entwicklungen in Gebäudenähe	13
3.4.3 Nutzbarmachung der Messwerte für praktische Anwendungen	13
3.4.4 Die Berücksichtigung dynamischer Effekte	14
4. Beispiele von Windlastuntersuchungen im Windkanal	15
4.1 Niederländischer Pavillon für die EXPO 2000 in Hannover	15
4.2 Mondriaanturm in Amsterdam	17
5. Schlussfolgerungen aus den Beispielen	22
6. Literatur	23
7. Authentication	24
Anlage Modelluntersuchungen im Windkanal	

1. Einleitung

Die Windlasten eines Gebäudes ergeben sich aus dem lokalen Windklima, dem es ausgesetzt ist, sowie aus seiner Form und seinen Abmessungen. Zur Berechnung der Wirkung des Windes auf Bauwerke verwendet man Rechenregeln aus Normblättern. Die Anwendung dieser Regeln ergibt Rechenwerte der Windlasten am Bauwerk. Dabei handelt es sich entweder um die auf die Tragkonstruktion des Gebäudes einwirkenden Kräfte oder um die lokalen Belastungen einzelner Fassaden- oder Dachelemente. Innerhalb Europas wird zur Zeit die Europäische Windlastnorm fertiggestellt [1]. Dieser bildet gleichzeitig auch die Grundlage der neuen deutschen Windlastnorm DIN 1055, Teil 4 [2].

In den Bauvorschriften werden verschiedene Vereinfachungen vorgenommen: Die Auswirkungen des lokalen Windklimas werden zur Wahl der in Rechnung zu stellenden Bemessungsgeschwindigkeit schematisiert. Es sind Rechenregeln zur Modellierung der Gelände-Rauigkeitseffekte vorgesehen, bei denen die Auswirkungen benachbarter Gebäude stark vereinfacht sind. Außerdem wird die Gebäudeorientierung gegenüber der Windrose normalerweise nicht berücksichtigt.

Die Auswirkungen der Gebäudehöhe und -dimensionierung kommen in den verwendeten Druckbeiwerte zum Ausdruck. Es ist nicht möglich, alle möglichen Gebäudeformen und -abmessungen in die Bauvorschriften aufzunehmen. Daher sind die Druckbeiwerte einer begrenzten Zahl von Gebäudeformen angegeben. In den meisten Fällen wird es möglich sein, das zu errichtende Bauwerk in einer dieser Gebäudeformtypen unterzubringen; dies wird im Allgemeinen jedoch zu einer konservativen Wahl führen.

Bei einfachen Gebäudeformen (z.B. bei Gebäuden mit rechtwinkligem Grundriss und Querschnitt) in ungestörter Umgebung lassen sich die Winddrücke auf die Fassadenpaneele und Dachteile mit Hilfe der heutigen Normen befriedigend berechnen. Bei abweichenden Gebäudeformen, bei Gebäuden, die sich in einem komplexen städtischen Umfeld befinden, oder im Falle von mehreren benachbarten Hochhäusern trifft dies jedoch nicht zu. Stehen zwei Hochhäuser unmittelbar nebeneinander, so kann zum Beispiel Interferenzwirkung auftreten, durch die namentlich die lokalen Windsogeffekte deutlich höher ausfallen können, als die Norm angibt.

In solchen Fällen kann der Normengebrauch also zu unsicheren Bauwerken führen. Daneben gibt es aber auch Situationen, in denen der Entwurf aufgrund der Normen unwirtschaftlich sein kann, was die Arbeit des Architekten erschweren kann, zum Beispiel dann, wenn die Orientierung oder Form des Gebäudes geringere Windlasten ergibt, als aufgrund der Norm zu erwarten wäre.

Fällt ein Gebäude nicht in den Anwendungsbereich der Vorschriften oder will man aus anderen Gründen die Windlasten genauer kennen, so sind Modelluntersuchungen in einem geeigneten atmosphärischen Grenzschichtwindkanal die beste Alternative. In diesem Artikel werden die Möglichkeiten von Windkanaluntersuchungen bei der Bestimmung der Bemessungswindlasten an Gebäuden besprochen werden. Zunächst wird die Berechnungsgrundlage der Europäischen Windlastnorm erläutert, wobei angegeben wird, welche Faktoren mit Hilfe von Windkanaluntersuchungen ermittelt werden können. Anschließend werden die Windkanaleigenschaften sowie die Anforderungen an das Windkanalmodell und an die Verarbeitung der Messdaten besprochen. Die Vorgangsweise wird anhand von zwei Beispielen erläutert.

2. Windlasten gemäß den Bauvorschriften

Die Bemessungswindlasten entstehen aus den quasi-statischen Windlasten nach Multiplikation mit einem Vergrößerungsfaktor, mit dem die dynamischen Effekte berücksichtigt werden. In der Europäischen Windlastnorm ENV 1991-2-4 [1] kommt folgendes Verfahren zum Einsatz:

$$F_w = c_e q_p(z_e) c_f A_{ref} c_{cor}$$

wobei:

$$c_e(z) = c_r^2(z) c_t^2(z) [1 + 2k_p I_v(z)]$$

$$c_r(z) = k_t \ln(z / z_0) \quad \text{für} \quad z_{\min} \leq z \leq 200 \text{ m}$$

$$c_r(z) = k_t \ln(z - z_0) \quad \text{für} \quad z < z_{\min}$$

$$k_t = k_{t,II} (z_0 / z_{0,II})^{0,07}$$

$$q_p = \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2$$

Dabei ist:

- F_w Windlast;
- c_e Aussetzungsfaktor;
- A_{ref} dem windausgesetzte Fläche;
- c_f Gesamtwinddruckbeiwert;
- ρ spezifische Masse der Luft;
- i_v Turbulenzintensität;
- k_p Spitzenfaktor; bei quasi-statisch reagierenden Bauwerken auf 3,5 festgesetzt;
- c_t topographischer Koeffizient, der in diesem Artikel nicht berücksichtigt wird;
- k_t Gelände-Rauigkeitsfaktor, der von der Rauigkeitslänge z_0 abhängt;
- q_p Grundstaudruck;
- v_{ref} Grundwindgeschwindigkeit;
- c_{cor} entspricht diversen, in diesem Artikel nicht berücksichtigten Korrekturfaktoren.

