

INVLOED VAN DE WIND OP DE AFVOER VAN ROOK EN GASSEN EN OP DE VENTILATIE BIJ HOOGBOUW *)

door Ir. N. FEIS

I Samenvatting

Bij de moderne stedenbouw is er een trend waar te nemen naar het meer-en-meer toepassen van hoge gebouwen, niet alleen voor utiliteitsdoeleinden, maar ook voor woningen. Omdat de snelheid van de natuurlijke wind altijd in een zekere mate toeneemt met de hoogte boven de grond, ontstaan er in de luchtstromingen om hoge gebouwen niet slechts grotere gebieden, waarin meer of minder sterke druk- en snelheidsverstoringen voorkomen, maar zijn daarin tevens de windsnelheden groter en de wervelingen heftiger dan bij lage gebouwen.

Als gevolg hiervan zijn een goede rook- en gassenafvoer en ventilatie niet alleen bij die hoogbouw zelf moeilijk te verwezenlijken, maar zijn zij bij de omringende laagbouw vaak bijna onbereikbaar.

Voor elk hoogbouwproject (en dat zijn tegenwoordig dikwijls gehele stads- of woonwijken) dient daarom tijdig te worden onderzocht of en hoe rookhinder en ventilatieproblemen zijn te voorkomen. Hiertoe zijn modelproeven in water- of windtunnels noodzakelijk.

II Inleiding

Na de tweede wereldoorlog is in Nederland de uitbreiding van het bouwvolume sterk in verticale richting toegenomen, zodat tegenwoordig gebouwen van 50 tot 100 meter hoog of meer vrij normaal zijn, zowel in de utiliteitssector als in nieuwe woonwijken of stadsdelen. Hoge flatgebouwen worden in min of meer regelmatige patronen gegroepeerd, zoals in de Bijlmermeer te Amsterdam, de stadsuitbreiding aan de noordoostzijde van Groningen, de nieuwe woonwijk voor Zaandam, het plan Hoog-Catharijne te Utrecht, enz. In verband met de nog steeds toenemende bevolkingsdichtheid, de stijgende grondprijzen en de noodzakelijke saneringen en krotopruijningen, wordt door architecten- en ingenieursbureaux verwacht, dat in de

komende decennia per jaar minstens vijftig grotere en kleinere stadsdelen, winkelcentra e.d. met vrij grote percentages hoogbouw ontwikkeld zullen moeten worden. Daarin zullen dan vele miljarden worden geïnvesteerd, terwijl hierdoor het leefklimaat voor minstens enige generaties wordt bepaald. Nu hangt dat leefklimaat niet alleen af van de kwaliteit van de woningen, van allerlei centrale voorzieningen, van gezellige winkelcentra, van ontspanningslokaliteiten, kinderspeelplaatsen en groenvoorzieningen, maar ook van de reinheid en behaaglijkheid van de atmosfeer zowel in als om de woningen. De laatstgenoemde factoren blijken echter juist door de hoogbouw in het gedrang te komen, doordat er om en in hoge gebouwen grote drukverschillen ontstaan. Er worden boven, opzij en aan de zijden sterk door wervelingen gestoorde gebieden in de windstroming gevormd.

Hierdoor kunnen geuren uit keukens, toiletten e.d. niet alleen inwendig door die flatgebouwen worden verspreid door allerlei trek- en tochtverschijnselen, maar worden rook, gassen en afgewerkte ventilatielucht ook buitenom naar ventilatie-inlaten, ramen en deuren, balkons, straten, speeltuinen enz. getransporteerd. In de door wervelingen gestoorde gebieden aan de zijden van die gebouwen verandert de wind bovendien voortdurend sterk van grootte en richting, zodat valwinden, rukwinden en heen- en terugstromingen optreden met gemiddeld vaak hogere snelheden dan die van de ongestoorde wind. Daardoor worden zowel de ventilatie als de verwarming, benevens de rook- en gassenafvoer van de daar aanwezige laagbouw reeds bij vrij zwakke wind ernstig bemoeilijkt of zelfs belemmerd.

Het lijkt dan ook noodzakelijk, dat meer inzicht wordt verkregen in deze met de hoogbouw samenhangende problemen; dat door onderzoekingen zowel op ad-hoc basis als op meer fundamentele wijze oplossingen hiervoor worden gevonden.

Dit laatste zal in het algemeen slechts in afdoende mate mogelijk zijn door nauwe samenwerking tussen

*) Lezing gehouden op de Vakantie-leergang voor Warmte-techniek 1970.

stedebouwkundigen, architecten en ventilatie- en verwarmingsdeskundigen, alsook stromingstechnici, zodat tijdig begrip wordt verkregen voor elkaars eisen en deze op de juiste wijze worden verwerkt. Getracht zal worden enige richtlijnen hiervoor aan te geven, die hoofdzakelijk gegrond zijn op ervaringen met modelproeven in windtunnels.

III De effecten van hoge gebouwen in de wind

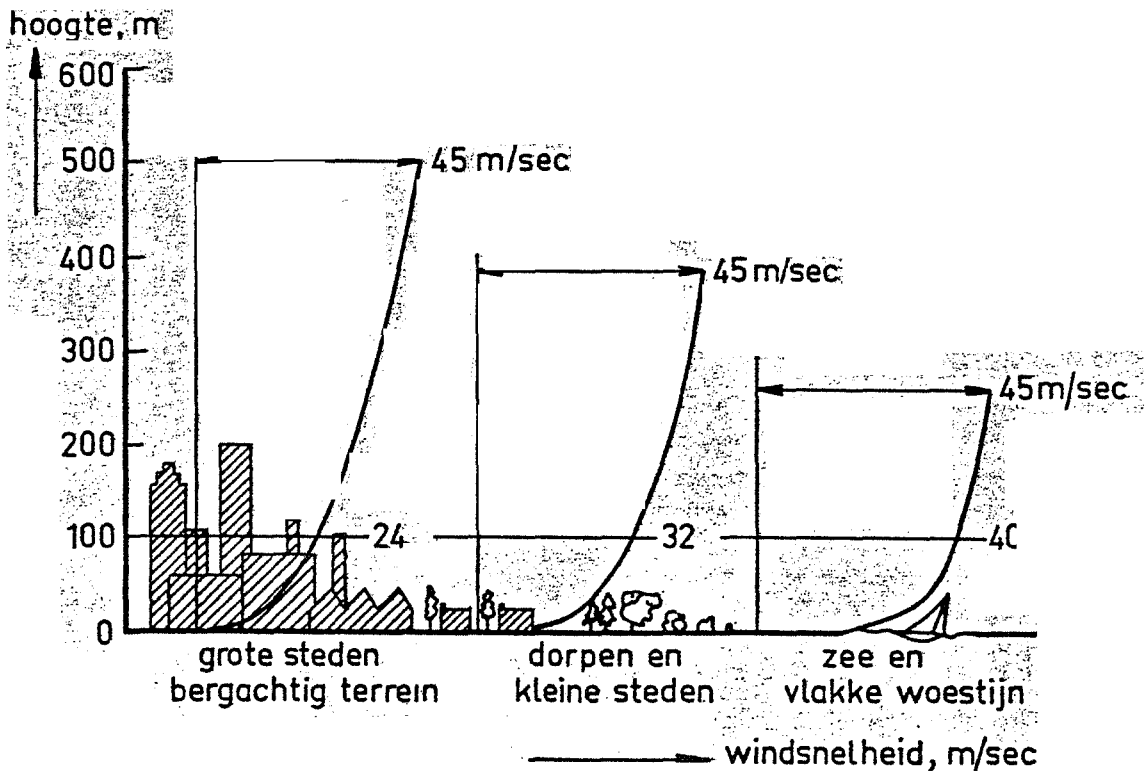
Een eigenschap van de wind is, dat zij altijd min of meer in sterkte toeneemt met de hoogte boven de grond.

Dat is een gevolg van de wrijvingskrachten, die het aardoppervlak op de luchtstromingen uitoefent, waardoor deze onderaan worden afgeremd en er wervelingen in ontstaan. De hoogte, waarover deze verstoringe invloed op de wind zich doet gelden, is afhankelijk van de ruwheid van het aardoppervlak.

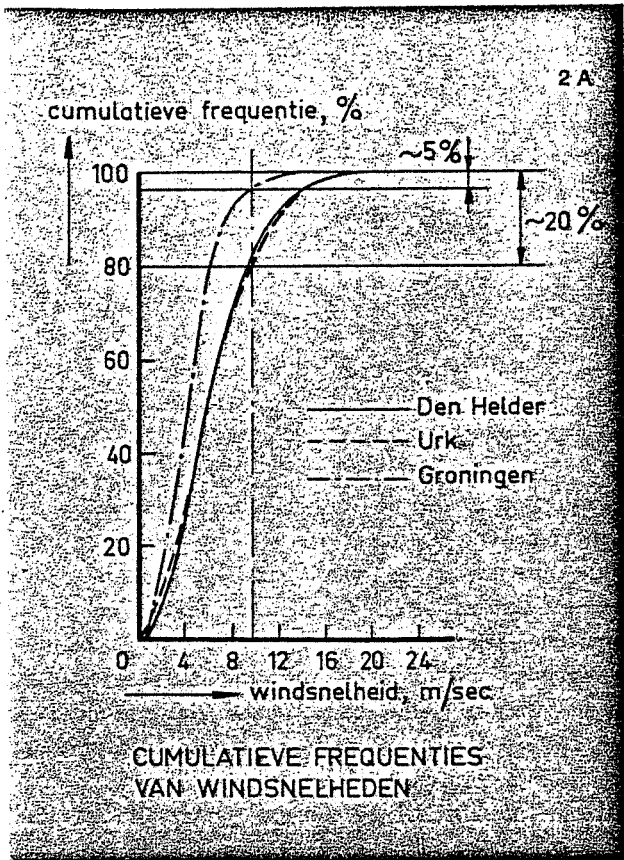
Boven een gladde zee is die zogenaamde grenslaag het dunst en is het verticale snelheidsverloop dicht bij het oppervlak het sterkst, terwijl deze grenslaag boven

grote steden of bergachtige terreinen het dikst is en de gradiënt erin het zwakst (zie fig. 1). Daardoor waait het aan zee altijd harder dan meer landwaarts, maar neemt de windsnelheid tussen 10 m en 100 m hoogte aan zee toe in een verhouding van slechts ongeveer 1,5 tegen boven steden van ca. 2,5. Verder is boven zee de wind bij matige snelheden constanter dan boven land. Achter obstakels in een luchtstroming worden namelijk wervels gevormd met diverse afmetingen en draairichtingen, welke lucht van grotere hoogten, d.w.z. met hogere snelheden, tot vlak bij de grond brengen. Hierdoor worden de luchtbewegingen in de grenslaag onregelmatig, namelijk afwisselend vertraagd en versneld en van richting veranderd. Omdat op zee de obstakels in het algemeen lager en geringer in aantal zijn dan op het land, worden er boven zee minder en kleinere wervels gevormd en is daardoor de wind er meestal minder buiig.

