

**KONINKLIJK NEDERLANDS  
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

TECHNISCHE RAPPORTEN

T.R. - 32

W.A.A. Monna

De KNMI-windtunnel

De Bilt, 1983

Publikatienummer: K.N.M.I. TR-32(FM)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut  
Fysisch Meteorologisch Onderzoek,  
Postbus 201,  
3730 AE De Bilt,  
Nederland.

U.D.C.: 551.508.5 :

551.511.6

<u>Inhoud</u>	bladzijde
I Inleiding	1
II Historisch overzicht	2
1. Anemometer-typen	2
2. IJkmethoden van anemometers	3
3. De K.N.M.I.-windtunnel	4
4. IJking van de windtunnel	6
1. Referentie-instrumenten	6
1. Vleugelrad-anemometers	6
2. Pitot-buizen	10
2. Tunnelijkingen	11
III Meting van de stromingseigenschappen	14
1. Inleiding	14
2. Meetmethode	14
3. Resultaten	16
4. Conclusies	18
IV Mogelijkheden in de toekomst	19
1. Uitgangssituatie	19
2. Verbeteringen van de bestaande windtunnel	20
3. Plaatsing bestaande windtunnel in nieuw te bouwen ruimte	20
4. Bouw nieuwe windtunnel	21
V Conclusies en aanbevelingen	23
VI Referenties	24
Appendix A: Windtunnelijking t.b.v. het gebruik met cup-anemometers en trivanen	27
Appendix B: Windtunnelijking t.b.v. het gebruik met propellervanen	32
Appendix C: Ontwerp-overwegingen voor een windtunnel-ruimte	34

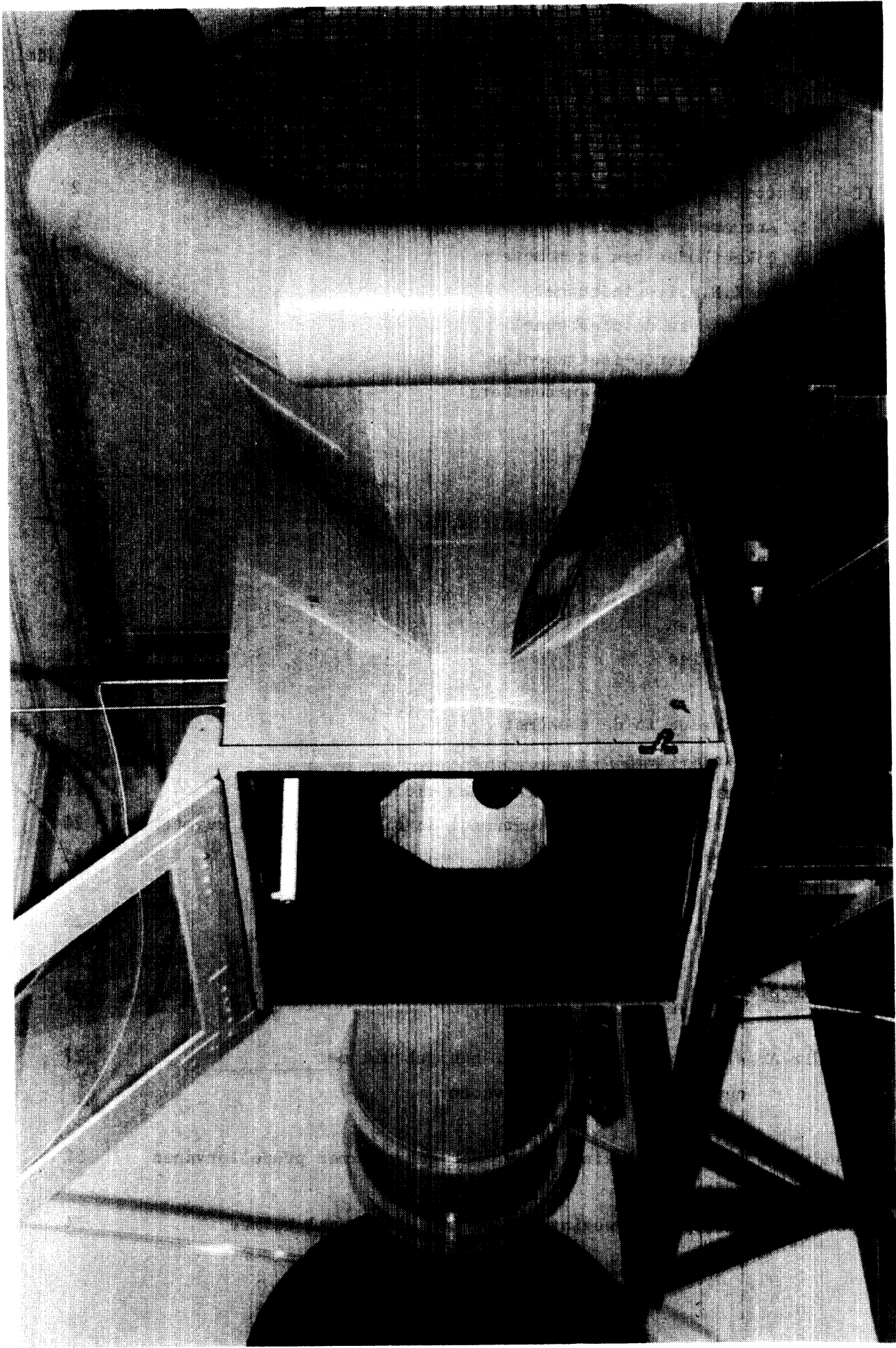


Fig. 1. De K.N.M.I.-windtunnel (15 maart 1983)

## I. Inleiding

In 1956 is op het K.N.M.I. een windtunnel in gebruik genomen. Om aan de toenemende vraag naar nauwkeurige wind(snelheids)metingen te kunnen voldoen werd het in eigen beheer ijken van anemometers noodzakelijk. De door het K.N.M.I. ontworpen en gebouwde windtunnel is thans nog steeds in goeddeels oorspronkelijke versie in gebruik. Tot op heden zijn geen metingen gepubliceerd van de stromingseigenschappen in het meetvolume. Aangezien enige kennis daarvan noodzakelijk is voor een verstandig gebruik van de tunnel, werden enkele stromingsmetingen verricht. De resultaten daarvan worden in dit rapport gepresenteerd.

In de komende jaren zal mogelijk op het K.N.M.I.-terrein vervangings-nieuwbouw plaatsvinden. Overwogen wordt daarin een windtunnelruimte op te nemen. De bestaande windtunnel zou daarin wat optimaler dan thans kunnen worden opgesteld. Anderzijds is ook de bouw van een nieuwe en wat grotere tunnel denkbaar.

Een aantal overwegingen die bij de besluitvorming hierover een rol spelen, worden in dit rapport genoemd. Een eerste, en zeer globale, kosten-baten-analyse is als losse bijlage bijgevoegd. Bovendien wordt een beknopt historisch overzicht gegeven van de ontwikkeling van windmeetmethoden en ijkingen op het KNMI, helaas niet erg volledig, en niet altijd geheel betrouwbaar. Te weinig gegevens werden destijds opgeslagen, teveel geheugenruimte is reeds gepensioneerd.

## II. Historisch overzicht

### 1. Anemometer-typen

Verschillende soorten anemometers werden in de loop der jaren, en worden deels nog door het K.N.M.I. gebruikt. Als we de drukplaat buiten beschouwing laten (in deze eeuw nog slechts op een enkel station gebruikt, bijvoorbeeld in Hoek van Holland) verdienen de volgende anemometers de aandacht:

1. Cup-anemometer, vroeger naar de uitvinder Robinson-molentje genoemd (Robinson, 1846, 1850); door Patterson (1926) belangrijk verbeterd; in steeds modernere versies bij het K.N.M.I. tot op heden in gebruik.
2. Dines-anemograaf, kortweg "Dines" genoemd naar de uitvinder, die voor het eerst met succes het principe van de Pitot-buis toepaste voor windsnelheidsmeting (Dines, 1890, 1892); thans niet meer bij het K.N.M.I. in gebruik.
3. Trivaan, een drie-componenten-vaan met propeller, door Wieringa op het K.N.M.I. ontwikkeld (Wieringa, 1967; Monna en Driedonks, 1979); bij het K.N.M.I. in gebruik als onderzoeksinstrument.
4. Gill-propellervaan, type 8002 D, geleverd door R.M. Young Company, Traverse City, Michigan, U.S.A. (Gill, 1975; Monna en Driedonks, 1979); thans in door het K.N.M.I. gemodificeerde versie in gebruik op de 213 m hoge meetmast te Cabauw (Driedonks et al., 1978).
5. Sonische-anemometer, Kayo Denki Co., Ltd., Tokio, Japan, type DAT-300, probe TR 61-A (Suomi, 1957; Kaimal en Businger, 1963; Mitsuta, 1966); bij het K.N.M.I. in gebruik als onderzoeksinstrument.
6. Perslucht-anemometer, een drie-componenten-anemometer, door Oost op het K.N.M.I. ontwikkeld (Oost, 1983); bij het K.N.M.I. in gebruik als onderzoeksinstrument, vooral toegepast bij metingen boven zee.

In 1888 werd op het hoofdstation van het K.N.M.I. in Maastricht de eerste cup-anemometer geplaatst; in Vlissingen, Groningen en De Bilt werd ook al spoedig met cup-anemometers gemeten. De eerste Dines werd in 1897 in Den Helder opgesteld. Gedurende vele jaren werden beide instrumenten naast elkaar gebruikt. Gegevens over de instrumentatie-geschiedenis van de verschillende stations zijn te vinden in Braak

(1942), Oemraw (1982/83), en in de stationsdocumentatie van de Klimatologische Dienst van het K.N.M.I.

Vergelijking van cup-anemometer en Dines werd al snel noodzakelijk geacht. In een gedegen vergelijkend onderzoek van vijf verschillende soorten anemometers (waaronder cup-anemometer en Dines) spreekt Dines (1892) zijn voorkeur uit voor zijn eigen ontwerp, voornamelijk op grond van eenvoud van constructie en robuustheid. Braak (1942, pag. 10) meent dat de Dines minder betrouwbare metingen oplevert dan de cup-anemometer.

