

Enige opmerkingen over wind in het bijzonder in verband met de ventilatie van gebouwen *)

H. Ph. L. den Ouden en ir. J. van Laar

1. Ventilatie van woon- en werkruimten

Aan de kwaliteit van de lucht moeten bepaalde eisen worden gesteld. Daar waar schadelijke (o.a. toxische) stoffen in de lucht kunnen komen moet dit zoveel mogelijk worden tegengegaan, waarbij veelal doelmatige afvoer met behulp van lucht nodig is.

Ook wanneer er niet van dergelijke schadelijke stoffen sprake is, moet toch lucht, verontreinigd door stof, riekstoffen, waterdamp enz. worden afgevoerd om een „behaaglijke” toestand te scheppen.

Tenslotte kan het noodzakelijk zijn overtollige hoeveelheden warmte af te voeren hetgeen eveneens met behulp van lucht kan plaats vinden.

In alle gevallen is er dus sprake van afvoer van „gebruikte” en toevoer van „verse” lucht. De hoeveelheden zijn uiteraard afhankelijk van de eisen die men aan de hoedanigheid van de lucht stelt en de hoeveelheden verontreiniging of warmte waar het om gaat.

De toestand, die men in een ruimte bereikt, is het resultaat van de volgende vier factoren:

- buitenklimaat
- bouwkundige uitvoering van de ruimte
- het gebruik van de ruimte
- de eventuele aanwezige mechanische ventilatievoorzieningen.

Zonder de aanwezigheid van deze laatste spreekt men van *natuurlijke* ventilatie; anders van *mechanische* ventilatie.

2. Natuurlijke ventilatie

2.1 Tengevolge van de wind

Rond een gebouw dat in de windstroming is geplaatst ontstaat een bepaalde drukverdeling, tengevolge waarvan in het algemeen aan de loefzijde een overdruk ontstaat, aan de lijzijde, evenals aan de zijgevels en op het dak, een onderdruk.

Door de aanwezige openingen o.a. in de vorm van raam- en deurkieren komt aan de geëxposeerde zijde de lucht binnen, terwijl door dergelijk openingen aan de andere zijde, evenals door aanwezige verticale kanalen, afvoer plaats vindt. Bij verandering van windrichting zal de situatie voor het gebouw veranderen en daarmee de luchtstromingen door het gebouw.

Wil men de grootte van deze ventilatie uit schattingen kennen, hetzij door berekening, hetzij door bepaling met een elektrisch stromingsanalogon, zoals aanwezig bij de Afdeling Binnenklimaat, dan moet voldoende kennis bestaan van het karakter (grootte, richting, turbulentiegraad) van de heersende wind, alsmede van de drukverdelingen welke hierdoor teweeg gebracht worden.

2.2 Tengevolge van temperatuurverschillen

De tweede factor, die een natuurlijke ventilatie kan veroorzaken, is het temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Daar dit temperatuurverschil gepaard gaat met een verschil in dichtheid tussen binnen en buiten zal een drukverschil, waarvan de grootte en de richting afhankelijk is van de hoogte, het gevolg zijn. Men duidt dit wel aan met „schoorsteenwerking” van een gebouw.

3. Mechanische ventilatie

Mechanische ventilatie wordt toegepast indien luchtverversingen noodzakelijk zijn van een omvang, die via natuurlijke ventilatie niet meer tot stand gebracht kunnen worden.

Ook bij aanwezigheid van deze voorziening blijft de wind echter in meerdere of mindere mate haar invloed uitoefenen op het gebouw en daarmee op de luchtverplaatsingen erin. Men denke aan de infiltratie door raam- en deurkieren, geopende deuren of ramen enz. Bovendien zal de wind een rechtstreekse invloed kunnen hebben op het ventilatiesysteem, omdat dit over open verbindingen met de buitenlucht moet beschikken voor aan- en afvoer van de benodigde luchthoeveelheden. De hiervoor noodzakelijke openingen zul-

*) Publicatie no. 145 van het Instituut voor Gezondheidstechniek T.N.O.

len eveneens het effect ondergaan van de optredende drukverdelingen.

4. Schattingen van optredende ventilatie in een elektrisch stromingsanalogon

Wenst men bij een gebouw vooraf schattingen te maken over mogelijke ventilatie, dan bestaat hiervoor een mogelijkheid met behulp van een elektrisch stromingsanalogon zoals ontwikkeld bij de Afdeling Binnenklimaat van het Instituut voor Gezondheidstechniek T.N.O. Hierin worden de diverse deuren, ramen, ventilatievoorzieningen nabootst door elektrische weerstanden en de verplaatste luchthoeveelheden door elektrische stromen. Hiervoor dient men in dit analogon elektrische spanningen aan te leggen welke overeenkomen met de drukverdelingen die in werkelijkheid oorzaak zijn van de luchtverplaatsingen.

Het is mogelijk gebleken hierbij zowel een samenspel na te bootsen van de gezamenlijke invloed van wind, schoorsteenwerking en mechanische ventilatie als van combinaties daarvan.

De aan te leggen spanningen moeten ontleend worden — zoals gesteld — aan de in werkelijkheid optredende drukverdelingen. Om de windinvloed na te bootsen is dus kennis van de wind noodzakelijk en als meteorologisch verschijnsel en wat betreft haar invloed op gebouwen die zich manifesteert als drukverdeling.

In de volgende paragrafen worden ten behoeve hiervan een aantal gegevens en methodieken nader samengevat.

5. Meteorologische gegevens over de wind in Nederland

Wind is een transport van lucht in de atmosfeer. Tengevolge van drukverschillen (verschillende barometerstanden) op uiteengelegen gebieden is de lucht boven de aarde in beweging. Steeds verplaatst lucht zich van en naar verschillende gebieden.

Van wat er zich enige tientallen meters boven het aardoppervlak afspeelt bemerkt de mens in zijn dagelijks leven weinig, wel echter van wat er zich in zijn „leefzone” afspeelt en ook daarin waait het.

In tegenstelling tot in de atmosfeer, is de lucht echter vlak bij het aardoppervlak niet vrij om zich te bewegen; er bevinden zich daar de nodige obstakels in de vorm van gebouwen, bossen enz. Deze worden door de wind „getroffen” en daarbij zullen omzettingen van de energie van de lucht plaats vinden.

Kenmerkend is dat de wind in vlagen waait. In

verband met het doel is het geoorloofd zich hier te beperken tot de gemiddelde horizontale snelheid. Deze wordt bepaald behalve door de horizontale luchtdrukverschillen, door de wrijving langs het aardoppervlak.

5.1 Enkele opmerkingen over de bepaling van windsnelheden door de meteorologische stations

Meteorologisch wordt de wind vastgelegd door richting en snelheid, gemeten op de diverse weerstations, welke zich op een aantal plaatsen in ons land bevinden. Er bestaan nauwkeurig vastgelegde regels hoe, waar en wanneer gemeten moet worden. De metingen vinden plaats op aanzienlijke hoogte boven de begane grond in de vrije ruimte. Van meteorologisch standpunt bezien is dit ook juist: men is geïnteresseerd in de luchtbewegingen, zoals deze zich afspelen in de atmosfeer.

Omdat in de regel de windsnelheid belangrijk met de hoogte toeneemt, terwijl tengevolge van de plaatselijke omstandigheden de hoogte boven het aardoppervlak, waarop bij de verschillende weerstations gemeten wordt, niet gelijk zal zijn (kunnen zijn) en men desalniettemin vergelijkbare gegevens wenst te verzamelen is de volgende afspraak gemaakt.

Men gaat uit van een zgn. „basisvlak”, waaronder wordt verstaan „het laagste vlak waarin geen hindernissen voorkomen”. Aangezien een terrein zonder hindernissen als zodanig meestal niet te verwezenlijken is, moet men door middel van een schatting het basisvlak aannemen op een zekere hoogte boven het aardoppervlak. Een hoogte die, volgend uit de definitie, alleen zal afhangen van de plaatselijke toestand en die derhalve van station tot station zal variëren. Voor het observatorium in De Bilt ligt dit vlak bijvoorbeeld op een hoogte van 17,5 m.

De meting van de windsnelheid en de windrichting vindt plaats op een hoogte, die tamelijk willekeurig zal zijn en doorgaans bepaald zal worden door aanwezige mogelijkheden of uitvoerbare constructies tot het verrichten van waarnemingen. Uiteraard moet de waarnemingsplaats voor de wind gelegen zijn boven het aangenomen basisvlak: bij de aanname van dit vlak is men ervan uitgegaan, dat de verschijnselen onder dit vlak dermate verstoring ondergaan door aanwezige obstakels, dat ze uit meteorologisch oogpunt niet meer belangrijk zijn. In De Bilt wordt gemeten op 37,5 m hoogte boven het aardoppervlak, dus 20 m boven het basisvlak.

Het is een bekend verschijnsel dat bij het opstoken van een C.V.-installatie, die met vers water is gevuld, lucht vrij komt. De laatste tijd neemt het aantal installaties dat onder druk werkt, door toepassing van een drukvat, meer en meer toe. In verband hiermede kan het van belang zijn te weten welke hoeveelheid lucht, zuurstof of stikstof, bij verschillende temperaturen en drukken; het water kan bevatten. In dit voorlichtingsblad worden daarom grafieken gegeven, waarin afgelezen kan worden de maximale hoeveelheid lucht, zuurstof en stikstof, welke water kan bevatten bij temperaturen tussen 0-100° C en drukken van 0-5 kg/cm². De hoeveelheden gas zijn opgegeven in normaal dm³ (liters van 0° C en 1 ata) per 1000 kg water (1 m³). De hoeveelheid gas, welke maximaal in een zekere hoeveelheid water kan zijn opgelost is afhankelijk van de temperatuur en de druk. Deze hoeveelheid kan met behulp van de gaswetten van Boyle en Henry worden berekend. Het volgende werd hierover aan Perry *) ontleend.

Volgens de wet van Henry is de opgeloste hoeveelheid van een gas in water evenredig met de druk van het gas boven het water. In formule:

$$x_a = \frac{p_a}{H} \quad (1)$$

waarin x_a : opgeloste hoeveelheid van het gas in het water

H : constante van Henry

p_a : partiële druk van het gas boven het water, waarin het gas is opgelost, die wordt gegeven door $p_a = p_t - p_w$

p_t : totaal druk boven water

p_w : waterdampdruk boven water.