Bij toenemende windkracht neemt echter die buiigheid toe, zowel boven zee als boven land. In het eerste geval worden natuurlijk de golven groter, maar boven-

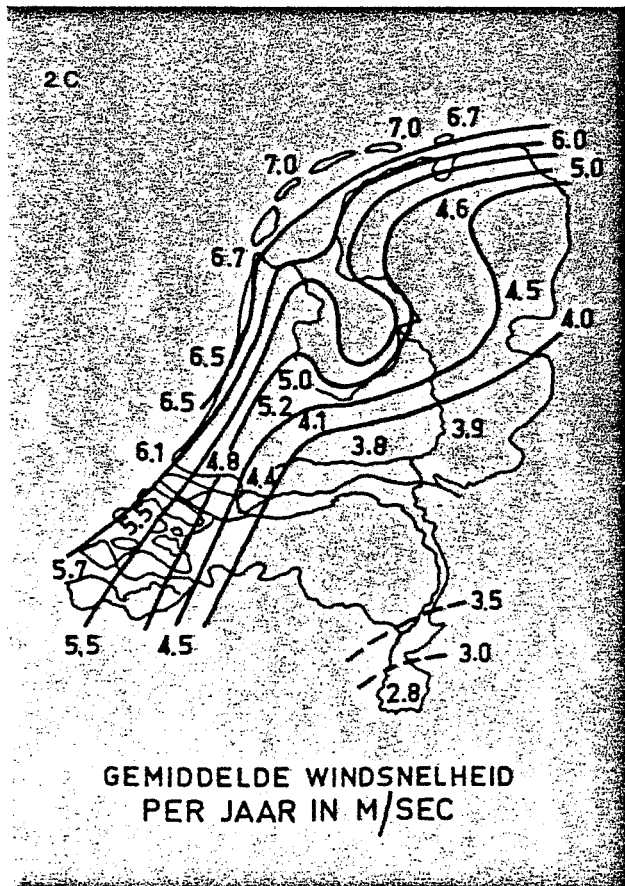
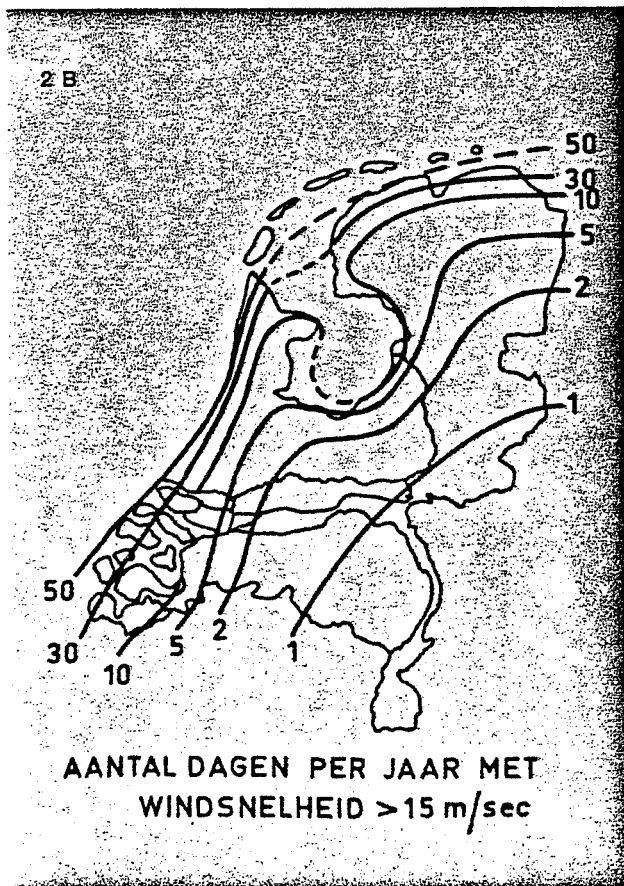


PROFIELEN VAN DE GEMIDDELTE WINDSNELHEID BOVEN TERREINEN VAN VERSCHILLENDE AARD



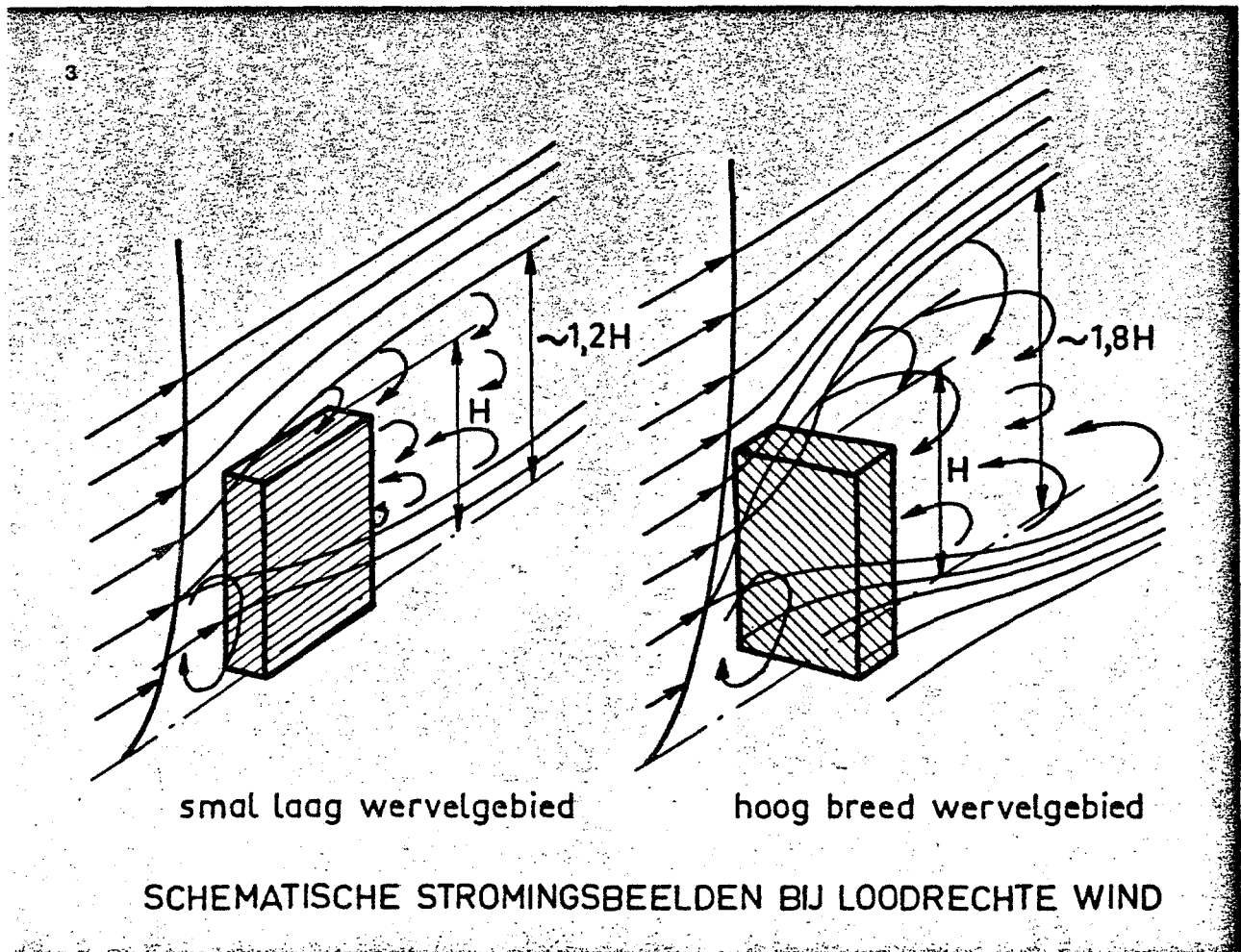
dien worden zowel boven zee als boven land de wervels heftiger door de grotere luchtsnelheden; zij krijgen ook nog minder tijd om door onderlinge wrijving tussen de luchtdeeltjes uit te dempen, voordat er nieuwe wervels door volgende obstakels worden gevormd. Doordat Nederland een winderig zeeklimaat heeft heersen er in de kustprovincies gemiddeld 5 tot 20% van de tijd windkrachten van meer dan 5, d.i. circa 10 m/sec. (zie fig. 2A) en komen er op 10 à 50 dagen van het jaar zelfs windkrachten van meer dan 7 (circa. 15 m/sec.) voor (zie fig. 2B). De jaarlijkse gemiddelde windsnelheid ligt dan ook tussen 4,5 en 7 m/sec.) (zie fig. 2C), terwijl het bovendien vrijwel nooit windstil is; slechts gedurende 5 tot 10% van de tijd zijn de windsnelheden in de randstad kleiner dan 2 m/sec., hetgeen meestal 's nachts is. De jaarlijkse gemiddelde windrichting is zuidwest tot west, zodat uit die hoeken de wind het meest waait en/of het sterkste is.