Tijdens, en na de tweede wereldoorlog nam de behoefte toe aan windmetingen voor wetenschappelijk onderzoek, zoals het verdampingsonderzoek in de Rottegatpolder (Deij et al., 1955). Hiervoor bleek nader onderzoek naar de betrouwbaarheid van de metingen, en naar de verschillen tussen de anemometertypen noodzakelijk. In een vergelijking tussen cup-anemometer en Dines vond Rijkooft (1952) dat de Dines meer overspeeding vertoont dan de cup-anemometer. Op grond van een nader vergelijkend onderzoek op de nieuwe, in 1953 in gebruik genomen K.N.M.I.-toren, kwam Rijkooft (1955) tot de conclusie dat de twee instrumenten niet door elkaar moeten worden gebruikt. Hij achtte bovendien de Dines inferieur aan de cup-anemometer, en adviseerde standaardisering van de windstations. Na de tweede wereldoorlog vond een belangrijke uitbreiding plaats van zowel burger- als militaire-synoptische stations, en van klimatologische windstations. Op deze nieuwe stations werden steeds meer cup-anemometers geplaatst. De laatste Dines stond tot 1977 op Urk.

## 2. IJkmethoden van anemometers

In de beginperiode werden gedurende vele jaren nauwelijks absolute ijkingen van instrumenten uitgevoerd; de fabrieksijking werd gehanteerd. Wel werden onderlinge vergelijkingen van instrumenten uitgevoerd, in latere jaren veelal op de oude-, en ook nog op de nieuwe K.N.M.I.-toren. De zogenaamde Dines-ijking was geen absolute ijking, maar slechts een ijking van het drukmeetgedeelte.

In 1903/1904 werd de K.N.M.I.-Robinson-windmeter geijkt tegen een Recknagel-Zschau-anemometer, waarvan de ijking door de Deutsche Seewarte was bepaald (Braak, 1942, pag. 16). Tegen het eind van de dertiger jaren was sprake van samenwerking met Ir. Havinga van het Laboratorium voor Aero- en Hydrodynamica in Delft, waar men over een windtunnel beschikte. Verschillende malen werden daar anemometers geijkt, die soms weer op de toren met andere anemometers werden vergeleken. Het betrof hier i.h.a. cup-anemometers (Braak, 1942). Rijkooft (1952) geeft de resultaten van ijkings bij het Nationaal Luchtvaart Laboratorium (N.L.L.), sinds 1961 Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (N.L.R.). De tot dan toe gebruikte Dines-ijkgetallen uit het Observers Handbook bleken onjuist. Na een anemometer onderzoek op de nieuwe toren in De Bilt stelde Rijkooft (1954) dat het toren-platform ongeschikt is als ijkplaats voor anemometers, en adviseerde "systematische en herhaalde windtunnel-ijkings van alle anemometers". Bij een bespreking tussen Deij, Hauer, Ten Kate, Vesseur en Rijkooft werd op 14 mei 1954 besloten alle voor klimatologische doeleinden gebruikte anemometers regelmatig bij het N.L.L. te ijken, en enkele exemplaren als substandaard te bewaren. In 1955 en 1956 werden ijkings uitgevoerd, en werd opnieuw de noodzaak geconstateerd regelmatig individuele instrumenten te ijken (Rijkooft, 1956). In 1956 werd de K.N.M.I.-windtunnel in gebruik genomen. Tot op heden zijn ijkings die op het K.N.M.I. worden uitgevoerd gekoppeld aan de standaard van het N.L.R.. Voor sommige doeleinden worden ijkings direct in de N.L.R.-windtunnel uitgevoerd.

### 3. De K.N.M.I.-windtunnel

Vanaf 1949 ontstonden op het K.N.M.I. serieuze plannen om een eigen windtunnel aan te schaffen, maar door geld- en ruimtegebrek was spoedige realisering niet mogelijk. In 1956 werd tenslotte in eigen beheer een windtunnel gebouwd. Het ontwerp is van Blokhuis en Wierda; advies werd gegeven door het N.L.L.. De tunnel is van het Eiffel-type, met een gesloten meetsectie.



De belangrijkste maten en eigenschappen zijn:

- doorsnede meetsectie  $0.134 \text{ m}^2$ ; achthoekige doorsnede
- lengte meetsectie 0,4 m
- kleinste bruikbare windsnelheid 0,2 m/s
- grootste bruikbare windsnelheid 30 m/s (25 m/s tot januari 1977)
- snelheidsregeling d.m.v. een regeltransformator
- grootste afwijking van de gemiddelde snelheid in het bruikbare deel van het meetvolume ca 3%
- turbulentiegraad in het bruikbare deel van het meetvolume < 1%

De oorspronkelijke versie was op een dexion-onderstel opgesteld in kamer 5 (oude vleugel).

Afgezien van detailwijzigingen, zoals de deur van het meetcompartiment, werd de tunnel 18 jaar lang in de oorspronkelijke versie gebruikt. Begin 1974 werd de tunnel verplaatst naar een ruimte in de bunker onder de nieuwe vleugel. Bovendien werden - mede op advies van Ir. N. Feis (CTI-TNO) en Tennekes - de volgende wijzigingen aangebracht (Driedonks, 1975):

- om de rand van de instroomopening werd een torus gemonteerd
  - op de wand tegenover de uitstroomopening werd in het verlengde van de tunnelas een kegelvormige stromingsgeleider gemonteerd
  - bij de uitstroomopening werd de tunnel verlengd m.b.v. een uitneembaar tussenstuk van 0,4 m lengte
  - er werd een nieuwe aandrijfmotor met nieuwe poelie geïnstalleerd.
- Aangezien de windtunnelruimte in de kelder ook voor andere doeleinden werd gebruikt, was het in de praktijk niet steeds mogelijk deze ruimte vrij van storende obstakels te houden. In 1976 werd een deel van de ruimte speciaal voor de windtunnel afgeschermd, maar geheel bevredigend was ook die oplossing niet. Zie over deze kwesties nota's van Driedonks d.d. 26-5-1976 en 4-6-1976. Tenslotte werd de tunnel begin 1977 terug geplaatst naar de oude windtunnelruimte, kamer 5 in de oude vleugel. Bij die gelegenheid werd een nieuw onderstel gemaakt, zodat de tunnelas zich thans vrijwel in het midden van de ruimte bevindt. De windtunnelruimte wordt sindsdien niet voor andere doeleinden gebruikt, maar is niet vrij van obstakels; er staan altijd enkele tafels, kisten, dozen en instrumenten. De ruimte zelf werd bij de herplaatsing wel gladder afgewerkt dan voorheen en van een stevige vloer voorzien. De

kegel tegenover de uitstroomopening wordt nog steeds gebruikt. Experimenten van Oost hadden uitgewezen dat plaatsing van een dergelijke kegel tegenover de instroomopening de turbulentiegraad aanmerkelijk vergrootte.

In 1976 bleek het noodzakelijk windvanen van het type Cabauw in de windtunnel te vergelijken met een referentie-windvaan. Experimenten van Van der Vliet leidden eind 1977 tot een stabielere constructie van de instrumentplug in (onder) de windtunnel, zodat de opstellingsplaats beter reproduceerbaar werd (Van der Vliet, 1981, pag. 20). In juni 1981 werd de bevestiging van de instrumentplug nogmaals gewijzigd, waardoor de stabiliteit opnieuw verbeterd werd. Na die datum zijn geen wijzigingen meer aangebracht. Figuur 1 geeft een beeld van de windtunnelopstelling op 15 maart 1983. Figuur 2 is een verticale doorsnede door de tunnelas van windtunnel en windtunnelruimte. Figuur 3 is een verticale doorsnede door het meet-compartment.

De windtunnel wordt hoofdzakelijk voor ijkingen van windmeetinstrumenten gebruikt. Bovendien wordt ook instrumenteel onderzoek in de tunnel gedaan. Daarbij moet niet alleen aan windmeetinstrumenten worden gedacht; het effect van wind op verschillende meteorologische instrumenten kan in principe in een windtunnel worden onderzocht.

Naast de hierboven genoemde toepassingen, wordt de windtunnel ook gebruikt om anemometers van derden te ijken. Daarbij kan wordt gedacht aan instrumenten van overheids- en semi-overheids-instellingen, militaire instanties, bedrijven (boorplatforms) en enkele particulieren. Per jaar wordt aan dergelijke ijkingen ca. 3 tunnelweken besteed; enige toename lijkt denkbaar.

#### 4. IJking van de windtunnel

##### 1. Referentie-instrumenten

###### 1. Vleugelrad-anemometers

Het is niet meer met zekerheid vast te stellen welke referentie-anemometers in het verleden gebruikt werden. Vermoedelijk werd in

