

4 OKT. 1968

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

Verslag V 211-VI

J. Wieringa

NAUWKEURIGHEID VAN ANEMOMETRIJKINGEN
IN DE K.N.M.I. WINDTUNNEL

551.508.54

De Bilt, augustus 1968.

Kon. Ned. Meteor. Inst.
De Bilt

Publikatienummer: Verslag V 211-VI.

Alle rechten voorbehouden

Nadruk zonder toestemming van het K.N.M.I. is verboden

Aanhalingen slechts met toestemming van het K.N.M.I.

1. Inleiding

Op 3 en 4 november 1966 ijkte ir. J.H. Rietman een drietal KNMI-anemometers in de windtunnel van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (N.L.R.) te Amsterdam. Omdat een van de nieuw ontwikkelde anemometertypen (016) niet tijdig voor die ijking beschikbaar was geweest, heeft ir. Rietman de op het NLR geijkte exemplaren in de KNMI-windtunnel vergeleken met dit nieuwe 016-type.

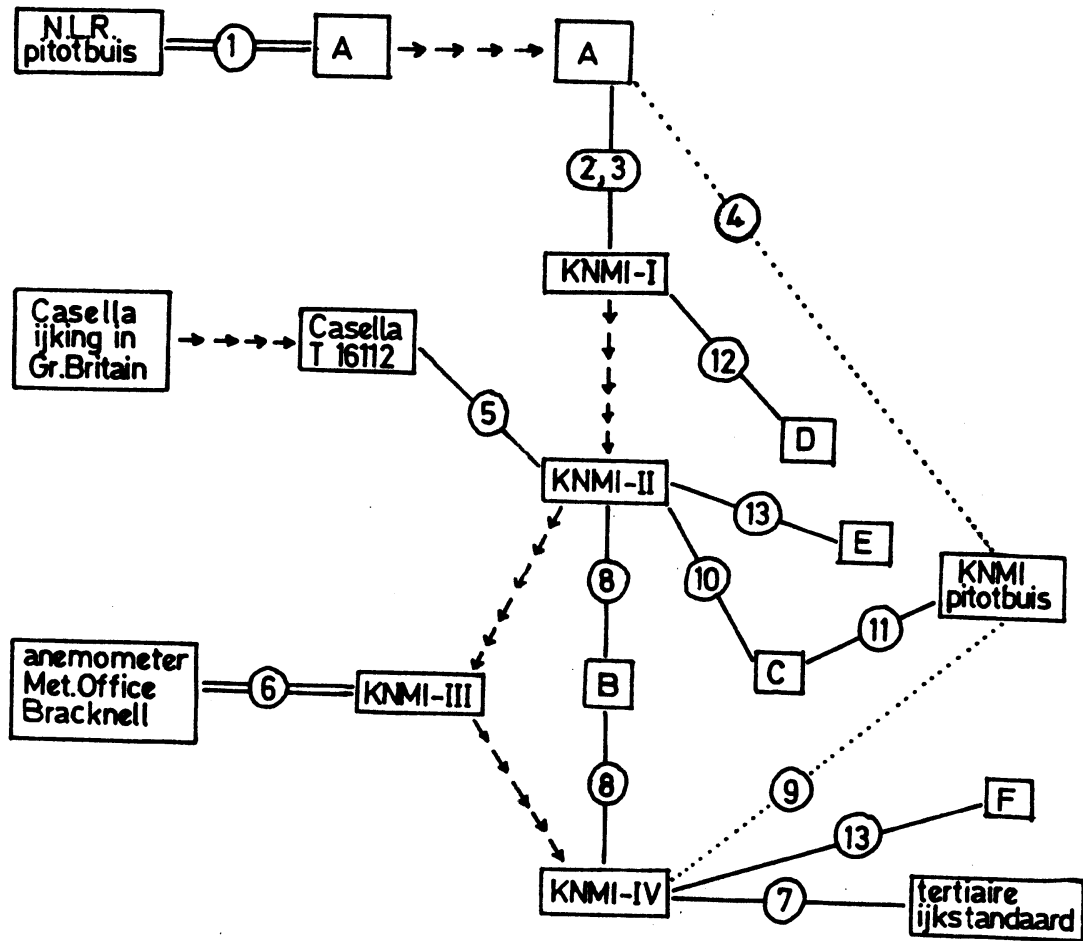
In het kader van het verdampingsonderzoek Flevo 1967 werden turbulentiemetingen gedaan met Aeolivanen, waarvan de propellers in de KNMI-tunnel geijkt werden tegen de pitotbuis; de windsnelheid overeenkomende met de pitotbuis-aanwijzing was echter onvoldoende bekend. Derhalve werden de ijkings van ir. Rietman numeriek uitgewerkt, en vervolgens werden van januari t/m mei 1968 op nauwkeurige wijze door de Heer W. Hovius de verdere benodigde metingen in de KNMI-tunnel uitgevoerd. Twee fabrieksnieuwe buiten het KNMI geconstrueerde anemometers, Casella-Sheppard en Lambrecht 1440, konden dankzij de medewerking van drs. L.A. Conrads (R.U. Utrecht) mede onderzocht worden. Tabel 10 en 11 werden berekend door de Heer O.A.J. Eisses, tabel 7 en 13 door de Heren H.W. de Froe en A. Steenhuisen.

Aangezien geen Nederlandse windtunnel bruikbaar bleek voor ijking bij zeer lage windsnelheden, werd op 21 maart 1968 te Bracknell, Engeland, de KNMI-vleugelradanemometer geijkt. Hierbij is grote dank verschuldigd aan dr. N.E. Rider voor zijn toestemming, en aan Mr. G.E.W. Hartley en Mr. B.R. Kiff voor hun hulp bij de meting.

Een aantal corrigerende opmerkingen van prof.dr. F.H. Schmidt en dr. C. Levert zijn zeer ten goede gekomen aan de begrijpelijkheid en de exactheid van dit verslag.

Fig. 1.

BLOKSCHAMA IJKONDERZOEK KN.M.I.-WINDTUNNEL



- Uking in KNMI - windtunnel
- ==== IJking in andere windtunnel
- Onbetrouwbare ijking
- Anemometertransport
- ① t/m ⑬ Nummer resultatentabel (blz. 29 t/m 34)
- KNMI-I t/m IV Lambrecht 1405a vleugelradanemometer
- A t/m F Groepen cupanemometers

2. Opzet van het onderzoek

De KNMI-windtunnel is een Eiffel-tunnel met gesloten meetruimte; het werkgebied heeft een doorsnede van 0,4 m (zie fig. 4). De ijkinstrumenten, pitotbuis en vleugelrad, worden gemonteerd aan de loefzijde der meetruimte nabij de hovenrand van het uitstrotingskanaal. De te ijken cupanemometer wordt opgesteld aan de lijzijde der meetruimte, met de cupnaaf ter hoogte van het midden der tunneldoorsnede.

De pitotbuis wordt afgelezen m.b.v. een alcohol-differentiaalmanometer met hellingen 1:25, 1:10 en 1:5. De vleugelradanemometer, Lambrecht 1405a/31973 (zie fig. 6), heeft op zijn as een wijzerplaat, gecalibreerd in m/min; de wijzer is gekoppeld met een ingebouwd uurwerk, dat een minuut na het overhalen van een hefboompje de wijzer blokkeert, zodat een stopwatch overbodig is. De rotatiesnelheden der onderzochte cupanemometers werden bepaald door de output in pulsen om te zetten en deze pulsen elektronisch te tellen gedurende 10 sec. of langer, afhankelijk van de windsnelheid en het aantal pulsen dat per omwenteling gegenereerd werd. Bij iedere windsnelheid werden minstens twee metingen gedaan en het gemiddelde genoteerd; het verschil tussen twee opeenvolgende ijkmetingen bij gelijkblijvende windtunneltoestand bedroeg gemiddeld 0,1%.

Alle op het KNMI en elders verrichte vergelijkende metingen zijn schematisch aangegeven in het blokschema fig. 1. Dit schema toont aan, dat bij vergelijking van ijkningen op het KNMI met elders uitgevoerde ijkningen de grootste handicap is, hoe men kan nagaan of instrumenten tijdens het transport ontregeld zijn. Bij het transport naar Bracknell, in de loop van dit onderzoek, is op mogelijke ontregeling controle uitgeoefend (zie §7). Een dergelijke controle is helaas niet aanwezig bij de transporten vóór de aanvang van dit onderzoek, te weten:

- 1) het transport van cupanemometergroep A naar het N.L.R. in november 1966;
 - 2) het transport van het vleugelrad naar Delft op 16 maart 1967.
- In het blokschema zijn de vleugelradijkningen voor en na de genoemde transporten van het vleugelrad afzonderlijk genoteerd als KNMI-I ...KNMI-IV.

Het voornaamste gestelde doel was het bepalen van omrekenfactoren

voor de KNMI-tunnel, met behulp waarvan uit de aanwijzing van pitotbuis of vleugelrad de "ware" windsnelheid rondom een in de tunnel opgestelde cupanemometer van gemiddelde afmetingen zou kunnen worden berekend. Verder werd de "mate van lineariteit" van de relatie windsnelheid - cuprotatiesnelheid voor verschillende anemometertypen onderzocht. Het was niet de bedoeling om van ieder anemometertype voldoende afzonderlijke exemplaren te ijkten om een statistisch verantwoorde schatting te kunnen doen van de gemiddelde ijking van een type en de spreiding om deze ijking; de berekende ijkningen mogen dan ook niet als representatief beschouwd worden. Een uitzondering hierop is de gemiddelde ijking van het type KNMI-016-XVI (Vlaardingen-anemometer), van welk type in de loop van het onderzoek voldoende exemplaren werden geijkt om een enigszins betrouwbare schatting te kunnen wagen.

Numeriek werden de uitwerkingsmethoden en de rekennauwkeurigheid bepaald door de volgende experimentele eis: via een ijking, die om praktische redenen lineair dient te zijn, zouden uit de rotatiesnelheid van cupanemometers windsnelheden tot ongeveer 20 m/s bepaald moeten worden met een nauwkeurigheid van 0,1 m/s.

Stel nu, dat een voldoende groot aantal ijkmetingen verkregen is om toevalsafwijkingen in deze metingen te kunnen uitmiddelen, dan kan een "ideale" ijkcurve berekend worden welke nauwkeurig het verband tussen cuprotatiesnelheid en windsnelheid aangeeft. Het doel is dan een ijkrechte te vinden, die over een zo groot mogelijk snelheidsgebied niet meer dan 0,1 m/s van de ideale ijkcurve afwijkt; binnen dit snelheidsgebied beschouwen we de anemometerijking dan als lineair.

Buiten dit lineaire gebied kan men de gewenste nauwkeurigheid alleen verkrijgen via rechtstreeks gebruik van de "ideale" kromme ijking; soms wordt hiertoe de anemometer-recorder van een speciale recorderschaal en/of speciaal registratiepapier voorzien.