Dynamische Effekte werden durch das Multiplizieren von F_t mit einem Faktor c_d berücksichtigt. Dieser Faktor c_d hängt besonders stark von der Eigenfrequenz und der Dämpfung des Gebäudes ab. Was seine Ableitung betrifft, wird auf die ENV 1991-2-4 verwiesen. In diesem Artikel werden die Effekte dynamischer Reaktionen nicht weiter behandelt werden. Für die meisten Bauwerke genügt es, von linearen Schwingungsformen auszugehen, wofür es Rechenregeln gibt. Spezielle

Windkanaluntersuchungen zur direkten Messung dynamischer Effekte werden in diesem Artikel nicht behandelt.

In den Vorschriften werden die Werte der Faktoren c_f je nach Form und Dimensionierung des Bauwerks in Figuren und Tabellen angegeben. Außerdem kann c_f aus den in der ENV 1991-2-4 angegebenen Druckbeiwerten abgeleitet werden. Es ist jedoch unmöglich, in diese Normen alle möglichen Formen aufzunehmen. Darüber hinaus sollte man sich im Klaren sein, dass in den Normen konservative Annahmen gemacht werden, zum Beispiel, um mit einer begrenzten Zahl von Figuren und Zahlen so viele Gebäudeabmessungen wie möglich abzudecken.

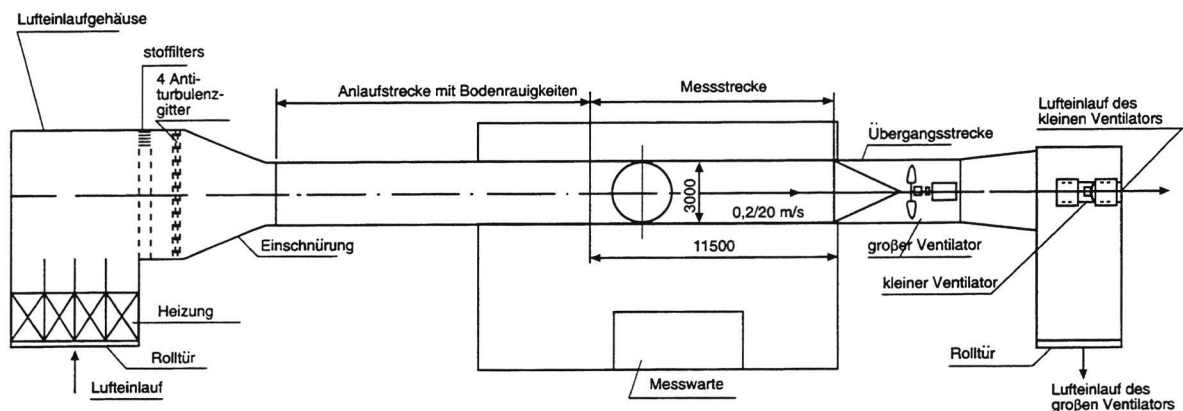
3. Windkanaluntersuchungen

3.1 Atmosphärischer Grenzschichtwindkanal

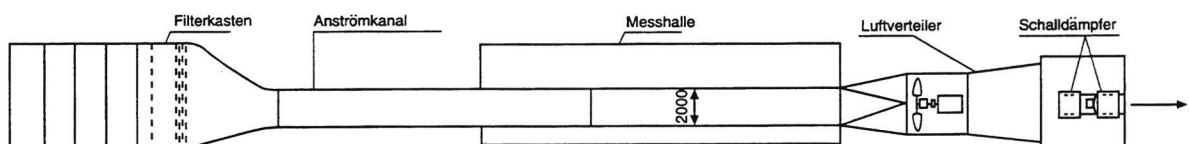
Ein Windkanal ist ein Instrument, in dem die Effekte einer Luftströmung an bzw. in der Nähe von Gegenständen unter konditionierten Bedingungen untersucht werden können. Bei Untersuchungen der Windwirkung auf Gebäude benutzt man maßstabsgetreue Modelle, üblicherweise im Bereich zwischen 1:100 und 1:1000.

Ein Windkanal ist mit einem oder mehreren Ventilatoren ausgerüstet, durch die die Luftströmung hervorgerufen wird. In einer Messstrecke, die normalerweise mit einer Drehplatte ausgestattet ist, befinden sich die zu untersuchenden Objekte. Stromauf der Messstrecke befindet sich der Teil, in dem die gewünschten Strömungseigenschaften hervorgerufen werden (Figur 1). Bei einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal müssen die Windeigenschaften wie das Windgeschwindigkeitsprofil und die Windschwankungen simuliert werden. Je nach dem Zweck der zu verrichtenden Messungen sind manchmal noch weitere Maßstabsparameter einzuhalten. Diese werden im nächsten Paragraphen behandelt.

Aufsicht



Seitenriss



Aufsicht und Seitenriss des Windkanals in Apeldoorn

Figur 1 Der atmosphärische Grenzschichtwindkanal bei TNO.

3.2 Modellieren von Gebäuden mit ihrer Umgebung

Das Windfeld eines bebauten Geländes wird nicht nur durch die Abmessungen des betrachteten Gebäudes, sondern auch durch die Höhe und Lage der benachbarten Gebäude sowie durch die Eigenschaften des ungestört anströmenden Windes bestimmt. Um aus Modelluntersuchungen eine gute Simulation der Wirklichkeit zu erhalten, müssen daher mehrere Bedingungen erfüllt sein:

1. Das betrachtete Gebäude bzw. der Gebäudekomplex muss maßstabsgetreu nachgebildet werden. Dabei ist der Maßstab so zu wählen, dass der Windkanaldurchmesser durch das Modell nicht zu stark blockiert wird. Dabei gelten Blockierungsprozentsätze von etwa 5% als Grenze [3, 4]. Sollen lokale Winddrücke an Fassaden oder Dachteilen gemessen werden, so sind auch die relevanten Fassadendetails so gut wie möglich in das Modell aufzunehmen.
2. Auch die das betrachtete Gebäude umgebende Bebauung ist - in einem Umkreis von 300 m - schematisch im Modell mit zu berücksichtigen.
3. Die Eigenschaften des anströmenden Windes sind maßstabsgetreu zu modellieren.

