

Hoge gebouwen vangen veel wind

door ir. N. Feis

Nationaal lucht- en ruimtevaartlaboratorium

Wat doet de wind?

Iedereen heeft tegenwoordig wel ervaren, dat het om hoge gebouwen bijna altijd flink waait. Dat waaien is meestal zeer plaatselijk, gaat dikwijls met rukken gepaard en vertoont ook vaak grote richtingveranderingen. De oorzaak van deze onaangename verschijnselen moet vanzelfsprekend gezocht worden in de natuurlijke wind en wel voornamelijk in één bepaalde eigenschap ervan, de zogenaamde verticale snelheidsgradiënt.

Wind ontstaat in het algemeen door drukverschillen over grote afstanden in de atmosfeer. Deze drukverschillen zijn weer een gevolg van verschillen in opwarming van de lucht, die met toenemende temperatuur uitzet, lichter wordt, op wil stijgen en minder druk uitoefent in de buurt van het aardoppervlak.

Boven een zekere hoogte kan de lucht zich vrij bewegen onder de invloeden van genoemde drukverlopen, van de stijgkrachten en van de wrijvingskrachten, veroorzaakt door de draaiing van de aarde met haar atmosfeer. Maar in een laag, grenzend aan het aardoppervlak, werken wrijvingskrachten sterk verstoring op de luchtbewegingen, die daar min of meer wervelend of turbulent worden en in hoogterichting een snelheidsverloop vertonen. De dikte van deze zogenaamde grenslaag varieert tussen circa 250 en 600 m en is afhankelijk van de ruwheid van het aardoppervlak. Boven een gladde zee of vlakke woestijn is zij het dunst en is het verticale snelheidsverloop dichtbij de grond het sterkst, terwijl boven de grote steden of een bergachtig of dichtbegroeid landschap de grenslaag het dikst is en de gradiënt het zwakst (zie afb. 1).

Nu worden windsnelheden door meteorologische instituten opgegeven voor een standaardhoogte van 10 m boven het aardoppervlak. Uit het voorgaande blijkt echter, dat bij eenzelfde windsnelheid aan de bovenrand van de grenslaagstroming, de snelheid op 10 m hoogte sterk verschilt bij diverse terreinsoorten; aan zee waait het altijd harder dan meer landinwaarts. Of anders gezegd, de windsnelheid neemt tussen 10 en 100 m hoogte toe in een verhouding van 1,5 boven zee, van circa 2 boven dorpen en van 2,5 boven centra van grote steden.