3. Gebruikte afkortingen

- u_{nlr} = gecorrigeerde ("ware") windsnelheid NLR-windtunnel
- u_{mo} = gecorrigeerde ("ware") windsnelheid in windtunnel Met. Off. Bracknell
- n = wijzerplataflezing KNMI-vleugelrad na 1 minuut rotatie

- R = aantal omwentelingen van anemometercups per seconde
u = windsnelheid, berekend uit R volgens lineaire ijking
a = richtingscoëfficiënt der lineaire ijking (helling)
u₀ = nulsnelheid, d.i. waarde der lineaire ijking voor R = 0
u_s = aanloopsnelheid, d.i. laagste windsnelheid welke stilstaande cups in beweging brengt
- u_{p1} = aanwijzing pitotbuis KNMI-tunnel via 1:25 manometer
u_{p2} = " " " " " 1:10 "
u_{p3} = " " " " " 1:5 "
u_{pk} = 0,984 u_{p1} + 0,03 m/s
u_c = (0,01696 n + 0,10) m/s, d.i. vleugelrad-ijkingen KNMI-I en KNMI-II
u_k = (0,01684 n + 0,12) m/s, d.i. vleugelrad-ijking KNMI-IV
u_t = KNMI-tunnelsnelheid ter hoogte van anemometercups, gemeten met vleugelrad (d.w.z. u_c of u_k) dan wel pitotbuis (d.w.z. u_{pk})
du = 100 (u_t - u_y).

Alle windsnelheden worden genoteerd in m/s. Tussen haakjes in de tabellen voorkomende grootheden zijn niet gebruikt bij de berekening der lineaire ijking.

4. Uitwerkingsmethode voor de metingen

De symmetrische bouw van een vleugelrad-anemometer maakt het mogelijk om zijn aerodynamische eigenschappen theoretisch te onderzoeken; zie b.v. [1]. Voor dit anemometertype kan men een vrijwel lineaire relatie verwachten tussen toerental en windsnelheid — ook al verdient toetsing hiervan aanbeveling.

Een cupanemometer is vanwege zijn asymmetrie nauwelijks toegankelijk voor aerodynamische studie, en lineariteit der R-u_t relatie is minder waarschijnlijk. Desalniettemin blijken de ijkingskrommen van de meeste cupanemometers bij niet te lage windsnelheden een hoge graad van lineariteit te bezitten. Nu biedt een lineaire benadering van de ideale ijkingskrommen de volgende praktische voordelen:

- a) Bij constructie van een geijkte schaal voor een recorder, die de anemometeroutput moet verwerken, wordt het resultaat nauwkeuriger als de anemometeroutput als een lineaire functie der windsnelheid beschouwd kan worden.

Men hoeft dan nl. bij het uitmeten der schaal alleen rekening te houden met de lineariteitsafwijking der recorder.

b) Bij uittrekken van stroken en verwerking van windponsgegevens leidt een lineaire ijking tot eenvoudig en dus betrouwbaarder rekenwerk.

Een lineaire ijkingskromme heeft voor een cupanemometer de vorm $u_y = aR + u_0$; de factor a is de richtingscoëfficiënt (helling) van de ijking. Het verwaarlozen van de nulsnelheid u_0 bij oude ijkingsen, zoals de klassieke KNMI-omrekenfactor "47 kt = 50 Hz" (=12,5 R voor de dynamo-anemometer), is afkeurenswaardig omdat deze geforceerde legging van de ijklijn door de oorsprong ($u = R = 0$) noodzakelijkerwijze leidt tot foutieve schatting van de windsnelheid bij zowel lage als hoge windsnelheden; voor de oude stationsanemometer O11-XII, welke een hoge u_0 heeft, is de grootteorde van deze fout in de windsnelheidsschatting 1 kt aan de beide uiteinden van de schaal (zie [2]). Een lineaire ijking moet bepaald worden door twee grootheden, hetzij helling en nulsnelheid, hetzij twee gemeten ijkpunten. Het is principieel onjuist om één punt van een recorder te ijken en aan te nemen, dat de oorsprong het andere punt is dat de ijklijn bepaalt; twee metingen, b.v. één bij ongeveer 5 m/s en één bij ongeveer 20 m/s, zijn noodzakelijk. Correcties op metingen welke zijn uitgewerkt m.b.v. een ijkingslijn, die door de oorsprong gelegd werd, kunnen hier niet behandeld worden aangezien, zoals vermeld in § 2, geen representatieve lineaire ijkingsen beschikbaar zijn. Vanzelfsprekend zijn geen correcties nodig voor metingen, welke zijn uitgewerkt m.b.v. een uittrekschaal die aangepast is aan een individuele windtunnelijking van anemometer en recorder, zoals nu gebeurt op het KNMI, afdeling Klimatologie. De laatstgenoemde werkwijze eist echter veel administratie, zeer veel ijkwerk en leidt desondanks tot moeilijkheden wanneer een anemometer of recorder wordt vervangen of hersteld zonder dat een nieuwe ijking is uitgevoerd.

Bij de uitwerking van metingen werd de output van een cupanemometer steeds omgerekend tot omwentelingen/s, d.i. R, ongeacht het per omwenteling geproduceerde aantal pulsen; de metingen met de pitotbuismanometer werden volgens de bij de KNMI-tunnel aanwezige ijktabellen omgezet in m/s. Vervolgens werd uit de output van het wél geijkte instrument van de vergelijkende meting de windsnelheid ter hoogte

van de anemometercups, u_t , bepaald. Daarna werd de ijking van het niet geijkte instrument berekend uit alle metingen, welke niet om experimentele redenen afvielen. De experimentele redenen om een meting a priori buiten beschouwing te laten waren:

- a) Voor de meeste anemometers kunnen beneden 2 m/s wrijvings-effecten leiden tot afwijkingen van de lineariteit; nergens is dus een meting beneden 2 m/s gebruikt.
- b) In bepaalde windtunnels zijn bepaalde snelheidsgebieden om stromingstechnische redenen onbetrouwbaar. Voor de NLR-tunnel was dit het meetgebied beneden 7 m/s; voor de KNMI-tunnel bleek het meetgebied boven 14 m/s onbetrouwbaar.

Als "optimale" ijking werd beschouwd die lineaire regressieformule $u_y = aR + u_0$, waarbij over een zo groot mogelijk snelheidsgebied $|du| < 10$ was. Ter bepaling hiervan werd uit alle experimenteel toelaatbare metingen m.b.v. kleinste kwadratenmethode de lineaire regressie tussen u_t en de output van het niet geijkte instrument berekend; hierna werd het verschil du bepaald tussen u_t en de windsnelheid u_y , welke volgde uit de output van het niet geijkte instrument volgens de zojuist berekende regressieformule. Een duidelijke eenzijdige trend in du , b.v. van positief naar negatief bij toenemende u_t , duidde dan op een lineariteitsafwijking van het niet geijkte instrument; doorgaans lag deze afwijking aan de benedenzijde van het beschouwde snelheidsgebied. Herberekening van de regressieformule met weglating van deze niet-lineaire metingen aan de uiteinden leidde dan tot een duidelijke verbetering van de aanpassing der ijking in het wél-lineaire gedeelte. Van een verbetering werd gesproken als de du -waarden kleiner waren en geen duidelijke trend in het teken meer vertoonden. In een of twee gevallen (zie b.v. tabel 10, 016-XVI-07, 11,28 m/s) werd bovendien een meting weggelaten, omdat hij in vergelijking met andere metingen in hetzelfde snelheidsgebied een ongewoon grote du had, waarschijnlijk dus een meet- of opschrijffout (zie [3]). Ook bij weglating van deze meet- of schrijffouten trad een duidelijke verbetering in het totale du -beeld op.

De op deze wijze berekende optimale ijking vertegenwoordigt dus op lineaire wijze een aantal experimenteel aanvaardbare metingen over een zo breed mogelijk snelheidsgebied, met afwijkingen die niet größer zijn dan 0,1 m/s ($|du| = 10$) in het lineaire gebied.

Alle uitgevoerde betrouwbare metingen, ook die buiten het lineariteitsgebied, zijn in dit verslag opgenomen, genoteerd als u_t van het geijkte instrument en $du = 100 (u_t - u_y)$ van het ongeijkte instrument, waarbij u_y de optimale ijking is. De tussen haakjes geplaatste metingen zijn niet gebruikt bij berekening van de optimale ijking. Slechts waar nodig zijn de tabellen uitgebreid met andere grootheden.

5. NLR-ijkingen en anemometergroep A

De lage-snelheidswindtunnel (no. 4) van het NLR kan maximaal een windsnelheid van 40 m/s bereiken; deze wordt gemeten met een pitotbuis, met een opgegeven meetnauwkeurigheid van $\pm 0,05$ m/s. De open meetruimte heeft een doorsnede van 1,5 m, en schijnt stromingsafwijkingen te vertonen bij windsnelheden beneden 5 m/s; wegens de vaagheid der informatie hierover heb ik de benedenste bruikbaarheidsgrens op 7 m/s gesteld.

Op het NLR werd anemometergroep A geijkt, bestaande uit drie KNMI-model cupanemometers. — De KNMI-model anemometers zullen hier worden aangeduid met hun KNMI-codenummer, met weglating van de eerste vier cijfers, b.v. $\phi\phi\phi\phi.011-XII$. —

Hiervan werden de volgende ijkingen bepaald (zie tabel 1) in de NLR-tunnel:

011-XII : $u_y = (1.993 R + 0,27)m/s$ (dynamo-anemometer met metalen cups)

015-XIV : $u_y = (2.052 R + 0,08)m/s$ (wit pvc huis, araldit cups)

016-p : $u_y = (1.977 R + 0,18)m/s$ (prototype van de 016-XVI-anemometr).

Uit de du -waarden in tabel 1 blijkt, dat de 011-XII zowel aan de bovenzijde als aan de benedenzijde van het ijkgebied een grote lineariteitsafwijking vertoont; i.h.b. de grote afwijkingen beneden 9 m/s leiden tot ongeschiktheid van deze anemometer voor de ijking der KNMI-tunnel, waarvan immers het snelheidsbereik slechts 17 m/s is: meer dan de helft van het KNMI-tunnel bereik valt samen met het non-lineariteitsgebied van deze 011-XII.

Tabel 2 geeft de resultaten van vergelijking van 015-XIV en 016-p met het vleugelrad in de KNMI-tunnel. De rechtstreekse aanwijzing van het vleugelrad, n , vertoont een afwijking van de NLR-ijking der anemometers; deze afwijking neemt met toenemende windsnelheid regelmatig toe tot aan de tunnelsnelheid van 14 m/s, en blijft daarboven constant of neemt weer af.

Daar volgens tabel 1 beide anemometers tot ongeveer 30 m/s lineair zijn, moet geconcludeerd worden dat boven 14 m/s een afwijking optreedt in de lineariteit van het verband tussen de aanwijzing van het vleugelrad aan de loefzijde van de meetruimte en de snelheid ter hoogte van de cupanemometer aan de lijzijde van de meetruimte. Een dergelijk stromingseffect kan van zoveel slecht te analyseren factoren afhangen, dat eenvoudige correctie onwaarschijnlijk is. Met andere woorden, de KNMI-tunnel is slecht bruikbaar voor het bepalen van nauwkeurige lineaire ijkings bij hogere windsnelheden dan 14 m/s.

De optimale regressielijn, berekend uit de gecombineerde metingen van 016-p en 015-XIV, geeft nu beneden 14 m/s voor de KNMI-tunnel het verband tussen n en de werkelijke (NLR)windsnelheid ter hoogte van een cupanemometer in standaardopstelling aan de lijzijde der meetruimte, mits de afmetingen van deze cupanemometer overeenstemmen met die van 015-XIV en 016-p. Deze vleugelrad-ijking zal verder als u_c genoteerd worden en is in fig. 1 aangegeven als KNMI-I. De regressieformule is:

$$u_c = (0.01696 n + 0,10) \text{ m/s} = (1.018 n + 6) \text{ m/min}$$

Hierbij verdient vermelding, dat de firma Lambrecht bij levering der vleugelrad-anemometer als ijkings opgaf: $u = (0.995 n + 10) \text{ m/min}$; dergelijke fabrieksspecificaties gelden gewoonlijk voor gebruik in een zeer grote obstakelvrije tunnel.