Bei TNO können standardmäßig sechs verschiedene atmosphärische Grenzschichten erzeugt werden, von einer Meeresgrenzschicht bis zu einer Grenzschicht über einem Großstadtgebiet. Je nach Lage des betrachteten Gebäudes wird die geeignetste Grenzschicht gewählt.

In jeder Windrichtung können Abweichungen der benutzten Grenzschicht sowie innerhalb eines Radius von 5 km auch Rauigkeitsübergänge (wie Wasser-Stadt oder Weide-Stadt) berücksichtigt werden.

Die Eigenschaften des durchschnittlichen Wind-Höhenprofils müssen maßstabsgetreu sein: Die Gebäudehöhe und die Rauigkeitslänge müssen am natürlichen Objekt und im Windkanal im gleichen Verhältnis stehen. Dies wird durch die sogenannte Jensen-Zahl H/z_0 ausgedrückt. Es muss also gelten:

$$\left(\frac{H}{z_0} \right)_{wt} = \left(\frac{H}{z_0} \right)_{vs}$$

Hierbei steht wt für Windkanal, und vs für das natürliche Objekt.

H ist die Höhe des Gebäudes

z_0 ist der Rauigkeitslänge.

Bei einer Analyse der Windlastextremwerte ist auch die Zeitachse richtig zu modellieren. Mehrere Zeitfaktoren sind von Bedeutung, worunter die Dauer einer Messung, anhand derer die Extremwerte bestimmt werden oder die Dauer der Böen, die modelliert werden. Daneben kommt es auch auf die Messfrequenz und die Eigenfrequenzen des zu untersuchenden Gebäudes an. Dabei muss stets die folgende Gleichung erfüllt sein:

$$\left(\frac{TV}{H}\right)_{wt} = \left(\frac{TV}{H}\right)_{vs}, \text{ oder } \left(\frac{nH}{V}\right)_{wt} = \left(\frac{nH}{V}\right)_{vs}$$

Hier ist:

- T der Zeitfaktor, beispielsweise die Messdauer oder Dauer der Böen in s;
- n eine Frequenz, beispielsweise die Mess- oder Eigenfrequenz des Bauwerks in Hz;
- V die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in m/s;
- H ein Längenmaß, beispielsweise die Höhe des Gebäudes in m.

Aufgrund der Maßstabsregel braucht beispielsweise die Windkanalgeschwindigkeit mit der am natürlichen Objekt nicht übereinzustimmen. Beträgt der geometrische Maßstab beispielsweise 1:250 und die Windkanalgeschwindigkeit etwa 15 m/s, so entspricht dies einer Windgeschwindigkeit am natürlichen Objekt von 30 m/s (dies stimmt größenordnungsmäßig mit der Windgeschwindigkeit in den Vorschriften überein), der Zeitfaktor ist demnach gleich:

$$\frac{T_{wt}}{T_{vs}} = \frac{n_{vs}}{n_{wt}} = \frac{1}{250} \frac{2}{1} = \frac{1}{125}$$

Werden bei Windkanalmessungen die Spitzendruckwerte am natürlichen Objekt bei einer Messdauer von 1 s ermittelt, so entspricht dies im Windkanal einer Messdauer von 1/125 s. In der Praxis bedeutet dies, dass eine Messfrequenz in der Größenordnung von 500 Hz oder mehr angehalten werden muss.

Ein bekannter Faktor ist die Reynolds-Zahl Re . Sie entspricht

$$Re = \frac{VH}{\nu}$$

wobei ν die kinematische Viskosität des Mediums darstellt.

Die Reynolds-Zahl ist von Bedeutung, wenn Nachlasseffekte der Strömung an Objekten modelliert werden sollen. Da man in Windkanälen mit normaler Luft arbeitet, die im Modell also dieselbe Viskosität aufweist als am natürlichen Objekt, wird in Modelluntersuchungen die Reynolds-Zahl nie erreicht, wenn man einmal von sehr hohen Windkanalgeschwindigkeiten, die in der Praxis nicht realistisch sind und bei denen die Strouhal-Zahl nicht mehr erreicht werden kann, absieht.

Bei der Ermittlung der Belastung spitzwinkliger Bauwerke hat sich dies auch als unnötig erwiesen. In diesem Fall wird das Nachlass-Trajekt in erster Linie durch die Gebäudeform und nicht durch die Reynolds-Zahl bestimmt.

Bei der Simulation der ungestörten Anströmung im Windkanal gibt es für die Reynolds-Zahl hingegen eine Minimalforderung. Die WTG-Richtlinie gibt eine Forderung für Re an, wobei für V die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* verwendet wird.

Bei runden Gebäudeformen ist dies schwieriger. Korrekturen der in Windkanaluntersuchungen ermittelten Druckbeiwerte sind dann erforderlich. Gewöhnlich ist der im Windkanal ermittelte Wert eher konservativ. Daneben ist es aber auch möglich, im Windkanal die Modellfläche aufzurauen, wodurch sich der Ort, an dem die Wirbelströmung nachlässt, bis zu einem gewissen Grad beeinflussen lässt.

3.3 Messtechnik der Belastungsermittlung

Die Windlasten eines Gebäudes werden durch die Drücke, die auf seine Außenseite einwirken, bestimmt. Diese ergeben zusammen die Kraft, der das Gebäude als Folge des Windes ausgesetzt ist. Im Folgenden wird kurz angegeben, welche Messungen bei der Untersuchung unterschiedlicher Fragen zu den Windlasten von Gebäuden vorgenommen werden können.

3.3.1 Winddruckmessungen

Der Winddruck wird mit Hilfe von Differenzdruckmessern ermittelt. Diese stellen den Unterschied zwischen dem auf die Außenwand des Modells einwirkenden und dem atmosphärischen Druck fest. Dieser Unterschied entspricht dem vom Wind hervorgerufenen Druck. Da im Windkanal gleichzeitig auch der dynamische Druck, bzw. die Windgeschwindigkeit gemessen wird, können anhand dieser Messungen auch die Druckbeiwerte ermittelt werden.

Druckmessungen werden in erster Linie für die Bestimmung der lokalen Druckbeiwerte benötigt, die zur Berechnung der Windlasten von Gebäudeteilen erforderlich sind.