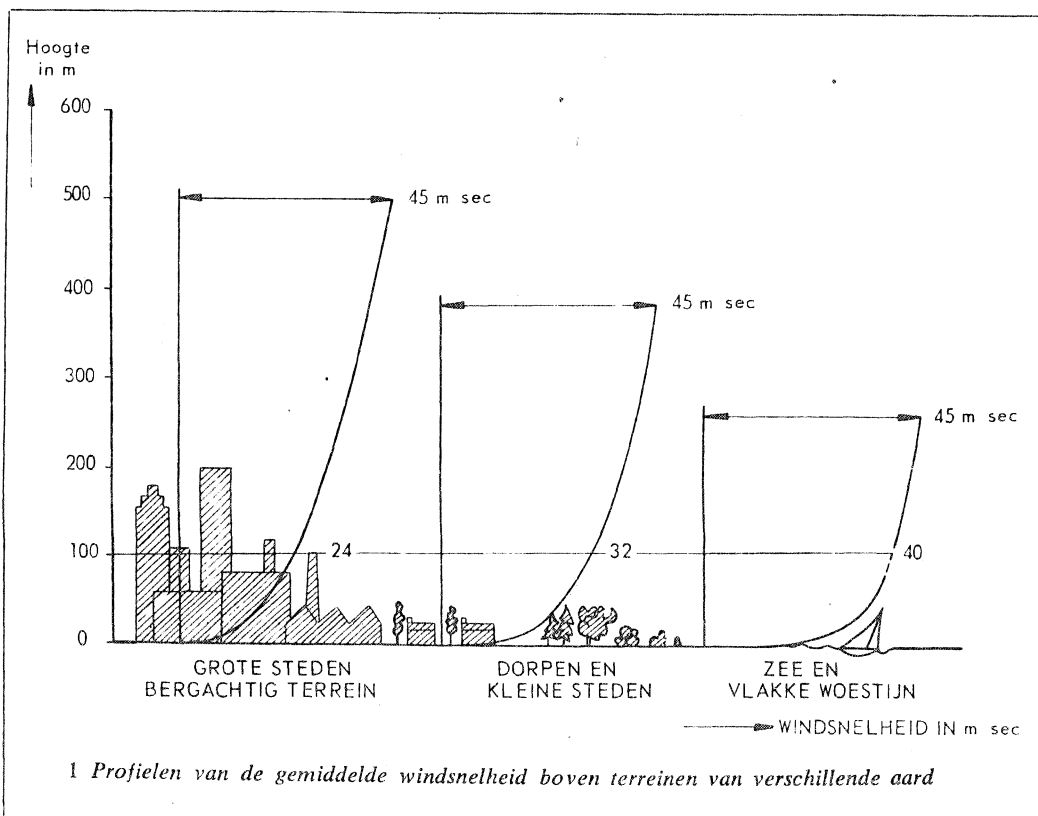
Behalve de verticale snelheidsgradiënt hangt ook de buigigheid van de wind af van de ruwheid van het aardoppervlak. Achter obstakels in een luchtstroming worden namelijk wervels gevormd, die lucht van grotere hoogten, — d.w.z. met hogere snelheden — tot vlak bij de

grond brengen. Daar die wervels allerlei grootten en draairichtingen kunnen hebben al naar gelang de vormen en afmetingen van de obstakels, worden de luchtbewegingen dichtbij de grond er onregelmatig zowel door versneld of vertraagd als van richting veranderd, zodat buien en rukwinden ontstaan. Zo kan de windsterkte in vlagen over 50 pct. van de gemiddelde windsnelheid variëren terwijl de windrichting daarbij over 25° kan verlopen. Boven zee en vlak terrein is de wind constanter dan boven steden en heuvellandschappen, omdat de obstakels in het eerste geval kleiner en/of geringer in aantal zijn dan in het laatste. Met toenemende windsterkte neemt in het algemeen ook de buigigheid toe, doordat de opgewekte wervels heftiger worden en minder tijd krijgen om door de inwendige wrijving van de lucht uit te dempen, voordat er nieuwe wervels worden gevormd door volgende obstakels. De afmetingen van de sterkste wervels zijn in verticale richting maximaal van dezelfde orde als de dikte van de grenslaag, d.w.z. dat zij diameters hebben tot 250

à 600 m terwijl zij in horizontale richting doorsneden van 10 tot 150 m hebben.

Wat doen hoge gebouwen met de wind?

Gebouwen van 100 m of meer hoog zijn in de atmosferische grenslaagstroming relatief grote obstakels. Zij veroorzaken dan ook veel ernstiger verstoringen in de wind dan de gewone laagbouw met drie tot zes verdiepingen. Het merkwaardige daarbij is, dat de winddrukken op het midden van elke gevel van de grond af tot vrij dicht bij de top ongeveer constant zijn en afhankelijk zijn van de stuwdruk van de ongestoorde wind op minstens de helft tot tweederde van de hoogte van het gebouw. Door deze uitbreiding van de drukken van genoemde hoogten tot onderaan toe zijn de drukverschillen vlak bij de grond bij hoge gebouwen veel groter dan bij de normale laagbouw. De stuwdruk van een stroming neemt namelijk kwadratisch met de snelheid toe, zodat ten gevolge van de verticale windgradiënt de gemiddelde stuwdruk op 100 m hoogte 2,25 (aan zee) tot 6,25 (boven grote steden)