Tegelijk met de in tabel 2 vermelde metingen zijn ook vergelijkende metingen van het vleugelrad en de 011-XII uitgevoerd; de resultaten zijn vermeld in tabel 3. De hieruit verkregen optimale ijkings werd berekend uit de windsnelheden boven 4 m/s; de reden hiervan was, dat bij aanloopproeven met dit type anemometer een gemiddelde aanloop-snelheid $u_g = 1.8 \text{ m/s}$ gemeten werd, zodat de metingen bij lage windsnelheid onbetrouwbaar geacht werden. De uit tabel 3 berekende optimale ijkings was: $u_y' = (2.024 R + 0,47) \text{ m/s}$; dit is een hellingsafwijking van 1,5% en een nulsnelheidsafwijking van 0,20 m/s voor twee ijkings van één en dezelfde anemometer. Aangezien elders (zie § 10) bleek, dat verschillende anemometers van eenzelfde type, 016-XVI, onderlinge ijkingsverschillen hadden waarvan de standaarddeviatie voor de helling 0,5% en voor de nulsnelheid 0,03 m/s was, is van deze twee 011-XII-ijkings óf de betrouwbaarheid onvoldoende óf de vergelijking niet geheel te rechtvaardigen. Aangezien de NLR-ijkings (tabel 1) van 9 m/s tot 25 m/s liep, en de KNMI-ijkings (tabel 3) berekend is van 5 m/s tot 14 m/s, hebben de beide ijkings

slechts een klein snelheidsgebied gemeen, waarin drie of vier ijkpunten liggen. Voorts blijkt uit de tabellen een sterke nonlineairiteit van de uiteinden der ijking van deze anemometer; onvergelykbaarheid van de twee ijkingen is dus de meest waarschijnlijke verklaring.

Voor verdere informatie over het anemometertype 011-XII leek het wenselijk de in [2] genoemde ijkingen van dit anemometertype, uitgevoerd op het NLR in 1955 en 1956, te vergelijken.

Indien men aanneemt, dat deze ijkingen destijds vergeleken zijn met de klassieke $47 \text{ kt} = 50 \text{ Hz}$ ijking—hierover zijn geen gegevens beschikbaar—, dan geven deze oude ijkingen tussen 5 en 22 m/s als gemiddeld resultaat: $u_y' = (2.05 R + 1,1) \text{ m/s}$. De verschillen tussen de 011-XII-ijkingen u_y , u_y' en u_y'' zijn van dien aard, dat het m.i. zinloos is om hierop verder in te gaan, althans in het kader van dit onderzoek, zolang geen recentere metingen dan die uit november 1966 beschikbaar zijn.

Anemometergroep A werd in november 1966 eveneens met de pitotbuisaanwijzing van de KNMI-tunnel vergeleken: zie tabel 4. De ijkingen van 011-XII zijn in deze tabel niet opgenomen wegens het ontbreken van een betrouwbare u_y -ijking van deze anemometer. Helaas zijn deze resultaten niet gespecificeerd naar manometerhelling, en zijn ze allen tot 0,01 m/s nauwkeurig opgegeven, hoewel de 1:5 manometertabel, die voor de hoogste snelheden ($> 16 \text{ m/s}$) noodzakelijkerwijze gebruikt moet zijn, slechts tot 0,1 m/s nauwkeurig is opgegeven. Nadere bestudering van tabel 4 toont een grote systematische afwijking tussen pitotbuis en 015-XIV-meting, terwijl de 016-p, die technisch gezien weinig van de 015-XIV verschilt, een vrij goede overeenstemming met de pitotbuis toont. Op grond van deze metingen kan dus geen duidelijke uitspraak over de pitotbuis-ijking worden gedaan.

Een drietal ijkingen van de 016-XVI-anemometer (anemometergroep D), uitgevoerd in november 1966, zal verderop nog ter sprake komen (§ 10).

6. Casella-ijking

Wegens het reeds genoemde vleugelrad-transport op 16 maart 1967 bestond er onzekerheid over de vleugelrad-ijking vanaf die datum. Derhalve werd van drs. Conrads een Casella anemometer geleend (Sheppard-type, T 16112-2/32/c), welke zojuist uit Engeland ontvangen was met

bijbehorende ijkgrafiek. Deze grafiek bleek boven 4 m/s binnen nauwkeurigheidsgrenzen van 0,01 m/s overeen te stemmen met de lineaire ijking: $u_y = (0.03853 R + 0,50)$ m/s. De anemometer had in vergelijking met de KNMI-modellen 015 en 016 kleinere cups en een groter huis; een vergelijking der ijkningen is dus niet geheel zuiver vanwege tunnelvullings-effecten.

De in februari 1968 gedane vergelijkende metingen zijn in tabel 5 gegeven. Bij aannahme van de u_y der Casella-anemometer als ware windsnelheid ter plaatse van de anemometer volgt hieruit de optimale ijklijn voor het vleugelrad: $u_y = (0.01698 n + 0,03)$ m/s voor windsnelheden boven 4 m/s. Gegeven het verschil der anemometerafmetingen, wijkt deze "ijking" weinig af van KNMI-I. Een merkwaardig verschijnsel valt waar te nemen, indien de vleugelradmeting wordt vergeleken met de Casella-meting, wanneer deze laatste uit de output is afgeleid via de ijkgrafiek i.p.v. uit de lineaire ijking u_y (in de tabel is de ijkgrafiek-snelheid genoteerd als u_g). Het verschil ($u_c - u_g$) heeft dan boven 4 m/s een vrijwel constante waarde van + 0,05 m/s en beneden 4 m/s een waarde van -0,09 m/s, vrijwel zonder overgang. Een reëel stromingseffect zou geleidelijker optreden; daarom ben ik geneigd dit toe te schrijven aan een fout in de geleverde ijkgrafiek, aangezien deze uit drie stukken bestaat: een blad 0 - 5 m/s, een blad 5 - 10 m/s en een blad 10 - 15 m/s. Een systematische optekenfout in het eerste blad zou het gemetene verklaren; en dit is niet zo ongeloofwaardig als het lijkt voor een firma van goede naam, want er is een ander bewijs van opteken-onzorgvuldigheid. De bladen zijn tevens voorzien van een ordinaatverdeling in ft/s, met bijbehorende aparte ijklijn; en voor het gebied 10 - 15 m/s is de m/s ijklijn zo ingeschreven, dat hij een geheel andere helling heeft dan de m/s-ijklijn welke volgt uit omrekening van de ft/s-ijklijn!!

Uit het bovenstaande blijkt helaas dat, afgezien van het verschil der anemometerafmetingen, de vergelijking van vleugelrad en Casella onvoldoende inlichtingen geeft over eventuele afwijkingen van de nulsnelheid van het vleugelrad, welke hier 0,03 m/s en in de u_c -ijking 0,10 m/s bedraagt. De helling van de Casella-ijking volgt wél voldoende nauwkeurig uit de ijkgrafieken: de beide ft/s-ijklijnen stemmen precies in helling overeen met de 5 - 10 m/s-ijklijn. Het verschil tussen de uit deze meting afgeleide vleugelradhelling (0.01698) en de helling der u_c -ijking (0.01696) is zo klein,

dat er geen reden bestaat om op grond van deze Casella-ijking een verschil te vermoeden tussen de vleugelrad-ijkingen vóór en ná 16 maart 1967. De ijking KNMI-II wordt dus gelijkgesteld aan de u_0 -ijking KNMI-I.

7. IJking van het vleugelrad in het Met.Office te Bracknell

De grote windtunnel van het Meteorological Office in Bracknell heeft een meetruimte-doorsnede van 0,91 x 1,37 m. De homogeniteit van de stroming in deze meetruimte is onderzocht (zie [4]) en bleek in het middendeel (0,5 x 0,9 m) gemiddeld beter dan 0,5% te zijn. Als ijkinstrument voor snelheden tot 15 m/s wordt in deze tunnel een Lowne Air Meter (M.O.106/54) gebruikt, welke in het National Physical Laboratory absoluut geijkt is in een tunnel met meetruimte 2,13 x 2,74 m. De directe aflezing van deze meter in ft/s, bepaald m.b.v. een stopwatch, is in tabel 6 aangegeven als u_{ft} ; de via de officiële ijking omgerekende aanwijzing van deze meter in m/s is als u_{mo} genoteerd.

Aansluitend op een WMO-conferentie in Londen was er één middag gelegenheid om in deze tunnel ijkingen uit te voeren in het meetgebied der op het NLR of in Delft niet bereikbare lage snelheden. De gebruikte opstelling van het vleugelrad en de Lowne meter ziet men in fig. 5 en fig. 6; deze gefimproviseerde opstelling was helaas niet stabiel genoeg om metingen te doen bij snelheden boven 3 m/s, en tijdsgebrek verhinderde de bouw van een steviger constructie. Aangezien het zeer moeilijk was om de vleugelradwijzerplaat in deze opstelling van buiten de tunnel af te lezen, zijn alleen die metingen als betrouwbaar beschouwd en verwerkt, bij welke de aflezing gedaan werd door na afloop van de meetminuut de tunneldeur te openen.

Vóór en na de reis naar Bracknell werd het vleugelrad in de KNMI-tunnel vergeleken met anemometergroep B (discussie zie § 8); hieruit bleek, dat de ijking van het vleugelrad tijdens de reis veranderd was. Vóór de reis gold ijking u_0 ; ná de reis geldt de ijking: $u_k = (0.01684 n + 0.12)$ m/s. Aangezien niet nagegaan kan worden op welk tijdstip deze ontregeling optrad, moet worden gesteld dat voor het vleugelrad tijdens de ijking in Bracknell een aparte ijking geldt, KNMI-III, welke tussen KNMI-II (u_0) en KNMI-IV (u_k) ligt.

De Bracknell-ijkingen zijn dus in tabel 6 zowel met u_c als met u_k vergeleken; hieruit kan worden geconcludeerd:

- a) het absolute verschil tussen u_{m0} en u_c of u_k is gering, ongeveer 0,02 m/s.
- b) De lineariteitsafwijking van het vleugelrad is verwaarloosbaar tot aan 0,5 m/s; misschien zelfs nog wel verder, maar dat kan niet nagegaan worden aangezien het laagste officiële ijkpunt van de Lowne meter bij 0,49 m/s ligt.

Hiermee is de betrouwbaarheid van het vleugelrad als ijkinstrument voor de KNMI-tunnel dus aangetoond voor het gehele gebruiksgebied der tunnel. Om er voor de toekomst zeker van te zijn, dat deze betrouwbaarheid gehandhaafd blijft, dient een TRANSPORTVERBOD en een REVISIEVERBOD voor het vleugelrad te worden ingesteld.

Om de resultaten van dit ijkonderzoek veilig te stellen voor ongelukken, die in weerwil van de genoemde verboden met het vleugelrad zouden kunnen gebeuren, is als tertiaire standaardanemometer de 016-p-cupanemometer gebruikt, welke als prototype toch niet voor stations- of researchmetingen in aanmerking komt. Deze 016-p is dus na grondige revisie vergeleken met de ijking u_k ; voor het meetgebied tussen 1,5 en 14 m/s was de optimale ijking: $u_y = (1.964 R + 0,17)$ m/s. Voor de afzonderlijke metingen zie tabel 7. Na de ijking is de anemometer veilig opgeborgen; indien nodig kan hij weer vergeleken worden met het vleugelrad om na te gaan of de ijking van dit laatste is verlopen.