Voor verschillende temperaturen zal de waarde van H verschillend zijn. Wenst men uit formule (1) uit te rekenen welke de opgeloste hoeveelheid gas is in kg/kg water is, dan moet (1) worden omgerekend in b.v.

$$x_g = \frac{x_a}{1 - x_a} \cdot \frac{M_a}{M_s}$$

waarin x_g : opgeloste hoeveelheid gas in kg per kg water

M_a : moleculair gewicht van het gas

M_s : moleculair gewicht van water (18).

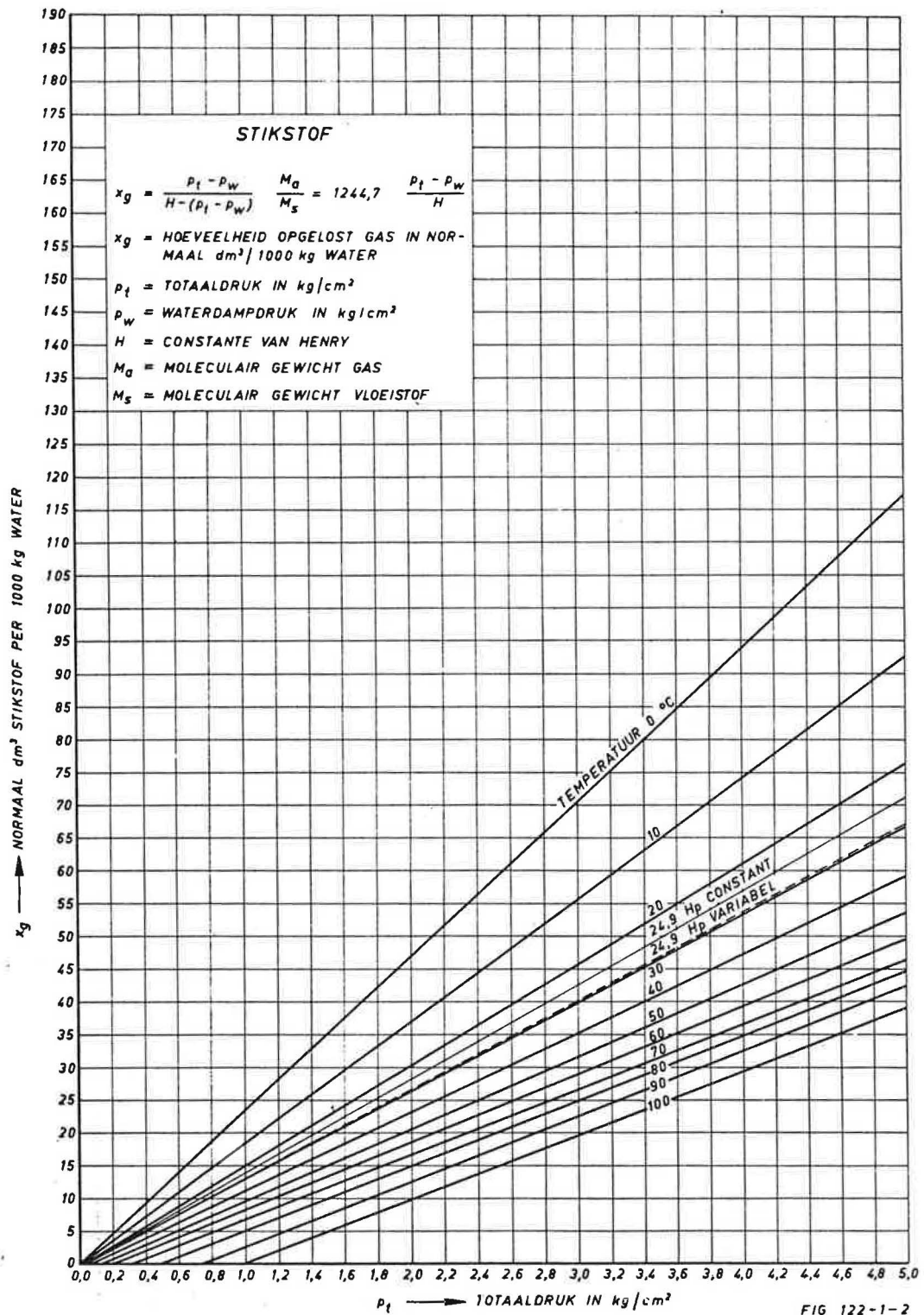
Berekening levert:
$$x_g = \frac{p_t - p_w}{H - (p_t - p_w)} \cdot \frac{M_a}{M_s}$$

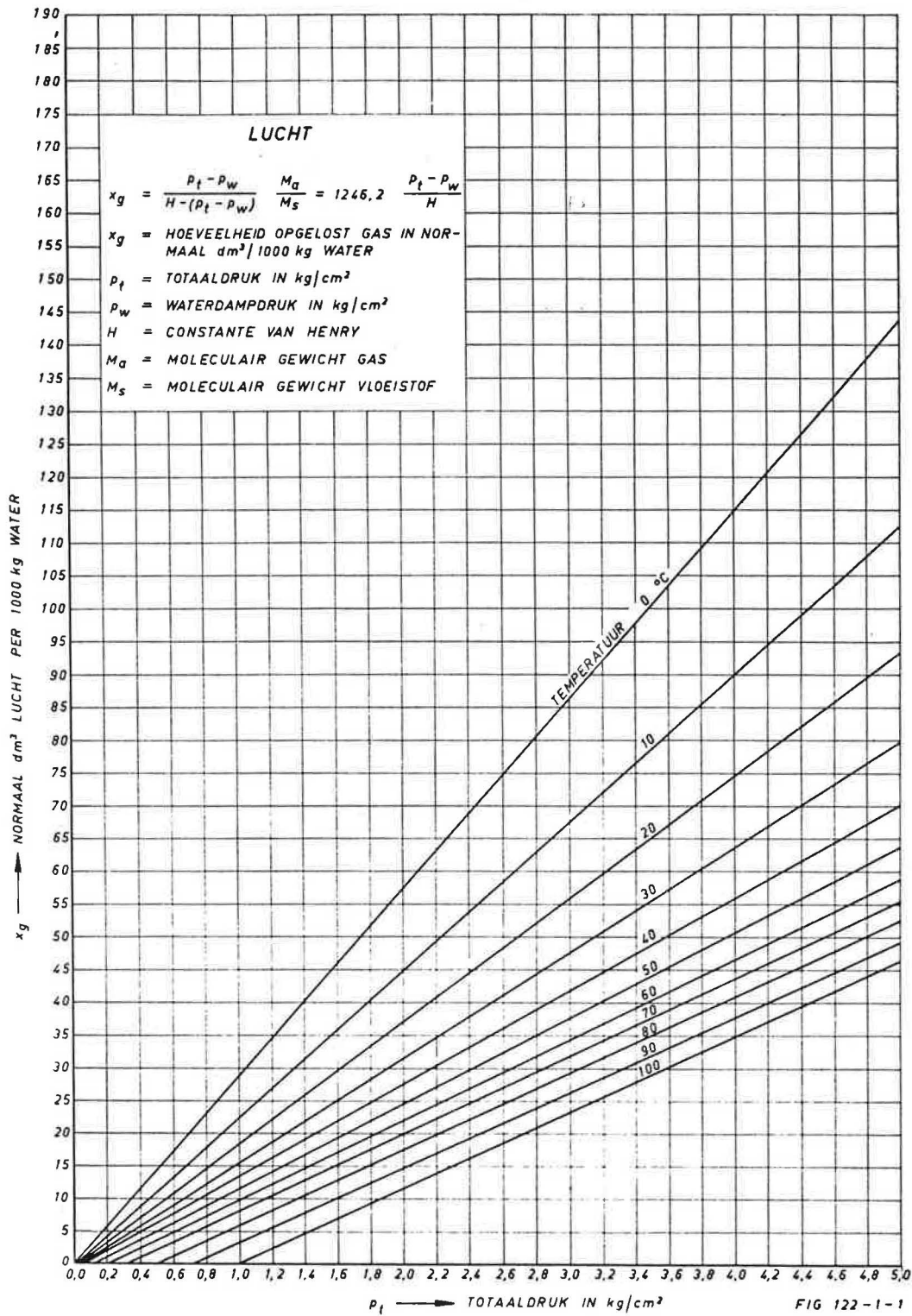
Waarmede voor alle temperaturen en drukken x_g kan worden berekend.

De wet van Henry gaat echter alleen op tot waarden van p_a tot 1 atm. Daarboven is H niet meer constant doch verandert met de druk. Perry geeft deze waarden voor H slechts voor enkele temperaturen.

Teneinde een indruk te krijgen hoe groot het verschil zal zijn tussen de werkelijke maximale hoeveelheid stikstof of zuurstof die onder bepaalde omstandigheden in water kan zijn opgelost en de hoeveelheid die in de grafieken is af te lezen, zijn voor stikstof en zuurstof berekend voor respectievelijk 24,9 en 25,9° C, de hoeveelheden opgelost gas bij verschillende partiële drukken van het opgeloste gas met een waarde voor H is constant en een waarde voor H toenemend met de druk. De berekende hoeveelheden zijn eveneens in de grafieken ingetekend. Hieruit kan worden afgeleid, dat voor stikstof de gemaakte fout niet groter zal zijn dan 5 %, voor zuurstof niet groter dan 10 %. Voor lucht zal de fout dan ongeveer 6 % zijn, bij de hoogste in de grafiek aangegeven drukken.

*) De waarden van Henry en de overige rekenwaarden werden ontleend aan John H. Perry, Chemical Engineers Handbook, 3e druk (T.C.V., 482).