1 Profielen van de gemiddelde windsnelheid boven terreinen van verschillende aard

keer zo groot is als op 10 m boven de grond. Echter niet alleen de verschillen in de drukken op de diverse gevels, maar ook de plaatselijke windsnelheden om de hoeken van de gebouwen, zijn over een groot deel van de hoogte ongeveer gelijk, daar zij direct samenhangen met die drukverschillen. Dat wil zeggen dat de verhoogde snelheden, die door de verdringing van de wind dichtbij de voorgevelranden ontstaan, bij de grond even groot zijn als op minstens de helft tot tweederde van de gebouwhoogte. Het is dus duidelijk dat door de verticale windgradiënt de plaatselijke windsnelheden rondom hoge gebouwen veel groter zijn dan in de buurt van laagbouw. Daar bovendien de zich achter, boven en opzij van een gebouw vormende wervels worden aangejaagd door de lucht, die vlak om de voorgevelranden stroomt, zijn ook die wervels bij hoogbouw veel sterker dan bij laagbouw. Omdat verder grote sterke wervels minder snel uitdempen dan kleine zwakke is het heftig turbulente gebied achter hoge gebouwen relatief veel uitgestrekter dan dat achter laagbouw. Bovendien is het gebied waarin sterke terugstromingen over de grond optreden, bij hoge gebouwen ook meestal verhoudingsgewijs langer dan bij laagbouw. Dit komt omdat hoogbouw vaak zeer slank is, waardoor de stroming langs de zijgevels en over het dak betrekkelijk minder geleiding ondervindt dan bij de meer gedrongen laagbouw en dientengevolge verder uitbuigt. Dit is in de afb. 2 en 3 schematisch aangegeven. Ten slotte dient nog te worden opgemerkt, dat zeer hoge gebouwen meestal vrij geïsoleerd staan; alleeh in steden als New York vormen zij een min of meer dicht bos. Omdat deze vrijstaande objecten tegenwoordig ongeveer dezelfde afmetingen hebben als de sterkste wervels in de natuurlijke wind, kunnen er tijdens het voorbijtrekken van een windvlaag of bui allerlei plaatselijke en tijdelijke effecten optreden, zoals extra vergrote windsnelheden, verhoogde over- en onderdrukken, wapperen van het zog, snelle omkering van stromingsrichtingen e.d. Over deze instationaire verschijnselen is nog weinig bekend, maar er zijn aanwijzingen dat zij de windproblemen van de hoogbouw belangrijk kunnen verzwaren.

Waarmee dient rekening te worden gehouden?
In het winderige klimaat van Nederland, waar in de kustprovincies gemiddeld 5 tot 20 pct. van de tijd windkrachten van meer dan 5 (on-

geveer 10 m/sec.) en op 10 à 50 dagen van het jaar van zelfs meer dan 7 (circa 15 m/sec.) voorkomen, moeten er wel ernstige windproblemen ontstaan rondom moderne hoge gebouwen. Bij elk hoogbouwproject dienen daarom de volgende vragen aan de orde te worden gesteld.