Daneben können diese Messungen aber auch für die Bestimmung der Gesamtlasten eines Gebäudes verwendet werden. Dazu benötigt man eine ausreichende Zahl von Messpunkten, an denen simultan gemessen werden muss. Solche Messdaten können beispielsweise in Finiten-Elementenprogramme eingegeben werden, woraus unter anderem das dynamische Verhalten von Bauwerken errechnet werden kann.

3.3.2 Windkraftmessungen

Die Gesamtwindlasten von Gebäuden können gemessen werden, indem man an einem Gebäudemodell eine Sechs-Komponentenwaage aufstellt. Damit können die Kräfte F_x , F_y , F_z und die Momente M_x , M_y und M_z als Funktion der Windrichtung gemessen werden.

Bei Windkanalmessungen werden die Windkräfte als Funktion der spezifischen Gebäudeform in der Umgebung ermittelt. Auch der Einfluss der umgebenden Bebauung wird unmittelbar berücksichtigt.

3.4 Verarbeitung der Windkanaldaten zu Bemessungswindlasten

Die Ergebnisse einer Windkanaluntersuchung zur Ermittlung der Windlasten von Gebäuden und Gebäudeteilen werden anstelle einer Bauvorschrift angewendet werden. Dies bedeutet, dass das Ergebnis den Zuverlässigkeitsanforderungen, wie sie beispielsweise für die Europäische Windlastnorm gelten, entsprechen muss. Das Ergebnis der Messdatenverarbeitung wird bereits in repräsentativen Werten ausgedrückt werden. Hierzu ist eine Analyse der gemessenen extremen Drücke, Kräfte oder Momente erforderlich. Daneben muss festgestellt werden, inwieweit die untersuchte Situation alle Belastungen, die sich im Laufe der Gesamtlebensdauer des Gebäudes ergeben können, ausreichend abdeckt. Im Folgenden wird etwas näher auf diese beiden Aspekte eingegangen.

3.4.1 Extremwertanalyse

Der Vorteil der Windkanaluntersuchungen ist, dass sowohl die spezifische Gebäudeform als auch die Orientierung gegenüber der Windrichtung berücksichtigt wird. Die Formeffekte kommen namentlich in den Formfaktoren, die in den Windkanaluntersuchungen ermittelt werden, zum Ausdruck; die Orientierungseffekte werden mit Hilfe der Extremwertstatistik, wie sie aus den Messdaten von Wetterstationen errechnet werden, in die Berechnungen mit einbezogen. Bei der Verarbeitung von Windkanaluntersuchungen werden die Extremwert-Verteilungen der Formfaktoren mit den Extremwertverteilungen der Windgeschwindigkeiten zu einer Wahrscheinlichkeitsverteilung zusammengefasst. Aus dieser Verteilung kann der Gesamtbelastungswert (für Druck, Kraft bzw. Moment) ermittelt werden, wie er einmal innerhalb von 50 Jahren zu erwarten ist. Dies ist der für die Belastung repräsentative Wert. Das anzuwendende Verfahren wurde von Cook [5] ausgearbeitet.

3.4.2 Einfluss künftiger Entwicklungen in Gebäudenähe

Bei Windkanaluntersuchungen ist es üblich, die unmittelbare Gebäudeumgebung beim Modellieren auf der Drehplatte mit zu berücksichtigen. Hierbei ist jedoch unklar, inwieweit künftige Entwicklungen, wie etwa der Abbruch oder die Errichtung benachbarter Hochhäuser, die Belastungen möglicherweise ungünstig beeinflussen können. Entscheidend ist, dass man sich von Anfang an Klarheit darüber verschafft, welche Rolle solche Entwicklungen im Gebäudeumfeld beim untersuchten Gebäude haben kann. Falls es für relevant gehalten wird, kann man erwägen, das Gebäude beispielsweise ohne seine unmittelbare Umgebung zu untersuchen, wobei die Rauigkeit seines Vorlandes sich bis auf die Drehplatte fortsetzt. In einem solchen Fall sind die spezifischen Formeigenschaften des Gebäudes und seine Orientierung gegenüber der Windrichtung zu berücksichtigen, eventuelle Abschirmeffekte benachbarter Gebäude werden hingegen vernachlässigt.

3.4.3 Nutzbarmachung der Messwerte für praktische Anwendungen

Das Ergebnis der Verarbeitung von Windkanalmessungen ist in vielen Fällen für jeden Belastungseffekt ein repräsentativer Wert, beispielsweise eine Kraft F_x , F_y und Momente M_x , M_y , M_z . Diese Repräsentativwerte sind nicht völlig korreliert und werden dementsprechend auch nicht gleichzeitig auf das Bauwerk einwirken. Ebenso wenig sind diese Werte aber auch völlig unkorreliert, sie können demnach auch nicht als völlig unabhängig betrachtet werden. Bei der Nutzbarmachung der Windkanaldaten für praktische Zwecke ist also entscheidend anzugeben, welche Kombinationen von Lasteffekten zu berücksichtigen sind. Xie u.a. [6] haben für Kraft- und Momentmessungen an einem Hochhaus dafür einen Hinweis gegeben. Es ergeben sich insgesamt 24 Kombinationen von M_x , M_y und M_z , die in der Konstruktionsberechnung berücksichtigt werden.

Eine andere Möglichkeit ist die Analyse der Lasteffekte mithilfe von Finiten-Elementenmodellen oder von anderen Methoden, bei denen die ermittelten Werte in Echtzeit in die Berechnung aufgenommen werden können. Anhand simultaner Druckmessungen kann dies an mehreren Stellen an einem Gebäude geschehen. Für jeden gewünschten Belastungseffekt und für jedes willkürlich in die Berechnung aufgenommene Konstruktionselement kann eine solche Echtzeitberechnung durchgeführt werden. Daraus ergeben sich Zeitverlaufswerte dieser Lasteffekte, die anhand einer Extremwertanalyse durchgerechnet werden können. In der Praxis dürfte ein solches Verfahren heutzutage noch nicht allzu häufig angewendet werden, für die Zukunft ist eine häufigere Verwendung dieser Methode aber durchaus zu erwarten.