TABEL I

Gemiddelde windsnelheid in m/sec, gereduceerd tot 6 m boven vlak terrein, voor de periode 1899-1927 (Med en Verh. K.N.M.I.)

	jan.	febr.	mrt.	apr.	mei	juni	juli	aug.	sept.	okt.	nov.	dec.	jaar
Den Helder	7,3	6,7	6,6	6,4	5,6	6,0	5,8	6,0	6,0	6,3	6,6	7,1	6,4
Groningen	5,4	5,0	5,0	4,7	4,3	4,1	3,9	4,0	4,0	4,4	4,8	5,0	4,6
De Bilt	4,8	4,6	4,6	4,3	3,8	3,6	3,5	3,5	3,5	3,8	4,2	4,6	4,1
Vlissingen	6,8	6,3	5,9	5,7	5,2	5,2	5,3	5,8	5,7	5,9	6,0	6,7	5,9
Maastricht	3,4	3,2	3,2	3,1	2,6	2,6	2,4	2,5	2,3	2,6	2,9	3,2	2,8

Als vergelijkingsvlak waar de gemeten snelheden naar herleid dienen te worden, wordt gedefinieerd het „reductievlak”, een vlak 6 m boven het basisvlak, of m.a.w. een vlak gelegen 6 m boven vlak terrein zonder hindernissen. Voor de diverse stations zal ook dit vlak op verschillende hoogten boven het aardoppervlak gelegen zijn. Voor het reduceren van de waargenomen snelheden naar het reductievlak wordt gebruik gemaakt van correctiepercentages.

Door het samenstel van weerstations wordt een indruk verkregen over de toestand boven een geheel land of een gebied, vastgelegd in een aantal punten. In deze punten vertonen de windsnelheden min of meer uiteenlopende waarden afhankelijk van het beschouwde land of gebiedsdeel. Voor Nederland kan men zich hieromtrent een oordeel vormen uit de vergelijking van bijvoorbeeld de gemiddelde windsnelheden over de verschillende maanden van het jaar voor 5 stations over het tijdvak 1899—1927, die zijn opgenomen in Tabel I.

Voor tussengelegen plaatsen zal een bepaalde interpolatie toegepast moeten worden om door afleiding uit de resultaten van de plaatsen waar metingen verricht zijn tot een voorspelling te geraken van wat men verwachten kan ter plaatse van het in beschouwing genomen gebouw.

De verschillen welke over het land voorkomen zullen voor een gedeelte het gevolg zijn van het totale windbeeld over het land of gebied, ten dele zullen zij het gevolg zijn van meer plaatselijke omstandigheden. Tengevolge hiervan kunnen dus onder zekere omstandigheden afwijkingen optreden tussen de werkelijk voorkomende snelheden en de uit de interpolatie voorspelde waarden: op dit punt moet voor het eerst in de beschouwing rekening gehouden worden met de invloed die

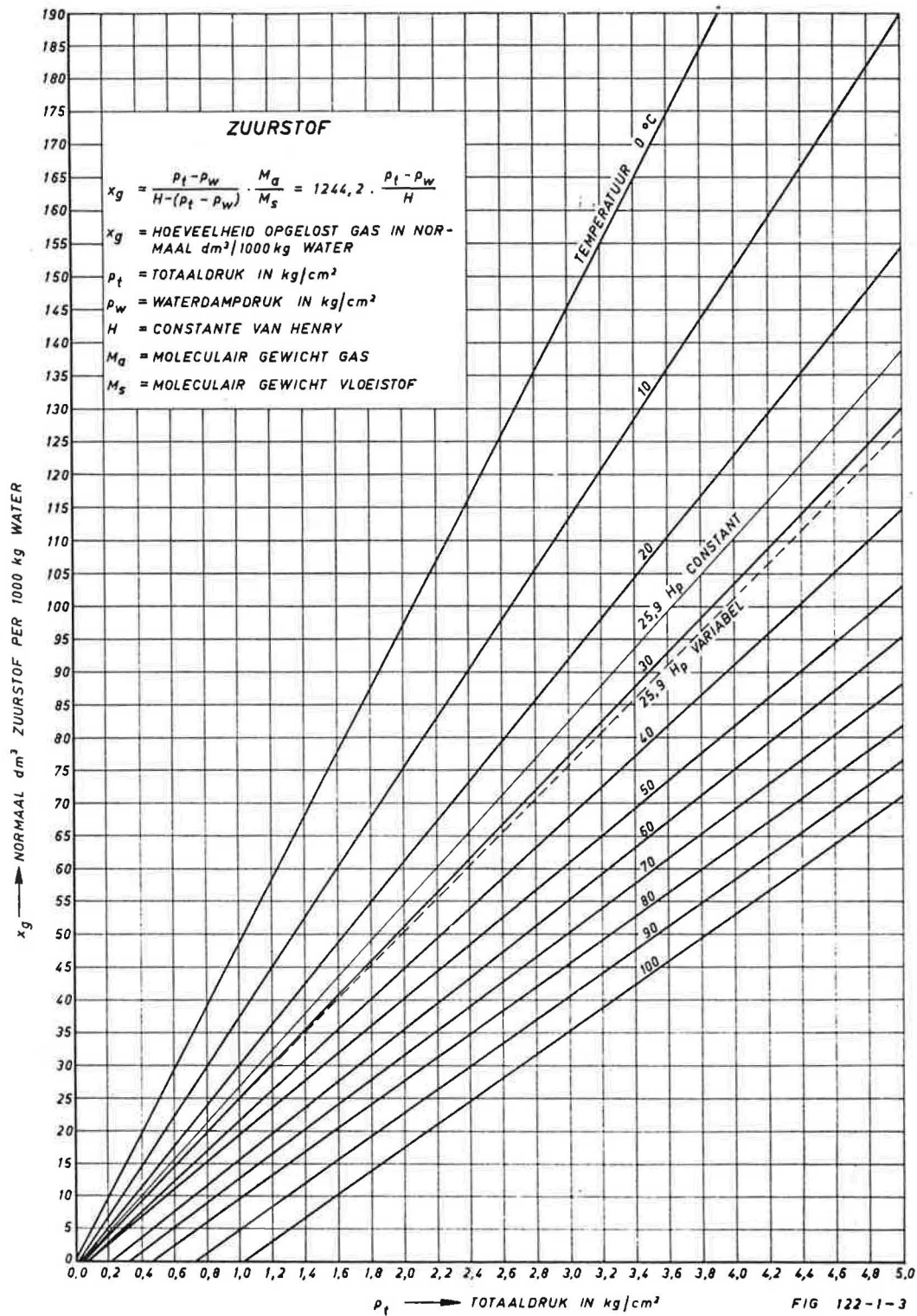
de omgeving van het gebouw, dus bebouwing of landschapsconfiguratie kan uitoefenen.

TABEL II

Aantal dagen per jaar dat een gemiddelde snelheid van zekere waarde wordt overschreden (gereduceerde uurwaarnemingen)

v m/sec	Den Helder (1922-1927)	Groningen (1906-1927)	De Bilt (1905-1927)	Vlissingen (1915-1927)	Maastricht (1905-aug. 1916; 1926-1927)
7	269	142	104	224	57,0
8	232	99,7	59,8	177	30,4
9	198	67,7	38,1	143	16,5
10	159	43,1	22,2	109	8,23
11	126	28,9	12,0	83,1	3,46
12	98,5	17,9	6,66	61,5	1,46
13	70,5	11,9	3,70	45,0	0,46
14	52,4	6,96	1,83	31,8	0,15
15	34,9	3,78	1,13	21,8	0,08
16	23,7	2,28	0,52	15,0	
17	14,5	1,55	0,44	9,46	
18	10,2	0,86	0,26	6,00	
19	5,85	0,36	0,17	3,77	
20	4,18	0,23	0,09	2,23	
21	2,50	0,18	0,04	1,46	
22	1,84	0,14	0,04	1,15	
23	0,84	0,05	0,04	0,69	
24	0,17	0,05		0,46	
25				0,31	
26				0,23	
27				0,15	

Voorbeeld: Voor Vlissingen zijn gedurende 177 dagen/jaar snelheden voorgekomen van 8 m/sec en hoger.



TABEL III

Afname van de windsnelheid in %

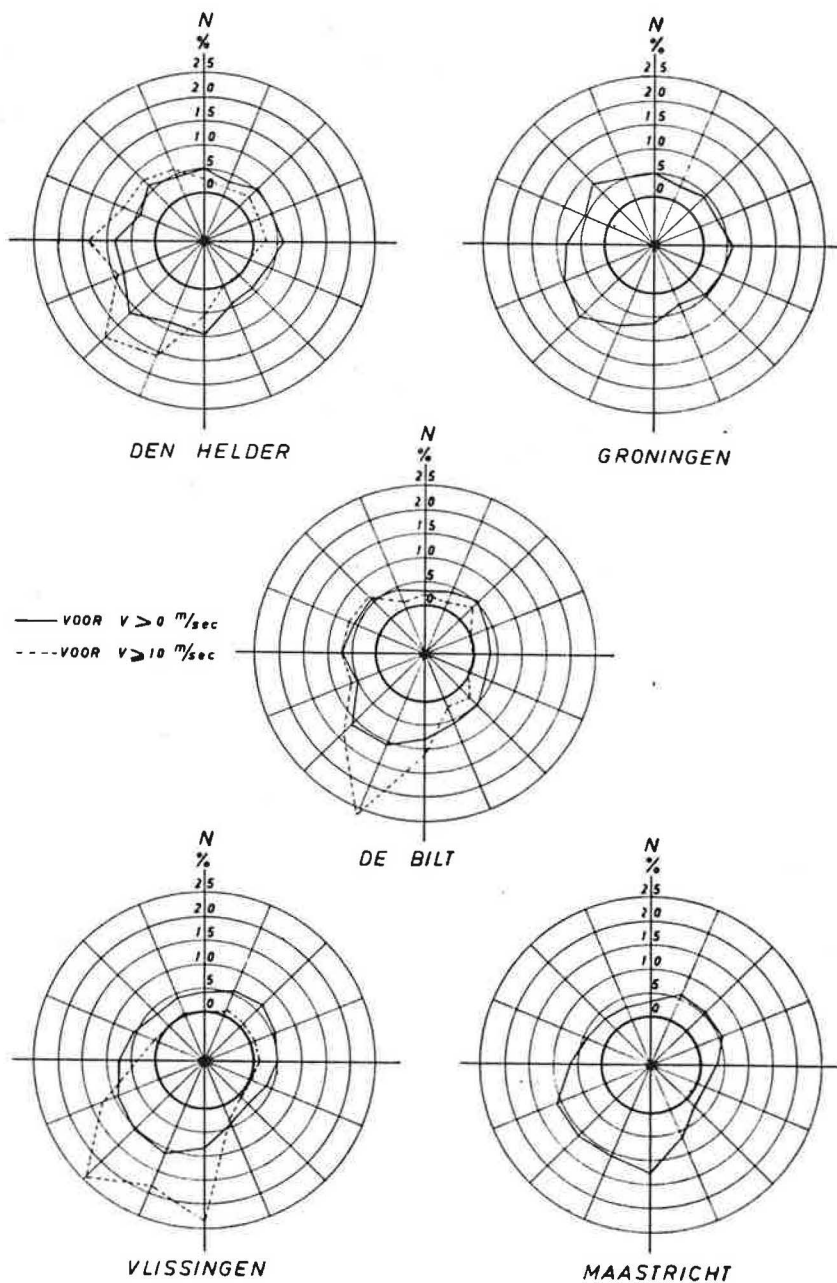
afstand tot de kust in km	0	10	20	40	60
bij W.wind	0%	20%	27%	33%	37%
bij O.wind	0%	0%	16%	22%	25%