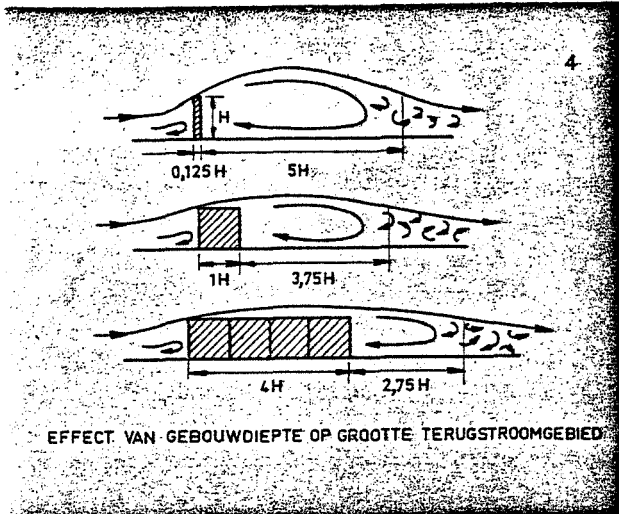
Nu zijn de hiervoren genoemde windsnelheden gebaseerd op de uurgemiddelden, zoals zij door het KNMI worden bepaald voor een standaardhoogte van 10 m boven het aardoppervlak. Maar bij buig weer kunnen in windvlagen of windstoten de snelheden tot 1,5 à 2 maal zo groot worden als die gemiddelden en kan de



windrichting over 20 à 30° verlopen. Dergelijke sterke windvlagen duren dan ca. 20 tot 60 seconden. Bovendien zijn de gemiddelde windsnelheden op 100 m hoogte (als gevolg van de verticale gradiënt) nog 1,5 à 2,5 maal zo groot als op de standaardhoogte van 10 m. En juist door dit laatste fenomeen ontstaan de grootste windproblemen bij de hoogbouw. Het merkwaardige is namelijk, dat hoge gebouwen die grotere snelheden en drukverschillen, welke dicht bij hun top heersen, naar de grond brengen. De winddrukken op de gevels van een gebouw zijn namelijk vanaf de grond tot dicht bij de top ongeveer constant en afhankelijk van de stuwdruk van de ongestoorde wind op minstens tweederde van de hoogte van het gebouw. Daardoor zijn de drukverschillen vlak bij de grond bij hoge gebouwen veel groter dan bij de normale laagbouw. Daar de plaatselijke windsnelheden langs de gevels en om de hoeken van een gebouw direct afhangen van die drukverschillen, zijn de verhoogde snelheden die door de verdringing van de luchtstromingen om een gebouw ontstaan, bij de grond bijna even groot als op tweederde van de gebouw-

hoogte. Door de verticale windgradiënt worden dus de plaatselijke windsnelheden rondom hoge gebouwen veel groter dan in de buurt van laagbouw. Hierdoor worden de wervels, die zich achter, opzij en boven een gebouw vormen bij hoogbouw, behalve groter ook veel sterker dan bij laagbouw. Zij worden namelijk aangejaagd door de lucht, die met verhoogde snelheid om de gevelranden aan de windzijde stroomt, terwijl hun diameters verband houden met de afmetingen van het gebouw waarbij zij ontstaan. Omdat grote sterke wervels minder snel uitdempen dan kleine zwakke, is het heftig turbulente gebied achter grote gebouwen relatief altijd veel uitgestrekter dan dat achter laagbouw. De vorming van wervels om gebouwen is een gevolg van het feit, dat luchtstromingen geen haakse bochten kunnen maken. De lucht, die vóór de gevel aan loefzijde uitwijkt en er naar opzij en omhoog langs stroomt, kan op de gevelranden niet haaks ombuigen, zodat de stroming van de zij- en bovenvlakken van het gebouw loslaat onder vorming van wervels (zie fig. 3). Om en achter een gebouw ontstaat dus een met wervels gevuld gebied, een zogenaamd zog, waar-





EFFECT VAN GEBOUWDIEPTE OP GROOTTE TERUGSTROOMGEBIED

in in het eerste gedeelte zelfs terugstromingen optreden (zie fig. 4). De grootte en de relatieve afmetingen van dit zoggebied hangen sterk af van de bouwvorm. Een smal, maar lang gebouw heeft, indien de lange zijde evenwijdig met de windrichting staat, relatief een veel minder breed en hoog zog dan een breed kort gebouw (zie fig. 3). Dit is ook de reden dat het gebied, waarin terugstromingen over de grond optreden, achter hoge gebouwen in verhouding meestal langer is dan bij laagbouw.

Hoge gebouwen zijn namelijk vaak slank van vorm, zodat bij windrichtingen loodrecht op hun lange gevels, de luchtstromingen langs de zijgevels en het dak betrekkelijk minder geleiding ondervinden dan bij de meer gedrongen laagbouw en dientengevolge meer uitbuigen (zie fig. 4).

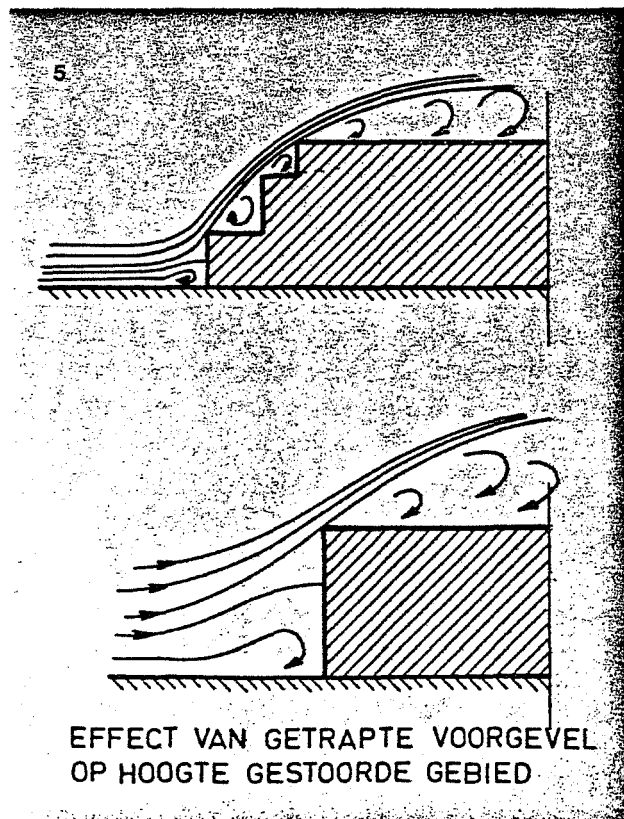
Verder kan een gebouw, dat trapsgewijs in hoogte verloopt, een veel kleiner zoggebied hebben dan een gebouw met dezelfde hoogte en grootste dwarsdoorsnede maar met een vlakke gevel. Door het trapsgewijze verloop van de gevel heeft een gebouw namelijk ongeveer hetzelfde effect op de luchtstroming als een stroomlijnform (zie fig. 5). Dat komt doordat de luchtstroming na te zijn losgelaten op de bovenrand van het eerste verticale vlak, zó uitbuigt, dat zij niet meer extra voor een volgend verticaal vlak hoeft uit te wijken en dus ook niet op de volgende rand losbreekt. De verlaging van het zoggebied boven een getrappt gebouw ten opzichte van dat boven een recht gebouw, blijkt dan ook af te hangen van de hellingshoek van de getrapte gevel; hoe flauwer die helling is, des te lager wordt het zoggebied.

IV De rookhinderproblemen bij de hoogbouw Wat wordt onder rookhinder verstaan?

Onder rookhinder verstaat men niet alleen meer of

minder schadelijke of onaangename uitwerking van rook of gassen op mensen, dieren en planten, maar ook de vervuiling of corrosieve aantasting van gebouwen, constructies enz. Hoewel de laatste tijd in het algemene kader van het milieubeheer getracht wordt normen op te stellen voor de toe te laten concentraties van allerlei corrosieve of schadelijke gassen, moet het begrip rookhinder toch als relatief of subjectief worden beschouwd. Wat door de ene mens als onverdraaglijke stank of benauwende lucht wordt gekenmerkt, wordt door de ander nauwelijks opgemerkt of misschien zelfs prettig gevonden. En een corrosieve aantasting kan eventueel door een eenvoudige beschermingsmaatregel, zoals het aanbrengen van een coating, worden voorkomen.

Daarom zal hier niet worden ingegaan op toe te stane concentraties van rook en gassen onder diverse omstandigheden, maar zal alleen worden behandeld het transport door de windstromingen. Verder zal ook niet worden besproken de hinder van vliegias en roet, die als korrels of vlokken uit de rookwolken „uitregenen”, daar het voorkomen hiervan een stooktechnisch probleem is. Alleen de zeer kleine roetdeeltjes, die de rook kunnen kleuren en door hun geringe valsnelheid ongeveer de baan van de rookwolken volgen, vormen een onderdeel van het rookhinderprobleem, daar zij meer of minder sterke vervuiling kunnen geven van de



EFFECT VAN GETRAPTE VOORGEVEL OP HOOGTE GESTOORDE GEBIED

atmosfeer alsook van gebouwen, voertuigen, planten, textielgoederen enz.