3.4.4 Die Berücksichtigung dynamischer Effekte

Mit den genannten Verfahren werden Ergebnisse über die sogenannte quasi-statische Belastung erhalten. Bei Hochhäusern liegen die Eigenfrequenzen der Bauwerke oft im Frequenzbereich von Wirbelströmungen und Böen, sodass ein dynamischer Respons auftreten wird. Der Einfluss einer solchen Dynamik kann, falls erforderlich, in unterschiedlicher Weise berücksichtigt werden:

- Mit Hilfe aeroelastischer Modelle kann der dynamische Respons unmittelbar gemessen werden. Dies erfordert eine genaue maßstabsgetreue Wiedergabe der Masse- und Steifigkeitseigenschaften des Bauwerks im Modell, also die Anfertigung teurer Gebäudemodelle. Dies lohnt sich nur, wenn mit einem komplexen dynamischen Verhalten zu rechnen ist. Aeroelastische Untersuchungen werden normalerweise nur beim Entwurf von Brücken mit großen Spannweiten angewendet. Für Gebäude gibt es weniger aufwendige Methoden.

Diese einfacheren Methoden beruhen auf den Ergebnissen von Windkanaluntersuchungen. So kann man bei den dynamischen Vergrößerungsfaktoren die Rechenmethode aus der Europäischen Windlastnorm anwenden. Es ist auch möglich, ein Gebäude als ein Masse-Federsystem zu modellieren, in dem die Kräfte und Formänderungen auf der Grundlage der im Windkanal gemessenen Windlasten berechnet werden können; daraus ergibt sich dann ein Wert für den dynamischen Vergrößerungsfaktor.

4. Beispiele von Windlastuntersuchungen im Windkanal

Im Folgenden werden zwei Fälle behandelt, bei denen Gebäude im Windkanal bei TNO untersucht worden sind. Dabei wird die Ermittlung der Druckbeiwerte für die beiden Gebäude erläutert und ein Vergleich mit den Berechnungen gemäß der Europäischen Windlastnorm ENV 1991-2-4 angestellt.

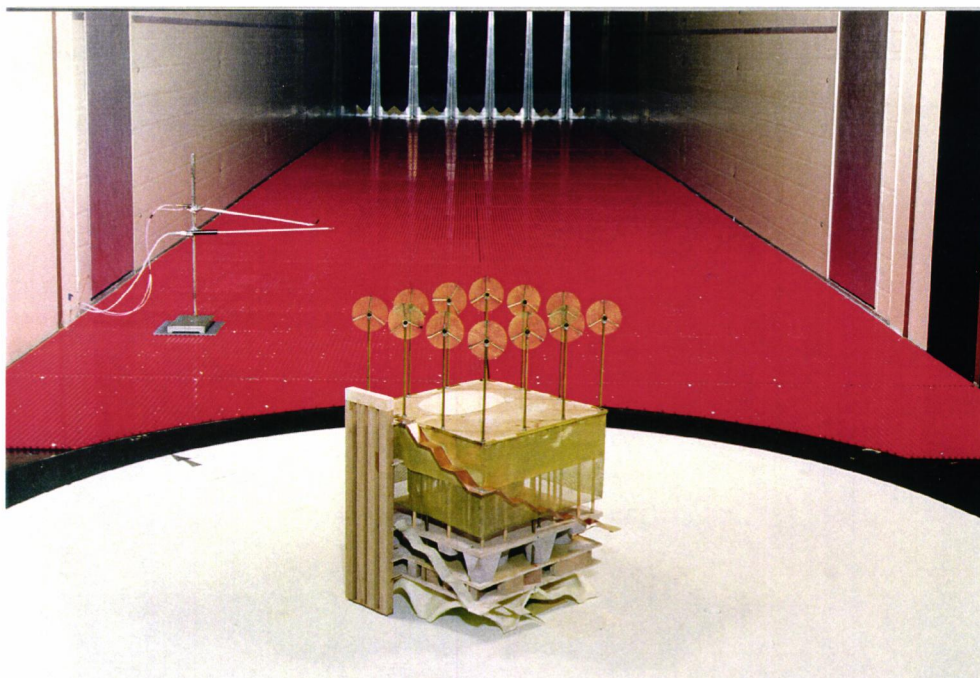
4.1 Niederländischer Pavillon für die EXPO 2000 in Hannover

Die EXPO 2000 in Hannover hat zum Thema 'Mensch-Natur-Technik'. Im Entwurf des niederländischen Pavillons (des Architektenbüros MVRDV) wurde dies auf das Thema 'Holland schafft Raum' zugespitzt. Der Raum wird geschaffen, indem im niederländischen Pavillon verschiedene niederländische Landschaftstypen übereinander angeordnet sind, zum Beispiel eine Dünenlandschaft, eine Gewächshauslandschaft und eine Etage mit lebenden Bäumen. Auf dem Dach kommt ein Teich mit einem Versammlungssaal. Das Wasser aus dem Teich fließt über den Dachrand ab und bildet für die gesamte oberste Etage einen 6 m hohen Wasservorhang. Am Dachrand sind Windturbinen montiert.

Die Fassaden des 40 m hohen Gebäudes sind größtenteils offen, so dass der Wind frei hindurchwehen kann. Dieser spezielle Gebäudeentwurf kann verschiedenartige Windprobleme verursachen. Auch durch den Wasservorhang an der obersten Etage können sich bei Wind Probleme ergeben.

Daher wurde bei TNO ein Pavillonmodell intensiv im Windkanal getestet (Figur 2). Dabei wurde ein möglicher Verlust an Windkomfort in den verschiedenen Gebäudeetagen, die Windlasten der Haupttragkonstruktion sowie die Winddrücke am Ort der Klimaanlage in Augenschein genommen.

Für dieses Gebäude, ohne Fassaden, aber mit allerlei Hindernissen in Form von Gewächshäusern, Bäumen usw. innerhalb der verschiedenen Etagen, sind die Bemessungswindlasten am Fundament mit Hilfe von Normen nicht festzustellen. Außerdem stehen mehrere Windturbinen auf dem Dach, wodurch zusätzliche Momente auf das Gebäude ausgeübt werden. Die Windturbinen stehen, je nach Windrichtung, einander bis zu einem gewissen Grade gegenseitig im Windsog, wodurch sich die Effekte bei verschiedenen Windrichtungen stark unterscheiden können.



Figur 2 Das Windkanalmodell für die EXPO 2000 im Windkanal von TNO.

Bei TNO wurden im Windkanal mit Hilfe einer Sechs-Komponentenwaage die Windkräfte und -momente am Gebäude bestimmt, sowohl für die Situation mit als auch ohne Windturbinen. Dabei wurde der Windwiderstand laufender Windturbinen modelliert.