5.2 Grootte van de voorkomende snelbeden

Teneinde enig inzicht te krijgen over de verdeling van de grootte van de voorkomende windsnelheden is opgenomen Tabel II, waarin wordt aangegeven het aantal dagen per jaar dat de gemiddelde windsnelheid (24-h gemiddelde) be-

paalde waarden overschrijdt; deze waarnemingen zijn gereduceerd tot 6 m hoogte.

Evenals bij de maandelijkse gemiddelden komt hierin naar voren de afname van de snelheid met de toename van de afstand tot de kust; in Tabel III komt dit duidelijk tot uiting.



PERCENTAGES DER WINDRICHTINGEN VOOR DE 5 HOOFDSTATIONS OVER DE PERIODE 1923-1926

FIG. 1

5.3 Voorkomende windrichtingen

Wil men de invloed van de wind op de ventilatie van een gebouw nagaan, dan is echter ook de windrichting van belang.

In fig. 1 zijn in een windroos aangegeven de percentages van de voorkomende windrichting voor alle waarnemingen over een bepaalde periode. Het bekende feit der overheersende Z.W.winden wordt door deze figuur statistisch bevestigd.

Bij lagere windsterkten is de invloed van de wind op de ventilatie gering en bij natuurlijke ventilatie is daarmee ook de ventilatie zelf gering; in verband daarmee is de invloed van de richting van de waarnemingen bij lagere snelheid niet zo interessant. Daarom zijn in dezelfde figuur ook de percentages gegeven van de verdeling voor de snelheden boven 10 m/sec over de 16 hoofdrichtingen, evenwel slechts voor 3 van 5 stations. Wel kan hier opgemerkt worden dat voor deze hogere snelheden de overheersende windrichting zoals die uit de figuur blijkt in het algemeen nog sterker geprononceerd is.

5.4 Toename van de windsnelheid met de hoogte

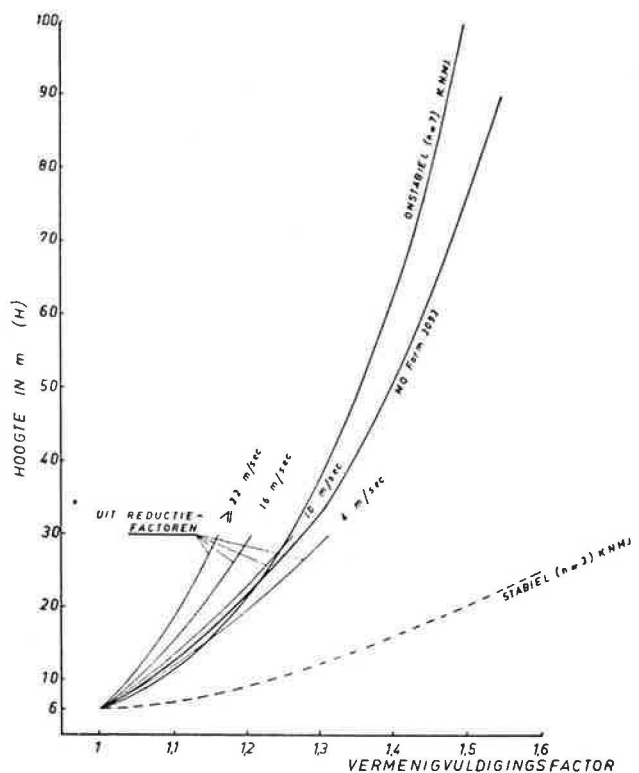
Een belangrijke factor is de toename van de windsnelheid met de hoogte. Reeds zagen we dat op de meteorologische stations de snelheden op waarnemingshoogte gereduceerd worden tot die op 6 m boven een basisvlak. Wil men uit de meteorologische gegevens de snelheid op een bepaalde hoogte vinden, dan moet men omgekeerd te werk gaan. Door vermenigvuldiging met een bepaalde factor vindt men uit de gereduceerde waarde de gewenste waarde. Voor deze factor zijn verschillende formules in omloop. De bekendste heeft de gedaante:

$$\underline{u}_H = u_6 \left(\frac{H}{6}\right)^n \text{ waarin } \left(\frac{H}{6}\right)^n$$

de genoemde factor voorstelt.

Hierin is u de snelheid in m/sec resp. op de hoogte H en 6 m, terwijl n een waarde heeft tussen 3 en 7 naar gelang de atmosfeer meer of minder stabiel is. Onder stabiel wordt hier verstaan een toestand met vrij geringe snelheid waarbij de lucht boven warmer is dan beneden. Dit zal in het algemeen het geval zijn in de vroege uren; de toename met de hoogte is onder deze omstandigheden dus groot. In het kader van deze verhandeling is die toestand van minder

belang zodat wij voor n de waarde 7 kunnen aanhouden.



VERMENIGVULDIGINGSFACTOR TER BEPALING VAN V_H UIT V_6 FIG. 2

In fig. 2 is voor $n = 7$ de formule grafisch weergegeven. Tevens zijn tot 30 m hoogte de omgekeerden van de reductiefactoren weergegeven die het K.N.M.I. gebruikt ter bepaling van de gereduceerde snelheid op 6 m hoogte uit de waarnemingen bij de diverse snelheden. Tevens is nog aangegeven de grafische weergave van een formule, die door de engelse Meteorological Office is geaccepteerd (M.O. Form. 3093). Uit de figuur blijkt dat bij toenemende snelheid de toename met de hoogte geringer wordt. Tabel IV geeft de gemiddelde waarden voor de vermenigvuldigingsfactor.

TABEL IV

Vermenigvuldigingsfactor op:	20 m hoogte	30 m hoogte	40 m hoogte	60 m hoogte	80 m hoogte	100 m hoogte
	1,2	1,25	1,30	1,40	1,45	1,50

6. Drukverdeling op gebouwen tengevolge van de wind

De drukverdeling stelt zich op een bepaalde wijze in waarbij de uiteindelijke verdeling bepaald wordt door:

- 1e. de structuur van de wind,
- 2e. vorm van het gebouw en plaatsing t.o.v. de gemiddelde windrichting,
- 3e. omgeving van het gebouw.

ad 1.

De natuurlijke wind is gekenmerkt door:

- a. een gemiddelde snelheid,
- b. hierop gesuperponeerd windstoten van verschillende tijdsduur, snelheid en afmeting,
- c. verandering (toeneming) met de hoogte afhankelijk van de stabiliteit van de atmosfeer en de „ruwheid” van de bodem (bijv. boven een meer is de toename anders dan boven een stad waarbij in het laatste geval uitgegaan wordt van het gemiddelde dakniveau),
- d. variatie van de windrichting om een gemiddelde richting zowel in het horizontale als in het verticale vlak.

Voor informatie van de invloed van de wind op de ventilatie is in de eerste plaats de gemiddelde snelheid, in de tweede plaats de verandering met de hoogte van belang.

ad 2.

De vorm van het gebouw heeft grote invloed op de zich instellende drukverdeling. In het algemeen kan gezegd worden dat bij loodrechte aanblaas van een van de gevels de verdeling als volgt wordt:

- a. aan de loefzijde een druk naar binnen gericht (overdruk),
- b. aan de lijzijde een naar buiten gerichte druk (onderdruk),
- c. aan de zijkanten ongeveer dezelfde onderdruk als aan de lijzijde,
- d. bij schuine daken met een hoek groter dan 25-30° gemiddeld een overdruk op de naar de wind gerichte zijde, een onderdruk aan de andere zijde. Bij daken met kleinere hellingshoek en dus ook platte daken altijd een onderdruk. Bij een windrichting die niet loodrecht op een gevel is gericht kunnen zeer grillige drukverdelingen ontstaan waarbij plaatselijk grote onderdrukken kunnen optreden (zie verder).

ad 3.

De omgeving van het gebouw bestaande uit andere gebouwen en het landschap heeft grote invloed op de drukverdeling. Het kan voorkomen dat bij bepaalde situaties ook aan de „windzijde” een onderdruk optreedt die in sommige gevallen zelfs lager kan zijn dan de onderdruk op het dak, zodat het zgn. „terugslaan” van schoorstenen kan optreden.

In het analogon moeten winddrukken worden ingesteld gebaseerd op bepaalde windsnelheden. De gegevens hiervoor dienen verkregen te worden uit de literatuur en/of uit onderzoeken aan modellen in windtunnels. Afhankelijk van de nauwkeurigheid van de gewenste informatie wordt bij het modelonderzoek achtereenvolgens rekening gehouden met:

- a. vrijstaand gebouw, met een uniforme snelheid over de gehele doorsnee van de tunnel of met de toevallig in de tunnel aanwezige snelheidsverandering met de hoogte;
- b. bij laagbouw, als tweede benadering, het aanbrengen van de omgevende gebouwen en opvallende andere obstakels; bij hoogbouw, als tweede benadering, de snelheidsverandering als functie van de hoogte. In het eerste geval ligt het grootste gedeelte van het gebouw n.l. beneden het zgn. basisvlak waarboven meteorologische gegevens beschikbaar zijn, die dus voor deze situatie niet bruikbaar zijn (natuurlijk wel voor het gehele complex); in het tweede geval ligt het gebouw zoveel hoger dan de omgeving, dat de omgevingsinvloed waarschijnlijk kleiner is dan de verandering van de wind met de hoogte;
- c. bij laagbouw, als derde benadering, een snelheidsverdeling over de hoogte in de tunnel overeenkomstig de werkelijkheid; bij hoogbouw als laatste verfijning nabootsing van de omgeving in het model.