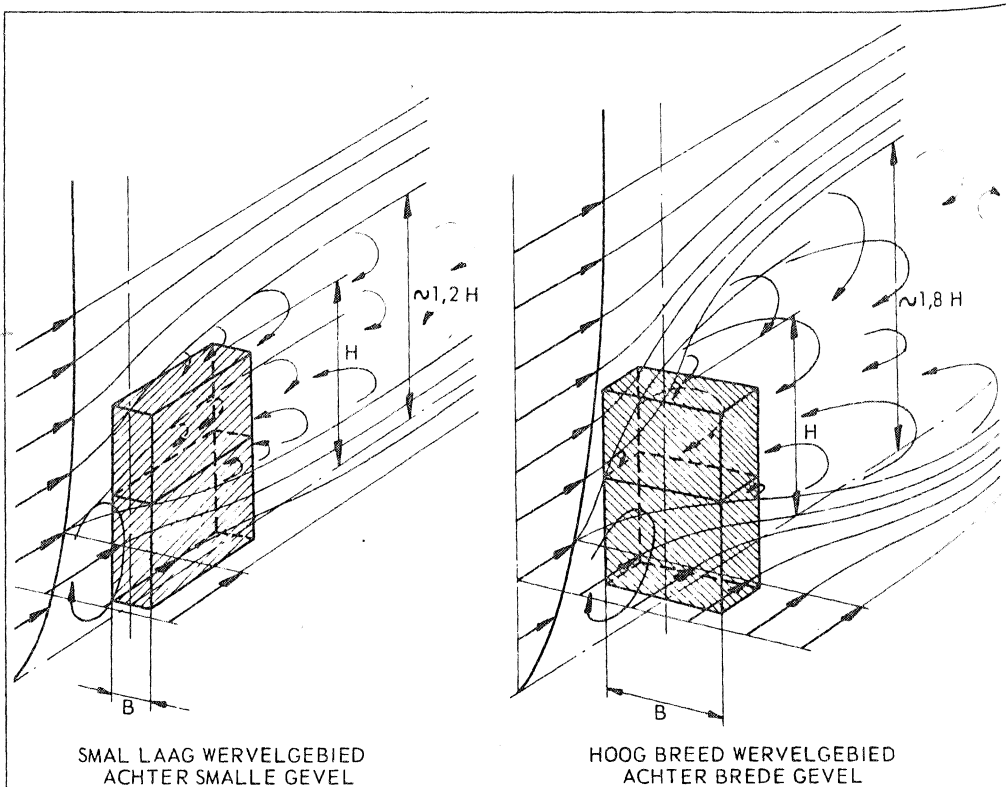
Wat zijn de winddrukverdelingen over gevels en daken, die bij de diverse windrichtingen maximaal kunnen ontstaan? Deze drukverdelingen zijn niet alleen van belang voor het berekenen van de totale windbelastingen op een gebouw maar bepalen ook de krachten, die ramen, deuren, dakbedekkingen, gevelbekledingen, enz. moeten kunnen weerstaan.

Wat zijn de grootste winddrukken, die bij de gebouwingangen, op ramen en balkondeuren

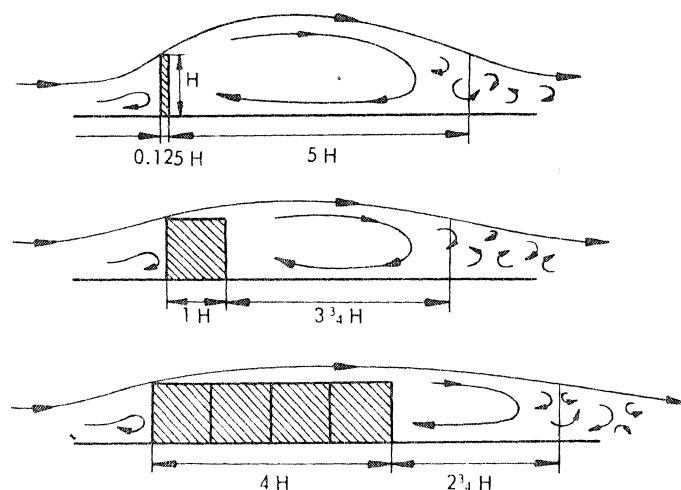
en in ventilatiegaten kunnen heersen? De optredende drukverschillen wordt de mogelijkheid van natuurlijke ventilatie of voorkomen van tocht hinder bepaald.

Welke winddrukken kunnen er ontstaan bij de luchtaanzuigroosters en de uitblaasopeningen van airconditioningsystemen? Deze drukken hebben invloed op de dimensionering van de ventilatoren en dus op de vermogens die voor de luchtverversing nodig zijn.

Welke windsnelheden, windrichtingen en wervelingen kunnen er optreden op de omliggende wegen, op galerijen, balkons, speelplaatsen, patio's, enz.? Het kan zijn dat eventuele ernstige windhinder ingrijpende bestrijdingsmaatregelen of zelfs projectveranderingen noodig maakt.