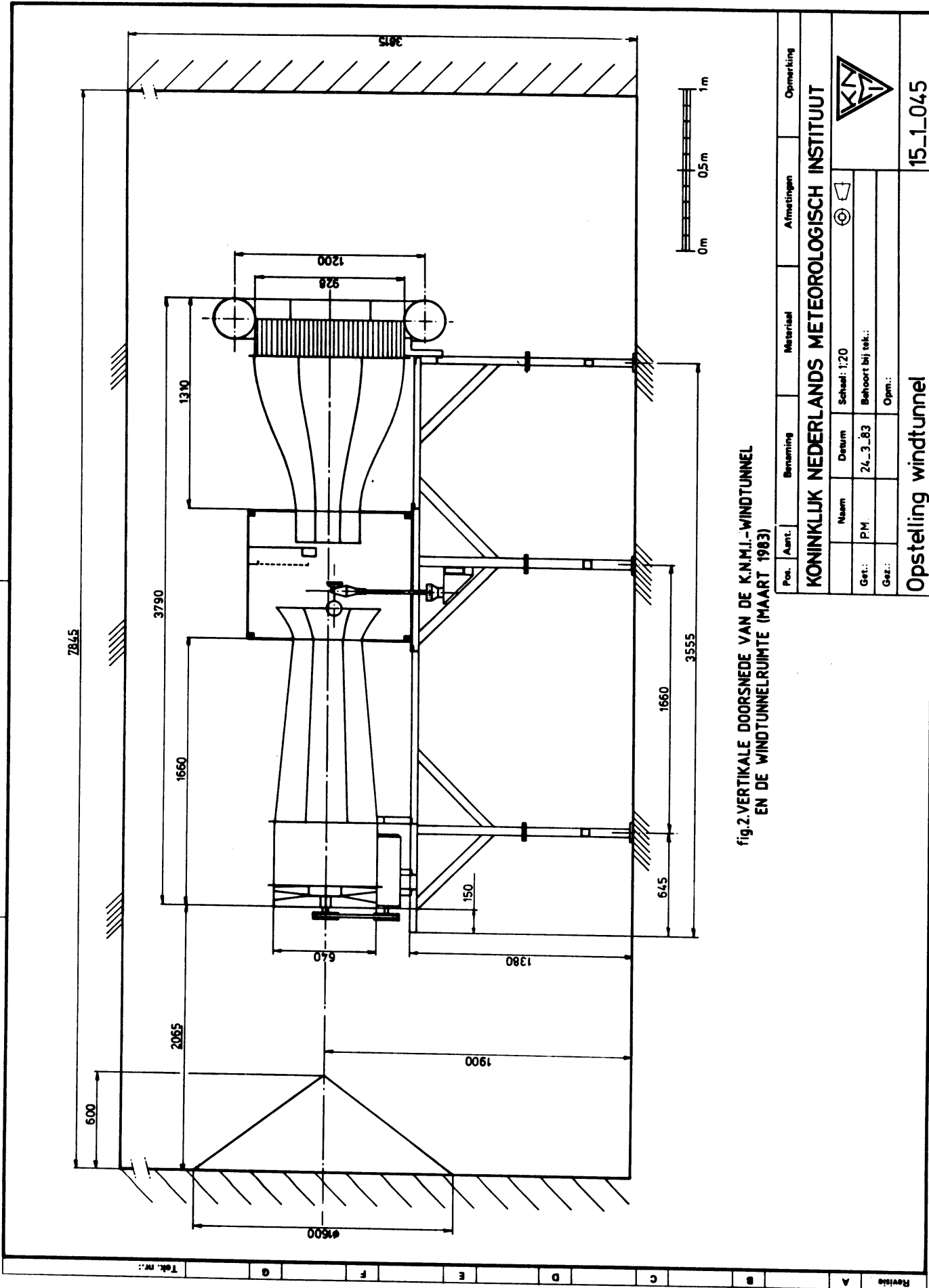



fig. 2. VERTIKALE DOORSNEDE VAN DE K.N.M.I.-WINDTUNNEL EN DE WINDTUNNELRUIMTE (MAART 1983)

Pos.	Aant.	Benaming	Materiaal	Afmetingen	Opmerking
<b>KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT</b>					
	Naam	Datum	Schaal: 1:20		
	Get.: P.M.	24. 3. 83	Behoort bij tek.:		
	Get.:		Opn.:		
<b>Opstelling windtunnel</b>					<b>15_1_045</b>

Auteursrechten voorbehouden volgens de wet

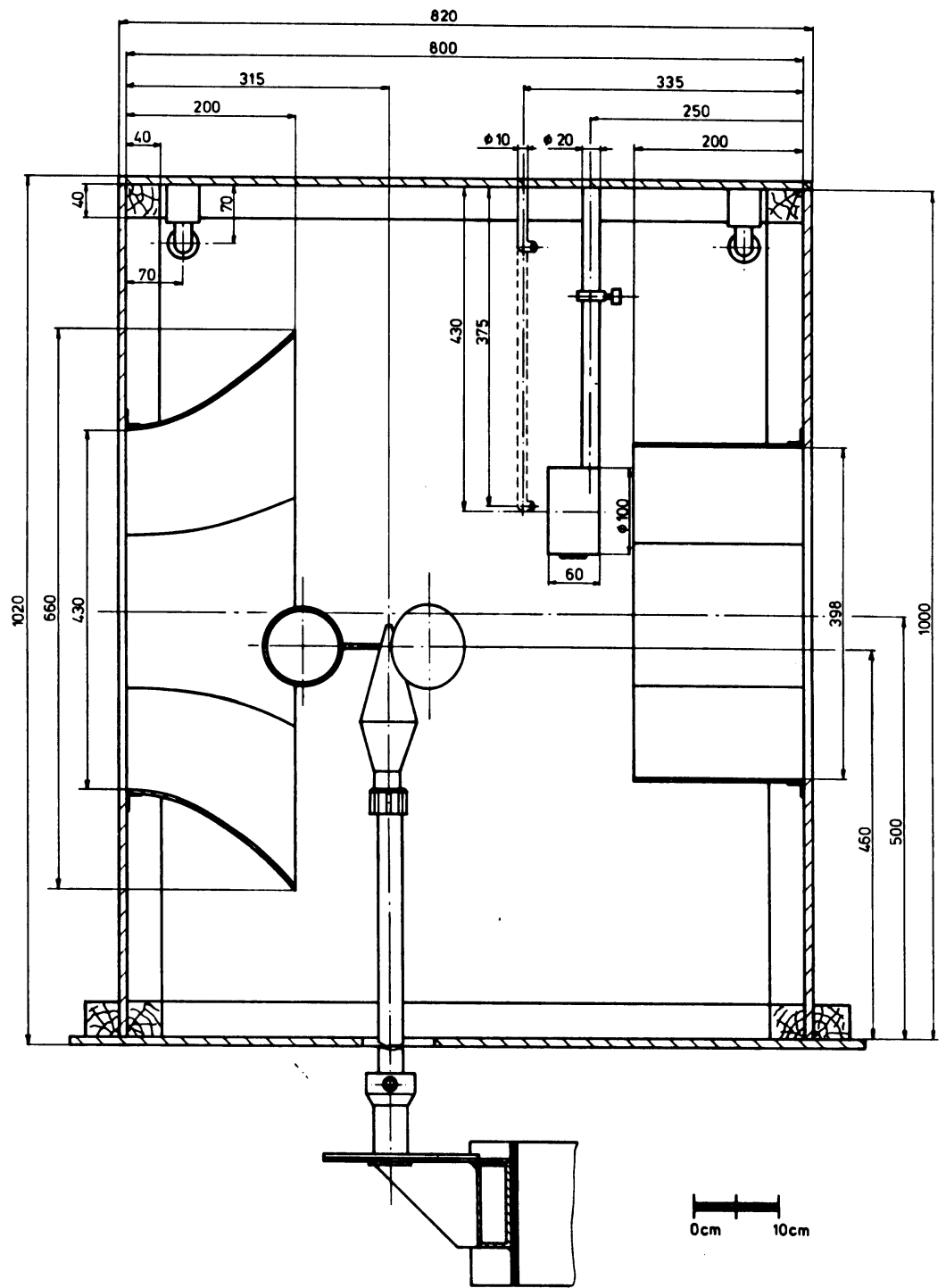


fig.3. VERTIKALE DOORSNEDE VAN HET MEETCOMPARTIMENT (MAART 1983)

Pos. Aant.	Benaming	Material	Afmetingen	Opmerking
<b>KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT</b>				
	Naam	Datum	Schaal: 1:5	
	Get.: P.M	28_3_83	Behoort bij tek.: 15_1_045	
	Get.:		Opn.:	
Meetruimte t.b.v. windtunnel				
				14_2_114

Afdeling Windtunneltechniek, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt

de eerste jaren gebruik gemaakt van de Fuess-vleugelrad-anemometer type 121, serienummer 16, K.N.M.I.-nummer 407. Waarschijnlijk was dit instrument reeds voor 1956 op het K.N.M.I. aanwezig. Uit een rapport van het N.L.L. (nr. A.1092, 19-11-1947) blijkt dat een dergelijke anemometer voor het K.N.M.I. is geijkt; het fabrieksnummer was echter 1516. In januari 1956 werd na een ijking op het N.L.L. een ijkgrafiek gemaakt van een vleugelrad-anemometer, helaas zonder nadere type aanduiding. Het K.N.M.I.-instrument (407) werd in de zeventiger jaren gebruikt voor een proef om het aantal omwentelingen elektronisch te tellen. Het bevindt zich thans in het oude-instrumenten-kabinet.

Op 16-3-1965 werd een Lambrecht vleugelrad-anemometer aangeschaft, type 1405 a, fabrieksnummer 31973, K.N.M.I. 01.00.047.01.. Het is niet duidelijk wanneer dit instrument in de windtunnel in gebruik werd genomen. Wieringa vermeldt een ijking van dit instrument in Delft op 16-3-1967, gebruikt het instrument bij zijn eigen onderzoek, en heeft een ijking uitgevoerd in de grote windtunnel van het Meteorological Office in Bracknell op 21-3-1968 (Wieringa, 1968). Niet zeker is dus welk instrument gebruikt werd van maart 1965 tot maart 1967.

Op 25-3-1975 werd een nieuwe Lambrecht vleugelrad-anemometer aangeschaft, type 1405 a, fabrieksnummer 420543, K.N.M.I. 01.00.047.05.. Dit instrument werd voorzien van een elektronische uitlezing, nadat iets dergelijks bij wijze van proef was gedaan bij de oude Fuess vleugelrad-anemometer (Breevoort, 1975). Bij deze experimenten bleek het noodzakelijk de voedingsspanning van de tunnelmotor te stabiliseren, omdat anders ontoelaatbare fluctuaties in de windsnelheid optreden (Breevoort, 1975). Vermoedelijk is de Lambrecht 420543 (met elektronische uitlezing) eind 1975 in gebruik genomen. Een netspanningsstabilisator werd waarschijnlijk in de loop van 1976 in gebruik genomen. Vleugelrad-anemometer Lambrecht 420543 en een netspanningsstabilisator zijn thans nog steeds in gebruik. De positie van deze vleugelrad-anemometer is in de figuren 2, 3 en 4 aangegeven. De oude Lambrecht vleugelrad-anemometer (31973), en een op 19-10-

1976 aangeschaft reserve exemplaar (Lambrecht 1405 a, 422142, K.N.M.I. 01.00.047.07) worden op het ijklaboratorium bewaard. Na de ijking in Bracknell in 1968 zijn geen referentie-anemometers buiten het K.N.M.I. geijkt. Transport van referentie-instrumenten is in het algemeen af te raden. Zoals hierna zal blijken worden vergelijkingen met referentie-instrumenten van derden op een andere wijze uitgevoerd.