Die Bemessungsgeschwindigkeit hängt vom lokalen Windklima ab und wurde anhand der Angaben aus der Europäischen Windlastnorm [1] berechnet. Die hieraus errechnete Windgeschwindigkeit gilt für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren. In diesem speziellen Fall steht das Gebäude allerdings nur während der EXPO 2000. Daher wurde der Bezugszeitraum auf ein Jahr festgesetzt. Da die Bemessungsgeschwindigkeit vom Bezugszeitraum abhängt, wurde mit einer niedrigeren Bemessungsgeschwindigkeit gerechnet. Diese wurde anhand der Berechnungsmethode aus der ENV 1991-2-4 errechnet.

Die Berechnungen führten zu den in Tabelle 1 wiedergegebenen Bemessungswindlasten am Fundament:

Tabelle 1 Bemessungswindlasten des EXPO 2000-Gebäudes.

	F_x (kN)	F_y (kN)	M_x (MNm)	M_y (MNm)	M_z (MNm)
ohne Turbinen	728	716	15,3	15,4	2,1
mit Turbinen	957	957	27,1	26,5	2,1

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass das Vorhandensein der Windturbinen zu bis zu 33% höheren Windkräften und bis zu 75% höheren Momenten führt. Die Kräfte und Momente mit Turbinen wurden vom Konstrukteur schließlich zur Dimensionierung der Konstruktion benutzt.

Figur 3 zeigt den niederländischen Pavillon, wie er auf der EXPO 2000 in Hannover gebaut wurde.

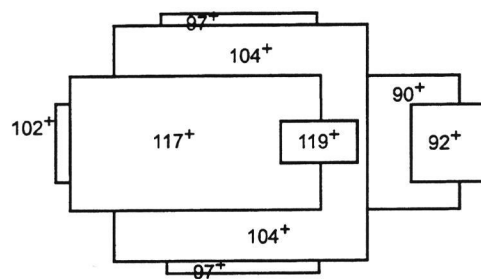


Figur 3 Der niederländische Pavillon auf der EXPO 2000 in Hannover.

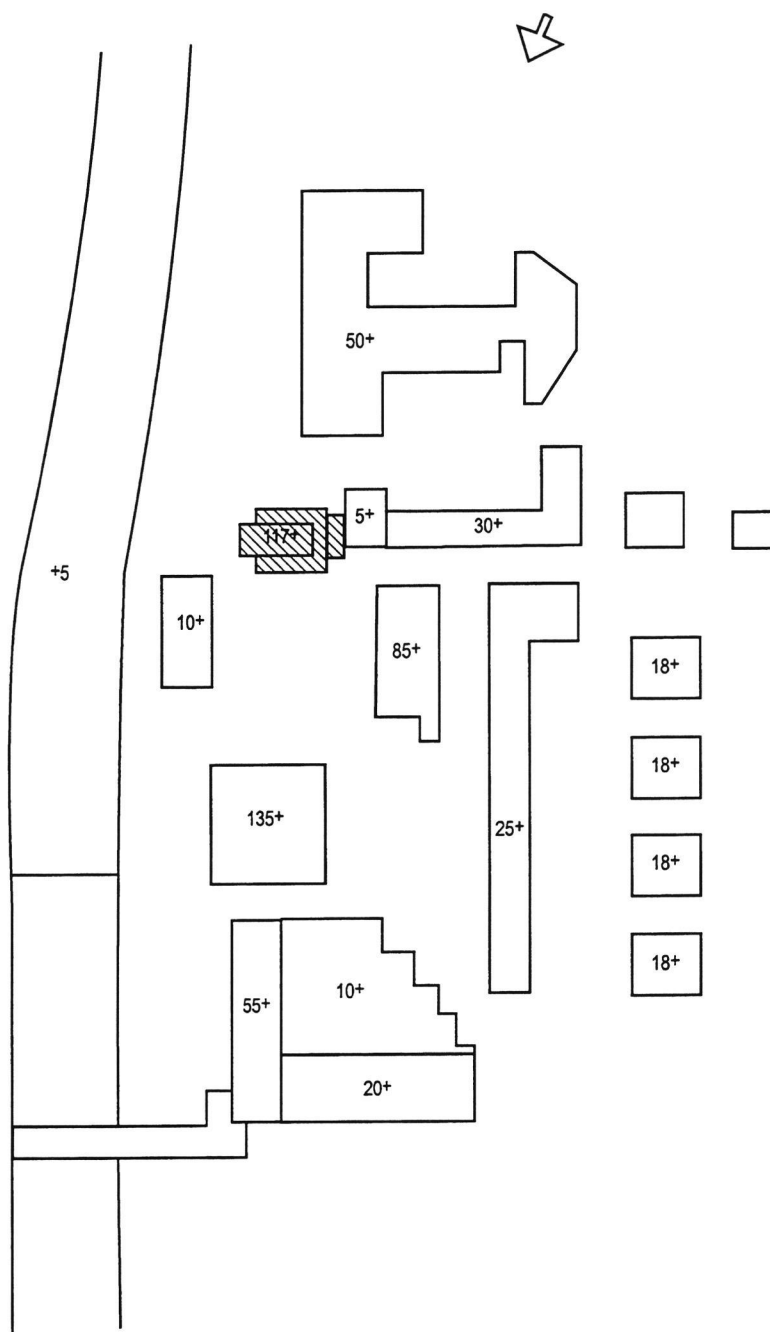
4.2 Mondriaanturm in Amsterdam

Der Mondriaanturm ist ein schmaler, etwa 117 m hoher Turm. Er hat einen aus mehreren zusammengefügt Rechtecken bestehenden Grundriss (Figur 4). Der Turm ist im Gebiet De Omval in Amsterdam projektiert. Die dortige Planung umfasst neben dem bestehenden 135 m hohen Rembrandtturm auch mehrere andere hohe Gebäude. Figur 5 gibt eine Übersicht.

Für den neuen Turm wurden Windkanaluntersuchungen ausgeführt, um festzustellen, wie stark die Belastungen der Haupttragkonstruktion sind und um die lokalen Windlasten der Fassadenelemente zu ermitteln.



Figur 4 Plan des Mondriaanturms.