8. Anemometergroep B

Een drietal in februari 1968 gerevideerde anemometers, twee van het Vlaardingentype (016-XVI-07 en 016-XVI-15) en een van het Rottegats-type (010-XIII-14), werden met het vleugelrad vergeleken vóór en ná het transport naar Bracknell. Bij de vergelijking voorafgaande aan het transport werd uitgegaan van de u_c -ijking en waren de volgende optimale ijkingen voor de anemometers verkregen:

$$016\text{-XVI-07} : u_y = (1.9065 R + 0,15) \text{ m/s}$$

$$016\text{-XVI-15} : u_y = (1.8978 R + 0,20) \text{ m/s}$$

$$010\text{-XIII-14} : u_y = (0.7852 R + 0,34) \text{ m/s}$$

Bij de na het transport gedane metingen werd uitgegaan van de juistheid van deze ijkingen, en werd uit iedere meetserie een nieuwe ijking van het vleugelrad bepaald.

Hierbij waren de optimale regressielijnen tussen de vleugelradaanwijzingen en de afzonderlijke anemometerijkingen u_y :

$$016\text{-XVI-07} : u_y = (0.01682 n + 0,09) \text{ m/s}$$

$$016\text{-XVI-15} : u_y = (0.01683 n + 0,15) \text{ m/s}$$

$$010\text{-XIII-14} : u_y = (0.01689 n + 0.12) \text{ m/s}$$

Voor de afzonderlijke meetresultaten zie tabel 8.

Bij de beoordeling van deze ijkingen is rekening gehouden met het feit, dat de cups van het Rottegatsanemometertype veel kleiner zijn dan de standaard-KNMI-cups, XIV, XV en XVI, voor welke de vleugelradijking wordt bepaald. Derhalve is bij middeling aan de ijking tegen de Rottegatsanemometer het gewicht 0,5 gegeven; de gemiddelde nieuwe vleugelrad-ijking (geldig vanaf 22 maart 1968) wordt dan:

$$u_k = (0.01684 n + 0,12) \text{ m/s} = (1.011 n + 7) \text{ m/min}$$

Deze ijking staat in fig. 1 genoteerd als KNMI-IV en kwam reeds in § 7 ter sprake.

Hiermee is dus uit de vleugelrad-aflezing n de windsnelheid ter hoogte van standaard-anemometercups in standaard-opstelling aan de lijzijde der KNMI-tunnelmeetruimte af te leiden. De afmetingen van deze standaardcups zijn: drie conische cups met cupdoorsnede 0,10 m en afstand anemometeras-cupmidden 0,10 m.

Hernieuwde regressieberekening van de na het transport gedane ijkingen van deze anemometergroep, nu met u_k i.p.v. de eigen oude ijking als primair bekend gegeven, leidt tot de ijkingen:

$$016\text{-XVI-07} : u_y' = (1.9069 R + 0,19) \text{ m/s}$$

$$016\text{-XVI-15} : u_y' = (1.8974 R + 0,18) \text{ m/s}$$

$$010\text{-XIII-14} : u_y' = (0.7820 R + 0,35) \text{ m/s}$$

De verschillen tussen de m.b.v. déze u_y' -ijkingen verwerkte anemometeroutput en u_k zijn in tabel 8 als du' opgenomen voor de na 22 maart 1968 verrichte metingen.

Een zevental in 1952 verrichte ijkingen van de toenmalige Rottegatsanemometer (zie [5]) had een gemiddelde: $u_{nlr} = [(0.834 \pm 0.015) R + (0.60 \pm 0.14)] \text{ m/s}$.

Uitgaande van een normaalverdeling van deze zeven ijkingen volgt uit de excentriciteit van de 1968-ijking dat de kans, dat de ijking van 010-XIII-14 door dit gemiddelde wordt vertegenwoordigd, voor helling en nulsnelheid 0,1% resp. 6,4% bedraagt. Zowel de verschillende ijk-omstandigheden (NLR-tunnel resp. KNMI-tunnel) als een constructieverandering van de Rottegatsanemometer zouden de oorzaak van dit verschil

kunnen zijn; bovendien is in 1968 slechts één anemometer onderzocht. Ter zijde: de aanloopsnelheid van deze 010-XIII-14 bedroeg gemiddeld 1,1 m/s.

9. Pitotbuis-ijking en anemometergroep C

Voor de kennis van het verband tussen de aanwijzing van de pitotbuis der KNMI-tunnel en de windsnelheid ter hoogte van een anemometer in standaardopstelling is een rechtsreeks vergelijking van pitotbuis en vleugelrad irrelevant. Stelt men nl. beide instrumenten op aan de loefzijde der meetruimte (het vleugelrad in dit geval bij de onderzijde van het uitstromingskanaal) dan is de windsnelheid aan de lijzijde nog steeds onbekend. Bij opstelling van het vleugelrad aan de lijzijde der meetruimte kennen we geen nauwkeurige ijking van de vleugelradaanwijzing als functie van de windsnelheid ter hoogte van het vleugelrad zelf, aangezien we n uitsluitend hebben vergeleken met de ware windsnelheid aan de andere kant van de meetruimte.

Bovendien zijn er dimensieproblemen. Het vleugelrad is kleiner dan een cupanemometer van standaardafmetingen. Bij de u_c - en u_k -ijkingen was de tunnel gevuld met het vleugelrad aan loef en een cupanemometer aan lij; laten we dit de standaardtunnelvulling noemen. Dan is bij meting van alleen vleugelrad en pitotbuis aan loef de tunnel leger dan in het standaardgeval, en indien men aan dit tweetal ijkinstrumenten aan loef een (loze) cupanemometer aan lij toevoegt is de tunnel voller dan in het standaardgeval; geen van beide opstellingen zijn goed vergelijkbaar met de opstelling die ons interesseert, nl. pitotbuis aan loef en anemometer aan lij.

Voor de volledigheid zijn enige series vergelijkende metingen met gelijktijdige opstelling van pitotbuis en vleugelrad aan loef gedaan; de resultaten zijn in tabel 9 vermeld. De gebruikte manometerhelling is in beide gevallen 1:25. De optimale ijkingen zijn:
zonder cupanemometer aan lij: $u_k = 1.032 u_{p1} - 0.06$ m/s (tunnel te leeg)
met cupanemometer aan lij: $u_k = 0.980 u_{p1} + 0.08$ m/s (tunnel te vol).
Aangezien de tunnelvulling in het tweede geval de meeste overeenkomst vertoont met de tunnelvulling tijdens ijking van een cupanemometer tegen het vleugelrad, zal het tweede geval nog het best overeenstemmen met de normale pitot-ijkopstelling.

De juiste methode om de waarde van ijkingen met de pitotbuis na te gaan is het uitvoeren van ijkingen van cupanemometers van standaard-

afmetingen met het vleugelrad, waarna dezelfde anemometers tegen de pitotbuis geijkt worden in afwezigheid van het vleugelrad. De hiervoor gebruikte anemometergroep C bestond uit de Vlaardingen-anemometers 016-XVI-05, 016-XVI-07 en 016-XVI-15. Deze anemometers waren in 1967 bij het Flevoproject gebruikt, opgesteld op resp. 8m, 4m en 2m hoogte. Bij de storm van 17 oktober 1967 had 016-XVI-05 een cup verloren; reparatie werd uitgevoerd door één nieuwe cup aan het oude cupstel te monteren, waardoor het mogelijk is dat een afwijking in de cupgeometrie is ontstaan. Nadat de onderstaande ijkingen (tabellen 10 en 11) in januari 1968 waren verricht, zijn de anemometers gerevideerd; hierbij zijn mogelijkerwijze de cups van 016-XVI-07 en 016-XVI-15 verwisseld, aangezien deze twee anemometers na revisie opnieuw werden geijkt (zie groep B, § 8) en toen vrijwel identieke, maar verwisselde ijkingshellingen bleken te hebben.

Uit ijking tegen het vleugelrad bleek het volgende (zie tabel 10):

$$016\text{-XVI-05} : u_y = (1.8815 R + 0.16) \text{ m/s}$$

$$016\text{-XVI-07} : u_y = (1.8949 R + 0.20) \text{ m/s}$$

$$016\text{-XVI-15} : u_y = (1.9062 R + 0.24) \text{ m/s}$$

De vergelijking van deze anemometers met de pitotbuis (zie tabel 11) leverde als gecombineerd resultaat van de drie meetreeksen de volgende pitot-ijkingen op:

$$\text{Manometerhelling } 1:25 \text{ (2-10 m/s)} : u_y = 0.984 u_{p1} + 0.03 \text{ m/s} \quad (s_{du} = 0.04)$$

$$\text{Manometerhelling } 1:10 \text{ (10-14 m/s)} : u_y = 0.95 u_{p2} + 0.4 \text{ m/s} \quad (s_{du} = 0.11)$$

Het gebruik van de 1:5 manometerhelling voor ijkingen is zinloos, aangezien in het snelheidsgebied waarin men gedwongen is op deze grove drukmeting over te gaan, boven 16 m/s, de KNMI-tunnel zelf al vanaf 14 m/s, onbetrouwbaar is gebleken.

De grootte s_{du} is de standaarddeviatie van de afwijking der individuele metingen van de optimale ijking. Voor de vleugelrad-ijkingen van tabel 10 vindt men $s_{du} = 0.05$ m/s. Men kan hieruit concluderen, dat ijkingen met de pitotbuis en manometerhelling 1:25 qua nauwkeurigheid even betrouwbaar zijn als ijkingen met het vleugelrad - al is de pitotbuis bewerkelijker. Daarentegen is ijking met pitotbuis en manometerhelling 1:10 voor nauwkeuriger ijkingen niet aan te bevelen. De gevonden 1:25 pitotbuis-ijking zal verder genoteerd worden als u_{pk} .

10. Anemometergroepen D, E en F, en samenvatting 016-XVI-ijkingen

De anemometergroepen D, E en F zijn onbelangrijk voor de bepaling van de windtunnelijking; als zuivere anemometerijkingen bedoeld, behoeven ze weinig commentaar.

Groep D, bestaande uit drie Vlaardingen-anemometers, werd door ir. Rietman in november 1966 doorgemeten in aansluiting op de NLR-ijkingen. De optimale ijkingen zijn:

$$016\text{-XVI-01} : u_y = (1.9241 R + 0.17) \text{ m/s}$$

$$016\text{-XVI-06} : u_y = (1.9050 R + 0.20) \text{ m/s}$$

$$016\text{-XVI-12} : u_y = (1.9015 R + 0.16) \text{ m/s}$$

De meetresultaten zijn vermeld in tabel 12.