7. Modelproeven in een windtunnel

Het is mogelijk in een windtunnel de drukverdeling van een gebouw zoals deze in werkelijkheid ontstaat, min of meer betrouwbaar na te bootsen aan de hand van een modelonderzoek. Daarbij treden een aantal verschijnselen op die van invloed zijn op de uiteindelijke drukverdeling en waardoor afwijkingen t.o.v. de werkelijkheid kunnen ontstaan. Hierop zal nu verder worden ingegaan.

Bij modelproeven dient aandacht te worden besteed aan:

- 1e. het schaaleffect,
- 2e. het randeffect (invloed van tunnelwanden),
- 3e. structuur van de windtunnelsnelheid t.o.v. de natuurlijke wind.

ad 1.

De combinatie van luchtbeweging en gebouw in de windtunnel moet zowel fysisch als geometrisch gelijkvormig zijn aan de werkelijkheid. Aan de eis van geometrische gelijkvormigheid wordt voldaan door het gebouw voldoende nauwkeurig na te maken (bijv. schaal 1 : 100 tot 1 : 1000).

Fysische gelijkvormigheid wordt verkregen indien de luchtsnelheid in de tunnel evenredig toeneemt met de verkleining t.o.v. de natuurlijke windsnelheid. Bij een model schaal 1 : 100 en een windsnelheid van 7 m/sec wordt de vereiste tunnelsnelheid 70 m/sec, bij een schaal 1 : 1000, 700 m/sec. Deze snelheden geven behalve technische ook fundamentele moeilijkheden. Indien namelijk de snelheid van de lucht groter wordt dan $\pm \frac{1}{3}$ van de geluidssnelheid, dus groter wordt dan ± 100 m/sec is de lucht niet meer als onsamendrukbaar te beschouwen waardoor allerlei extra effecten optreden die in werkelijkheid niet voorkomen. De luchtsnelheid is dus aan een bovengrens gebonden. In de praktijk blijkt dat dus niet voldaan kan worden aan de zgn. modelregels (Re-voorwaarde) n.l. dat het product van een afmeting van het gebouw maal de windsnelheid voor model en werkelijkheid hetzelfde moet zijn.

De verschillen die hierdoor ontstaan worden verschillen tengevolge van het zgn. „schaaleffect” genoemd.

Uit een groot aantal proeven is gebleken dat het schaaleffect mits de snelheid boven een bepaalde minimumwaarde ligt voor de vormen zoals gebouwen die meestal hebben (scherpe begrenzingen) verwaarloosbaar zijn. Dit vindt zijn oorzaak in het feit dat de stromingsvorm die de drukverdeling bepaalt en die bestaat uit een aantal wervelgebieden om het gebouw weinig verandert als functie van de snelheid. Het loslaten van de luchtstroom vindt n.l. plaats aan een scherpe begrenzing waarachter dan de wervel gevormd wordt (fig. 3). Bij ronde vormen (bijv. schoorstenen) wordt het loslaten wél sterk beïn-

vloed door de windsnelheid. In het laatste geval dienen dus bijzondere voorzorgen genomen te worden om een goede vergelijking tussen model en werkelijkheid mogelijk te maken. (schaaleffect dus niet te verwaarlozen).

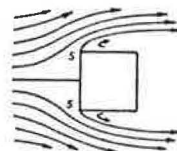


FIG 3

ad 2.

Indien de oppervlakte van het model vanuit de stromingsrichting gezien t.o.v. het vrije tunneloppervlak een bepaalde waarde (volgens sommige onderzoekers $\pm 15\%$) overschrijdt, treedt een ontoelaatbare invloed van de wand op de drukverdeling op.

Mocht in bepaalde gevallen toch niet aan het onderzoek van een „groot” model te ontkomen zijn, dan kan dit randeffect op de volgende wijze kwantitatief worden bepaald.

Uitgegaan wordt van twee tunnels. Bij de Afdeling Binnenklimaat bijvoorbeeld zijn twee tunnels resp. van 25×30 cm en van 120×120 cm. Twee modellen worden gebouwd, een „groot” en een „klein”. De verhouding van het kleine model t.o.v. de kleine windtunnel is hetzelfde als die van het grote model t.o.v. de grote windtunnel. Door nu het kleine model achtereenvolgens in de kleine (wel randeffect) en de grote (geen randeffect) te onderzoeken kan gecorrigeerd worden voor de invloed van de tunnelwanden. Uitgegaan moet daarbij worden van een vergelijkbare snelheidsverdeling in beide tunnels.

ad 3.

In de meest eenvoudige windtunnel is de snelheid in het middengebied constant en neemt deze naar de wanden toe tot 0 af. In sommige gevallen is het mogelijk dat de afname van de wind naar de wand gelijkvormig verloopt als de verandering van de wind met de hoogte in het vrije veld. Het is dan mogelijk in deze tunnel zowel de gemiddelde snelheid als de verandering met de hoogte na te bootsen. De modellen dienen dan echter in dezelfde verhouding tot het snelheidsverloop te staan als in werkelijkheid, wat betekent dat slechts modellen van één bepaalde verkleiningschaal onderzocht kunnen worden.

Bij aerodynamische onderzoeken zoals in diverse laboratoria worden uitgevoerd is het van belang de snelheid over de gehele doorsnee constant te houden. Dit is met een bepaalde techniek goed te realiseren op enkele mm van de wand na. Dat deze „goede” aerodynamische windtunnel (nog) minder aan de eisen van de natuurlijke wind tegemoet komt dan de zgn. „primitieve” windtunnel is wel duidelijk.

Het is echter mogelijk gebleken door toepassing van bepaalde technieken de verandering van de windsnelheid met de hoogte op voldoende nauwkeurige wijze na te bootsen. Eén van de mogelijkheden bestaat uit het aanbrengen van een bepaalde bodemruwheid in de tunnel die relatief t.o.v. het model dezelfde is als de ruwheid die in werkelijkheid aanwezig is. Fig. 4 laat het resultaat zien van zowel een te grote als een te kleine relatieve ruwheid $h \div z_0$ dan die in werkelijkheid aanwezig is.²⁾

In de tunnel wordt met een constante windsnelheid gewerkt zowel naar grootte als naar richting. Enkele literatuurgegevens wekken de indruk dat de afwijking die daardoor ontstaat t.o.v. de gemiddelde winddrukverdeling zoals die in de praktijk is, gering is.²⁾³⁾

Het enige wat misschien wel van belang is, is het effect dat vooral bij harde wind ontstaat, doordat luchthoeveelheden met grote snelheid van een hoge laag (± 200 m) naar beneden schieten en dus het dak onder een hoek treffen, zodat misschien tijdelijk een hogere druk op het dak optreedt. Dit mede in verband met het reeds genoemde terugslaan van schoorstenen. Dit niet-stationaire verschijnsel is stationair na te bootsen door het model ook t.o.v. het horizontale vlak onder een hoek te zetten. De mogelijkheden en de noodzakelijkheid van het nabootsen van bovengenoemde niet-stationaire windaspecten worden in de toekomst verder bestudeerd.

8. Enkele voorbeelden van resultaten van modelproeven uit de literatuur

8.1 Weergave van de drukverdeling om een gebouw

Indien een luchtstroom met een snelheid v_0 wordt afgeremd tot een snelheid 0, dan wordt de kinetische energie ($\frac{1}{2}\rho v_0^2$ waarbij ρ de massa van 1 m³ lucht is) omgezet in drukenergie. Ter plaatse van de snelheid 0 treedt een overdruk op van $\Delta p_0 = \frac{1}{2}\rho v_0^2$ t.o.v. de druk in de ongestoorde stroming. Door een obstakel (bijv. een gebouw) in

de luchtstroom aan te brengen wordt deze verstoord, d.w.z. op bepaalde plaatsen wordt de snelheid groter, op andere kleiner dan v_0 . Bij een gebouw heeft dit tot gevolg dat zich een bepaalde drukverdeling instelt. Voor het weergeven van de resultaten, gevonden met een modelproef, wordt de druk op het gebouw betrokken op de druk van de ongestoorde stroming welke laatste p_0 gesteld wordt. Nu is het drukverschil tussen een bepaalde plaats waar de snelheid v is en de ongestoorde stroming gelijk aan $\Delta p = p - p_0 = \frac{1}{2}\rho v^2 - \frac{1}{2}\rho v_0^2$.

Uit de formule blijkt dat de maximale overdruk $\Delta p_0 = \frac{1}{2}\rho v_0^2$ ontstaat bij een snelheid $v = 0$. Het drukverschil is 0 indien v gelijk is aan v_0 .

Aangezien de snelheid in principe onbeperkt kan toenemen kan dus ook het drukverschil, indien v groter is dan v_0 onbeperkt negatief worden.

Teneinde de resultaten van de metingen weer te geven onafhankelijk van het gebruikte eenhedenstelsel en de snelheid waarmee de proeven zijn gedaan, worden alle drukken betrokken op de zgn. snelheidsdruk $\Delta p_0 = \frac{1}{2}\rho v_0^2$. Dan is dus

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho v_0^2} = 1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2$$

Een complicatie treedt op ten aanzien van de druk in de gebieden waar diverse onderdruk-wervels ontstaan (o.a. aan de lijzijde). De snelheid in deze wervels is n.l. niet maatgevend voor de optredende druk. Als snelheid die de druk in dit geval bepaalt, moet genomen worden die van de luchtstroom die over het gebouw heen schiet, door het gebouw versneld is en die onder zich dus ook aan de lijzijde dezelfde druk doet ontstaan als in de snelle stroom zelf heerst. Dit is tevens een verklaring van de geringe verandering van de druk aan de lijzijde.