Figur 5 *Stadtplan De Omval, Amsterdam.*

Windlasten des Turms

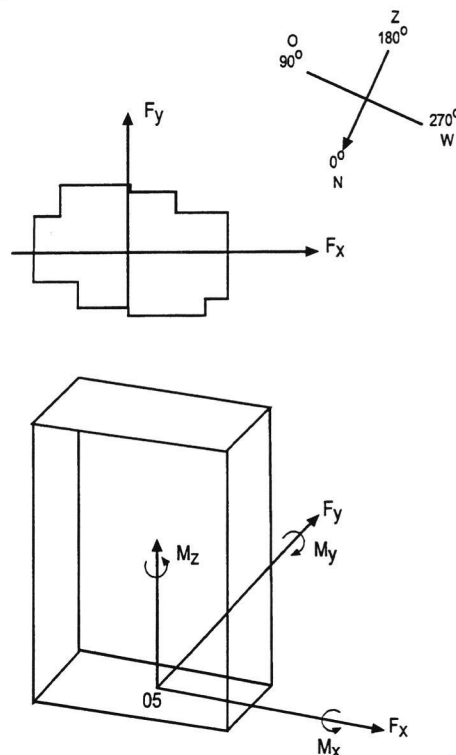
Die schwankenden Windkräfte wurden an einem speziellen starren Leichtgewichtmodell gemessen, das frei von der Drehscheibe auf eine dynamische Sechs-Komponentenwaage gestellt wurde. Für alle Windrichtungen im Abstand von 15° wurden die in der Zeit auftretenden schwankenden Kräfte und Momente registriert.

Figur 5 zeigt, dass der Mondriaanturm in einer komplexen Umgebung steht und von anderen hohen Gebäuden umgeben ist. Die künftige Umgebung dieses Büroturms könnte jedoch ganz anders aussehen als zur Zeit vermutet, beispielsweise deshalb, weil projektierte Gebäude letztendlich nicht gebaut bzw. derzeit vorhandene Gebäude abgerissen werden könnten. Dadurch erhält die Kenntnis des Einflusses benachbarter Gebäude auf die Windlasten des Büroturms einen besonderen Stellenwert.

Aufgrund dieser Überlegung wurde die Ermittlung der Windlasten der Haupttragkonstruktion unter drei verschiedenen Bedingungen vorgenommen:

1. Turm mit gegenwärtiger und projektierte Bebauung;
2. Turm ohne Nachbarbebauung;
3. Turm mit Nachbarbebauung aber ohne den projektierten Breitnerturm (85°) und ohne das vorhandene Delta Lloyd-Gebäude (50°).

Darüberhinaus wurde eine vergleichende Berechnung nach der niederländischen Norm NEN 6702 [7] vorgenommen. Für diese Berechnung war als Gebäudeform ein Quader gewählt. Das Achsensystem ist in Figur 6 wiedergegeben.



Figur 6 Das Achsensystem des Mondriaanturms.

In Tabelle 2 werden die gemessenen und berechneten Windkräfte am Windkanalmodell miteinander verglichen. In Tabelle 2 sind die Windlasten in Form eines Kraftbeiwertes ausgedrückt: $C_f = F/1/2\rho V^2$, wobei F die Bemessungskraft am Gebäude ist und $1/2\rho V^2$ den repräsentativen Staudruckwert der Wetterstation Schiphol darstellt. Der Effekt der Rauigkeitsübergänge zwischen Schiphol und der Stadt ist bei dieser Schreibweise in C_f untergebracht.

Tabelle 2 Bemessungskräfte und -momente am Mondriaanturm.

	F_x (kN/Pa)	F_y (kN/Pa)	M_x (MNm/Pa)	M_y (MNm/Pa)	M_z (MNm/Pa)
NEN 6702 [7]	5,56	8,67	0,52	0,34	–
Variante 1	3,37	6,83	0,37	0,20	0,03
Variante 2	3,01	7,40	0,41	0,18	0,03
Variante 3	3,06	7,50	0,38	0,19	0,03

Variante 2, ohne benachbarte Bebauung, kann als Bezugslage für einen Vergleich mit den Normen herangezogen werden. Für diese Variante ergeben die Windkanalmessungen, im Vergleich mit den Normen, einen deutlich niedrigeren Windwiderstand an der schmalen Gebäudeseite (F_x und M_y) sowie einen etwas niedrigeren Widerstand an der breiten Seite des Gebäudes (F_y und M_x). Diese niedrigeren Werte können zur Gänze der Gebäudeform zugeschrieben werden.

Es zeigt sich, dass die Schematisierung der Form eines komplex zusammengesetzten Gebäudes zu einem Rechteck leicht zu einer Überschätzung der Windlasten führt. Die Tabelle ergibt kein Bild der zu berücksichtigenden Kombinationen. Dadurch verringert sich ein Teil des Unterschiedes mit den Vorschriften.

Der Effekt der komplexen benachbarten Bebauung ist in diesem speziellen Fall überraschend gering. An der schmalen Seite des Gebäudes (F_y , M_x) werden die Kräfte und Momente durch die Bebauung etwas niedriger und an der breiten Seite (F_x , M_y) etwas höher.

Variante 3, bei der zwei Hochhäuser entfernt sind, zeigt Ergebnisse, die zwischen der Situation mit und ohne benachbarte Bebauung liegen.

Lokale Bemessungswindlasten

An zahlreichen Messpunkten an den Fassaden und Dachflächen wurden, bis nahe an die Ecken heran, mit Hilfe eines Druckmesssystems mit hoher Frequenz die schwankenden Winddrücke gemessen.

Mit Hilfe einer Extremwertanalyse wurden diese Drücke daraufhin zu repräsentativen lokalen Winddruckwerten umgerechnet. Dies geschah etwa folgendermaßen:

Die schwankenden Drücke wurden für 24 verschiedene Windrichtungen im Abstand von 15° als Funktion der Zeit gemessen. Für jeden Messpunkt und jede Windrichtung wurde hieraus die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Extremwerte ermittelt. Diese wurden mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung der extremen Staudrücke der jeweiligen Windrichtung kombiniert. Schließlich wurde aus den kombinierten Extremwertverteilungen iterativ für alle Windrichtungen gemeinsam der extreme Winddruck bzw. Sog bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0.02 pro Jahr ermittelt.