"Groep" E is een Lambrecht-1440 anemometer no. 342576, in bruikleen ontvangen van drs. Conrads in februari 1968. De anemometercups hebben grotere dimensies dan de KNMI-standaardcups, zodat de vergelijking met u_c niet geheel zuiver is. Als enige van de onderzochte anemometers geeft deze geen pulsoutput, maar wordt voor iedere 46 omwentelingen een telwerk één cijfer verdraaid; dit telwerk heet honderdtallen meters windweg aan te geven, maar zowel uit de KNMI-tunnelmeting als uit de door de fabriek geleverde correctiegrafiek blijkt, dat het na aftrek van de nulnelheid slechts negentigtallen meters windweg aangeeft, althans boven 4 m/s. Voldoende nauwkeurige metingen werden verkregen door telkens 50 cijfers (5 "km" windweg) te laten passeren en de passeertijd te meten; bij $u_c = 0,69$ m/s was deze passeertijd drie uur en dertien minuten. Het resultaat is mede interessant omdat hetzelfde cuptype is gemonteerd op de Lambrecht-1482 klimatologische windmeter, welke o.m. in het Haringvliet-onderzoek is gebruikt. De metingen zijn gegeven in tabel 13; de bijbehorende optimale Lambrecht-1440-ijking is:

$$u_y = (1.9543 R + 0,83) \text{ m/s.}$$

Groep F, bestaande uit twee nieuwe stationsanemometers 015-XV, werd in april 1968 geijkt. De metingen zijn vermeld in tabel 13; de bijbehorende ijkingen zijn:

$$015\text{-XV-14} : u_y = (1.9772 R + 0,12) \text{ m/s}$$

$$015\text{-XV-16} : u_y = (1.9887 R + 0.14) \text{ m/s}$$

Voorlopige niet-representatieve ijking van het type: $u_y = (1.983 R + 0,13) \text{ m/s.}$

Een representatieve schatting van de type-ijking kan op grond van de tijdens dit onderzoek verrichte metingen alleen gedaan worden voor de Vlaardingen-anemometer 016-XVI, waarvan er 8 exemplaren zijn geijkt, indien men de ijkingen van de exemplaren 07 en 15 vóór en na de revisie in februari 1968 afzonderlijk telt (zie § 9 voor nadere uitleg). De verkregen ijkingen zijn samengevat in tabel 14. Bij de middeling is de helling van de 05-anemometer niet meegerekend vanwege de uitgevoerde cupreparatie. Aangezien de laagste snelheden, waarbij ijkingen werden verricht, steeds de aanloopsnelheden van de individuele anemometers waren, kan ook u_s worden vermeld. Gemiddeld volgt uit tabel 14 voor de Vlaardingen-anemometer 016-XVI:

	Helling (m/s per R)	Nulsnelheid u_0 (m/s)	Aanloopsnelheid u_s (m/s)
gemiddelde	1.905	0.19	0.39
standaarddeviatie	0.009 (=0.5%)	0.03	0.11

Kortweg, voor dit anemometertype is de constructie zodanig uniform (mits de cups op een mal worden geconstrueerd en niet uit de vrije hand gemonteerd), dat bij gebruik van de ijking $u_y = (1.905 R + 0.2)$ m/s het zinvol is om een uittrek- en rekennauwkeurigheid van 0,1 m/s aan te houden. Hierbij moeten gemeten snelheden, welke lager dan 0,4 m/s zijn, tot de klasse "windstilte" worden gerekend.

Om na te gaan in hoeverre onnauwkeurigheden, welke het gevolg zijn van de berekening van een ijking uit een beperkt aantal punten, een grens stellen aan de betrouwbaarheid der gevonden ijkingen, is steekproefsgewijze van anemometergroep F de standaarddeviatie voor de regressiecoëfficiënten helling en nulsnelheid bepaald.

Resultaat:	Standaarddeviatie helling (m/s per R)	Standaarddeviatie nulsnelheid (m/s)
Anemometer 015-XV-14	0.0052 (=0.26%)	0.023
015-XV-16	0.0035 (=0.18%)	0.014
1.96 x gemiddelde	0.43%	0.036 (95% betrouwbaar)

Aannemende dat deze steekproef representatief is voor de populatie van alle anemometerijkingen, is het dus zinvol om de helling te noteren in 3 à 4 cijfers totaal en de nulsnelheid in eenheden van 0.01 m/s. Voorts blijkt de ijkmethode nauwkeurig genoeg te zijn om de individuele verschillen in de groep 016-XVI-anemometers aan te tonen.

11. Lineariteitsafwijkingen bij lage windsnelheden

In weerwil van de inhomogeniteit der stroming om anemometercups blijkt uit de gedane metingen, dat voor de meeste anemometers over een verrassend groot snelheidsgebied een lineair verband tussen windsnelheid en rotatiesnelheid bestaat. Bij zeer lage windsnelheden kan echter toch een afwijking van de volgens § 4 berekende optimale ijking ontstaan om verscheidene redenen.

Allereerst wordt bij lage snelheden het totale aerodynamische moment op de cups klein in verhouding tot het wrijvingsmoment in de lagers. Hierdoor ontstaat wrijvingsvertraging, R neemt verhoudingsgewijze te sterk af met afnemende windsnelheid, dus u_y neemt sneller af dan u_t . Dan verandert de dus systematisch in positieve richting totdat $du = u_t$, d.w.z. de aanloopgrens is bereikt en de cups staan stil.

Verder is er bij zeer lage cuprotatiesnelheden een verandering van het stromingspatroon rondom de cups te verwachten, misschien met bijbehorende variaties van de effectiviteit van de energieoverdracht tussen windstroming en cups. Een dergelijk effect is vanwege de ingewikkeldheid van het stromingspatroon niet te voorspellen.

Omdat in ieder geval de bruikbaarheidsgrenzen der lineaire ijking voor de meetpraktijk van belang zijn, ongeacht de oorzaak van die begrenzing, is in fig. 2 van alle anemometertypen de lineariteitsafwijking uitgezet. Hierbij is voor de typen 016-XVI en 016-p een gemiddelde over snelheidsklassen ter grootte 0,3 m/s resp. 0,4 m/s uitgezet (zie tabel 15) in verband met de onoverzichtelijkheid van het grote aantal metingen dat van deze beide typen beschikbaar is.

Uit de grafiek blijkt, dat voor de best geconstrueerde anemometers de negatief wordt met afnemende windsnelheid, m.a.w. u_y en dus R is verhoudingsgewijze te groot. Dit zou kunnen betekenen, dat de energieoverdracht op de cups bij lagere windsnelheden effectiever is dan bij hogere. Hiervoor zijn verschillende speculatieve verklaringen mogelijk, zoals laminarisering der stroming of vermindering van de onderlinge storing der cups bij afnemende windsnelheid. Zonder verder experimenteel werk valt er weinig te bewijzen; in ieder geval is het effect er, en is het van groot nut doordat het de wrijving — die bij de dynamo-anemometer een sterk positieve du veroorzaakt — compenseert. In het bijzonder bij de KNMI-anemometertypen 015-XV en 016-XVI heffen de effecten elkaar vrijwel op, zodat de lineariteitsafwijking tot aan de laagste snelheden de 0,1 m/s niet of nauwelijks overschrijdt.

Verdere verbetering der lagers is voor deze anemometers dan ook af te raden, anders treedt overcompensatie van de wrijving op, zoals b.v. bij de Casella-Sheppard het geval is. Een dergelijke overcompensatie leidt weliswaar tot lage aanloopsnelheden, maar hij maakt ingewikkelde uittrekmethode (ijkgrafiek of ijktabel) noodzakelijk. De lineaire ijking van de 015-XV en de 016-XVI biedt instrumenteel en rekentechnisch vele voordelen, en de nu bereikte aanloopsnelheden zijn laag genoeg voor alle metingen, die men op verantwoorde wijze met cupanemometers kan doen.

12. Voorstellen voor verder onderzoek

Aangezien tussen de NLR-ijking, welke de basis vormt van bovenstaand onderzoek, en de uiteindelijk verkregen ijkingen van het vleugelrad (KNMI-IV) en de pitotbuis (u_{pk} , afgeleid van KNMI-II) veel ongecontroleerd transport plaatsvond, is er enige onzekerheid in de genoemde ijkingen; voor een schatting van de grootte dezer onzekerheid zie § 13. Voor een nog nauwkeuriger bepaling van de tunnelijking voor de nu onderzochte anemometers van standaardafmetingen (KNMI-015-XV, KNMI-016-XVI), en om wat meer te weten te komen over de waarde van de tunnelijking voor grotere of kleinere anemometers, is verdergaand onderzoek in de nabije toekomst gewenst. Dit zou dan de volgende vorm moeten hebben: een aantal operationele anemometers (geen prototypen!) van verschillende afmetingen zou eerst in de KNMI-tunnel met vleugelrad én pitotbuis vergeleken moeten worden, dan zou een ijking in een grote windtunnel plaats moeten vinden met voldoende metingen tussen 5 en 15 m/s, gevolgd door een naaijking in de KNMI-tunnel. Van ieder in dit onderzoek betrokken anemometertype dienen minstens twee exemplaren gebruikt te worden. Op deze manier kan tevens van de verschillende typen het gedrag bepaald worden bij windsnelheden boven 15 m/s; dit is in de KNMI-tunnel niet mogelijk.

Bij verder onderzoek in de KNMI-tunnel zelf zouden enige kleine verbeteringen wenselijk zijn, nl. een fijnregelknop voor de snelheidsregelaar en een venstertje aan de lijzijde der meetruimte, waardoor de wijzerplaat van het vleugelrad gemakkelijker afgelezen kan worden. De tunnelsnelheid is i.h.a. stabiel genoeg voor het verrichten van ijkingen; regelapparatuur voor nog verder verhoogde stabiliteit is alleen wenselijk voor langduriger proeven. In dat

geval zou men zich moeten beperken tot stabilisering van de omwentelingssnelheid der tunnelpropeller via een op de propelleras aangebrachte meter, aangezien het ontoelaatbaar is om een extra anemometer als obstakel in het tunnelkanaal te brengen.

Het effect van verandering der omgevingsomstandigheden op ijkingsmetingen is helaas niet bepaalbaar uit vergelijkende metingen, aangezien de output van de drie instrumenttypen pitotbuis, vleugelrad en cupanemometer in eerste benadering (zie [6] en [7]) op overeenkomstige wijze evenredig is met de stuwdruk $\frac{1}{2} \rho u^2$, d.w.z. met $\sqrt{T/p}$. In ieder geval zal een ijkingsshelling-bepaling niet worden beïnvloed door atmosferische veranderingen, indien de ijkingsmeting beëindigd wordt in hetzelfde snelheidsgebied waarin hij is begonnen; m.a.w. men ijkt van lage naar hoge snelheden en dan weer terug. Voorts dient bij een nauwkeurige pitotijking de temperatuur in het KNMI-windtunnellaboratorium gnoteerd te worden, indien deze sterk afwijkt van de standaardtemperatuur 20°C, aangezien de dichtheid van de manometervloeistof 0,12% afneemt per graad temperatuurstoename. Bij normale kamertemperaturen is deze meetfout echter verwaarloosbaar. Voor het doen van correcte pitotbuis-ijkingsmetingen is het veel belangrijker andere foutenbronnen onder controle te houden, zoals knikken in de drukslang of de juistheid van het nulniveau der manometer (regelmatig controleren, vóór, ná en liefst ook tijdens een meting!).

Een onderzoek naar de invloed van het transducertype (dynamo, contact, reedrelais of fotodiode) op de nulsnelheid is gewenst. Vermoedelijk zal er geen meetbaar verschil zijn tussen reedrelais en fotodiode, terwijl toepassing van dynamo of contact een grotere u_0 geeft.