## 2. Pitot-buizen

Vanaf 1956 zijn, naast vleugelrad-anemometers, Pitot-buizen gebruikt als referentie-instrument. Het is niet meer na te gaan hoeveel verschillende instrumenten in gebruik zijn geweest. Er zijn zowel instrumenten gekocht, als in eigen beheer gemaakt. Bovendien werden soms instrumenten gerepareerd. Zo werd in 1969 een Pitot-buis beschadigd en gerepareerd; bovendien werd een nieuw exemplaar aangeschaft (Driedonks, 1974). Niet geheel zeker is of het hierbij om dezelfde exemplaren gaat als de door Driedonks (1974) genoemde "oude" en "nieuwe" Pitot-buizen. Deze laatste twee instrumenten worden thans in het ijklab bewaard. De "oude" is, afgaand op het uiterlijk, ooit gerepareerd. De "nieuwe" bevindt zich in de windtunnel en wordt nog af en toe gebruikt. De nieuwe Pitot-buis is van het fabriekaats Lambrecht. In figuur 3 is de positie gestippeld aangegeven. Pitot-buis en vleugelrad-anemometer kunnen niet tezamen in het meetvolume worden geplaatst.

Het drukverschil van de Pitot-buis werd gemeten met een vloeistof differentiaal-manometer. Het ijklab beschikt thans nog over een Lambrecht-manometer, fabrieksnummer 56101, géén K.N.M.I. nummer. Vroeger is ook nog een ouder exemplaar gebruikt: Lambrecht 655, K.N.M.I. 33.01.000.01, aangeschaft op 14-2-1957; niemand weet waar dit instrument zich thans bevindt.

Op den duur voldeed het instrument toch niet meer, en op 13-12-1973 werd een Betz-micromanometer aangeschaft, nr. 9604, K.N.M.I. 33.01.000.02. Dit instrument werd pas enige tijd later in gebruik genomen.

## 2. Tunnelijkingen

In de eerste jaren na de bouw van de windtunnel werd aangenomen dat de windsnelheid ter plaatste van het te ijken instrument even groot is, als ter plaatse van het referentie-instrument. Geen rekening werd gehouden met verstoring van het windveld t.g.v. de grootte van het te ijken instrument, m.a.w. de invloed van de zogenaamde vulfactor. Deze vulfactor komt wel in het spraakgebruik voor, maar iets dergelijks wordt nooit in formules gebruikt; een geschikte definitie is doorsnede instrument gedeeld door doorsnede meetsectie. Ook de positie van het instrument is nog van belang. Voor nauwkeurige ijkingen moet men de combinatie van referentie-instrument en te ijken instrument(-type) ijken, door enkele exemplaren van het te ijken instrumenttype ook in een veel grotere windtunnel te ijken, waar de vulfactor geen rol speelt. Men refereert dan tevens aan het standaard instrument van die grotere windtunnel. Voor wat het K.N.M.I. betreft is dat altijd de N.L.R.-tunnel geweest.

De noodzaak van dergelijke ijkingen bleek tijdens het Flevo-verdampingsonderzoek (Wieringa, 1972). De ijking van de combinatie vleugelrad-anemometer (31973) - cup-anemometer en van de combinatie Pitot-buis - cup-anemometer werd uitgevoerd door Wieringa (1968), uitgaande van door Rietman op het N.L.R. uitgevoerde cup-anemometer ijkingen. Voorlopig werd toen verondersteld dat de vulfactoren van de trivaan en de cup-anemometer even groot zijn; er werd dus geen aparte ijking verricht van de combinaties Pitot-buis - trivaan en vleugelrad-anemometer - trivaan.

In de jaren daarna werden regelmatig tunnelijkingen uitgevoerd:

a. ijking i.v.m. verplaatsing windtunnel naar bunker

- geijkt werden de combinaties:

- vleugelrad-anemometer met cup-anemometer
- Pitot-buizen ("oude" en "nieuwe") met cup-anemometer
- Pitot-buizen ("oude" en "nieuwe") met trivaan.

er werd een ijking verkregen van de opstelling vóór verplaatsing en één van de nieuwe opstelling

- cup-anemometers en trivanen werden eenmaal bij het N.L.R. geijkt
- referentie: Driedonks (1974, 1975)
- b. ijking i.v.m. terugplaatsing van de tunnel naar de oorspronkelijke windtunnelruimte
  - geijkt werden de combinaties:
    - vleugelrad-anemometer (420543 sinds eind 1975) met cup-anemometer
    - "nieuwe" Pitot-buis met trivaan
  - er werd alleen een ijking verkregen van de situatie na verplaatsing
  - cup-anemometers en trivanen werden eenmaal bij het N.L.R. geijkt
  - referentie: ijking uitgevoerd door Driedonks in 1977; geen rapport in druk verschenen; zie appendix A
- c. ijking i.v.m. aanschaf Gill-propellervanen
  - geijkt werd de combinatie vleugelrad-anemometer (420543) met propellervaan
  - er werden propellervanen bij het N.L.R. geijkt
  - referentie: ijking uitgevoerd door Monna in 1979; geen rapport in druk verschenen; zie appendix B
- d. ijking van de combinatie vleugelrad-anemometer (420543) met trivaan
  - reden was de vereenvoudiging van de ijkprocedure t.o.v. ijking met de Pitot-buis
  - er werden geen instrumenten bij het N.L.R. geijkt
  - referentie: Hofman en Van Londen (1983)

In 1981 ontstond enige onzekerheid over de ijking van de bij het N.L.R. gebruikte referentie-instrumenten (brief van Van den Enden, d.d. 4-5-1981). Door het N.L.R. is deze kwestie inmiddels uitgezocht (18-4-1983); het K.N.M.I. zal schriftelijk op de hoogte worden gesteld.



Thans (29-12-1982) gelden voor de verschillende instrument-combinaties in de K.N.M.I.-windtunnel de volgende ijkingen:

1. vleugelrad-anemometer 420543 met cup-anemometer K.N.M.I.

01.00.0.18:

$$U = 0,03500.P_v + 0,1$$

referentie: Driedonks, appendix A

2. vleugelrad-anemometer 420543 met propellervaan Gill 8002D:

$$U = 0,036376.P_v + 0,22$$

referentie: Monna, appendix B

3. vleugelrad-anemometer 420543 met trivaan:

$$U = 0,03617.P_v + 0,03$$

referentie: Hofman en Van Londen, 1983

4. "nieuwe" Pitot-buis met trivaan:

$$U = 0,995.U_p + 0,03$$

referentie: Driedonks, appendix A

deze ijking wordt gebruikt vanaf 1-1-1983; tot die datum werd gebruikt  $U = U_p$

Hierin is:

U de windsnelheid in m/s ter plaatse van het te ijken instrument  
 $P_v$  het aantal pulsen per seconde van de vleugelrad-anemometer  
 $U_p$  de windsnelheid in m/s zoals gegeven door de Pitot-buis

Na de terugplaatsing van de windtunnel in 1977 zijn de combinaties van Pitot-buis met cup-anemometer en propellervaan niet geijkt. De Pitot-buis wordt thans alleen nog voor experimenten gebruikt.

Thans (29-12-1982) wordt één windvaan van het type Cabauw (K.N.M.I. 01.00.521.002) bewaard als referentie-instrument voor het ijken van het windrichtingsdeel van de trivaan en de propellervaan.

### III. Meting van de stromingseigenschappen

#### 1. Inleiding

Ten einde de bruikbaarheid van de windtunnel voor verschillende toepassingen te kunnen beoordelen, is het noodzakelijk de snelheidsgradiënten en turbulentiegraad (lokale relatieve snelheidsfluctuaties:  $\sigma U/\bar{U}$ ) van de stroming in het meetvolume te kennen. Tot op heden zijn echter geen resultaten gepubliceerd van metingen van deze tunneleigenschappen. In de zeventiger jaren zijn door Schaap turbulentiemetingen gedaan met een hittedraad-anemometer. Volgens persoonlijke mededeling van Schaap werden een turbulentiegraad van ca. 1%, en een grenslaag langs de wand van ca.  $10^{-2}$  m dikte gevonden.

Ook ten behoeve van de besluitvorming omtrent een eventueel nieuw te bouwen windtunnel is enige kennis van de stromingseigenschappen van de huidige tunnel noodzakelijk. Derhalve werden enkele metingen verricht teneinde een globale indruk te krijgen van snelheidsgradiënten en turbulentiegraad in het meetvolume. Daarbij werd dankbaar gebruik gemaakt van de assistentie van Van der Luit, J.G. van der Vliet en Vredendaal. Volstaan werd met de bepaling van een vijftal profielen in een verticaal vlak door de as van de tunnel. Metingen op andere plaatsen in het meetvolume zijn aanmerkelijk moeilijker uitvoerbaar. Alhoewel de absolute nauwkeurigheid van de metingen niet groot is, werd een bruikbaar beeld van de stromingseigenschappen verkregen.

#### 2. Meetmethode

Zowel de snelheidsgradiënten als de turbulentiegraad werden met een hot-wire-anemometer gemeten. Een dergelijk instrument is weliswaar niet ideaal voor absolute snelheidsmetingen, maar gezien de geringe afmetingen van het meetvolume was een kleine sensor noodzakelijk. Gebruikt werd DISA-hot-wire-apparatuur: constant temperature hot wire, anemometer 55D05, linearizer 55D15 en power supply 52A40. De gemiddelde windsnelheid (gelijkspanning) werd afgelezen op een HP digital multimeter 3465B; de turbulentiegraad (wisselspanning) op een Brüel en Kjaer electronic RMS voltmeter 2425. Voor turbulentiemeting

wordt het frequentiebereik (3 dB) door de electronica aan de onderzijde begrensd tot 2 Hz; bij 20 m/s komt dat overeen met een wervelgrootte van 10 m. Wervels kleiner dan ca. 1 mm worden door de sensor niet meer gedetecteerd; het frequentiebereik wordt zodoende door de sensor aan de bovenzijde begrensd bij 20 kHz (bij 20 m/s), ruim binnen de 3 dB bovengrens van de electronica (70 kHz).