Ten slotte zal bij deze behandeling van het rookhinderprobleem alleen worden ingegaan op het neertrekken van rook en gassen door de wervels van nabijgelegen gebouwen of van de schoorstenen waar zij uitkomen. Niet dus op de dispersie door diffusie of door de atmosferische turbulentie.

Dit laatste wordt voornamelijk dan in de praktijk onderzocht, indien allerlei atmosferische of klimatologische invloeden van belang zijn, maar nog niet voldoende nauwkeurig bij modelonderzoek kunnen worden nagebootst. In de Concauwe publikatie van 1966: „The Calculation of atmospheric Dispersion from a Stack”, zijn hierover gegevens en formules verzameld, terwijl door diverse onderzoekers in latere publikaties aanvullende praktijkformules en berekeningsmethoden zijn gegeven, om de effectieve schoorsteenhoogte ten behoeve van die dispersie-berekening, d.w.z. de opstijging van de rookpluim uit een schoorsteen, nog beter te kunnen voorspellen.

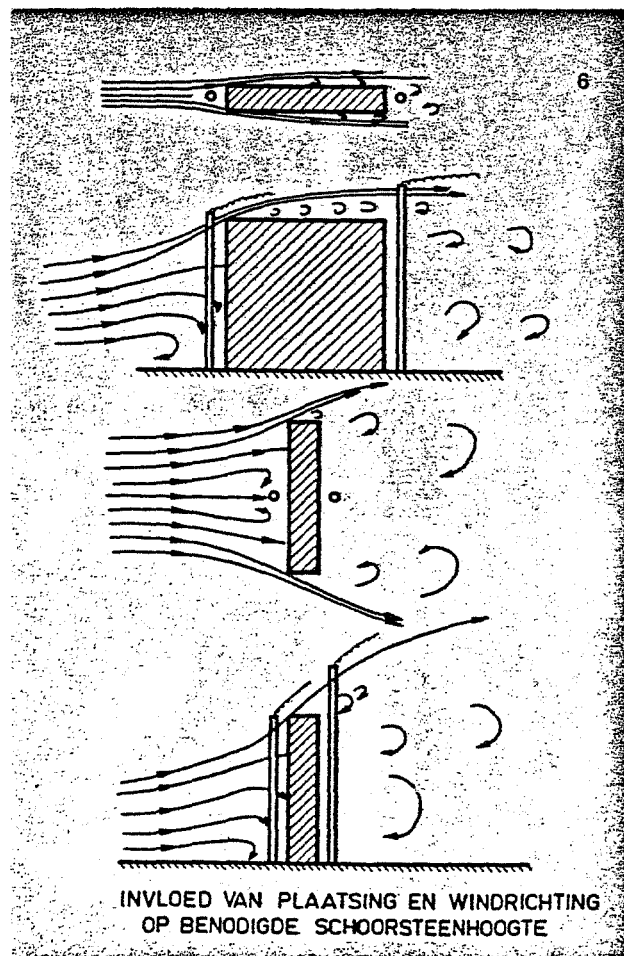
Al dergelijke dispersie-berekeningen hebben echter geen enkele zin, indien een schoorsteen uitmondt in het door wervels gestoorde zoggebied van (een) gebouw(en). Deze wervelsystemen zijn namelijk zodanig, dat de daarin terecht komende rook of gassen zeer snel naar beneden worden getransporteerd, zodat de zijzijde van een gebouw, waarop een te lage schoorsteen staat, zelfs van de top tot de grond in rook gehuld kan zijn.

Waardoor ontstaat rookhinder bij hoogbouw en wat is er tegen te doen?

Indien alle huizen of gebouwen in een wijk of stadsdeel ongeveer even hoog zijn en vrij dicht op elkaar staan, vormt alleen de buitenste vrij aangestroomde rij huizen een echt obstakel in de wind. Er ontstaat dan wel een dikke turbulente grenslaag boven zo'n stadsdeel, maar daarin zijn geen bijzonder heftige grote neertrekkende wervels aanwezig. Daardoor kan de rookafvoer van elke woning of elk gebouw er redelijk goed zijn. De schoorstenen dienen dan zover boven de daken uit te steken, dat zij boven het vrij lage wervelgebied eindigen, dat elk dak zelf veroorzaakt. Dat dit eigen wervelgebied laag is komt door het stroomlijneffect van getrapte gevels; dat geldt ook voor schuine daken of daken met slechts gering hoogteverschil ten opzichte van de omringende gebouwen.

Zodra er echter een hoog gebouw tussen geplaatst wordt, wordt de stromingstoestand in die stadswijk geheel anders. Een dergelijk gebouw vormt dan wel een apart en groot obstakel in de grenslaagstroming

boven de stad; achter, boven en opzij ontwikkelt zich een groot zoggebied. Hierin komen soms wervels voor met maximale afmetingen gelijk aan de afmetingen van het gebouw, die boven de omgeving uitsteken en met snelheden gelijk aan de oversnelheden aan de gevelranden aan de loefzijde bij het dak. Afhankelijk van de gebouwworm breidt dit zoggebied zich meer of minder sterk uit. Het is echter mogelijk, dat bij loodrechte aanstroming op de lange gevel van een hoog, lang en smal gebouw de grens van het gestoorde gebied vanaf de voorgevelrand van het dak onder een hoek van 45° naar boven begint te lopen en dat de uiteindelijke hoogte van het zog 2 tot 2,5 maal de gebouwhoogte (boven zijn omgeving) wordt. Indien nu rook in dit wervelgebied wordt uitgeblazen, wordt zij meestal direct naar beneden (naar het dakoppervlak) alsook verder naar de grond getransporteerd. De snelheid van uitblazen heeft hierop geen invloed, daar de energie van de wervels dan altijd verre overheerst ten opzichte van de kinetische energie in de rookpluim. Het gevolg is dat in het gehele terugstroomgebied van het zog een grote rookconcentratie ontstaat. Daar dit terugstroomgebied vrij lang kan zijn,



namelijk tot 5 en meer gebouwhoogten toe (zie fig 4), wil dit zeggen dat bij een gebouw van 100 m hoogte de laagbouw in een gebied met een straal van minstens 500 m er veel last van kan hebben, als de schoorsteen niet hoog genoeg is.

Om deze rookhinder van en vóór een hoog gebouw te voorkomen, dienen de schoorstenen ervan dus boven het door hem veroorzaakte gestoorde gebied uit te steken. Omdat een schoorsteen zelf echter een obstakel in de stroming is, kan daarachter de rook ook neergetrokken worden. De ervaring leert dat dit gebeurt zodra de windsnelheid aan de top van een schoorsteen groter wordt dan de rookuitblaassnelheid.

Achter de schoorsteen kan dan een „rookvlag” ontstaan van 3 tot 10 schoorsteendiameters hoogte. En als deze vlag aan zijn onderzijde in het gestoorde gebied van het gebouw komt, treedt toch rookhinder op. Omdat de windsnelheden op het dak van een hoog gebouw zeer groot kunnen zijn (ongestoorde snelheid 1,5 à 2,5 x zo groot op 100 m hoogte als op 10 m hoogte en daarbovenop nog 1,5 à 2 x vergroting door verdringing van de luchtstroming door het gebouw) zal het dus vaak noodzakelijk zijn de schoorsteen van een hoog gebouw circa 10 diameters boven het gestoorde gebied te laten uitsteken.

Om geen onnodig lange schoorstenen te behoeven te bouwen, zal men ze dáár moeten plaatsen waar het gestoorde gebied het laagste is. Aan welke kant van een gebouw dat zal zijn hangt natuurlijk af van de bouwvorm, maar meestal kan de schoorsteen het beste vóór de kortste gevel staan (zie fig. 6). Zo mogelijk zou zij ook geplaatst moeten worden aan de zijde, waarop de wind meestal staat (zuidwest tot noordwest), omdat dan de rook door de uitwijkende luchtstroming hoog over het gebouw wordt heen getild (zie fig. 6).

Een veel moeilijker op te lossen probleem is echter de last, die een hoog gebouw veroorzaakt voor de rookafvoer én de werking van de stooktoestellen in de omringende laagbouw. In de eerste plaats slaan de neerwaarts gerichte wervels in het zogebied de rook, afkomstig van de schoorstenen van de laagbouw, direct naar beneden. Daarnaast treden er grote veranderingen op van de stromingsrichting in het zog ten gevolge van de afspoelende wervels, alsook doordat de natuurlijke wind zelf niet constant van richting is. Door het „wapperen” van het zog keren de luchtstromingen daar zelfs vaak van richting om en zijn zij ook afwisselend op en neer gericht. Bovendien ontstaan daardoor vrij sterke drukwisselingen op de daken. De trekvariaties die hierdoor optreden in de schoorstenen van laagbouw in de buurt van een hoog gebouw, kun-

nen reeds bij niet al te sterke wind zó groot zijn, dat kachels worden uitgeblazen. Om deze moeilijkheden te overwinnen zullen dus schoorsteenkapen moeten worden ontwikkeld, die vrijwel ongevoelig zijn voor windsterkte en windrichting inclusief op-en-neerstromingen, d.w.z. dat zij in feite zelf geen trek mogen geven bij welke wind ook. Maar daarnaast zullen toch ook de stooktoestellen ongevoelig moeten worden gemaakt voor trekvariaties. Die drukwisselingen werken namelijk wél op de schoorsteenuitlaten, maar dringen niet of in ieder geval niet met dezelfde tijdsvertraging door tot de aanzuigopeningen van de kachels, zodat hierdoor ook trekvariaties ontstaan. Meestal worden daarom trekventilatoren en/of trekregulateurs aangebracht, maar of dit voldoende is blijft de vraag. Een verbetering zou misschien ook verkregen kunnen worden door de schoorstenen belangrijk te verhogen, d.w.z. in plaats van bijvoorbeeld 1 à 2 m, 5 tot 10 m lange schoorstenen te maken, zodat de uiteinden verder van het wisselende drukgebied bij de daken komen te liggen. Maar dit is architectonisch natuurlijk geen aanvaardbare oplossing.