13. Samenvatting der meetresultaten

Hoewel vanwege de ongecontroleerde anemometertransporten in 1966 en 1967 een berekening der nauwkeurigheidsmarge van de verkregen ijkingsmetingen niet mogelijk is, kan wel een schatting van deze marge worden gedaan, uitgaande van het gemeten verloop der ijkingsshellingingen van een drietal anemometers, welke in de loop van dit onderzoek vóór en na een werkplaatsrevisie geijkt werden. Dit verloop blijkt gemiddeld $\pm 0,5\%$ te zijn (zie tabel 16); de aanname is nu, dat tijdens het transport van anemometergroep A in november 1966 deze anemometergroep niet meer ontregeld is dan tijdens een revisie het geval zou zijn geweest,

althans wat betreft de cupgeometrie die de helling bepaalt. Ontregeling van de lagers, d.i. de nulsnelheid, tijdens transport is niet vergelijkbaar met revisie, daar immers tijdens een revisie de lagers steeds worden nagezien en schoongemaakt; het enige beschikbare gegeven over een dergelijk nulsnelheidsverloop is de 0,02 m/s verandering van de vleugelrad-nulsnelheid bij het transport naar Bracknell. Tijdens het Bracknelltransport is de hellingsijking van het vleugelrad 0,7% verlopen, hetgeen in grootteorde overeenstemt met het genoemde revisieverloop van de drie cupanemometers. De 0,1% overeenstemming tussen ijking van de helling der Casella-Sheppard anemometer en de officiële opgave mag niet zonder meer in de nauwkeurighedsbeschouwing opgenomen worden wegens het verschil in afmetingen van de Sheppard-cups en de KNMI-standaardcups.

Indien dus de nauwkeurigheds-schatting voor de helling 0,56% bedraagt (zie tabel 16) en voor de nulsnelheid 0,02 m/s (Bracknell-transport), dan volgt als eindresultaat dat de ijking in de KNMI-tunnel van cupanemometers met cups van standaardafmetingen (zie § 8) kan worden berekend uit:

- a) de aanwijzing n van de Lambrecht-1405a vleugelradanemometer, volgens

$$u_k = ((0.01684 \pm 0.00009) n + (0.12 \pm 0.02)) \text{ m/s};$$

- b) de aanwijzing van de pitotbuis met manometerhelling 1 : 25, volgens

$$u_{pk} = (0.984 \pm 0.005) u_{\text{pitot}} + (0.03 \pm 0.02) \text{ m/s}.$$

De pitotbuis-manometeroutput kan ofwel in u_{pitot} worden omgezet via de bij de windtunnel aanwezige tabel, ofwel rechtstreeks in u_{pk} via de grafiek fig.7. De beide ijkmethoden, vleugelrad en pitotbuis met manometerhelling 1:25, zijn gelijkwaardig in nauwkeurigheid; voor onderzoekers met weinig ervaring in het bijstellen van de differentiaalmanometer is vleugelradijking echter eenvoudiger nauwkeurig uit te voeren. Het meetbereik van de 1:25 pitotbuis is 2,5 - 10 m/s; het meetbereik van het vleugelrad loopt van 0,5 m/s ($n = 23$) tot de hoogste nauwkeurig bepaalde snelheid in de KNMI-tunnel, d.i. 14 à 15 m/s. Beide instrumenten zijn over het gehele genoemde meetbereik lineair. De nauwkeurigheid van een zorgvuldig in de KNMI-tunnel uitgevoerde ijking is over het gehele meetbereik beter dan 0,1 m/s.

Het gebruik van de manometerhelling 1:10 met de pitotbuis wordt afgeraden voor ijkdoeleinden; het gebruik van de manometerhelling 1:5 is zinloos.

Willekeurige anemometers van het type 016-XVI (Vlaardingen-anemometer) blijken als gemiddelde ijking te hebben:

$$u_y = ((1.905 \pm 0.009)R + (0.19 \pm 0.03)) \text{ m/s.}$$

De aanloopsnelheid is gemiddeld 0,4 m/s, en de ijking is volledig lineair.

Enkelvoudige niet-representatieve ijkings van andere anemometertypen worden hieronder samengevat; in de kolom " u_{\min} " is de windsnelheid aangegeven, beneden welke de anemometer meer dan 0,1 m/s van zijn eigen lineaire ijking afwijkt (§ 11).

Anemometer	Helling (m/s per R)	u_0 (m/s)	u_s (m/s)	u_{\min} (m/s)	Beschrijving
011-XII	2.0 (?)	0.4(?)	1.8	3.4	dynamo-stationsanemometer
010-XIII	0.785	0.4	1,1	1,3	Rottegatsmolen
015-XIV	2.052	0.08	?	?	araldit-cup-anemometer
015-XV	1.983	0.13	0.5	0	nieuwe stationsanemomtr.
016-p	1.964	0.15	0.3	0.8	prototype 016-XVI
Casella-Sheppard	0.0385	0.50	0.2	2.9	fotodiode-precisieanemomtr.
Lambrecht-1440	1.954	0.83	0.4	3.8	grove anemomtr. m.telwerk

Het aantal gebruikte cijfers is gebaseerd op de nauwkeurigheid der uitgevoerde ijking, en is geen betrouwbare aanwijzing voor de ijking van andere anemometers van hetzelfde type, aangezien in het bijzonder bij de oudere anemometertypen belangrijke constructievariatiën optreden. Alle onderzochte anemometers zijn afgebeeld in fig. 3.

Wil men de resultaten van bovenstaand onderzoek bestendigen, dan is het niet toelaatbaar om de vleugelrad-anemometer te revideren of te transporteren.

Litteratuur:

- 1 : T. Dahlen, D. Paffrath: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem Flügelradanemometer.
Forschungsber. 66-07, Inst.Phys.Atm. DVL München (1966)
- 2 : P.J. Rijkooft: IJkingen van KNMI-rotatie-dynamoanemometers uit de series 001 en 002 in de windtunnel van het Nationaal Luchtvaart Laboratorium.
KNMI-R-III-177 (1956)
- 3 : L.G. Parratt: Probability and experimental errors in science.
Wiley, New York (1961); blz. 69
- 4 : G.E.W. Hartley : Windtunnels in the Meteorological Office.
Met.Mag. 95 (1966) 144-150
- 5 : P.J. Rijkooft: Voorlopige beschouwingen over de ijkingen der Rotte-
gatspolder Robinson-anemometers.
KNMI-R-III-99 (1952)
- 6 : O. Schrenk: Trägheitsfehler des Schalenkreuz-Anemometers.
Zeitschr.f.Techn.Phys.10(1929) 57-66
- 7 : E. Over: The measurement of air flow.
Chapman & Hall, London (1949)

ABSTRACT: Accuracy of anemometer calibrations in the KNMI-windtunnel.

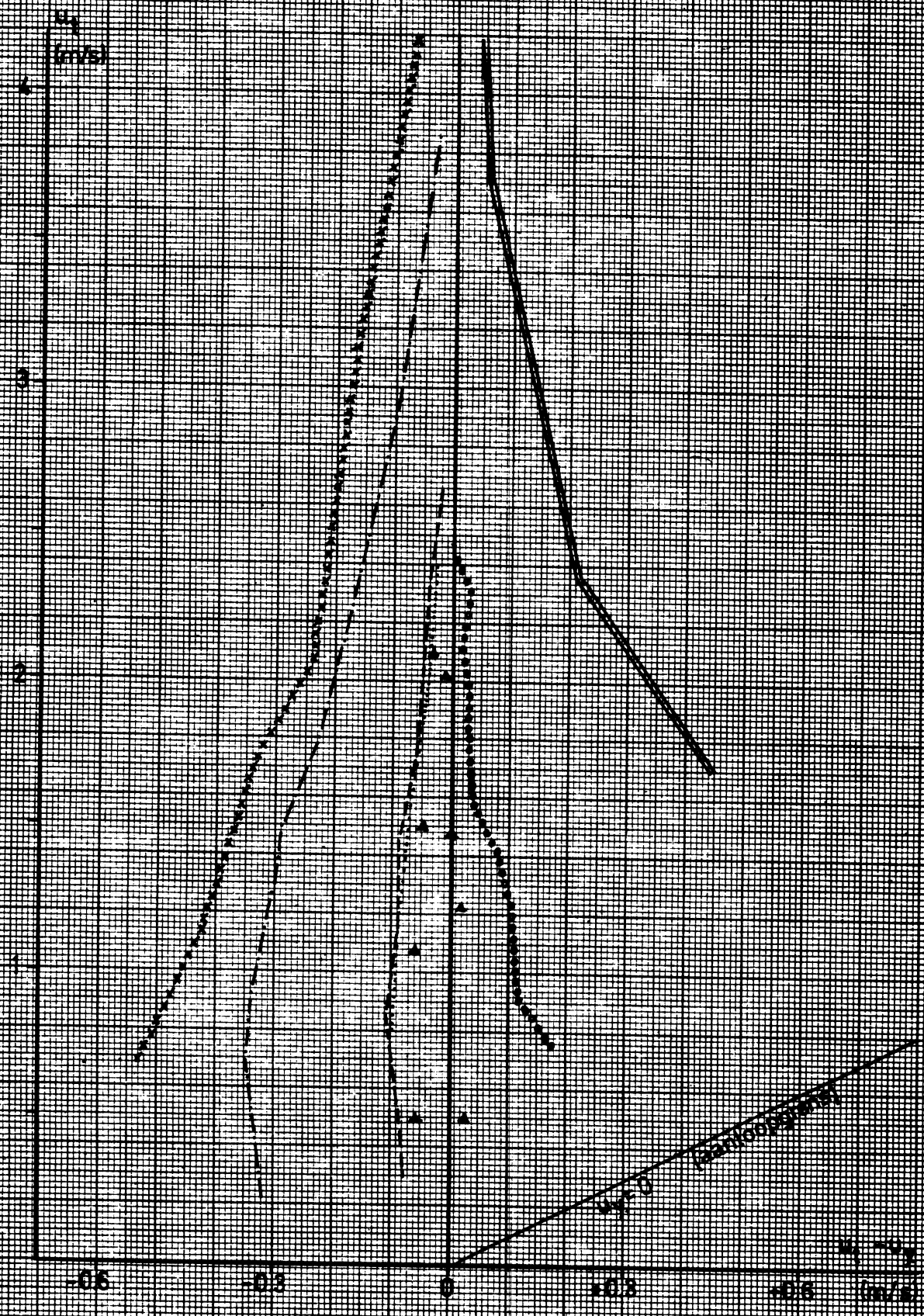
The small windtunnel (diameter 0.4 x 0.4 m) at the Royal Netherlands Meteorological Institute is shown to be suitable for calibrations between 0.5 m/s and 14 m/s with an accuracy of 0.1 m/s. A linear calibration, valid within certain speed limits, is obtained for a selection of anemometers and summarized in § 13. The deviation of the output of these anemometers from their linear calibration is given in fig. 2.