Gezien de geringe mate van bewegingsvrijheid was het niet mogelijk op alle plaatsen de sensor op dezelfde wijze te oriënteren t.o.v. de tunnelas. Aangezien de sensorgevoeligheid afhangt van de aanstroomrichting zullen bij anisotrope turbulentie -langs de wanden- meetfouten worden gemaakt. Bij elke oriëntatie werd de sensor evenwel geijkt, en daarbij bleken geen grote verschillen op te treden. Onzekerheid in de aflezing en verloop van de apparatuur leverde ook fouten op. De bevestiging van de sensor aan een beweegbare steun levert een verstoring van het windveld op; bij relatieve profielen verdwijnt deze fout echter goeddeels. Het eindresultaat is zeker niet binnen enkele procenten betrouwbaar, maar geeft wel een globaal beeld van de windsnelheid en turbulentiegraad in het meetvolume. De nauwkeurigheid in de profielen bedraagt ca. 10%.

Er werden vijf verticale snelheids- en turbulentieprofielen gemeten, alle in één verticaal vlak door de tunnelas. De afstanden tot de uitstroomopening zijn 3, 6,5, 12, 24 en 37 cm. Elk profiel werd in twee gedeelten gemeten: eerst de onderste helft tot de hoogte van de tunnelas, daarna het deel boven de tunnelas, plus een overlap van 10 cm onder de as. De meetpunten lagen 1 à 2 cm uiteen, afhankelijk van het verloop van het profiel. Gemeten werd bij 5, 10, 15 en 20 m/s. Per profiel werd de snelheid in de tunnel steeds constant gehouden, en de sensor langs de meetpunten verplaatst. Het onderste deel van elk profiel werd bepaald met de "nieuwe" Pitot-buis en de Betz-micromanometer 9604 als referentie-instrument. Voor het bovenste deel van elk profiel werd de Pitot-buis vervangen door de Lambrecht vleugelrad-anemometer 420543. Elk profiel werd éénmaal gemeten. Af en toe werd echter de reproduceerbaarheid geverifieerd, die nooit slechter dan ca. 10% bleek te zijn.

Teneinde de vijf verticale snelheidsprofielen ook onderling te kunnen vergelijken werd een horizontaal snelheidsprofiel gemeten, iets onder de tunnelas. Daarbij was een aparte constructie nodig, om de sensor bij draaiende tunnel horizontaal te kunnen verplaatsen; stilzetten van de tunnel bij elke verplaatsing levert een te grote onnauwkeurigheid op. Bij elk van de vier windsnelheden werd het horizontale profiel vijf maal gemeten, aangezien de fluctuaties in deze metingen groter waren dan bij de verticale profielen. Mogelijk is de wat meer geïmproviseerde wijze van verplaatsen daarvan de oorzaak.

### 3. Resultaten

We duiden meetpunten aan met de hoogte  $h$  (cm) boven het ondervlak van de uitstroomopening, en de horizontale afstand  $d$  (cm) tot de uitstroomopening.

Voor elk verticaal snelheidsprofiel werd genormeerd door het gemiddelde van de punten  $h = 18$  en  $h = 20$  op 100% te stellen. Elk profiel wordt dus aangegeven in procenten t.o.v. het bijbehorende (fictieve) meetpunt  $h = 19$ . De tunnelas ligt bij  $h = 20$ . Daar waar onder- en bovenhelft overlappend werden gemeten, werd steeds het gemiddelde genomen. Met behulp van het gemiddelde van de vijf horizontale profielmetingen werden tenslotte voor elke windsnelheid de verticale profielen ook onderling genormeerd. Als 100%-punt werd gekozen  $h = 19$ ,  $d = 12$ . Bij 20 m/s bleek de windsnelheid tijdens een profielmeting onvoldoende constant voor relatieve snelheidsmetingen; deze werden verder niet gebruikt. Aangezien geen significante verschillen werden gevonden tussen de metingen bij de drie andere snelheden, werden grafisch gemiddelde profielen bepaald. In figuur 4 zijn deze snelheidsprofielen gegeven. De tekening geeft een verticaal vlak weer door de as van de tunnel (horizontale -.-. lijn); links de voorrand van de instroomopening, rechts de achterrand van de uitstroomopening, rechtsboven de onderzijde van de vleugelrad-anemometer. Op schaal zijn de opstellingsplaatsen van cup-anemometer (C), trivaan-propeller (T) en propellervaan-propeller (P) aangeduid. Langs de vijf verticale lijnen zijn de profielen gemeten; de krommen geven de plaatselijke snelheid in procenten (onderstaande schalen) t.o.v. de bijbehorende verticale 100% lijn. Het normeringspunt is met \* aangegeven.

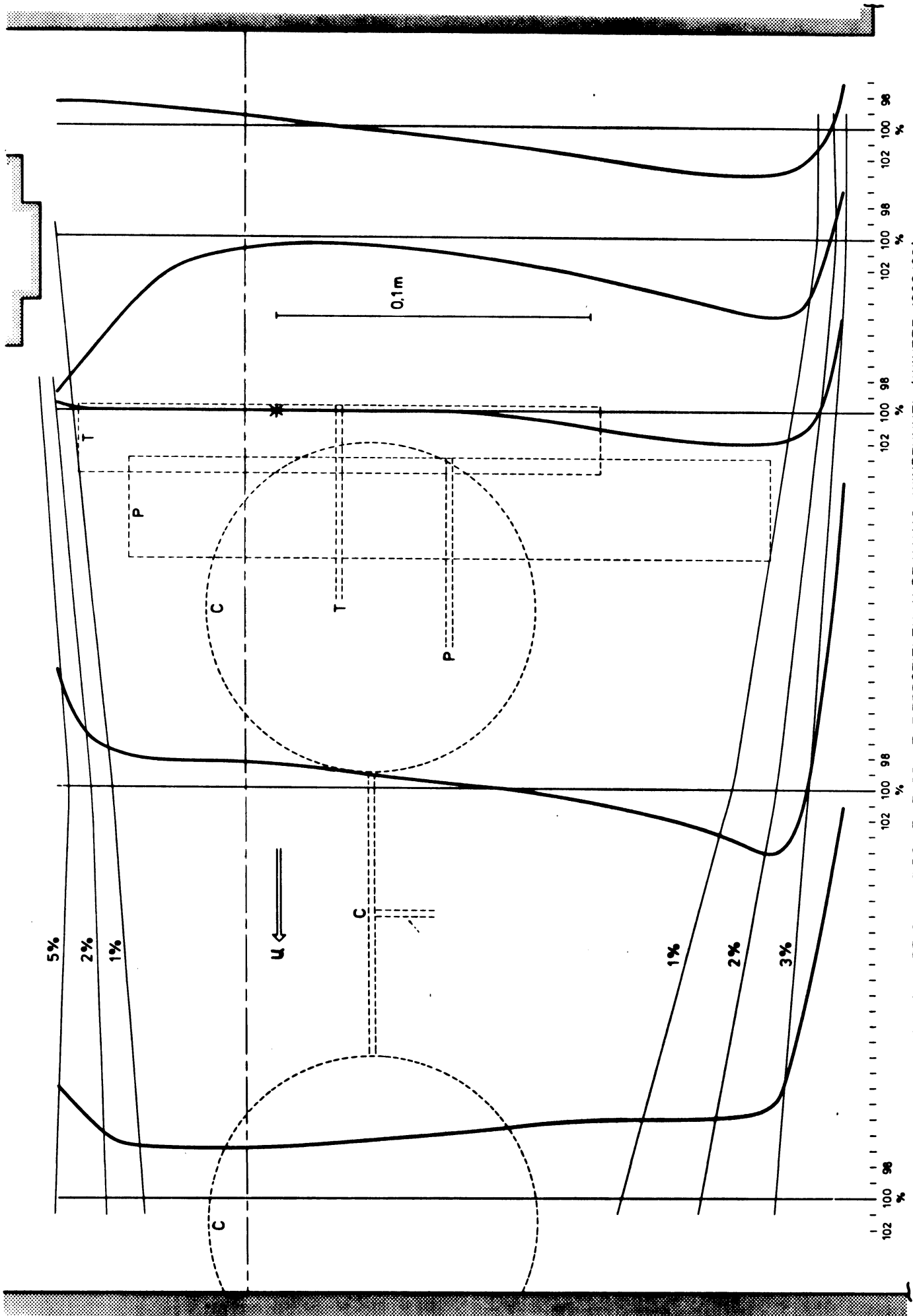


fig. 4 GEMIDDELTE SNELHEIDS - EN TURBULENTIEPROFIELEN IN DE K.N.M.I. - WINDTUNNEL (WINTER 1982/83)

De turbulentiegraad werd voor elk meetpunt uitgerekend in procenten t.o.v. de plaatselijke gemiddelde snelheid. Omdat de turbulentiegraad nauwelijks afhankelijk is van de windsnelheid werden de metingen bij 20 m/s nu wel gebruikt. Daar waar profielen overlappen werd weer het gemiddelde genomen. Per profiel werd vervolgens grafisch geïnterpoleerd naar de posities met 1%, 2% en 5% turbulentie. Tenslotte zijn in figuur 4 de isolijnen van gelijke turbulentie aangegeven. Het betreft hier weer het gemiddelde over de vier windsnelheden. Turbulentie van meer dan 5% werd wel gevonden, maar i.v.m. de overzichtelijkheid niet in de figuur aangegeven; het gaat daarbij om de uiterste randen van het meetvolume. De turbulentiegraad in het in de praktijk gebruikte deel van het meetvolume is iets kleiner dan 1%.

Bij het bezien van figuur 4 realiseer men zich dat het deel onder de tunnelas in principe rotatie-symmetrisch is t.o.v. de tunnelas. Alleen boven in de tunnel wordt dit beeld verstoord door de invloed van de vleugelrad-anemometer op de wijze zoals boven de as aangegeven.