Voor lucht is de snelheidsdruk $1/16 v^2$ kg/m² of, wat hetzelfde is, mmwk (mm waterkolom). Bij een snelheid van 4, 8, 12, 16 m/sec is de snelheidsdruk dus resp. 1, 4, 9 en 16 kg per m² of mmwk.

Voor sterkteberekeningen moet met windstoten rekening gehouden worden tijdens welke veel hogere drukken optreden dan bij bovengenoemde snelheden die gemiddeld voorkomen. Bijvoorbeeld bij een snelheid van 40 m/sec (144 km/h) is de snelheidsdruk 100 kg per m². Bij sommige gebouwen treden bij een windrichting die een hoek van $\pm 45^\circ$ met de gevel maakt plaatselijk op het

dak een onderdruk op die tot $7 \times$ de snelheidsdruk kan bedragen. Dit betekent dus bij 40 m/sec een druk naar buiten van 700 kg per m². (zie ook fig. 7).

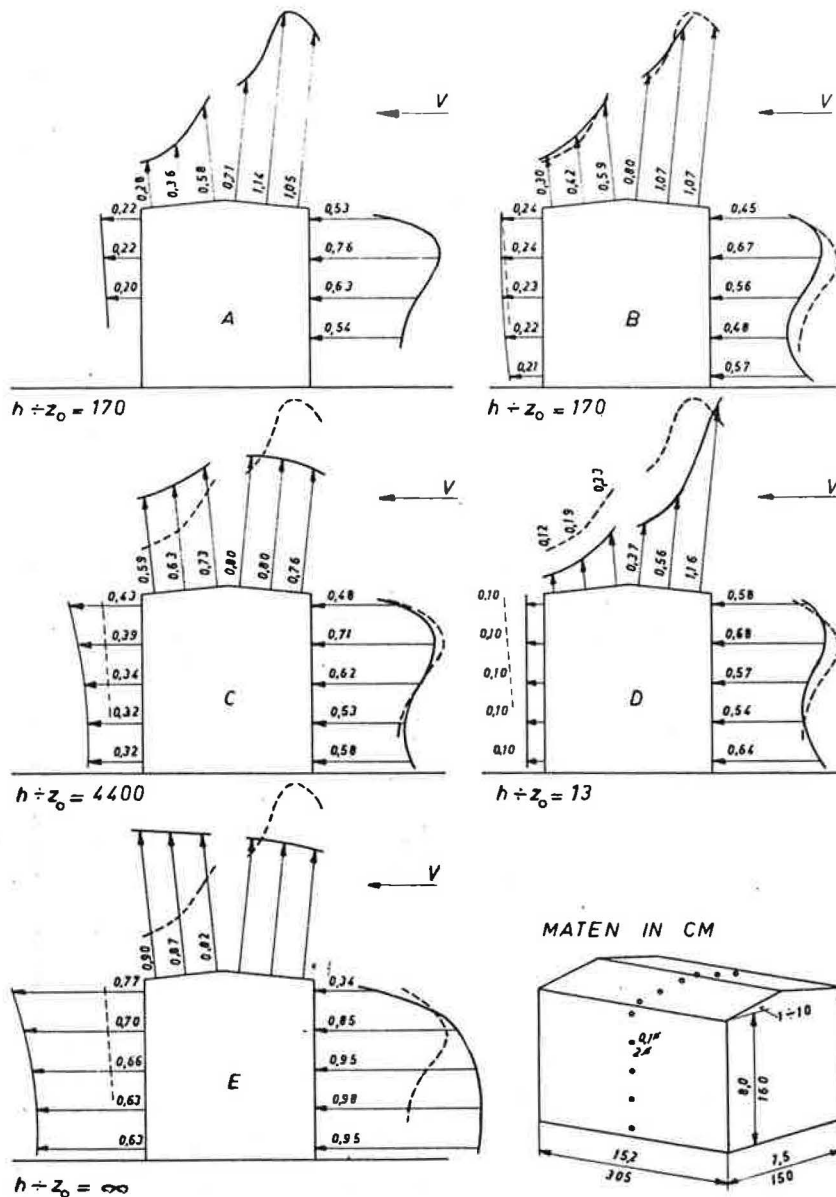
In de praktijk is het nulniveau van de druk zoals boven gedefinieerd niet bekend. Daarom worden praktijkmetingen meestal herleid tot de druk aan de lizijde als nulniveau. Bij een gebouw met openingen volgt dan uit de analogonproeven hoe de druk binnenshuis is, waaruit dan weer volgt of de diverse oppervlakken een kracht naar buiten of naar binnen ondervinden.

De weergave van modelproeven gaat uit van een dicht gebouw waarin de druk o heerst zoals die

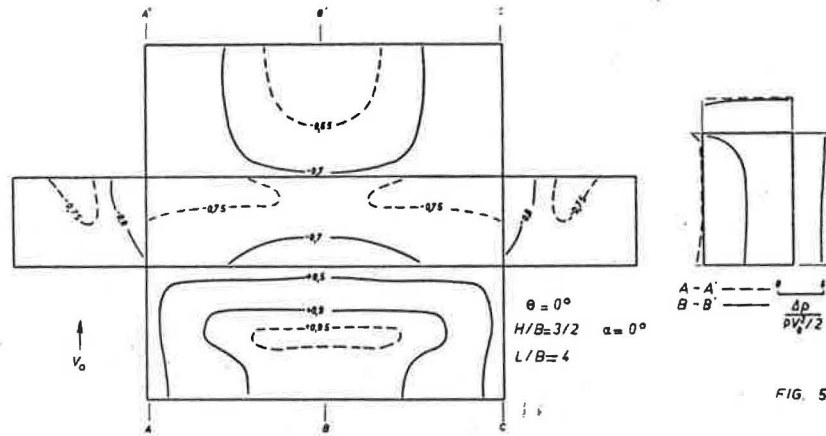
ook in de vrije luchtstroming ter plaatse in de tunnel ver van het model aanwezig is. Bij de beoordeling van de diverse figuren dient hiermee rekening te worden gehouden.

8.2 Windrichting loodrecht op de langste gevel van een gebouw

Fig. 4 geeft de drukverdeling van een vrijstaand gebouw.²⁾ Fig. A geeft de gemiddelde drukverdeling zoals gemeten op ware grootte in het vrije veld. Fig. B geeft de uitkomsten van een modelproef waarbij de relatieve bodemruwheid dezelfde was als in werkelijkheid. De in fig. A weergegeven drukverdeling is gestippeld aangegeven evenals in fig. C t/m E.



OVERGENOMEN UIT: INGENIØREN - INTERNATIONAL EDITION VOLUME 2 1958, N°4 FIG. 4



OVERGENOMEN UIT WIND-TUNNEL STUDIES OF PRESSURE DISTRIBUTION ON ELEMENTARY BUILDING FORMS. IOWA INSTITUTE OF HYDRAULIC RESEARCH STATE UNIVERSITY OF IOWA CITY 1951

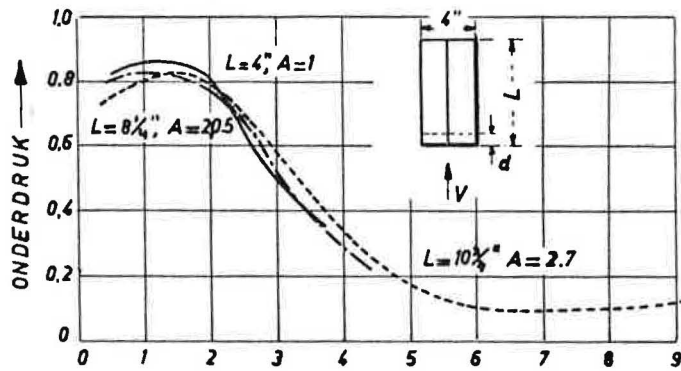
Fig. C t/m E geven de invloed van zowel ver-
groting als verkleining van de relatieve bodem-
ruwheid t.o.v. fig. A en B.

Fig. 5⁴) geeft de drukverdeling om een gebouw
waarbij de verhouding hoogte : breedte =

$$3/2 \left(\frac{H}{B} = 3/2 \right) \text{ en}$$

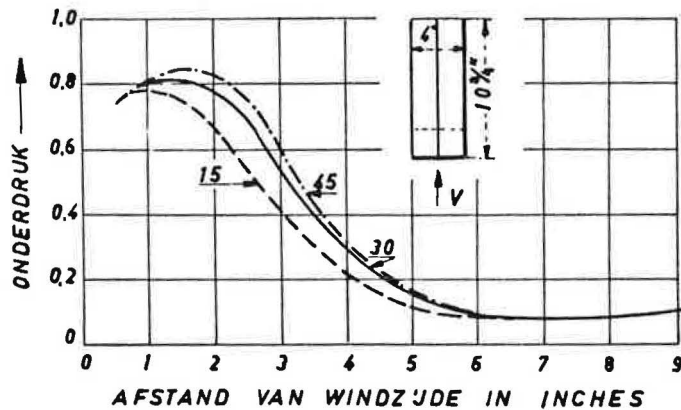
$$\text{lengte : breedte} = \frac{L}{B} = 4.$$

Als 't model 'n plat dak heeft blijkt in 't alge-
meen dat bij loodrechte aanblaas de overdruk aan
de loefzijde 0,8 tot 0,9 maal $\frac{1}{2}\rho V_0^2$ bedraagt, aan
de lijzijde een onderdruk van 0,3 tot 0,6 maal
 $\frac{1}{2}\rho V_0^2$, evenals op het dak en aan de zijkanten.