LINEARITEITSAFWIJKING CUPANEMETER - LIKINGEN

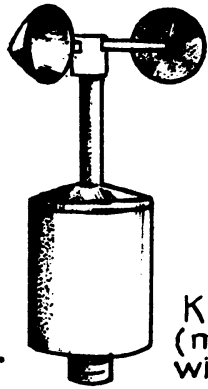
Fig. 2

- KMM - 010-XII
- KMM - 011-XI
- ▲ KMM - 015-XV
- KMM - 018-XVI
- KMM - 019-p

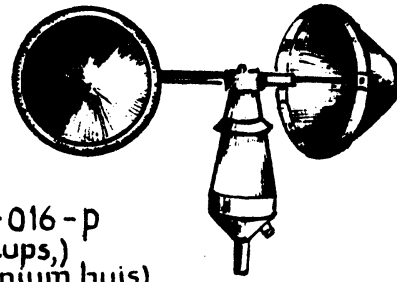
- Casella T 1012
- Lambrecht 1140
- u_g = gemiddelde ijsnelheid KMM-waardetabel
- u_g = gemiddelde ijsnelheid volgens ijsmeting



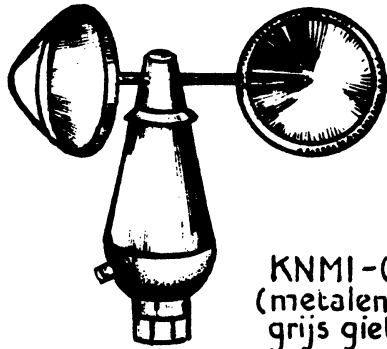
Onderzochte Cup-anemometertypen - Schaal 1:5



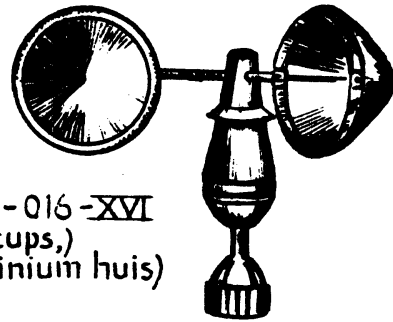
KNMI-010-XIII
(metalen cups,
wit plaatijzeren huis)



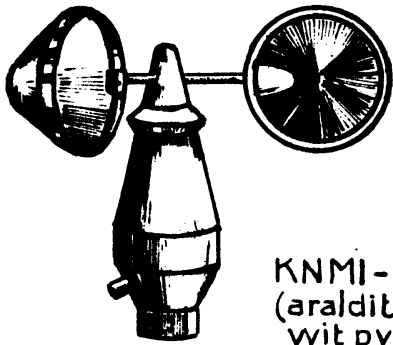
KNMI-016-p
(pvc cups,
aluminium huis)



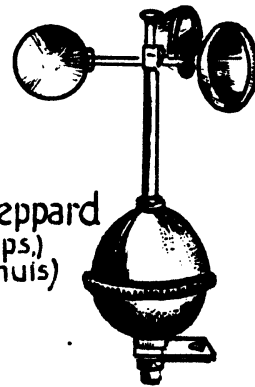
KNMI-011-XII
(metalen cups,
grijs gietijzeren huis)



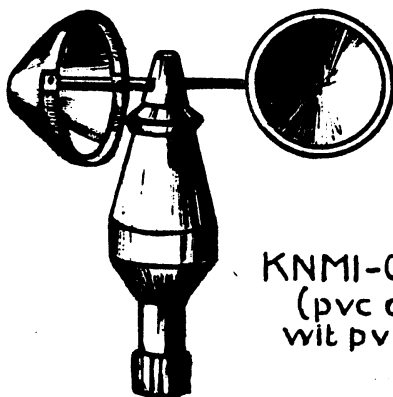
KNMI-016-XVI
(pvc cups,
aluminium huis)



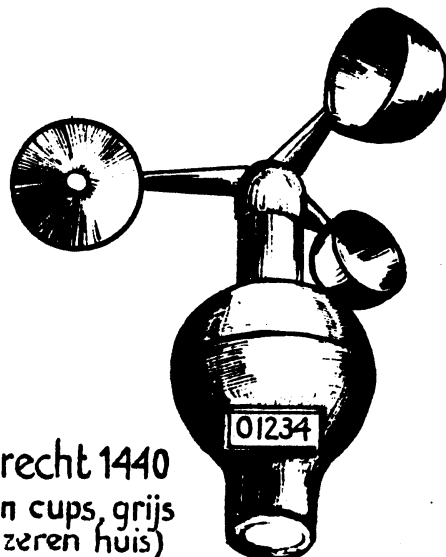
KNMI-015-XIV
(araldit cups,
wit pvc huis)



Casella-Sheppard
(metalen cups,
grijs pvc huis)



KNMI-015-XV
(pvc cups,
wit pvc huis)



Lambrecht 1440
(metalen cups, grijs
gietijzeren huis)

Fig. 4 : Meetruimte der KNMI-wind-
tunnel met pitotbuis en
016-XVI-anemometer.

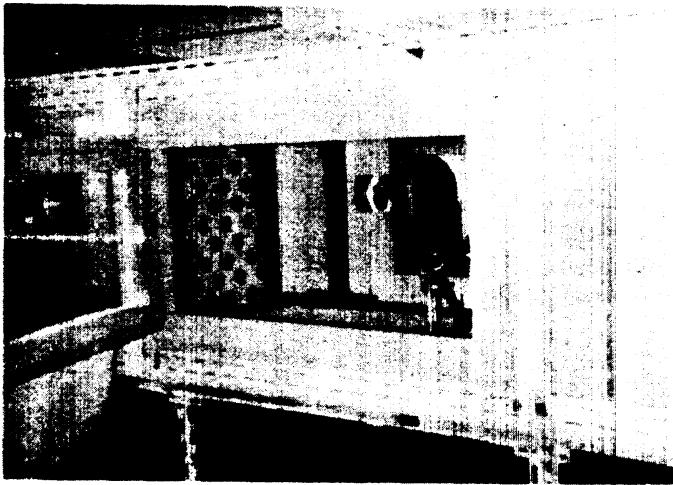


Fig. 5 : Meetruimte der wind-
tunnel in Bracknell.
Luchtstroom van rechts naar
links.

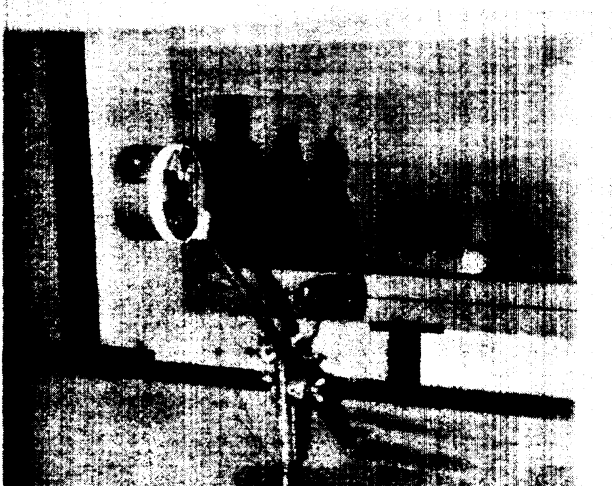
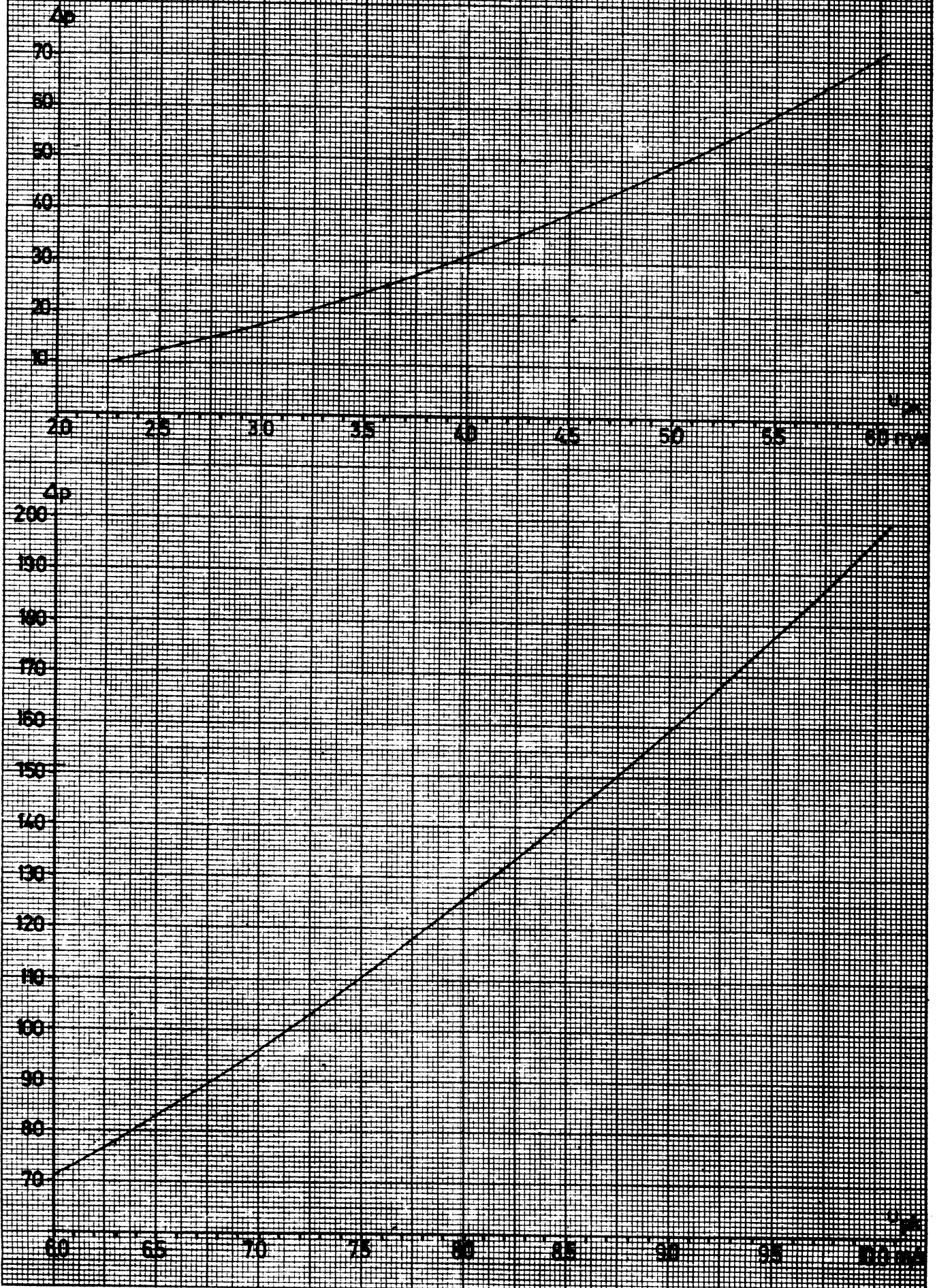


Fig. 6 : Close-up der opstel-
ling in Bracknell; links de
Lambrecht vleugelradanemometer,
rechts de Lowne Air Meter.

PROTEUS-LIJNEN KNIJ-WINDTUNNEL, gecorrigeerd voor standaard-opbouwomgeving.
 Δp = aarwijzing 1,25 meter in m/s 2000.