2 Schematische stromingsbeelden bij wind loodrecht op de smalle en lange gebouwzijde



3 Effect van de gebouwdiepte op de grootte van het terugstroomgebied

hoe vindt de afvoer plaats van rookgassen of van de afgewerkte lucht van garages, keukens, zuurkasten, wc's e.d., die uit schoorstenen of luchtuitlaatopeningen worden geblazen? Door de neer- en terugstromingen aan de lijzijde kan het voorkomen dat deze luchtes hinder veroorzaken voor de naaste omgeving of ook voor het gebouw zelf, als zij direct naar de aanzuigroosters van airconditioningsystemen, de ramen of de ventilatiegaten worden getransporteerd.

Sinds de Tweede Wereldoorlog, toen men in Nederland niet alleen in de utiliteits-, maar ook in de woningsector steeds meer hoogbouw is gaan toepassen, zijn in de windtunnels van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium vele onderzoeken aan schaalmodellen van gebouwen (complexen) uitgevoerd, teneinde antwoorden op bovenstaande vragen te krijgen. Enige van de daarbij opgedane ervaringen zullen hier worden vermeld, daar zij van belang kunnen zijn voor de opzet van nieuwe projecten.

Mogelijke drukverschillen

De overdruk ten opzichte van de barometerdruk op een gevel aan de loefzijde kan ten hoogste éénmaal de stuwdruk van de ongestoorde wind op minstens de helft tot tweederde van de gebouwhoogte bedragen.

De onderdruk (zuiging) op de gevel aan de lijzijde wordt, afhankelijk van de gebouwvorm, meestal niet meer dan 0,3 à 0,6 maal die stuwdruk. Vlak bij de hoeken en dakranden van de gevel aan loefzijde kunnen echter onderdrukken van twee- à driemaal de stuwdruk en soms zelfs hoger voorkomen.

Welke druk er in een gebouw optreedt, hangt af van de mate van luchtdichtheid, de wijze van ventilatie en van de plaatsing en constructie van toegangsdeuren e.d. In een goed luchtdicht gebouw, d.w.z. met weinig lek door ruit-sponningen, raamspleten, enz., zou een overdruk tot aan de stuwdruk van de wind kunnen ontstaan als er grote toegangsdeuren aan de loefzijde wijd opengaan. Op de hoeken van een dergelijk gebouw zouden dan ruiten met een totaal drukverschil van bijvoorbeeld viermaal de stuwdruk naar buiten kunnen worden geperst.

In de meeste gebouwen wordt echter, ten gevolge van de lekken in alle gevels, een onderdruk gezogen, die zelfs ongeveer gelijk kan worden aan die, welke buiten op de gevel aan de lijzijde werkt. In voornoemd geval worden dan ruiten in het midden van de gevel aan de loefzijde met een drukverschil van hoogstens circa 1,6 maal de stuwdruk van de wind naar binnen geduwd, terwijl tegelijkertijd die op de hoeken met maximaal circa 2,4 maal die stuwdruk naar buiten kunnen worden gezogen.

Zodra ergens een ruit het begeeft, kunnen mogelijk de drukverschillen tussen binnen en buiten ineens veel groter worden, zodat dan eventueel vele ruiten eruit worden geblazen. Men kan dus beter geen ramen of ruiten vlak bij de hoeken aanbrengen.

Om bij de sterkteberekening van gevels, ramen, deuren, enz. in ieder geval aan de veilige kant te blijven, zou het aan te bevelen zijn om voor de ongestoorde windsnelheid altijd die te nemen, welke volgens meteorologische gegevens maximaal bij de top van een gebouw kan optreden.

Overigens moet opgemerkt worden, dat nog onvoldoende bekend is van de invloeden van windgradiënten, buien en windstoten zowel op de gemiddelde drukken en snelheden als op de variaties daarvan.