Daar bovendien het neerslaan van de uittredende rook bij al deze maatregelen blijft optreden, lijkt het onvermijdelijk dat men bij het toepassen van hoogbouw overgaat op een systeem van stadswijkverwarming, waarbij de benodigde stookinstallaties met hun schoorstenen eventueel gecombineerd worden met de hoge gebouwen. Deze centrale stookinstallaties zouden mogelijk een schonere verbranding kunnen hebben dan de vele kleine cv-installaties of kachels voor elke aparte woning. Ze zouden eventueel zelfs van rookgasreinigingsinstallaties kunnen worden voorzien. Dit betekent dat ontworpen stadswijken in hun geheel met de erbij behorende omgeving in wind- of watertunnels onderzocht moeten worden, voordat tot de bouw wordt overgegaan. Men kan niet ongestraft zo maar één of meerdere hoge gebouwen in een laagbouw omgeving zetten. Indien dit gebeurt bij zogenaamde sanering van een wijk zou deze daardoor juist heel ongezond kunnen worden.

V De ventilatieproblemen bij de hoogbouw Waardoor ontstaan de ventilatiemoeilijkheden?

Ventilatie, d.w.z. het verversen van de lucht in vertrekken en werkruimten, is bij laagbouw meestal geen groot probleem, omdat door de temperatuurverschillen van de lucht binnen en buiten, alsook door de drukverschillen welke de wind levert, voldoende trek ontstaat als ramen, ventilatiegaten (bovenlichten) e.d. worden geopend. Mocht de ventilatie onvoldoende zijn door een tegenwerkende winddrukverdeling, dan

kunnen raamventilatoren of trekventilatoren in ventilatiekappen, schoorstenen e.d. meestal het euvel verhelpen.

Als gevolg van de verticale windgradiënt zijn de drukverschillen bij een 100 m hoog gebouw echter 2,25 tot 6,25 maal zo groot als bij de conventionele laagbouw van 10 m hoog. Natuurlijke ventilatie met eventuele hulp van raamventilatoren e.d. leidt daardoor bij hoogbouw vaak tot moeilijkheden, zoals sterke tochtverschijnselen en ongewenste luchtverplaatsingen tussen diverse ruimten. Daarom is het bij hoge gebouwen meestal noodzakelijk dat gedeeltelijke of volledige kunstmatige ventilatie wordt toegepast. Onder gedeeltelijke kunstmatige ventilatie wordt hier verstaan: het wegzuigen van de afgewerkte lucht uit de vertrekken en het vrij toelaten van buitenlucht via ramen, speciale ventilatie-openingen of kanalen. Bij volledige kunstmatige ventilatie wordt de verse lucht, die dan meestal op een bepaalde temperatuur en vochtigheid is gebracht, onder overdruk ingeblazen en verdwijnt de afgewerkte lucht via afzuigkanalen.

Deze twee ventilatiesystemen worden door de wind op verschillende wijze beïnvloed, waarmede terdege rekening dient te worden gehouden.

Luchtafzuiging

Bij toepassing van het systeem van alleen afzuigen van afgewerkte lucht — hetgeen natuurlijk dient te gebeuren in de vertrekken met de grootste stankproductie zoals wc's en keukens — moet erop gerekend worden dat door de wind in gebouwen dikwijls onderdrukken gezogen worden ten opzichte van de barometerdruk. Dit is een gevolg van het feit, dat alleen de gevel aan de windzijde aan een overdruk van maximaal éénmaal de stuwdruk van de wind bloot staat, terwijl de andere gevels onderdrukken van 0,3 (lijzijde) tot 0,6 (zijgevels) en de hoeken zelfs 2 à 3 maal die stuwdruk ondervinden. Afhankelijk van de windrichting en van de plaatsing van ramen en deuren benevens van de grootte van hun lekoppervlakken, kunnen daardoor onderdrukken in gebouwen ontstaan tot circa 0,3 maal de stuwdruk. Daar die stuwdruk behoort bij de windsnelheid, zoals die dicht bij de top van een gebouw heerst, kunnen de onderdrukken bij hoogbouw vrij groot zijn; bijvoorbeeld bij een windkracht 7 (15 m/sec.) in een 100 m hoog gebouw 10 tot 30 mm waterkolom. Bovendien kunnen die onderdrukken binnen een gebouw naar boven toe toenemen, doordat de overdruk aan de windzijde bij de top afneemt, terwijl de onderdrukken op de andere gevels bovenaan en onderaan meestal ongeveer gelijk zijn. Daarom zullen de bovenste verdiepingen een sterkere

afzuiging moeten krijgen dan de lagere en dus eventueel aparte ventilatieschachten moeten hebben. Bovendien mogen de verschillende bouwlagen niet met elkaar in open verbinding staan via trappenhuizen e.d., daar dit ook tot ongewenste (verticale) luchtverplaatsingen zou kunnen leiden.

Om op de benodigde ventilatorcapaciteit en aandrijfenergie te besparen is het gewenst, ventilatieschachten boven het wervelgebied op het dak van het gebouw te laten uitsteken, zodat de wind mee kan helpen aan de ventilatie door middel van de onderdrukken, die zij dan aan de toppen van de schachten veroorzaakt. Indien vrij ver uitstekende schachten onmogelijk zijn en de uitlaatopeningen aan de zijanten van het gebouw of van een dakopbouw zijn gelegen, dient er rekening mee te worden gehouden, dat de afzuigventilatoren bij sterke wind eventueel een belangrijk grotere druk moeten overwinnen dan de zuivere ventilatieweerstand. De druk op de uitlaatopeningen kan dan namelijk veel hoger zijn dan de druk in het gebouw. Hoeveel deze extra tegendruk kan bedragen hangt natuurlijk af van de windrichting en windsterkte, van de vorm en constructie van het gebouw en de plaatsing der uitlaatopeningen.

Volledig kunstmatige luchtverversing en airconditioning

In verband met de moeilijkheden, die het afzuigen van lucht ten behoeve van de ventilatie bij hoge gebouwen geeft, wordt meer en meer airconditioning toegepast of in ieder geval volledig kunstmatige luchtverversing. In principe moet daarbij het gebouw luchtdicht zijn, daar anders toch inwendig drukverschillen en ongewenste luchtverplaatsingen ontstaan, waardoor de luchthuishouding alsook de warmtebalans niet in orde gehouden kunnen worden.

Het probleem bij dit systeem is meestal: welke drukken kunnen er heersen bij de aanzuig- en uitblaasopeningen. Er is tegenwoordig een algemene neiging de airconditioning-apparatuur, de ventilatoren enz. op het dak of in de bovenste verdieping van het gebouw te plaatsen. Daar heersen tijdens wind meestal onderdrukken. Indien daarbij ongeveer dezelfde onderdrukken op de aanzuig- en uitblaasopeningen werken, behoeven de ventilatoren alleen de ventilatieweerstanden te overwinnen. Uit onderzoekingen is echter gebleken, dat zelfs als deze openingen vrij dicht bij elkaar geplaatst zijn, er bij bepaalde windrichtingen toch grote verschillen in de erop werkende drukken kunnen optreden; soms wel tot ruim éénmaal de stuwdruk van de wind (op dakniveau). Het is dus voor de economie van dergelijke luchtverversingssystemen van be-

lang, dat tevoren wordt nagegaan hoe deze drukverschillen minimaal of liefst meewerkend gemaakt kunnen worden. De aanzuig- en uitblaasopeningen mogen bovendien niet zó ten opzichte van elkaar worden geplaatst, dat bij bepaalde windrichtingen de uitgeblazen lucht direct weer aangezogen kan worden.

De beste oplossing zou zijn, dat de aanzuigopeningen worden geplaatst op ongeveer de halve hoogte van het gebouw in de gevel aan de windzijde, omdat daar een overdruk aanwezig is. Indien bovendien de uitlaatopeningen aan de top van een schacht zitten, die een eind boven het dak uitsteekt, zodat er altijd een onderdruk op ontstaat, dan helpt de wind mee om de ventilatieweerstanden te overwinnen. Dit zou echter betekenen, dat er aanzuigopeningen aan verschillende zijden van het gebouw moeten zijn, zodat door middel van omschakelkleppen in de aanzuigkanalen altijd alleen aan de windzijde lucht kan worden ingelaten.