#### 4. Conclusies

Het beeld zoals geschetst in figuur 4 is ongeveer wat men zou verwachten. Het zog van de uitstroomopening (onderaan) en van de vleugelrad-anemometer zijn in snelheids- en turbulentieprofiel te zien. Ook al kan t.g.v. meetfouten de werkelijkheid plaatselijk iets anders zijn, wordt wel duidelijk dat het bruikbare meetvolume uiterst krap bemeten is voor de ingeschetste instrumenten. Daarbij realiseer men zich dat het te ijken instrument zelf de stroming ook nog zal verstoren. In principe zijn al deze effecten via de elders in dit rapport beschreven ijkprocedures "er uit geijkt". De gradiënten zijn echter zo groot dat men daar alleen enigermate zeker van kan zijn als instrumenten altijd in exact dezelfde positie worden opgesteld. Ter illustratie: een per ongeluk uitgevoerde ijking van acht cup-anemometers in een 8,5 cm te veel "stroomafwaarts" gelegen positie leverde een gemiddeld verschil op van  $1,66 \pm 0,49\%$  met de daarna uitgevoerde correcte ijking; een ruwe schatting aan de hand van figuur 4 doet een afwijking van ca. 1,8% (zelfde teken) verwachten.

#### IV. Mogelijkheden in de toekomst

##### 1. Uitgangssituatie

De K.N.M.I.-windtunnel wordt thans voornamelijk voor ijkingen gebruikt. Daarnaast wordt af en toe instrumenteel onderzoek uitgevoerd. De bezettingsgraad van de tunnel bedraagt ca. 50%. Een relatief gering deel van de noodzakelijke metingen kan, wegens de beperkte afmetingen van de tunnel, niet bij het K.N.M.I. worden uitgevoerd. Dergelijke metingen worden in het algemeen uitgevoerd in de lage-snelheids-tunnel LST 2x1,2 van het N.L.R.. Het K.N.M.I. betaalt daarvoor een uurvergoeding. Het N.L.R. bouwt thans een nieuwe windtunnel in de N.O.-polder (Duits Nederlandse Windtunnel, D.N.W.). Als deze in gebruik genomen wordt, zal de tunnel waar het K.N.M.I. thans gebruik van maakt, worden afgebroken. Vanaf dat moment (ca. 1984) zal het K.N.M.I. gebruik kunnen maken van de nieuwe N.L.R.-tunnel. Te verwachten is dat de uurvergoeding dan hoger zal zijn dan thans. Het N.L.R. heeft nog geen nieuwe tarieven vastgesteld. Enkele telefoongesprekken met Ir. C. Leijnse (N.L.R.) gaven echter toch enige indruk van de nieuwe tarieven. De in dit rapport gehanteerde schattingen zijn echter van schrijver dezes; het N.L.R. kan hieraan op geen enkele wijze worden gehouden.

De huidige K.N.M.I.-windtunnel voldoet redelijk, maar heeft enkele nadelen:

- de meetsectie is krap bemeten voor de te ijken instrumenten
- het ijken van grotere instrumenten, zoals sonische-anemometer, is onmogelijk
- de W.M.O. (1971) adviseert anemometer-ijkingen tot 50 m/s; met de huidige tunnel is maximaal 30 m/s mogelijk
- de thans bestaande windtunnelruimte is stromings-technisch niet optimaal; het is bovendien veelal onvermijdelijk dat tijdens metingen extra obstakels in de windtunnelruimte worden geplaatst
- het bedieningscomfort is gering
- de windtunnel is slecht bereikbaar vanuit I.N.S.A., vooral met instrumenten

Volledige uitbesteding van al het voorkomende windtunnelwerk zou,

rekening houdend met de besparing van  $\frac{1}{2}$  manjaar, ca. f 280.000,- per jaar aan huur en arbeidsloon kosten. Het lijkt dus zeker zinvol dat het K.N.M.I. over een eigen windtunnel beschikt. In de praktijk fungeert het K.N.M.I. als (secundaire) standaard voor windsnelheidsijkingen. Binnen de beschikbare mogelijkheden is het dus zaak te streven naar een optimaal functionerende windtunnel. In de volgende paragrafen wordt nagegaan welke mogelijkheden tot verbetering er zijn.

## 2. Verbeteringen van de bestaande windtunnel

Indien de tunnel nog geruime tijd in de huidige ruimte blijft staan, valt te overwegen enkele verbeteringen aan te brengen:

- verbeteren van de afdichting van de deur
- verbeteren van de trillingsdemping
- monteren van de bedieningsapparatuur in een zo compact mogelijk rek of paneel
- verwijderen van zoveel mogelijk obstakels uit de terugstroomruimte (Bradshaw en Pankhurst, 1964; Baynton, 1974/75; Feis, 1982)
- verhogen van de maximumsnelheid lijkt moeilijk uitvoerbaar: het is de vraag of plaatsen van een zwaardere motor technisch verantwoord is, en bovendien zou het bedieningscomfort bij hoge snelheden nauwelijks acceptabel zijn
- verbeteren van de bereikbaarheid lijkt alleen realiseerbaar door de tunnel te verplaatsen naar een geheel vrij te maken ruimte dichter bij I.N.S.A.; ook dan ware rekening te houden met bovenstaande overwegingen

## 3. Plaatsing bestaande windtunnel in nieuw te bouwen ruimte

Zoals reeds in de inleiding vermeld, wordt overwogen bij eventuele nieuwbouwplannen een nieuwe windtunnelruimte op te nemen. Zo wordt bijvoorbeeld thans gedacht aan een ruimte van 15 x 5 x 5 m (l,b,h). De bestaande windtunnel zou daarin kunnen worden geplaatst. De doorsnede van deze nieuwe ruimte ( $25 \text{ m}^2$ ) is ongeveer even groot als van de bestaande ruimte ( $24 \text{ m}^2$ ); de breedte is echter ongeveer 1,5 m kleiner. Dat betekent dat veel aandacht moet worden besteed aan de obstakelvrijheid van de terugstroomruimte; de nieuwe ruimte zou een minder vierkante doorsnede hebben dan de oude ruimte.



Zo moet bij voorkeur een bedieningskabine worden gebouwd buiten de eigenlijke tunnelruimte. Het bedieningscomfort zou daardoor tevens toenemen. Bovendien zal het misschien nodig zijn de nieuwe ruimte te voorzien van afrondingen en geleidingsprofielen. Met andere woorden, de windtunnelruimte zou uitsluitend moeten dienen als terugstroomruimte, en niet als thans ook worden gebruikt als zitplaats voor de operateur en als opslagruimte voor instrumenten. Aan de windtunnel zelf zullen bij deze optie geen belangrijke wijzigingen nodig zijn. De kosten vallen vrijwel geheel binnen de voor het gebouw te maken kosten. De voordelen van deze optie lijken me zodanig dat, in geval daadwerkelijk gebouwd zal worden, opname van een nieuwe windtunnelruimte wenselijk is. Bij een verstandige opzet zal de bereikbaarheid vanuit I.N.S.A. dan ook verbeterd kunnen worden.

#### 4. Bouw nieuwe windtunnel

De huidige windtunnelruimte laat plaatsing van een grotere windtunnel niet toe. De lengte (7.5 m) is daarbij de beperkende factor. In de geplande nieuwe ruimte (lengte 15 m) is een grotere tunnel echter wel mogelijk. In eerste instantie werd daarbij aan een omlooptunnel gedacht. Sykes (1977) beschrijft een omlooptunnel die met enkele wijzigingen aan onze wensen lijkt te voldoen. Toch ontstaat bij nadere beschouwing enige twijfel of de geringe contractieverhouding (1:2,2) voldoende is voor de gewenste turbulentiegraad van ca. 1% en een binnen ca. 1% homogene snelheidsverdeling. Meestal kiest men de contractieverhouding 1:6 à 1:12 (Pope, 1954; Bradshaw en Pankhurst, 1964; Metha en Bradshaw, 1979; Feis, 1982). Telefonisch overleg met Feis (1982) en nadere literatuurstudie (reeds genoemde auteurs) leerde dat een Eiffel-tunnel met gesloten meetsectie (analoog aan de bestaande tunnel) de beste kansen biedt. Feis (1982) acht een meetsectie van 1 x 1 x 1 m uitvoerbaar in de geplande windtunnelruimte, en wilde desgewenst een ontwerp maken, tegen "geringe kosten". Het benodigde motorvermogen kan worden geschat op 15 kW, wat geen al te grote problemen oplevert (max. snelheid 50 m/s). Een dergelijke windtunnel kan slechts aan de gestelde eisen voldoen als de terugstroomruimte zorgvuldig is afgewerkt en vrij is van obstakels. In appendix C wordt een aantal overwegingen gegeven m.b.t. het ontwerp van een windtunnelruimte.

Bij de besluitvorming omtrent eventuele nieuwbouw is een kosten-baten-analyse nodig; een globale raming is in een separate bijlage gegeven. Men realiseert zich dat een nauwkeurige schatting pas mogelijk is, als het ontwerp meer in detail bekend is. Voor deze globale schatting werd met Andringa overlegd. Gezien de kritische afmetingen van de bestaande tunnel, en de grote afhankelijkheid van het N.L.R. lijkt het gewenst te streven naar een eigen, grotere windtunnel. Behalve de kosten-baten-analyse speelt natuurlijk de absolute grootte van de benodigde investeringen een rol.