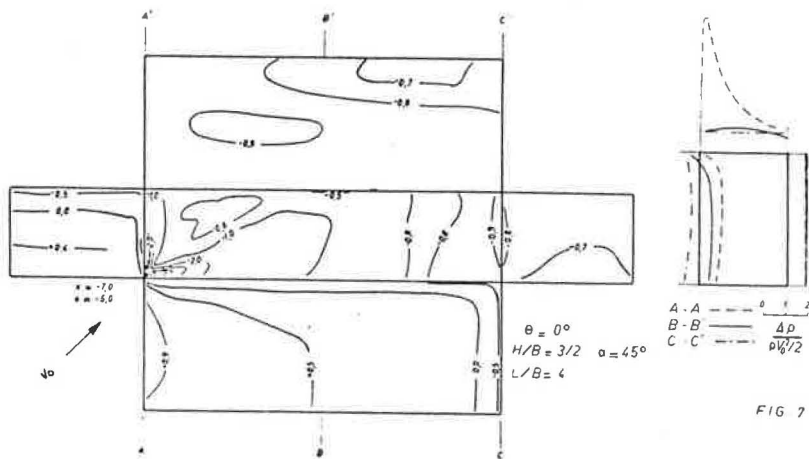
OVERGENOMEN UIT:
ENGINEERING NOVEMBER 1, 1957

FIG. 6



HOOGTE TOT DAKGOOT 2"

ONDERDRUK OP HET DAK ALS FUNCTIE VAN DE AFSTAND
TOT DE WINDZUDE



OVERGENOMEN UIT WIND-FUNNEL STUDIES OF PRESSURE DISTRIBUTION ON ELEMENTARY BUILDING FORMS IOWA INSTITUTE OF HYDRAULIC RESEARCH STATE UNIVERSITY OF IOWA CITY 1951

Het totaal drukverschil varieert dus van 1,1 tot 1,5 maal de snelheidsdruk.

De lijnen verbinden de punten van gelijke druk en geven zodoende een duidelijk beeld van het verloop van de druk.

8.3 Windrichting evenwijdig aan de langste gevel van het gebouw (fig. 6)⁵⁾

In dit geval treedt de grootste onderdruk op aan de kopzijde van het gebouw om af te nemen tot $\pm 0,1$. Het verloop van de onderdruk bij verschillende hellingen van het dak is ongeveer hetzelfde en aangegeven in de figuur voor een hoek van 15° , 30° en 45° .

8.4 Windrichting maakt een hoek van $\pm 45^\circ$ met de gevel (fig. 7)⁴⁾

Op het dak ontstaan twee conische wervels die plaatselijk een extreem grote onderdruk doen ontstaan (tot $7 \times$ de snelheidsdruk).

Het gebouw is hetzelfde als dat van fig. 5.

8.5 Invloed afscherpende werking naburige gebouwen (fig. 8)⁶⁾

De onderdruk op het dak van gebouw B wordt gegeven, vrijstaand en met gebouwen aan de loefzijde en aan de lijzijde. De horizontale gestippelde lijn geeft de voorgeschreven norm door de engelse „Code of Practice” (C.P. 3).

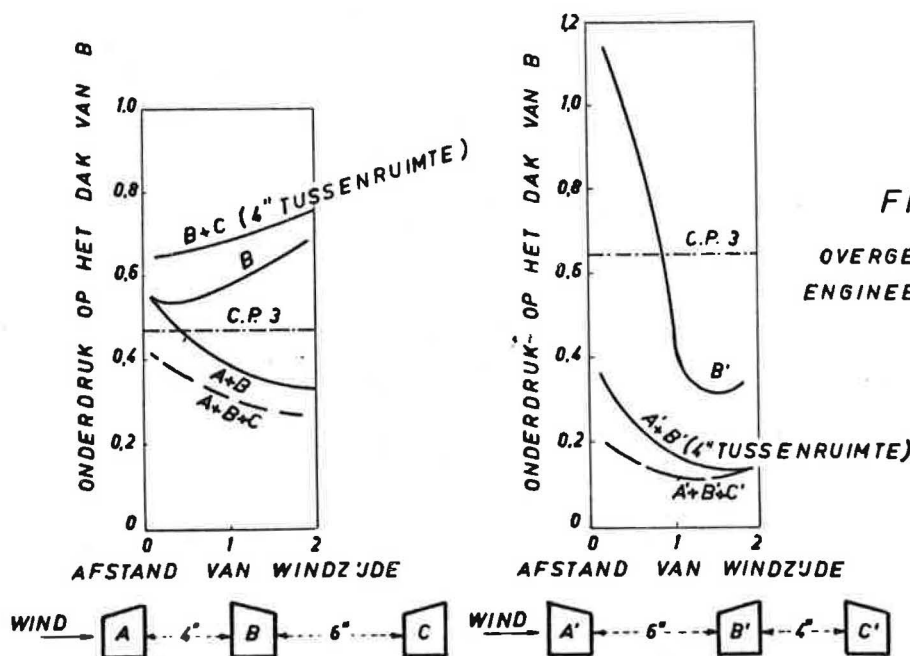
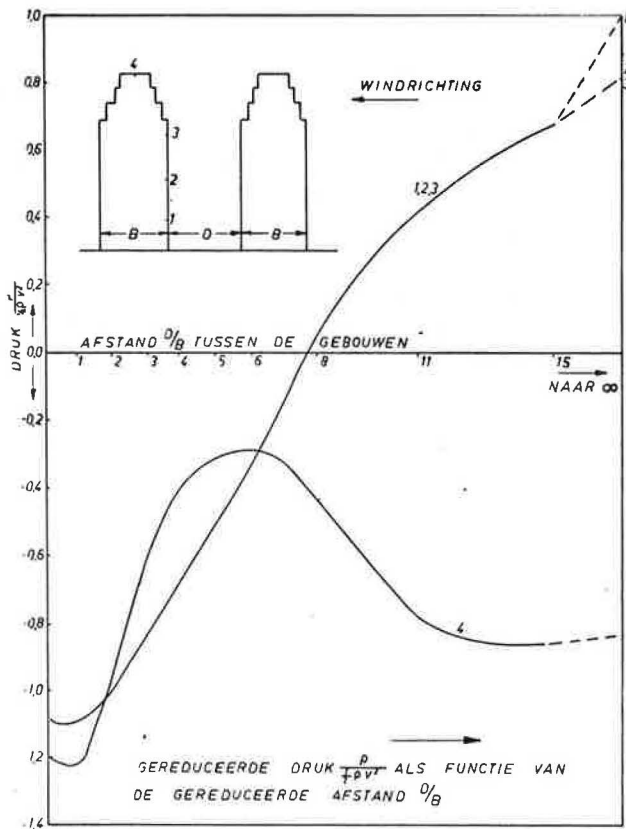


FIG. 8

OVERGENOMEN UIT: ENGINEERING DECEMBER 6, 1957



OVERGENOMEN UIT: J. L. INST CIVIL ENGINEERS
19 (1942) II

FIG. 9

Duidelijk blijkt dat de onderdrukken plaatselijk hoger zijn dan de voorgeschreven die als bouwnorm geldt. De gegeven drukverdeling geldt voor loodrechte aanblaas, bij schuine aanblaas (zie punt 8.4) kunnen nog veel grotere afwijkingen verwacht worden. Vooral voor lichte dakconstructies zijn deze gegevens van groot belang te aanzien van de eisen die aan de bevestiging gesteld dienen te worden.

Fig. 9⁷⁾ geeft de verandering van de overdruk aan de loefzijde als functie van de afstand tot een naburig gelijkvormig gebouw dat op de wind ligt bij loodrechte aanblaas. Evencens is de onderdruk op het bovenste platte gedeelte van het dak aangegeven. De afstand is uitgedrukt in de breedte van het gebouw. Uit de grafieken blijkt dat bij een bepaalde afstand ($\pm 5 \times$ de breedte van het gebouw) de druk op het dak t.o.v. de loefzijde hoger is, wat dus tot allerlei nare effecten aanleiding kan geven. De lengte van het model was 8", de hoogte 5,2" en de breedte 2". De afstand van $5 \times$ de breedte komt dus overeen met $\pm 2 \times$ de hoogte. Bij een gebouw van 100 m hoogte is dus een bijzonder grote invloed nog aanwezig op een 200 m verder gelegen even hoog gebouw.

8.6 Weergave drukverschil in een polair diagram⁸⁾

In fig. 10 is het drukverschil tussen de punten 1 en 3 uitgezet van tegenover elkaar liggende gevels, bij verschillende windsnelheden en -richtingen, gemeten aan een laboratoriumgebouw. Het drukverschil is ook hier betrokken op de snelheidsdruk $\frac{1}{2} \rho v^2$. Was de windsnelheid ten tijde van de meting v en de richting bijv. Z.O. dan werd de waarde berekend van de verhouding $\Delta p / \frac{1}{2} \rho v^2$ en deze waarde werd in het polaire diagram ingetekend op de voerstraal op de Z.O.-richting.

9. Toepassing van het bovenstaande in het elektrisch analogon.

Wenst men de invloed na te gaan van de heersende wind op de ventilatie van een speciaal gebouw, dan zijn het de windsnelheid en de windrichting ter plaatse van dat gebouw welke van belang zijn.

Aan de hand van bijvoorbeeld een modelproef of uit de literatuur heeft men n.l. een idee van de grootte van de drukken die zich rond het gebouw instellen, uitgedrukt in snelheidsdruk van de wind bij verschillende windrichtingen. Aan welke combinatie van windrichting en -snelheid men het gebouw in het analogon gaat blootstellen hangt nu af van verschillende omstandigheden.

DRUKVERDELING OM EEN GEBOUW,
TENGEVOLGE VAN DE WIND

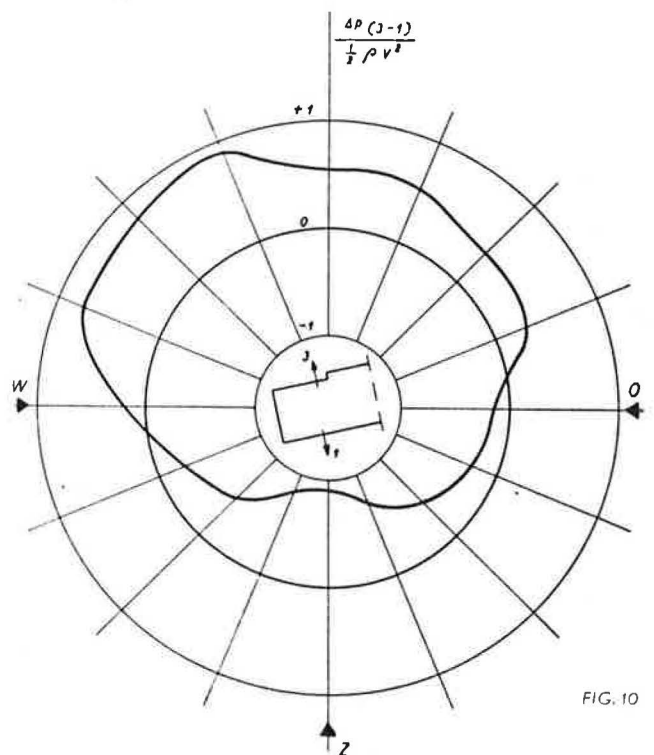


FIG. 10

— Oriëntatie van het gebouw.