Een zeer ongunstige toestand wat betreft het benodigde ventilatievermogen zou natuurlijk ontstaan, indien de aanzuigopeningen op de hoeken van een gebouw werden geplaatst — waar zeer grote onderdrukken kunnen optreden (tot driemaal de stuwdruk van de wind) — en de uitblaasopeningen in het midden van een lange gevel, waar de grootste overdruk (éénmaal de stuwdruk) aanwezig kan zijn. De ventilatoren zouden dan alléén door het aanzuigen en uitblazen op deze plaatsen al een druk moeten kunnen overwinnen, gelijk aan viermaal de stuwdruk van de wind op dakniveau, hetgeen bij windkracht 7 op 100 m hoogte zou kunnen neerkomen op ruim 300 mm waterkolom. Net als bij de rookhinder het geval is, kunnen hoge gebouwen ook de ventilatie van de omringende laagbouw moeilijker maken. Om een hoog gebouw kunnen namelijk windsnelheden optreden die één à twee maal zo groot zijn als die van de natuurlijke wind op de hoogte van de top van het gebouw. De winddrukken op ramen, ventilatieopeningen enz. van lage gebouwen in de buurt van zo'n hoog gebouw kunnen daardoor meer dan 10 maal zo groot worden dan wanneer die hoogbouw er niet was. Nu zijn dikwijls bij hoge gebouwen de ramen en deuren en het hang- en sluitwerk van onvoldoende kwaliteit, zodat er inwendige tochtverschijnselen optreden, maar bij laagbouw rekent men in ieder geval niet met de genoemde grote drukverschillen. Bij de laagbouw rondom een hoog gebouw kunnen dan ook sterke tochtverschijnselen en/of verwarmings- en ventilatieproblemen voorkomen, die niet zijn op te lossen met eenvoudige middelen zoals antitocht-strippen, raamventilatoren e.d. Daarom zullen dus ook bij die laagbouw ventilatieschachten met eventueel krachtige afzuigventilatoren

moeten worden aangebracht, terwijl tevens goed afsluitende ramen en deuren en solide hang- en sluitwerk dienen te worden toegepast.

VI Onderzoekingen aan schaalmodellen in wind- of watertunnels

In het voorgaande is erop gewezen, dat de rookhinder- en ventilatieproblemen bij het toepassen van hoogbouw sterk afhankelijk zijn van de gebouwwormen en van de sterkte, de richting, de gradiënt en de turbulentie van de wind. Daar elk gebouw, gebouwencomplex of stadsdeel anders van vorm en samenstelling is en bovendien luchtstromingen om hoekige voorwerpen niet zijn te berekenen, kan nooit met zekerheid voorspeld worden in welke mate die problemen zullen optreden of dat bepaalde maatregelen ter bestrijding ervan nodig zullen zijn of zullen voldoen. Het is dan ook meestal noodzakelijk en zeker altijd gewenst, dat bij ontwerpen van gebouwen van bijvoorbeeld meer dan ca. 40 m hoogte door schaalmodellen in wind- en/of watertunnels onderzocht wordt of er moeilijkheden zullen ontstaan en hoe deze eventueel zijn op te lossen. In verband daarmee zal thans worden aangegeven hoe dergelijke onderzoekingen kunnen worden uitgevoerd en hoe de resultaten ervan verwerkt worden. Het gaat hierbij dus om de volgende kwesties:

- a. Bepalen van de gemiddelde winddrukken op de ingangen, ramen, balkondeuren, ventilatieschachten e.d. Dit is nodig om de mogelijkheden te kunnen beoordelen van natuurlijke ventilatie van verschillende ruimten of vertrekken.
- b. Leren kennen van de gemiddelde winddrukken bij de luchtaanzuigroosters en de uitblaasopeningen van airconditioningsystemen. Deze winddrukken hebben invloed op de dimensionering van de ventilatoren en op de vermogens, die voor airconditioning nodig zijn.
- c. Nagaan hoe groot de drukvariaties kunnen zijn op de uitstroomopeningen van schoorstenen en ventilatieschachten. Dit is nodig om te kunnen vaststellen of en wat voor trekregulateurs moeten worden toegepast, om een voldoende constante trek te waarborgen.
- d. Nagaan hoe de afvoer zal verlopen van de rookgassen of van de afgewerkte lucht van keukens, wc's, garages, zuurkasten e.d., die uit de geprojecteerde schoorstenen worden geblazen. Indien die gassen door de wervelingen in de luchtstroming om het gebouw direct naar de grond, aanzuigroosters van airconditioningsystemen of ventilatieopeningen worden getransporteerd, is dat

meestal op zijn minst gesproken hinderlijk voor de aanwezigen in en om de hoogbouw en de omgevende laagbouw.

- e. Bepalen van de concentratie van de uitgeblazen gassen in het zogebied van het gebouw. Hierdoor kan worden vastgesteld of een zekere rookhinder al of niet toelaatbaar zal zijn.

Modellen en modelregels

Bij stromingsonderzoekingen aan modellen is het noodzakelijk, dat er een grote mate van gelijkvormigheid bestaat tussen de stromingen om het model en die om het werkelijke object. Want alleen als aan deze voorwaarde wordt voldaan, zijn de resultaten van de metingen aan een model geldig voor de werkelijkheid. Om dit te kunnen bereiken voor bovengenoemde onderzoekingen dienen de volgende modelregels in acht te worden genomen.

1. Geometrische gelijkvormigheid

Een eerste vereiste is natuurlijk, dat een model geometrisch gelijkvormig is aan het werkelijke object.

Door een getrouwe nabootsing op schaal is hieraan meestal eenvoudig te voldoen. Bij zeer grote objecten zoals gebouwen (complexen) zijn de modelschalen in verband met de geringe afmetingen van de meetplaatsen van wind- of watertunnelse echter zeer klein, bijvoorbeeld 1 : 100 tot 1 : 500. Op die kleine schalen zijn de details als daklijsten, raamkozijnen e.d. niet meer na te bootsen. Dat is gelukkig ook niet nodig, daar die details geen of weinig invloed hebben op de algemene stromingspatronen om dergelijke objecten. De modellen hebben dus meestal vlakke wanden: alleen sterkere profileringen zoals galerijen, luifels, portalen e.d. moeten natuurlijk wel nagebootst worden. In windtunnels zijn de modellen opgebouwd uit dunne vlakke houten planken of plexiglas platen; in watertunnels bestaan zij (in verband met de grotere erop werkende krachten) uit dikke plexiglas platen of staalplaten. Eventuele profileringen worden erop aangebracht door er strippen van triplex, plexiglas of staal op te lijmen.

2. Gelijkvormige krachtensystemen in de stromingen

De krachtensystemen op de deeltjes van de stromingen om het model en om het werkelijke object dienen ook gelijkvormig te zijn, willen er gelijkvormige stromingen ontstaan. Nu werken er in het algemeen gesproken op deze deeltjes hoofdzakelijk traagheids- en wrijvingskrachten. Indien de verhouding tussen deze krachten op alle overeenkomstige punten bij gelijkvormige objecten hetzelfde is, dan zullen de deeltjes

ook gelijkvorige banen beschrijven. Deze verhouding wordt uitgedrukt door het dimensieloze getal van Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot l}{s}$$

waarin v = karakteristieke snelheid, bijvoorbeeld die van de ongestoorde stroming;

l = karakteristieke afmeting van het omstroomde object;

s = kinematisch viscositeit van het stromende medium.

Het is duidelijk dat bij het onderzoek aan modellen op zeer kleine schaal het Reynoldsgetal niet gelijk kan zijn aan dat wat bij het werkelijke object optreedt. Bij onderzoekingen in watertunnels zijn de bereikbare Reynolds-getallen bij gelijke stromingssnelheden en modelafmetingen ongeveer 15 à 20 maal zo hoog als bij metingen in windtunnels; een en ander als gevolg van de geringere kinematische viscositeit van water die afhankelijk is van de temperatuur. Maar ook in water zou voor volledige gelijkvormigheid de snelheid van de stroming om het model vele malen groter moeten zijn dan de werkelijke windsnelheid, namelijk de schaalfactor gedeeld door ongeveer 15 à 20, hetgeen onmogelijk is. Er kunnen daarom bij metingen aan modellen zogenaamde schaaffecten optreden, waardoor de resultaten niet overdraagbaar zijn op de werkelijkheid.

Bij onderzoekingen aan hoekige objecten, zoals gebouwen, is dit schaaffect echter gelukkig meestal zeer gering, omdat zij aerodynamisch slecht gevormd zijn, d.w.z. niet gestroomlijnd, maar opgebouwd uit platte vlakken met min of meer scherpe hoeken. Daar stromingen geen hoekige banen kunnen volgen laten zij altijd op de randen of hoeken los en worden er daarna gebieden gevormd met grote wervels.

De grootten van de loslatings- en wervelgebieden zijn evenredig met de afmetingen van de vlakken waarop zij ontstaan, zodat deze gebieden bij model en werkelijk object gelijkvormig zijn, ongeacht de modelschaal. De stromingsbeelden zijn daardoor bij gelijkvormige hoekige objecten ook steeds vrijwel gelijkvormig en dus onafhankelijk van het getal van Reynolds. Alleen als objecten min of meer gestroomlijnd of afgerond zijn, zoals sommige moderne gebouwen, schoorstenen e.d., dient er wel rekening te worden gehouden met eventuele schaaffecten. Door bepaalde maatregelen, zoals het aanbrengen van ruwheden op of het spannen van dunne draden langs het modeloppervlak, zijn er in deze gevallen soms mogelijkheden om toch voldoende gelijkvormigheid te bereiken.

3. Gelijke compressibiliteitsverschijnselen in de stromingen

Bij stromingen om objecten worden de particles van het medium plaatselijk versneld of vertraagd, hetgeen gepaard gaat met resp. verlaging of verhoging van de statische druk, d.i. de druk die de deeltjes onderling op elkaar uitoefenen. In een samendrukbaar medium zoals lucht wordt daardoor tevens het door die deeltjes ingenomen volume plaatselijk vergroot of verkleind, d.w.z. dat het medium expandeert of comprimeert tijdens het stromen. Om bij een model een stroming te krijgen welke gelijkvormig is aan die om het werkelijke object, zullen die compressibiliteitsverschijnselen in beide gevallen hetzelfde moeten zijn.