## V. Conclusies en aanbevelingen

1. De bestaande windtunnel is, marginaal, bruikbaar voor het ijken van cup-anemometers, propellervanen, trivanen en Cabauwvanen.
2. De invloed van de vulfactor is voor deze drie instrumenten verschillend; hoewel dat verschil in principe "er uit geijkt" wordt, is het af te raden verschillende instrumenten door elkaar te gebruiken.
3. De K.N.M.I.-windtunnel is slechts bruikbaar voor ijkdoeleinden als de instrumentposities nauwkeurig reproduceerbaar zijn.
4. Het ijken van grotere instrumenten dan bovengenoemde is in de K.N.M.I.-windtunnel niet mogelijk.
5. Het uitvoeren van experimenten met windsensoren, en vooral richtings-sensoren, is in de K.N.M.I.-windtunnel i.h.a. niet mogelijk.
6. Het is noodzakelijk dat van iedere stations-anemometer tenminste regelmatig wordt gecontroleerd of de ijking niet te veel afwijkt van de gehanteerde standaard-ijking; een meer volledige ijking verdient de voorkeur.
7. Het "hoogste" ijkpunt dient bij alle anemometer-ijkingen te liggen bij 30 m/s.
8. Indien het K.N.M.I. zou beschikken over de benodigde faciliteiten, zou het wenselijk zijn anemometers ook te ijken bij snelheden boven 30 m/s.
9. Het is noodzakelijk grotere zekerheid dan thans te verkrijgen omtrent de absolute nauwkeurigheid van door het K.N.M.I. gebruikte referentie-instrumenten.
10. Het is wenselijk dat het K.N.M.I. beschikt over een windtunnel met een meetsectie van ca. 1 x 1 x 1 m en een grootste bruikbare snelheid van ca. 40 m/s.
11. Indien niet binnen afzienbare termijn over een nieuwe windtunnelruimte zal kunnen worden beschikt, is het noodzakelijk de bestaande windtunnel en windtunnelruimte mechanisch en stromingstechniek te optimaliseren.
12. Het plaatsen van obstakels in een windtunnelruimte (Eiffel-type tunnel) dient achterwege te blijven.
13. Indien bouw van een nieuwe windtunnel niet mogelijk is, is het wenselijk de bestaande tunnel te verplaatsen naar een speciaal voor dat doel te bouwen of vrij te maken ruimte.
14. Een moeizaam transport van instrumenten van en naar de windtunnel heeft een negatieve invloed op de kwaliteit van de ijkingen.
15. Het is noodzakelijk bij een ijkinstallatie een gedetailleerd logboek bij te houden.

V. Referenties

- Baynton, H.W., 1974/75: The FOF Wind Tunnel. In: Atmospheric Technology. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Col., 100-104.
- Braak, C., 1942: Het klimaat van Nederland, D (vervolg) Wind. K.N.M.I.-Mededelingen en Verhandelingen 46, 9-31, 72-76.
- Bradshaw, P. and R.C. Pankhurst, 1964: The design of low-speed wind tunnels. In: Progress in Aeronautical Sciences, edited by D. Küchemann and L.H.G. Sterne, vol. 5, 1-69, Pergamon Press.
- Breevoort, H.H., 1975: Verbeteren van de bediening en de procedure voor anemometer-ijkingen voorzien van een standaardplug. K.N.M.I.-rapport, handgeschreven, in 2 delen, geen nummer.
- Deij, L.J.L., S.B. Hooghoudt, J.H.M. Latour, P.K. Peerlkamp en A.H. Stam, 1955: Het verdampingsonderzoek in de Rottegatpolder gedurende de jaren 1947 tot en met 1952. Versl. Med. Comm. Hydr. Onderz. T.N.O. No. 2.
- Dines, W.H., 1890: On the Variations of Pressure caused by the Wind blowing across the Mouth of a Tube. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., XVI, 208-213.
- Dines, W.H., 1892: Anemometer comparisons. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., XVIII, 165-185.
- Driedonks, A.G.M., 1974: Windsnelheidsijking in de K.N.M.I.-windtunnel. K.N.M.I.-rapport V-253.
- Driedonks, A.G.M., 1975: Windsnelheidsijking in de nieuwe opstelling van de K.N.M.I.-windtunnel. K.N.M.I.-rapport V-260.
- Driedonks, A.G.M., H. van Dop and W.H. Kohsiek, 1978: Meteorological observations on the 213 m mast at Cabauw in the Netherlands. Proc. 4th Symp. Meteor. Observations and Instrumentation, Denver, Amer. Meteor. Soc., 41-46.
- Feis, N., 1982: Persoonlijk gesprek.
- Gill, G.C., 1975: Development and use of the Gill UVW anemometer. Bound.-Layer Meteor., 8, 475-495.
- Hofman, C. en A. van Londen, 1983: IJking van trianen tegen het vleugelrad in de K.N.M.I. windtunnel. K.N.M.I.-rapport FM-83-5.
- Kaimal, J.C., and J.A. Businger, 1963: A continuous wave sonic anemometer-thermometer. J. Appl. Meteor., 2, 156-164.

- Metha, R.D. and P. Bradshaw, 1979: Design rules for small low speed wind tunnels. *Aeronautical Journal*, 83, 443-449.
- Mitsuta, Y., 1966: Sonic anemometer thermometer for general use. *J. Meteor. Soc. Japan*, 44, 12-24.
- Monna, W.A.A. and A.G.M. Driedonks, 1979: Experimental Data on the Dynamic Properties of Several Propeller Vanes. *J. Appl. Meteor.*, 18, 699-702.
- Oemraw, B., 1982/83: Stationsbeschrijving windwaarneming "stationsnaam". Serie K.N.M.I.-technische rapporten.
- Oost, W.A., 1983: The Pressure Anemometer - an instrument for adverse circumstances. Te publiceren in *J. Appl. Meteor.*
- Patterson, J., 1926: The Cup Anemometer. *Trans. Roy. Soc. Canada, Series III*, XX, 1-54.
- Pope, A., 1954: Wind-tunnel testing. John Wiley and Sons, Inc., New York-London, second edition, fourth printing, 1964.
- Robinson, T.R., 1846: Modification of Dr. Whewell's Anemometer for measuring the velocity of the Wind. *Brit. Assoc. Advancement Science, Sections*, Southampton, 1846, 111-112.
- Robinson, T.R., 1850: Description of an improved Anemometer for registering the Direction of the Wind, and the space which it traverses in given intervals of Time. *Trans. Roy. Irish Acad.*, 22, 155-178.
- Suomi, V.E., 1957: Sonic Anemometer. In: *Exploring the Atmosphere's First Mile*. Pergamon Press, New York, 1, 256-266.
- Rijkoort, P.J., 1952: Anemometer onderzoek; een vergelijking van de Robinson-anemometers, in gebruik bij het verdampingsonderzoek in de Rottegataspolder, met de Dines-anemograaf te De Bilt. K.N.M.I.-rapport R III-87.
- Rijkoort, P.J., 1954: Anemometer-onderzoek op de nieuwe toren van het K.N.M.I.. K.N.M.I.-rapport R III-128.
- Rijkoort, P.J., 1955: Comparison of wind speeds measured simultaneously by a Dines Anemograph and a Robinson Cup Anemometer in Fluctuating winds. *Meteor. Mag.*, 84, 137-140.
- Rijkoort, P.J., 1956: IJkingen van K.N.M.I.-rotatie dynamo anemometers uit de serie 011 en 002 in de windtunnel van het Nationaal Luchtvaart Laboratorium. K.N.M.I.-rapport R III-177.
- Sykes, D.M., 1977: A new Windtunnel for Industrial Aerodynamics. *J. Ind. Aerodynamics*, 2, 65-78.

- Vliet, J.G. van der, 1981: De invloed van de mast en de uithouders op de windmeting te Cabauw. K.N.M.I.-rapport W.R. 81-4.
- Wieringa, J., 1967: Evaluation and design of wind vanes. *J. Appl. Meteor.*, 6, 1114-1122.
- Wieringa, J., 1968: Nauwkeurigheid van anemometerijkingen in de K.N.M.I. windtunnel. K.N.M.I.-rapport V 211-VI.
- Wieringa, J., 1972: Tilt errors and precipitation effects in trivane measurements of turbulent fluxes over open water. *Bound.-Layer Meteor.*, 2, 406-426.
- W.M.O., 1971: Guide to meteorological instrument and observing practices, 4th ed., bijgewerkt tot 1976, chapter 6.

Appendix AWindtunnelijking t.b.v. het gebruik met cup-anemometers en trivanen

Uitgevoerd door Driedonks m.m.v. Van Londen in januari 1977.

Reden: terugplaatsing van de tunnel naar kamer 5, oude vleugel.

Geijkte combinaties:

- vleugelrad-anemometer Lambrecht 420543 met cup-anemometer type 018
- "nieuwe" Pitot-buis met trivaan

Er werden 4 cupanemometers en 3 trivanen gebruikt. Met elk van deze instrumenten werd een voorijking uitgevoerd in de K.N.M.I.-tunnel (met het genoemde referentie-instrument), gevolgd door een ijking in de lage-snelheids-tunnel van het N.L.R. (Schiltknecht als referentie-instrument). Tenslotte werd op het K.N.M.I. met elk instrument een naijking uitgevoerd. Voor elk instrument werd het gemiddelde van voor- en naijking berekend. Zo werd bij het N.L.R. bepaald welke windsnelheid behoort bij een aanwijzing van een instrument, en in de K.N.M.I.-tunnel welke aanwijzing het referentie-instrument daarbij geeft. Hieruit kan het verband worden berekend tussen de aanwijzing van het K.N.M.I.-referentie-instrument en de windsnelheid ter plaatse van het te ijken instrument.

Vleugelrad-anemometer met cup-anemometer

## K.N.M.I.-ijking

Gemeten werd de tijd  $t$ , nodig om een cup-anemometer een bepaald aantal pulsen (1024) te laten produceren, bij een aantal verschillende windsnelheden.