Staat het gebouw ongeveer in een richting N-Z, dan moet voor de loodrecht op de gevel staande W. richting een hogere waarde voor de windsnelheid worden aangenomen dan bij een oriëntatie O-W voor de noordelijke resp. zuidelijke wind. Praktisch zal men meestal een zodanige grootte kiezen, dat de gemiddelde windsnelheid, die men kiest, slechts gedurende een beperkt aantal dagen van het jaar wordt overschreden. (zie Tabel II).

— Hoogte van het gebouw.

Rekening moet worden gehouden met de snelheidstoename over de hoogte. De in Tabel II opgegeven waarden moeten vermenigvuldigd worden met een uit Tabel IV te kiezen vermenigvuldigingsfactor.

Een voorbeeld kan e.e.a. verduidelijken. Stel men heeft een gebouw, hoog 70 m, oriëntering N-Z, gelegen in het midden van het land. Hiervoor kunnen dus de cijfers van De Bilt worden toegepast. De gemiddelde hoogte van de omringende bebouwing en daarmee het basisvlak is te stellen op 10 m hoogte. De vermenigvuldigingsfactor volgens Tabel IV bedraagt voor een hoogte van $(70-10) = 60$ m: 1,4.

Eist men, dat de gemiddelde snelheid gedurende slechts 1 % van het aantal dagen de gekozen waarde overschrijdt, dan is uit Tabel II af te lezen dat op 6 m hoogte de gemiddelde snelheid dan op 13 m/sec moet worden aangenomen:

het een snelheid van $1,4 \times 13 = \text{ca } 18$ m/sec. Stelt men de eis lager, bijv. op 10 % van het aantal dagen, dan komt men op een snelheid voor de hoogste etage van $1,4 \times 9$ of ca 13 m/sec. Met een dergelijke redenering is het mogelijk een enigszins gefundeerde schatting te maken van de windsnelheid en daarmee van de druk. Voor de hoogste etage van dit gebouw betekent verschillen, waarmee bij het onderzoek in het analogon moet worden rekening gehouden.

Literatuurlijst

- 1) K.N.M.I. Mededelingen en Verhandelingen no. 32, 1929 Dr. C. Braak: Het klimaat van Nederland: C. Luchtdrukking, D. Wind.
- 2) Ingenioren-International Edition — Volume 2, no. v 1958, no. 4. „The Model-Law for Phenomena in Natural Wind” door Martin Jensen.
- 3) Vacantie-Leergang voor Verwarmings-Techniek 1948 van de Warmte-Stichting te Utrecht: „Winddrukverdeling aan gebouwen” door J. A. Businger.
- 4) Windtunnel studies of pressure distribution on elementary buildings forms: Iowa Institute of Hydr. Res. State Univ. of Iowa City 1951.
- 5) Engineering, nov. 1957, p. 559-561.
- 6) Engineering, dec. 1957, p. 732-733.
- 7) Paper 5367, Journal of the Institution of Civil Engineers, p. 243, 1942-1943.
- 8) „Verwarming en Ventilatie”, Febr. 1949.
- 9) Vacantie-Leergang 1941.

A.C.I.-MEDEDELINGEN

Adreswijzigingen:

Oud: Fa. J. v. d. Ham, Voorstraat 44, Brielle.
Nieuw: Slagveld 15, Brielle.

Oud: Techn. Inst. Bur. P. Thissen, Grubbenvorsterweg 34, Sevenum.
Nieuw: Danikerstraat 19, Geleen.

Oud: P. Hoeymakers, Roermondsestraat 14, Venlo
Nieuw: Jodenstraat 14, Venlo.

Oud: J. Feenstra, Hofstraat 22, Groningen
Nieuw: Eeldersingel 48 (hoek Paterswoldseweg), Groningen.

Oud: J. Overtoom, 2e Braamstraat 2, Den Haag
Nieuw: Maagdenpalmstraat 7, Den Haag.

Oud: N.V. Verwarmings Unie „Benevu”, Oranjeplein 34, Maastricht, tel. 04400-4234.
Nieuw: Oranjeplein 33-34, Maastricht, tel. 04400-27234.
Privé: Emmabergweg 21, Hulsberg (L), tel. 04406-3030.

VRAAG- EN AANBODBEMIDDELING:

Aangeboden: P.S.K.-olieketel, cap. 21.000 kcal/h.
Fa. Gebr. Krienen, Laag-Keppel.

3 Stuks oliebranders fabrikaat Niec Ray cap. 3 10.000 kcal/uur voor middel zware olie, compleet met regelapparatuur, enz. Warmte Techn. Bureau J. Geitenbeek, Utrecht, tel. 030-17630.

RECTIFICATIE.

In het vorige nummer plaatsten wij op de pagina's 249 en 250 de examenopgaven voor het onderdeel sanitaire techniek van het examen Ver-

warmingstechniek. Op onverklaarbare wijze werd verzuimd de bij deze opgaven behorende tekeningen op te nemen. Onderstaand treft U deze alsnog aan.

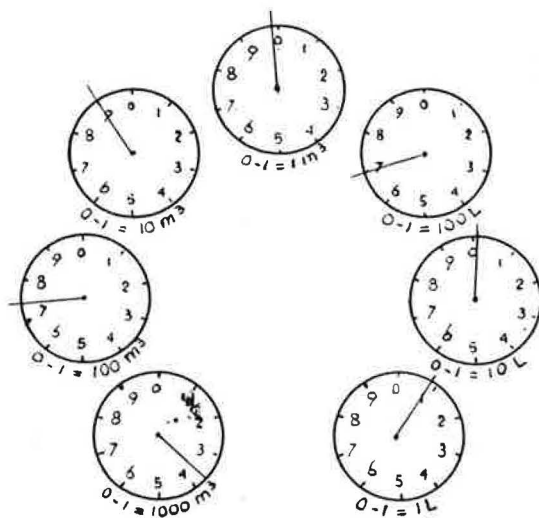
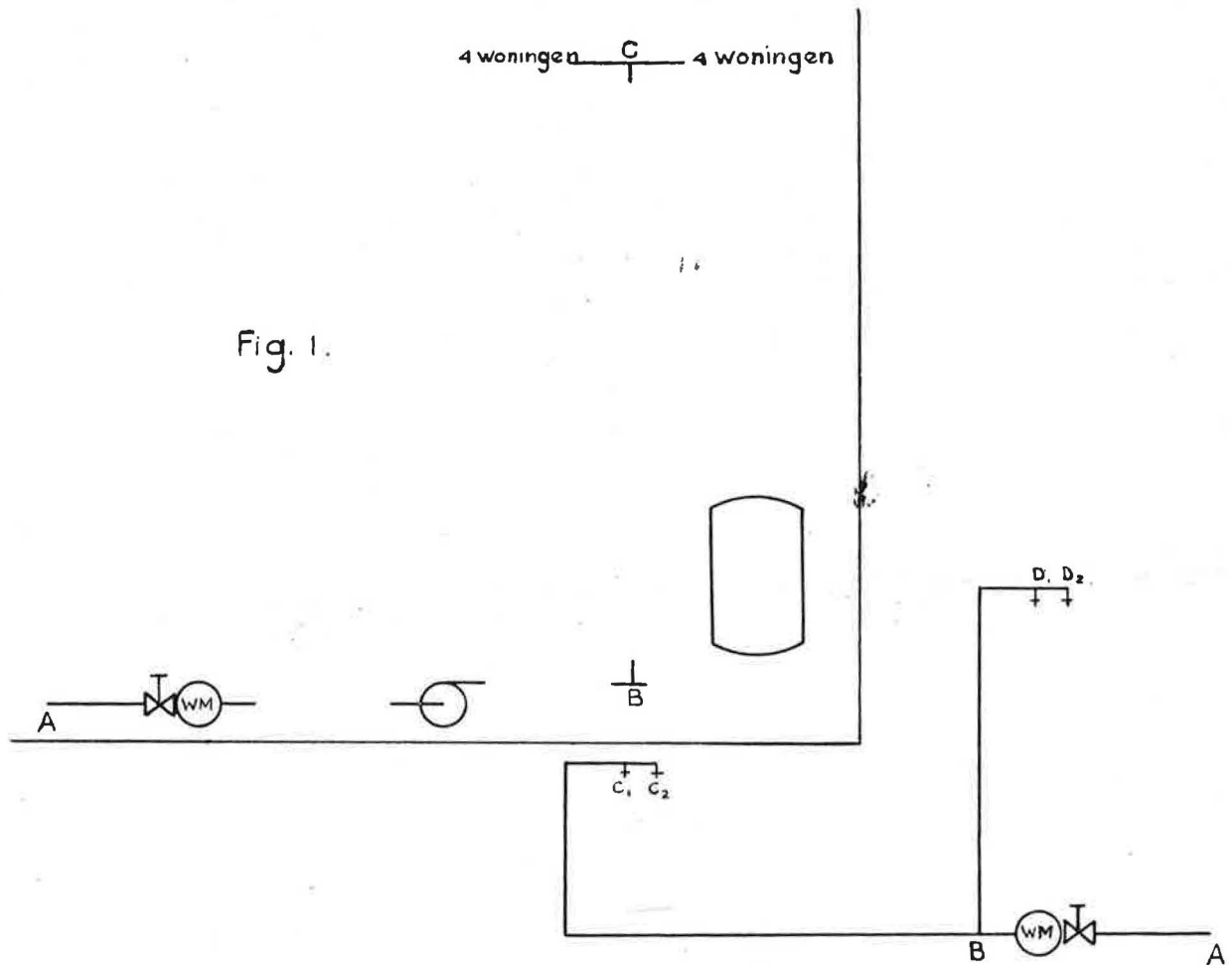


Fig. 3