Die Fassadenform des Mondriaanturms weist keine Besonderheiten auf, umfasst aber viele kleine vorspringende bzw. vertiefte Kanten. Deshalb ist es nützlich, die Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen mit den anhand der Normen ermittelten Werten zu vergleichen. Tabelle 3 gibt eine Übersicht der stärksten Druck- und Sogwirkungen.

Tabelle 3 Maximale lokale Bemessungswindlasten der Fassaden.

	Sog (Pa)	Druck (Pa)
ENV 1991-2-4	-1914	1472
Windkanal	-2168	1287

Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, dass in diesem Fall, trotz des Vorhandenseins mehrerer nahe gelegener Hochhäuser, die Unterschiede zwischen den anhand der Norm und anhand der Windkanalmessungen erhaltenen Ergebnissen gering sind. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Fassadenentwurf auf dem höchsten gemessenen Wert beruht. Es ist jedoch auch möglich, anhand der Windkanalmessungen an der Fassade Zonen zu definieren, an denen unter Umständen eine leichtere Fassadenkonstruktion möglich wäre.

Die Erfahrung zeigt jedoch, dass bei abweichenden Gebäudeformen und beim Vorhandensein von Hochhäusern in der unmittelbaren Umgebung (Interferenzwirkung) mit weit höheren lokalen Windlasten zu rechnen ist. Solche spezifischen Effekte können ausschließlich mit Hilfe von Windkanalmessungen festgestellt und berücksichtigt werden.

5. Schlussfolgerungen aus den Beispielen

Die beiden Beispiele belegen, dass Windkanaluntersuchungen zur Bestimmung der Bemessungswindlasten an Gebäuden vorzüglich geeignet sind, wenn sie nicht unmittelbar in den Normen aufgeführt sind oder nur nach starker Schematisierung entsprechend den Normen ermittelt werden können.

Dadurch kann die Berechnung und damit der Entwurf von Gebäuden optimiert werden.

In den Normblättern wird die Bebauung in der unmittelbaren Umgebung nicht berücksichtigt. Dies gilt auch für den Einfluss der Gebäudeorientierung gegenüber dem Wind.

Die in diesem Artikel beschriebenen Beispiele geben eine Vorstellung von den Möglichkeiten, die Windkanaluntersuchungen bei der Ermittlung von Bemessungswindlasten bieten. Weitere Beispiele finden Sie in 'Wind Aktuell, welches Sie bei jedem der Autoren anfordern können.

6. **Literatur**

- [1] ENV 1991-2-4, Eurocode 1/Europäische Windlastnorm: Basis of design and actions on structures: Part 2-4: Wind actions, CEN, Brüssel, 1995.
- [2] DIN 1055, Teil 4 neu, 1999.
- [3] ASCE, Manual of Practice, Wind tunnel studies of buildings and structures, September 1997
- [4] Windtechnologische Gesellschaft WTG e.V. WTG-Merkblatt über Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, WTG, 1994
- [5] Cook, N.J., The designer's guide to wind loading, part 2; static structures, Butterworth, 1990
- [6] Xie, J., Irwin, P.A., Accardo, M., Wind load combinations for structural design of tall buildings. Wind engineering into the 21st century, volume 1, pp 163-168, Hrg. Larsen, Larose, Livesey, 1999
- [7] NEN 6702: TGB Belastingen en Vervormingen (Niederländisch), NNI, 1990.
- [8] Wind Aktuell, TNO, 1999.

7. Authentication

Name and address of the principal:

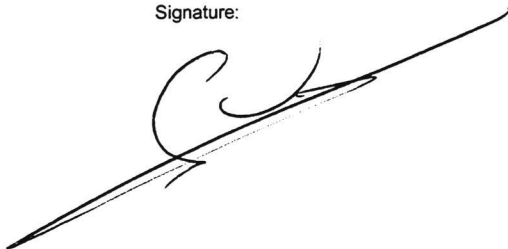
Names and functions of the cooperators:

Ing. G.Th. Visser

Names and establishments to which part of the research was put out to contract:

Date upon which, or period in which, the research took place:

Signature:



Ing. G.Th. Visser
Project Leader

Approved by:



Dr. M.P. Keuken
Head of department

Anlage Modelluntersuchungen im Windkanal

In einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal können an einem maßstabsgetreuen Modell unterschiedliche Untersuchungen angestellt werden. In dieser Anlage werden die Windkomfortuntersuchungen und Untersuchungen über die Ausbreitung von Gasen besprochen.

Untersuchungen im Bereich Windkomfort

Hohe Gebäude können ernsthafte Windprobleme in ihrer unmittelbaren Umgebung verursachen. Bei Böen können die Windgeschwindigkeiten bisweilen so hoch werden, dass Menschen umgeweht werden.

Bei einer Untersuchung im Bereich Windkomfort werden die Windgeschwindigkeiten um das Objekt als Funktion der Windrichtung gemessen. Mit Hilfe der Windstatistik wird anschließend berechnet, wie oft der Grenzwert eines Windproblems oder einer Windgefahr pro Jahr durchschnittlich überschritten wird (das Windklima). Durch Prüfung anhand von Windkomfortkriterien wird untersucht, wie das Windklima beurteilt werden muss. Bei Windproblemen oder Windgefahren können in direkten Beratungen mit den Betroffenen Maßnahmen zur Verbesserung des Windklimas erprobt werden.

Ausbreitung von Gasen

Die aus Schornsteinen oder anderen Abfuhrkanälen entweichende Abluft kann unter bestimmten Voraussetzungen schlecht verdünnt und von der Klimaanlage direkt wieder angesaugt werden. Dies kann innerhalb des Gebäudes zu allerlei Beschwerden und Gesundheitsproblemen Anlass geben.

Mit Hilfe von Messungen im Windkanal kann untersucht werden, ob derartige Effekte zu erwarten sind und durch welche Maßnahmen solche Probleme gegebenenfalls vermieden werden können.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Gerard Th. Visser,
TNO-MEP, Postfach 342, 7300 AH Apeldoorn, Niederlande

Dr. Ing. Chris P.W. Geurts,
TNO-Bauforschung, Postfach 49, 2600 AA Delft, Niederlande

Dipl.-Ing. Piet C. van Staalduinen,
TNO-Bauforschung, Postfach 49, 2600 AA Delft, Niederlande