Daarbij werd tevens gemeten het door de vleugelrad-anemometer geproduceerde aantal pulsen  $P_t$  in die tijd  $t$ . Met lineaire regressie werd uit de meetpunten het verband gevonden tussen  $P_t$  en  $t$ , voor vier cup-anemometers:

$$P_t = \alpha \cdot t + \beta \quad (1)$$

## N.L.R.-ijking

Bij het N.L.R. werd op analoge wijze het verband bepaald tussen windsnelheid  $U$  in m/s en het aantal omwentelingen per seconde  $R$  van de cup-anemometer:

$$U = a \cdot R + b \quad (2)$$

Een cup-anemometer geeft 32 pulsen per omwenteling. Als  $P_v$  het aantal pulsen per seconde van de vleugelrad-anemometer is, volgt uit (1) en (2) de ijkformule voor de onderzochte combinatie:

$$U = \frac{a}{\beta} \cdot \frac{1024}{32} \cdot P_v + b - \alpha \cdot \frac{a}{\beta} \cdot \frac{1024}{32} \quad (3)$$

We nummeren de anemometers volgens het K.N.M.I.-codenummer, waarbij niet significante getallen zullen zijn weggelaten, bijv. 01.00.018.012 → 1812. De resultaten waren als volgt:

K.N.M.I.-voor-ijking (formule 1)

$$1806: P_t = 1,795 \cdot t + 1777,4$$

$$1808: P_t = 1,563 \cdot t + 1782,4$$

$$1812: P_t = 2,357 \cdot t + 1769,2$$

$$1820: P_t = 1,052 \cdot t + 1776,5$$

K.N.M.I.-na-ijking (formule 1)

$$1806: P_t = 1,853 \cdot t + 1787,6$$

$$1808: P_t = 1,292 \cdot t + 1789,7$$

$$1812: P_t = 2,368 \cdot t + 1779,8$$

$$1820: P_t = 0,797 \cdot t + 1787,0$$

K.N.M.I.-ijking gemiddeld (formule 1)

$$1806: P_t = 1,82 \cdot t + 1782,5$$

$$1808: P_t = 1,43 \cdot t + 1786,1$$

$$1812: P_t = 2,36 \cdot t + 1774,5$$

$$1820: P_t = 0,92 \cdot t + 1781,8$$

N.L.R.-ijking (formule 2)

$$1806: U = 1,945 \cdot R + 0,17$$

$$1808: U = 1,955 \cdot R + 0,13$$

$$1812: U = 1,946 \cdot R + 0,15$$

$$1820: U = 1,948 \cdot R + 0,13$$



K.N.M.I.-combinatie-ijking (formule 3)

$$1806: U = 0,03492 \cdot P_v + 0,11$$

$$1808: U = 0,03503 \cdot P_v + 0,08$$

$$1812: U = 0,03509 \cdot P_v + 0,07$$

$$1820: U = 0,03498 \cdot P_v + 0,10$$

Gemiddelde ijking vleugelrad-anemometer met cup-anemometer

$$U = (0,03501 \pm 0,00007) \cdot P_v + 0,09 \pm 0,02$$

"nieuwe" Pitot-buis met trivaan

K.N.M.I.-ijking

Gemeten werd de windsnelheid  $U_p$  in m/s met de Pitot-buis als functie van het aantal rotaties per seconde  $R$  van de propeller, bij verschillende windsnelheden. Met lineaire regressie werd uit de meetpunten het verband gevonden tussen  $U_p$  en  $R$ , voor drie trivanen:

$$U_p = \gamma \cdot R + \delta \quad (4)$$

De windsnelheid  $U_p$ , zoals gemeten met de Pitot-buis werd berekend uit de relatie

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_p^2 \quad (5)$$

waarin:  $\Delta P$  is drukverschil van de Pitot-buis in  $N/m^2$

$\rho$  is dichtheid van lucht in  $kg/m^3$

$U_p$  is windsnelheid in m/s

De dichtheid  $\rho$  is afhankelijk van temperatuur en druk, en wordt gevonden uit

$$\rho = \frac{P}{2,87 \cdot T} \quad (6)$$

waarin:  $P$  is atmosferische druk in mbar

$T$  is luchttemperatuur in K

## N.L.R.-ijking

Gemeten werd de windsnelheid  $U$  in m/s als functie van het aantal rotaties per seconde  $R$  van de propeller, bij verschillende windsnelheden. Met lineaire regressie werd uit de meetpunten het verband gevonden tussen  $U$  en  $R$ , voor drie trivanen:

$$U = c \cdot R + d \quad (7)$$

Uit (6) en (7) volgt de ijkformule voor de onderzochte combinatie:

$$U = \frac{c}{\gamma} \cdot U_p + d - \delta \cdot \frac{c}{\gamma} \quad (8)$$

We nummeren de trivanen volgens het volgnummer uit het K.N.M.I.-codenummer. De resultaten waren als volgt:

## K.N.M.I.-voor-ijking (formule 4)

$$2: U_p = 1,8718 \cdot R + 0,066$$

$$4: U_p = 2,0639 \cdot R + 0,005$$

$$5: U_p = 1,7901 \cdot R + 0,035$$

## K.N.M.I.-na-ijking (formule 4)

$$2: U_p = 1,8716 \cdot R + 0,089$$

$$4: U_p = 2,0737 \cdot R - 0,042$$

$$5: U_p = 1,7793 \cdot R + 0,051$$

## K.N.M.I.-ijking gemiddeld (formule 4)

$$2: U_p = 1,8717 \cdot R + 0,078$$

$$4: U_p = 2,0688 \cdot R - 0,019$$

$$5: U_p = 1,7847 \cdot R + 0,043$$

## N.L.R.-ijking (formule 7)

$$2: U = 1,8642 \cdot R + 0,083$$

$$4: U = 2,0536 \cdot R + 0,073$$

$$5: U = 1,7795 \cdot R + 0,034$$

K.N.M.I.-combinatie-ijking (formule 8)

$$2: U = 0,9960.U_p + 0,0053$$

$$4: U = 0,9927.U_p + 0,0919$$

$$5: U = 0,9971.U_p - 0,0089$$

Gemiddelde ijking Pitot-buis met tri vaan

$$U = (0,995 \pm 0,002).U_p + 0,03 \pm 0,05$$

Appendix BWindtunnelijking t.b.v het gebruik met propellervanen

Uitgevoerd door Monna m.m.v. Van Londen medio 1979.

Reden: aanschaf propellervanen.

Geijkte combinatie:

- vleugelrad-anemometer Lambrecht 420543 met propellervaan type Gill 8002 D

Er werden 3 propellervanen gebruikt. Met elk instrument werd een voorijking uitgevoerd in de K.N.M.I.-tunnel, met de vleugelrad-anemometer als referentie-instrument, gevolgd door een ijking in de lage-snelheidstunnel van het N.L.R. (Schiltknecht als referentie-instrument). Tenslotte werd op het K.N.M.I. met elk instrument een naijking uitgevoerd. Voor elk instrument werd het gemiddelde van voor- en naijking berekend. Zo werd bij het N.L.R. bepaald welke windsnelheid behoort bij een aanwijzing van een instrument, en in de K.N.M.I.-tunnel welke aanwijzing het referentie-instrument daarbij geeft. Hieruit kan het verband worden berekend tussen de aanwijzing van het K.N.M.I.-referentie-instrument en de windsnelheid ter plaatse van het te ijken instrument.

## K.N.M.I.-ijking

Bij een aantal verschillende windsnelheden werd steeds het aantal pulsen per seconde  $P_v$  van de vleugelrad-anemometer gemeten, en het bijbehorende aantal pulsen per seconde  $P_p$  van de propeller. Met lineaire regressie werd voor elk van de propellers het verband gevonden tussen  $P_v$  en  $P_p$ :

$$P_v = \epsilon \cdot P_p + \zeta \quad (9)$$

## N.L.R.-ijking

Bij het N.L.R. werd op analoge wijze het verband bepaald tussen windsnelheid  $U$  in m/s en het aantal pulsen per seconde  $P_p$  van de propeller:

$$U = e \cdot P_p + f \quad (10)$$

Uit (9) en (10) volgt de ijkformule van de onderzochte combinatie:

$$U = \frac{e}{\epsilon} \cdot P_v + f - \zeta \cdot \frac{e}{\epsilon} \quad (11)$$

We nummeren de propellervanen volgens het volgnummer uit het K.N.M.I.-codenummer. De resultaten waren als volgt:

K.N.M.I.-vooring (formule 9)

$$7: P_v = 1,3848 \cdot P_p - 3,4108$$

$$8: P_v = 1,3817 \cdot P_p - 3,3949$$

$$9: P_v = 1,3782 \cdot P_p - 3,7173$$

K.N.M.I.-naijing (formule 9)

$$7: P_v = 1,3775 \cdot P_p - 3,7308$$

$$8: P_v = 1,3746 \cdot P_p - 3,1209$$

$$9: P_v = 1,3709 \cdot P_p - 3,8364$$

K.N.M.I.-ijking gemiddeld (formule 9)

$$7: P_v = 1,3811 \cdot P_p - 3,5708$$

$$8: P_v = 1,3781 \cdot P_p - 3,2579$$

$$9: P_v = 1,3746 \cdot P_p - 3,7768$$

N.L.R.-ijking (formule 10)

$$7: U = 0,050179 \cdot P_p + 0,11$$

$$8: U = 0,050211 \cdot P_p + 0,09$$

$$9: U = 0,049980 \cdot P_p + 0,09$$

K.N.M.I.-combinatie-ijking (formule 11)

$$7: U = 0,036332 \cdot P_v + 0,24$$

$$8: U = 0,036434 \cdot P_v + 0,21$$

$$9: U = 0,036361 \cdot P_v + 0,22$$

Gemiddelde ijking vleugelrad-anemometer met propellervaan

$$U = (0,03638 \pm 0,00005) \cdot P_v + 0,22 \pm 0,02$$

Appendix COntwerp-overwegingen voor een windtunnelruimte

Een goed ontworpen windtunnelruimte (terugstroomruimte) is vooral van belang als een open tunnel van het Eiffel-type wordt gebouwd. Hieronder wordt een aantal punten genoemd die daarbij de aandacht verdienen. Deze lijst is niet volledig en geeft soms alleen aan dat bepaalde beslissingen moeten worden genomen, veelal nog vóór het gebouw gebouwd wordt. Gedacht wordt aan een tunnel met een meetsectie van 1 x 1 x 1 m, maximum snelheid 50 m/s.

- afmeting tenminste 5 x 5 x 15 m
- bedieningsruimte buiten de tunnelruimte
- gladde afwerking van de wanden, ook bij deuren, ramen, verlichting, verwarming; welke oneffenheden zijn nog acceptabel?
- goede warmte- en geluidsisolatie, ook naar de bedieningsruimte
- luchtdicht sluitende deuren en ramen
- voldoende grote deuren, zowel voor toegang met instrumenten als voor de bouw van de tunnel
- aangrenzende ruimte om instrumenten op te slaan en opstellingen te prepareren
- deuren gemakkelijk te openen met kwetsbare instrumenten in de hand; mogelijk elektrische schuifdeuren
- overwegen of speciale vloerconstructie nodig is i.v.m. trilling van motor van tunnel
- propeller niet dwars voor bedieningsruimte; onbreekbaar glas in wand bedieningsruimte
- uitzicht vanuit de bedieningsruimte op de meetsectie
- voldoende stevige wand bij uitblaasopening; geen deur tegenover uitblaasopening
- verwijderbare geleideschoepen
- aandacht voor veiligheid bij draaiende motor
- bedieningsruimte bereikbaar buiten tunnelruimte om