Nu is dit bij windtunnelproeven vrij eenvoudig te bereiken, daar de compressibiliteitsverschijnselen afhankelijk zijn van het geval van Mach:

$$Ma = \frac{v}{a}$$

waarin v = stromingssnelheid;

a = geluidssnelheid in lucht.

Als dus de stromingssnelheid in de tunnels dezelfde is als in de werkelijkheid, zijn de compressibiliteitsverschijnselen gelijk. Omdat water vrijwel onsamendrukbaar is zouden er bij modelonderzoekingen in watertunnels afwijkingen kunnen optreden ten opzichte van de werkelijke luchtstromingen.

Gelukkig echter zijn de in de werkelijkheid optredende drukverschillen in windstromingen om gebouwen nog zo gering ten opzichte van de barometerdruk, dat daarbij nauwelijks gesproken kan worden van expansie of compressie van de lucht. D.w.z. dat in de werkelijkheid in de wind vrijwel geen compressibiliteitsverschijnselen optreden, zodat windstromingen met zeer goede benadering door waterstromingen zijn na te bootsen. Bovendien kunnen, als het getal van Reynolds van geen belang is, de stromingssnelheden in windtunnels naar believen gekozen worden, indien zij slechts laag genoeg blijven ten opzichte van de geluidssnelheid ($Ma \leq 0,1$).

In watertunnels kan de stromingssnelheid ook willekeurig worden gekozen, waarbij er echter op gelet dient te worden, dat nergens in de stroming de statische druk zó laag wordt, dat er dampbellen in ontstaan (cavitatie). Dit kan voorkomen worden door op het water in de tunnel een voldoende hoge persdruk te zetten.

4. Gelijkvormige windgradiënten en turbulenties

De snelheidsverlopen en de wervels in de aankomen-

de wind zouden bij een modelproef op schaal nagebootst moeten zijn, ten einde gelijkvormige stromingsbeelden te krijgen om model en werkelijk object.

Die windgradiënten en wervelingen ontstaan echter niet alleen door de in de directe omgeving van een object aanwezige obstakels, maar ook door het landschap waarover de wind aankomt. Nu is meestal niets bekend van de gemiddelde windgradiënt en van de schaal (afmetingen) en intensiteit van de turbulentie ter plaatse van een geprojecteerd of bestaand object. Daar zij bovendien met de windsterkte en richting belangrijk kunnen variëren, is het zeer moeilijk hen bij modelproeven altijd na te bootsen. De bestaande winden watertunnels in Nederland zijn trouwens ongeschikt om beiden — windgradiënt en turbulentie — goed te imiteren. Hiervoor zijn namelijk zeer lange meetplaatsten nodig, welke voor vliegtuigbouwkundig en ander aero- en hydrodynamisch onderzoek overbodig zijn.

Daarom wordt er bij onderzoekingen aan zeer grote gebouwen soms hoogstens met behulp van een spijlenrooster, met in verticale richting verlopend doorlaatpercentage, een zekere gradiënt opgewekt in de tunnelstroming vóór het model. Deze gradiënt kan een $2/5$ tot $1/7$ machtskromme zijn, afhankelijk van de plaats van het gebouw. Bij plaatsing dicht bij de kust wordt de $1/7$ machtskromme toegepast, omdat algemeen wordt aangenomen, dat dit de gradiënt is welke in de wind boven zee heerst. Voor gebouwen in grote steden daarentegen wordt de $2/5$ machtskromme gebruikt, daar boven een stad een zeer dikke grenslaag in de windstroming ontstaat. Indien de turbulentie, d.w.z. de frequentie en de grootte van snelheids- en richtingsveranderingen in de wind, niet juist worden nagebootst, kunnen de in de tunnels gemeten gemiddelde drukken en vooral de drukfluctuaties afwijken van hetgeen in de werkelijkheid optreedt. Gelukkig echter hebben grote obstakels in de omgeving van een object meestal veel sterkere invloed dan de windturbulentie. Door deze obstakels zoveel mogelijk bij het model op te nemen, d.w.z. voor zover de maximale maquette-afmetingen toelaten, kunnen in deze gevallen toch vrij betrouwbare resultaten worden verkregen. Voor alleenstaande zeer hoge gebouwen dienen echter zeker de turbulenties, d.w.z. de frequenties en de grootten van de snelheids- en richtingsveranderingen van de wind, juist te worden nagebootst.

5. Gelijkvormige krachtensystemen op uitgeblazen gassen

Om de banen van in de wind uitgeblazen gassen bij het model gelijkvormig te krijgen met die van de werkelijkheid, dient aan twee voorwaarden te worden

voldaan. In de eerste plaats moet de verhouding tussen de kinetische energie in de uitgeblazen straal gasen en de daartegen duwende wind, bij model en werkelijk object hetzelfde zijn. Dit komt erop neer, dat de volgende regel zou moeten worden gevolgd:

$$\frac{\rho_r V_r^2}{\rho_l V_l^2} \underset{\text{model}}{=} \underset{\text{werkelijkheid}}{\frac{\rho_r V_r^2}{\rho_l V_l^2}}$$

Hierin is V_r = uitblaassnelheid rookgas,
 V_l = snelheid lucht,
 ρ_r = dichtheid rookgas,
 ρ_l = dichtheid lucht.

Omdat de dichtheid van de gasen meestal niet constant is en vaak maar weinig van die van lucht afwijkt, wordt zij vrijwel altijd gelijk ondersteld aan de dichtheid van de lucht.

Daardoor wordt bovenstaande regel vereenvoudigd tot:

$$\frac{V_r}{V_l} \underset{\text{model}}{=} \underset{\text{werkelijkheid}}{\frac{V_r}{V_l}}$$

d.w.z. dat de verhouding tussen de uitstroomsnelheid van de lucht of het water uit de modelschoorstenen ten opzichte van de stromingssnelheid in de wind- of watertunnel hetzelfde moet zijn als de verhouding tussen de rookgas-uitreesnelheid en de windsnelheid bij het werkelijke object. Hieraan is altijd eenvoudig te voldoen, daar zowel de tunnelstromingssnelheid als de uitstroomsnelheden uit de schoorstenen bij de proeven goed zijn te regelen.

Indien echter de uitgeblazen gasen in de werkelijkheid een heel ander soortelijk gewicht hebben dan de lucht, bijvoorbeeld door een hoge temperatuur, dan werken er op de gasdeeltjes niet alleen dynamische krachten maar ook statische (Archimedes) krachten. In dat geval moeten dus tevens de verhoudingen tussen deze twee soorten krachten bij de modelproef dezelfde zijn als in de werkelijkheid. Deze verhouding kan worden weergegeven door het getal van Froude, dat in dit geval geschreven kan worden als:

$$F = \frac{T_l \rho_r}{T_r \rho_l - T_l \rho_r} \cdot \frac{V_r^2}{L \cdot g}$$

waarin T_l = absolute temperatuur van de lucht,
 T_r = absolute temperatuur van rookgasen,
 ρ_r = dichtheid van de gasen bij kamertemperatuur,
 ρ_l = dichtheid van de lucht bij kamertemperatuur,

g = versnelling van de zwaartekracht,

V_r = rookgas-uitblaassnelheid,

L = karakteristieke lengte bijvoorbeeld gasstraaldiameter.

Uit deze formule blijkt dat indien het Froude-getal bij een model op zeer kleine schaal hetzelfde moet zijn als in de werkelijkheid, in de eerste plaats de stromingssnelheid bij de tunnelproeven veel kleiner moet zijn dan de werkelijke snelheid. Verder dient dikwijls de temperatuur van de uitgeblazen straal bij het model veel hoger te zijn dan in de werkelijkheid, om de dichtheidsverhoudingen tussen lucht en gasen gelijk te maken.

Omdat deze maatregelen grote beperkingen opleggen aan de variatiemogelijkheden tijdens de proeven als ook de meetprocedures ingewikkeld maken, wordt aan deze eis van een constant getal van Froude vrijwel nooit voldaan; er wordt dus gekleurd water of koude lucht vermengd met oliedamp uit de schoorsteen geblazen. Dit geeft in het algemeen toch geen grote afwijkingen in de stromingsbeelden, daar deze bij rookhinderonderzoekingen voornamelijk beheerst blijken te worden door de wervelingen, welke door het object of de omgevende grote obstakels in de stroming worden opgewekt. In de werkelijkheid worden bovendien eventuele lichtere of zwaardere rookgasen door de turbulenties zeer snel met lucht vermengd en afgekoeld, zodat hun stijgkracht spoedig verdwenen is. De stijgkracht van lichte of hete rookgasen speelt wel een belangrijke rol, als een rookpluim wordt uitgeblazen uit een schoorsteen buiten de invloedssfeer van het wervelgebied boven de gebouwen. In dat geval is er echter geen rookhinder in de directe omgeving te verwachten.

Bij rookhinderproeven in tunnels in de naaste omgeving van objecten wordt dus vrijwel uitsluitend de regel aangehouden, dat de verhoudingen tussen rook-uitblaassnelheid en windsnelheid van het werkelijke object precies worden nagebootst.

Meetmethoden en presentatie der resultaten

Tunnels zijn al of niet gesloten kanaalcircuits, waar door middel van ventilatoren, compressoren, of schroeven lucht of water doorheen wordt gepompt. In een bepaald gedeelte van het circuit, de zogenaamde meetplaats, waarin door allerlei maatregelen de stroming de voor het onderzoek vereiste kwaliteiten heeft gekregen, worden de te beproeven modellen geplaatst. Deze modellen, die meestal op een vlakke plaat, de zogenaamde grondplaat, zijn opgebouwd, worden bevestigd hetzij op een wand van de meetplaats, hetzij op

een evenwijdig aan de tunnel-longsas aangebracht schot in de meetplaats.