Tochthinder en ventilatieproblemen

Ten gevolge van de grote verschillen in de drukken op de diverse gevels blijkt bij aparte in- en uitritten en op parkeerplaatsen voor auto's en fietsen onder hoge gebouwen tocht met bijna dezelfde sterkte als de ongestoorde windsnelheid op dakhoogte op te kunnen treden, terwijl er op niet-afgesloten gangen of in vertrekken, trek met de helft van die snelheid kan ontstaan.

In hoge gebouwen, die niet luchtdicht en airconditioned zijn, dienen daarom veel tochtdeuren te worden aangebracht, vooral om de trappenhuisen heen. Verder zullen speciale afdicht- en wentelconstructies voor ramen en deuren (labyrinten in de sponningen, tuimelramen met diverse draaiassen, draaideuren) nodig zijn om het interne klimaat aangenaam te kunnen houden onder alle weersomstandigheden.

De geweldige tocht in in- en uitritten, enz. kan het beste worden bestreden door deze enigszins labyrintvormig met sterke doorsnede- veranderingen en rechthoekige bochten te maken, bijvoorbeeld door het plaatsen van schotten of schermen die beurtelings van de ene en de andere zijde halverwege in de doorgang steken. Soms kan de oplossing van het probleem worden gevonden in het verplaatsen van de toegangen naar een ander punt, zodat de drukverschillen kleiner worden, bijvoorbeeld door het aanbrengen van een tunnel of abri.

Door de grote drukverschillen leidt natuurlijke ventilatie bij hoogbouw eveneens meestal tot allerlei problemen, daar er ongewenste luchtverplaatsingen tussen de diverse ruimten kunnen optreden zoals uit wc's en keukens naar de gangen en andere vertrekken. Doordat de onderdruk aan de top van een gebouw groter is dan op lagere hoogten, treden er bovendien verticale luchtverplaatsingen op indien de verschillende bouwlagen in open verbinding met elkaar staan via trappenhuisen e.d. Om dit te voorkomen zal op zijn minst een effectieve luchtafzuiging uit diverse ruimten moeten plaatsvinden, waarbij zo mogelijk ventilatieschachten worden toegepast, die een flink eind boven het dak uitsteken. Dit is niet alleen nodig om te zorgen dat de uitgeblazen luchtjes niet in de neerstromingen aan de lijzijde van het gebouw terechtkomen, maar ook om de wind zelf mee te laten helpen aan de afzuiging, doordat zij een flinke onderdruk

aan de toppen van dergelijke schachten veroorzaakt.

Windhinder

De plaatselijke snelheidsverhogingen en de heftige wervels in de windstromingen in de buurt van hoge gebouwen kunnen ernstige hinder en zelfs gevaar opleveren voor voetgangers en ander verkeer.

Dichtbij de hoeken kunnen op de grond snelheden optreden, die meer dan 1,5 maal de ongestoorde windsnelheid op de helft tot tweederde van de gebouwhoogte bedragen. Op balkons en open galerijen langs flatgebouwen zijn op de hogere verdiepingen bij flauwe hoeken of bochten van de gevels zelfs plaatselijke snelheden van tweemaal de ongestoorde windsnelheid gemeten. Dat wil zeggen dat daar bij een gewone storm orkaansnelheden optreden, waarin men zich niet staande kan houden, en dat niet-stevig-vergrendelde deuren en ramen worden losgerukt. Op hoeken en in de korte zijden van hoge gebouwen dienen dan ook geen ramen, balkons en toegangsdeuren te worden aangebracht, terwijl open galerijen bij hoogbouwflats liefst niet moeten worden toegepast, of ten minste van windschermen moeten zijn voorzien.

Directe open verbindingen tussen de lange gevels van een hoog gebouw zoals doorritten of loopgangen dienen ook te worden vermeden, daar dit geweldige trekaten zijn, waarin de windsnelheden tot 1,25 maal die van de ongestoorde wind kunnen oplopen. De luchtstraal, die aan de lijzijde van het gebouw uit zo'n trekgat stroomt, kan bovendien nog op een grote afstand zeer hinderlijk zijn. Als dergelijke verbindingen noodzakelijk zijn, dienen zij in ieder geval te worden voorzien van dezelfde labyrintweerstand als hierboven zijn genoemd ter bestrijding van tochthinder.