Door de grondplaat, waarop het model staat, te verdraaien om een er loodrecht opstaande as, kunnen verschillende relatieve windrichtingen worden ingesteld.

Stationaire drukmetingen

Voor drukmetingen worden op de plaatsen, waar men de drukken wil leren kennen, gaatjes aangebracht in de oppervlakken van de modellen. In deze gaatjes worden van binnen in het model dunne koperen leidingen of plastic slangen gestoken, zodat hun openeinden komen te liggen in het modeloppervlak. Die leidingen worden met behulp van slangen via het holle model, een gat in de grondplaat en een doorvoering van de tunnelwand, verbonden met manometers of via een multischakelkraan met een elektronische drukopnemer.

De plaatselijke (oppervlakte)drukken worden daarbij altijd gemeten ten opzichte van de statische druk in de stroming in de meetplaats, een eind stroomopwaarts van het model. Door de gemeten gemiddelde drukverschillen te delen door de stuwdruk van de ongestoorde tunnelstroming vèr voor het model, worden dimensieloze drukcoëfficiënten verkregen. Met behulp van deze coëfficiënten kunnen de gemiddeld in de werkelijkheid optredende over- of onderdrukken ten opzichte van de atmosferische (barometer)druk op eenvoudige wijze worden berekend, namelijk door deze te vermenigvuldigen met de stuwdruk van de ongestoorde wind. Deze stuwdruk dient bij hoge gebouwen die te zijn, welke op dakniveau heerst; bij gebouwen van bijvoorbeeld 100 m hoogte is dat 2,25 tot 6,25 maal de stuwdruk van de wind op 10 m boven de grond. De meest extreme drukverschillen zullen natuurlijk optreden tijdens de krachtigste storm welke ter plaatse van het betreffende gebouw voorkomt.

Omdat niet te voorspellen valt hoe sterk die storm ooit zal zijn, neemt men voor de berekening van de grootste drukverschillen die windkracht, welke met een bepaalde kans (bijvoorbeeld 95%) in een zekere periode (bijvoorbeeld 1 maal in de 10 jaren of 100 jaren) zal optreden of waarvan volgens statistische weergegevens bekend is, dat zij gemiddeld gedurende slechts een zeer klein gedeelte van alle tijd (bijvoorbeeld 5% of 1%) overschreden wordt.

Dynamische drukmetingen

Voor dynamische drukmetingen moeten de drukleidingen, die van de drukgaatjes van het model komen, worden aangesloten op gevoelige elektronische druk-

opnemers, welke zowel buiten de tunnel als in het model opgesteld kunnen zijn. Het wisselende signaal van deze drukopnemers kan worden geregistreerd met behulp van diverse typen recorders, maar kan door middel van speciale elektronische apparatuur eventueel ook direct geanalyseerd worden. Op deze wijze kan in de eerste plaats de gemiddelde grootte worden bepaald van de drukvariaties (de r.m.s.-waarde) ten opzichte van de stuwdruk van de ongestoorde stroming. Bovendien kan door een frequente analyse worden vastgesteld hoe sterk de drukvariaties in verschillende frequentiebanden zijn. Door de gemeten frequenties te delen door de modelschaalfactor en te vermenigvuldigen met de verhouding tussen de werkelijke windsnelheid en de ongestoorde stromingssnelheid in de tunnel, worden de in de werkelijkheid optredende frequenties gevonden. Nagegaan kan dan worden of de te verwachten drukvariaties, die evenredig met de stuwdruk van de wind toenemen, met hun frequenties bepaalde constructies, zoals gevelbekledingen, ramen e.d., kunnen doen bezwijken of stooktoestellen kunnen laten doven, zodat daartegen maatregelen getroffen moeten worden.

Rookhinderproeven

Bij onderzoeken in windtunnels wordt uit de schoorsteen van het model, die uit een messing of stalen pijp bestaat, een nevel utigeblazen, bestaande uit een witachtig mengsel van lucht met verdampte of met behulp van koolzuur vernevelde olie. In watertunnels wordt met inkt of andere kleurstoffen gemengd water uit de modelschoorsteen geperst. De baan van de „rookpluim” alsook de neertrekking van de „rook” door wervels en het terugstromen in het zoggebied van het gebouw(encomplex) worden vastgelegd door de stromingsbeelden te fotograferen bij stroboscopische flitsverlichting. Hierdoor wordt duidelijk zichtbaar of en hoe de rook wordt getransporteerd naar ventilatieopeningen, aanzuigroosters en airconditioning-systemen, wegen, recreatieruimten enz. Door de schoorstenen bij het model meer of minder ver door te steken, kan bovendien op eenvoudige wijze worden vastgesteld welke hoogte zij minimaal moeten hebben om geen rookhinder te veroorzaken.

Recirculatie-onderzoeken

Ten einde na te gaan welke concentratie de gassen hebben, welke in het zoggebied van een gebouw terecht komen, wordt bij windtunnelonderzoeken een mengsel van lucht en koolzuur geblazen uit de schoorstenen, uitlaten van zuurkasten, uitlaatopeningen van airconditioning-systemen of ventilatie-

schachten. Op de plaatsen waar men de concentratie wil kennen, worden dan met behulp van afzuigpijpjes monsters lucht uit de stroming gehaald. Door de concentraties van het CO₂ in de uitgeblazen lucht en in de monsters te bepalen, wordt een inzicht verkregen in de mate waarin recirculatie van de afgevoerde gassen kan optreden.

In watertunnels kan dergelijk onderzoek eenvoudig gebeuren door uit de schoorstenen pekewater te persen met een bekende zoutconcentratie. Op alle gewenste plaatsen zijn dan op het model sondes aangebracht, waarmee de elektrische geleidbaarheid van het water zeer snel en nauwkeurig kan worden bepaald. Daar deze geleidbaarheid een functie van de zoutconcentratie is, kan op deze wijze dus ook gemakkelijk de mate van recirculatie worden vastgesteld.

Bij deze recirculatie-onderzoekingen dient natuurlijk (net als bij het rookhinderonderzoek) de verhouding van de uitblaassnelheid ten opzichte van de tunnelstromingssnelheid dezelfde te zijn als de verhouding tussen rookgasuittreesnelheid en windsnelheid bij het werkelijke object. Bovendien moet de inwendige dia-

meter van de modelschoorsteen op schaal precies overeenkomen met die van de werkelijke schoorsteen, zodat ook de hoeveelheden uitgeblazen gassen overeenstemmen. Dit laatste is bij rookhinderonderzoek niet zo noodzakelijk; daarbij kan beter de buitendiameter van de modelschoorsteen goed op schaal worden nagebootst, omdat hierdoor de afstand wordt bepaald van het neertrekken van rook in het zog van de schoorsteen (de hoogte van de „rookvlag”).

VII Conclusies

De moderne hoogbouw kan aanleiding geven tot allerlei stooktechnische, ventilatie- en rookhinderproblemen.

De ernst van die problemen is niet te voorspellen aan de hand van tekeningen van dergelijke projecten, daar de windstromingen om hoekige objecten met allerlei vormen en afmetingen niet zijn te berekenen.

Daarom is het ten zeerste aan te bevelen, reeds tijdens het ontwerp modelonderzoekingen in wind- of watertunnels te laten uitvoeren, zodat tijdig maatregelen getroffen kunnen worden ter voorkoming of vermindering van de moeilijkheden.

TVVL - PUBLICATIES

	Thermische eigenschappen van bouwmaterialen (in samenwerking met Ratio-bouw en TNO) (juli 1964)	f 4,25	10	van verwarming en luchtbehandeling (november 1967)	uitverkocht
2-WG	Regelen ter behartiging bij het voorkomen van corrosie van de met rookgas in contact komende delen van ketelinstallaties (december 1964)	f 2,—		10-Tabellen van weerstanden en snelheden in buizen voor centrale verwarming (samengesteld door Adviesbureau Huygen N.V., Maastricht) (november 1969)	f 15,—
3-WG	Aanbevelingen ter voorkoming van corrosie aan de waterzijde van warmwaterverwarmingsinstallaties (april 1965)	uitverkocht		11-WG Aanbevelingen ter voorkoming van corrosie aan de waterzijde van warm- en heetwaterverwarmingsinstallaties (januari 1969)	f 6,50
4-WG	Berekeningsmethoden voor de bepaling van de capaciteit van klimatiseringsinstallaties in niet stationaire gevallen (augustus 1965)	f 5,—		ledenprijs	f 4,50
5-WG	De berekening van behaaglijkheidscondities (april 1966)	uitverkocht		12-R Resultaten van enige onderzoekingen betreffende de toevoer van gekoelde lucht in een proefkamer: deel II: Toevoer vanuit de gangwand deel III: Toevoer vanuit het plafond (augustus 1969)	f 7,50
6-WG	Meteorologische gegevens I: buitentemperatuur en zonneshijnduur (april 1966)	f 10,—		ledenprijs	f 3,50
7-WG	Meteorologische gegevens II: droge- en natte boltemperatuur en relatieve vochtigheid (mei 1967)	f 10,—		13-LC Koeltechniek voor de verwarmingstechnicus (november 1969)	f 17,50
8-R	Resultaten van enige onderzoekingen betreffende de toevoer van gekoelde lucht in een proefkamer (november 1967)	f 5,—		<i>Namens REHVA:</i> Thermal Abstracts verschijnt 6 × per jaar à 200 fiches	
9-LC	Ontwikkeling en prognoses anno 1967			abbonement per jaar (voor leden)	f 24,50
				(voor niet-leden)	f 55,—