Omdat bij schuine aanblazing vlak langs de lange gevels ook oversnelheden kunnen voorkomen tot 1,25 maal de ongestoorde windsnelheid, is het bij hoogbouw vaak noodzakelijk de ingangen op de één of andere manier af te schermen. Dit kan gebeuren door een lange brede luifel aan te brengen met daaronder schermen loodrecht op de gevel. Om hinderlijke wervelvorming door deze schermen te voorkomen, kunnen zij het beste voor de helft of een kwart open zijn en bijvoorbeeld worden uitgevoerd als een hekwerk of een rooster.

In verband met de trek langs de gevels is het verder aan te raden wegen of wandelpaden niet dichtbij hoge gebouwen aan te leggen. Het kan zelfs gewenst zijn om vanaf de ingangen vrij ver – d.w.z. tot aan de toegangswegen – uitstekende abri's met gesloten of halfopen zijwanden te bouwen.

De in de buurt van hoge gebouwen optredende heftige grote wervels kunnen het verblijf in binnenplaatsen, nabijgelegen speeltuinen en plantsoenen, alsook op dakterrassen en balkons erg onaangenaam maken. De terugstroomsnelheden, die aan de lijzijde van hoge

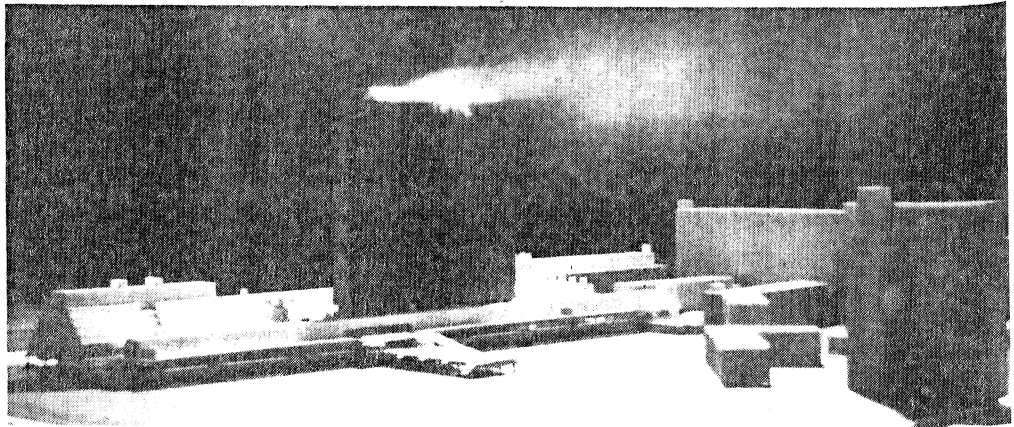
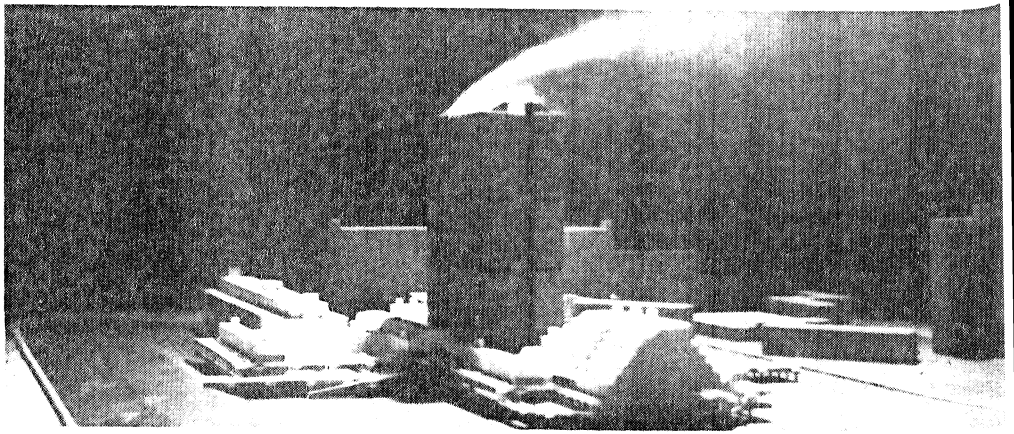
gebouwen voorkomen, kunnen soms tot meer dan de helft van de ongestoorde windsnelheid op dakhoogte oplopen. Zij zijn daarbij zeer veranderlijk in grootte en richting doordat de wervels niet op hun plaats blijven, maar afwisselend met de wind meespoelen en opnieuw ontstaan. Door de sterke plaatselijkheid alsmede veranderlijkheid van deze terugstromingen kunnen zij voor passerend verkeer gevaren opleveren, daar dat door onverwachte windstoten uit verschillende richtingen wordt getroffen. Het is dus niet gewenst om hoge gebouwen te plaatsen in de buurt van verkeerswegen. Als dit niet anders mogelijk is, dienen die wegen aan beide zijden afgeschermd te worden door dichte boomsingels, struikenhagen of eventueel halfopen windschermen.

In dergelijke windschermen mogen natuurlijk geen onderbrekingen voorkomen, daar deze als trekpaten werken. Verder moet opgemerkt worden dat tijdens stormen de bomen in de buurt van hoge gebouwen vrij snel beschadigd of zelfs omgerukt worden door de wervelstoten.

Plantsoenen, speelplaatsen enz. kunnen op dezelfde wijze als wegen voor de wervels van hoge gebouwen worden afgeschermd. Op dakterrassen, waar de wervelsterkten het grootst zijn, kunnen horizontale roosters op enige meters erboven geplaatst en bestaande uit vrij brede op hun kant staande planken, het neerslaan van de wind tegengaan. Natuurlijk dienen om dergelijke terrassen ook windschermen te worden geplaatst.

Goede raad behoeft niet duur te zijn

De in het voorgaande genoemde tochtthinder-, windhinder- en ventilatieproblemen en hun eventuele oplossingen, zijn noodzakelijkerwijs zeer in het algemeen behandeld. Elk groot gebouw heeft weer een andere vorm alsook een andere ligging ten opzichte van omgevende gebouwen en bestaat zelf vaak uit een complex van hoog- en laagbouwonderdelen (zie afb. 4). Daardoor is vrijwel nooit van een ontworpen gebouw met zekerheid te zeggen of en in welke mate deze problemen zullen optreden. Het is dan ook altijd raadzaam om aan een schaalmodel in een windtunnel de verschillende aspecten te onderzoeken. Vooral de moderne trend in de flatbouw naar steeds hogere en grotere eenheden, die bovendien in trekpaten-vormende patronen gegroepeerd worden tussen verhoogde rijwegen met



4 Windtunnelmodel van de medische faculteit te Rotterdam, met het Dijkzigtziekenhuis en enige hoge gebouwen in de omgeving; uitgevoerd zijn wind- en tochtthinder, winddrukken en rookhinderonderzoekingen

onderdoorgaande voergangerspaden e.d. (zie afb. 5) vergroot de kans op het optreden van onaangename of zelfs gevaarlijke klimatologische toestanden.

De jarenlange ervaring van het NLR op dit gebied heeft aangetoond, dat de kosten van windtunnelonderzoekingen meestal niet meer

dan 1 promille van de bouwkosten van een project bedragen. Hoe groter het project, hoe geringer dit percentage is. Gezien de mogelijke nadelige invloeden van de wind op het leefklimaat en de veiligheid in en om hoge gebouwen lijken deze kosten altijd wel een antwoord.

5 Maquette van het oorspronkelijke ontwerp voor het stadsdeel Bijlmermeer te Amsterdam