Fig. 7



Tabel 1. NLR-windtunnel, 3 en 4 november 1966: Anemometergroep A

u_{nlr}	011-XII du	015-XIV du	016-p du
35.00	(+ 20)	(+ 42)	+ 3
30.00	(+ 11)	+ 3	- 2
25.00	+ 4	- 8	- 3
20.00	0	+ 9	+ 3
18.00	- 2	- 4	- 4
16.00	0	- 1	0
14.00	- 2	- 1	0
12.00	+ 2	0	- 4
10.00	- 1	- 2	+ 4
9.00	+ 5	+ 3	- 3
8.00	(+ 11)	(- 3)	+ 4
7.00	(+ 10)	(- 1)	+ 4
(6.00)	(+ 11)	(+ 2)	(+ 7)
(5.00)	(+ 17)	(+ 6)	(+ 8)
	a=1.993	a=2.052	a=1.977
	$u_0=0.27$	$u_0=0.08$	$u_0=0.18$

In deze tabel is
 $du=100(u_{nlr}-u_y)$

Tabel 2. KNMI-windtunnel, november 1966

u_y	015-XIV		016-p		
	$100(n/60-u_y)$	$100(u_c-u_y)$	u_y	$100(n/60-u_y)$	$100(u_0-u_y)$
(16.93)	-23	+16	(17.59)	-44	- 4
(15.67)	-27	+10	(17.43)	-43	- 3
(14.58)	-29	- 4	(15.81)	-44	- 6
13.28	-33	0	(14.34)	-54	-16
11.70	-28	+ 2	12.59	-39	- 8
10.53	-23	+ 5	11.00	-37	- 8
9.21	-16	+10	9.73	-30	- 3
7.71	-18	+ 5	8.40	-23	+ 1
6.42	-19	+ 2	6.91	-21	- 3
4.87	-19	0	5.25	-19	0
3.26	- 9	+ 6	4.11	-18	- 1
2.52	-10	+ 4	3.07	-15	- 7
			2.48	-14	- 7
			(1.66)	-13	- 9
			(1.14)	-12	-10

Tabel 3. KNMI-windtunnel, november 1966

u_c	011-XII $100(u_c-u'_y)$
(17.26)	+11
(15.65)	+10
(15.53)	+ 2
13.52	+ 2
12.24	+ 3
11.16	- 2
9.56	- 7
8.07	0
6.27	0
5.00	+ 3
(3.73)	+ 5
(2.37)	+23
(1.71)	+43
	a=2.024
	$u_0=0.47$

Tabel 4. KNMI-windtunnel, november 1966
Anemometergroep A contra pitotbuis

015-XIV		016-p	
u_p	$100(u_y - u_p)$	u_p	$100(u_y - u_p)$
17.56	-51	17.38	+ 3
16.08	-42	16.05	+ 9
14.86	-57	15.08	+ 1
13.45	-37	13.78	- 9
12.12	-47	12.26	- 1
10.70	-39	11.05	+ 1
9.37	-37	10.00	- 4
7.90	-51	9.97	+ 4
6.39	-42	8.69	-14
5.19	-40	7.08	-12
4.18	-40	5.65	-11
3.14	-39	4.29	- 3
2.48	-31	3.11	- 2
		2.47	- 1
		2.15	- 3

Tabel 5. KNMI-windtunnel, feb.'68
Casella-Sheppard tegen vleugelrad

u_o	$100(u_o - u_y)$	$100(u_o - u_g)$
13.26	+ 3	+ 3
12.48	+ 5	+ 5
11.53	+ 5	+ 5
10.72	+11	+11
9.87	+ 6	+ 6
8.94	+ 8	+ 8
7.85	- 4	- 4
6.63	+ 5	+ 5
5.77	+11	+11
4.82	+ 3	+ 3
(3.86)	- 3	0
(2.90)	-10	- 3
(2.11)	-19	- 9
(1.78)	-23	-11
(1.50)	-29	-14
(1.30)	-30	-13
(0.93)	-34	-11
(0.69)	-35	-10
(0.22)	-32	-10

$a = 0.0385$
 $u_o = 0.50$

Tabel 6. Windtunnel Bracknell, 21.3.68
Vleugelrad tegen Lowne Air Meter

u_{ft}	u_{mo}	n	$100(u_{mo} - u_o)$	$100(u_{mo} - u_k)$
8.606	2.72	155	-1	-1
6.711	2.14	121.5	-2	-3
5.592	1.81	101.5	-1	-2
4.452	1.47	81.5	-1	-2
3.679	1.25	68	0	-2
3.030	1.07	57	0	-1
2.538	0.94	49.8	0	-2
2.178	0.84	44	-1	-2
1.804	0.74	37.8	0	-2
1.022	0.54	26.5	-1	-3
0.730	0.47	22.5	-1	-3

Tabel 7. KNMI-windtunnel, april 1968. Vleugelrad tegen 016-p (tertiaire standaard)

u_k	du	u_k	du	u_k	du
(16.36)	-2	9.18	-2	3.28	+ 2
(15.93)	-3	8.81	+4	3.02	- 2
(15.42)	-5	8.52	-2	2.78	- 1
(15.01)	-4	8.22	+4	2.58	- 1
(14.53)	-6	7.83	+4	2.42	- 2
(14.09)	-6	7.48	0	2.24	- 2
13.66	-4	7.14	-2	2.10	- 3
13.20	+1	6.72	+4	1.94	- 3
12.73	-4	6.38	+3	1.82	- 5
12.33	-1	5.99	+7	1.70	- 5
11.87	+2	5.51	+2	1.53	- 8
11.47	-1	5.08	+3	(1.36)	- 7
11.11	+1	4.51	+5	(1.19)	- 7
10.66	-4	4.29	+3	(0.99)	- 8
10.27	-1	4.04	+6	(0.77)	-11
9.82	-3	3.75	+2	(0.55)	-10
9.51	0	3.54	+4	(0.27)	- 9

$a = 1.964$
 $u_o = 0.17$

Tabel 8. Transport-controleijking, anemometergroep B contra vleugelrad
016-XVI-07

maart 1968		april 1968	
u_c	du	u_k	du'
(16.96)	-36	(16.96)	-15
(16.25)	-10	(16.10)	-1
(15.28)	-11	(15.02)	-7
14.32	-3	14.33	-2
13.23	-5	13.31	-5
12.18	-1	12.30	-1
11.33	+4	11.14	-3
10.28	0	10.22	+3
9.16	+1	9.08	-2
8.16	+4	8.15	+5
7.22	+6	7.23	+8
6.19	+3	6.17	+6
5.22	-4	5.19	+3
4.70	+3	4.72	0
4.14	-3	4.23	-1
3.61	-2	3.69	-3
3.12	-1	3.17	-3
2.58	0	2.54	-5
2.12	-4	2.01	-5
(1.63)	-6	(1.48)	-12
(1.12)	-9	(1.06)	-9
(0.51)	-7	(0.49)	-8
a=1.9065		a=1.9069	
$u_o=0.15$		$u_o=0.19$	

016-XVI-15

maart 1968		april 1968	
u_c	du	u_k	du'
(16.32)	0	(16.96)	-10
(15.38)	+7	(16.19)	-8
14.28	-4	(14.99)	-8
13.25	0	14.25	-1
12.23	0	13.19	-3
11.25	0	12.21	-2
10.23	-1	11.23	-4
9.29	0	10.31	-3
8.19	+2	9.03	+2
7.22	+3	8.14	+7
6.27	+2	7.26	+10
5.21	+3	6.27	+4
4.70	+4	5.44	+6
4.22	0	4.85	+1
3.68	-3	4.26	-6
3.18	0	3.71	0
2.64	-2	3.12	-3
2.12	-5	2.58	-2
(1.63)	-7	2.01	-6
(1.12)	-8	(1.55)	-8
(0.63)	-12	(1.18)	-8
(0.32)	-13	(0.78)	-9
a=1.8978		(0.32) -12	
$u_o=0.20$		a=1.8974	
		$u_o=0.18$	

010-XIII-14

februari 1968		april 1968	
u_c	du	u_k	du'
(17.13)	+5	(17.13)	+5
(15.84)	-4	(16.32)	+6
14.52	0	(15.19)	+2
13.67	-3	(14.22)	+2
13.08	+1	13.20	+2
12.18	0	12.26	+2
11.21	-2	11.25	-2
10.35	+1	10.26	-3
9.53	-1	8.14	-6
8.63	0	6.18	-1
7.78	-2	5.14	0
6.97	0	4.20	+2
4.12	-1	3.08	+1
3.80	-2	a=0.7820	
3.48	0	$u_o=0.35$	
3.14	-1		
2.90	+1		
2.71	+1		
2.47	0		
(2.31)	+3		
(2.12)	+2		
(1.97)	+3		
(1.80)	+3		
(1.58)	+4		
(1.41)	+8		
(1.25)	+10		
(1.08)	++11		
(0.91)	+12		
(0.76)	+17		
a=0.7852			
$u_o=0.34$			

Tabel 9. KNMI-windtunnel, mei 1968.
Onderlinge vergelijking van
pitotbuis en vleugelrad.

Zonder cupanemo- meter in tunnel		Met cupanemometer in tunnel aan lij	
u_k	du	u_k	du
10.36	+28	9.95	-15
9.84	+28	9.18	-8
9.31	+23	8.52	-11
8.81	+23	7.73	-8
8.24	+20	7.07	-6
7.66	+18	6.22	-3
7.18	+18	5.42	-5
6.64	+10	4.55	-5
6.17	+17	3.47	+2
5.64	+4	2.73	+3
5.21	+15		
4.58	+3		
4.13	+11		
3.62	+10		
3.12	+8		
2.26	-2		

In deze tabel is $du = 100(u_k - u_{p1})$.

Tabel 10. KNMI-windtunnel, januari 1968. Anemometergroep C contra vleugelrad.

016-XVI-05		016-XVI-07		016-XVI-15	
u_c	du	u_c	du	u_c	du
(16.88)	+ 1	(16.92)	+ 3	(16.91)	- 1
(15.69)	- 1	(15.87)	+ 2	(15.83)	-10
(14.77)	- 3	(14.92)	- 2	(15.30)	- 4
13.99	+ 2	13.90	- 4	(14.77)	+ 2
12.76	+ 3	13.07	- 4	(14.12)	- 4
12.13	- 5	12.17	+ 1	13.42	-12
11.17	- 2	(11.28)	+16 (&)	12.74	+ 7
10.23	- 1	10.25	0	11.72	+ 1
9.40	- 4	9.30	0	11.03	- 1
8.42	+ 1	8.41	+ 6	10.09	+ 7
7.37	+ 4	7.19	+ 8	9.19	- 5
5.56	+ 5	6.34	- 8	8.26	+ 2
4.55	+ 3	4.85	+ 2	7.44	+ 6
3.76	+ 1	4.34	+ 3	6.58	+ 4
(3.16)	-10 (&)	3.55	- 2	5.90	+ 2
3.02	- 7	3.06	- 3	5.10	- 3
(2.93)	0 (&)	2.52	- 2	4.34	- 4
(2.71)	- 3 (&)	2.07	- 6	3.41	- 3
(2.47)	- 5 (&)	(1.54)	-12	2.88	- 8
(2.20)	- 2 (&)	(1.19)	-11	2.35	- 9
2.18	- 5	(0.69)	-13	(1.73)	(-28) (\$)
(1.88)	- 5 (&)	(0.29)	0	(1.63)	-12
(1.63)	- 4 (&)	a=1.8815		(1.26)	-12
(1.41)	- 8	$u_o=0.20$		(0.90)	-16
(1.24)	- 8 (&)			(0.56)	- 9
(0.71)	- 9 (&)			(0.49)	-10
(0.29)	-20			a=1.9062	
a=1.8815				$u_o=0.24$	
$u_o=0.16$					

(&) : naderhand t.b.v. lineariteitsonderzoek verrichte meting

(&) : waarschijnlijk meetfout

(\$) : niet bij lineariteitsonderzoek gebruikt, waarschijnlijk meetfout

Tabel 11. KNMI-windtunnel, januari 1968. Anemometergroep C contra pitotbuis.

Manometer- helling	016-XVI-05		016-XVI-07		016-XVI-15	
	u_y	du	u_y	du	u_y	du
1:5	(16.72)	-18	(16.57)	-18	(16.88)	-12
	(15.68)	-32	(15.71)	-29	(15.80)	-20
	(14.85)	-15	(14.57)	-33	(14.78)	-22
1:10	13.88	-12	13.52	-33	13.77	-13
	12.76	-24	12.67	-28	12.85	-15
	11.79	-21	11.96	+ 6	11.85	- 5
	10.83	-12	10.79	- 1	10.87	-13
1:25	9.86	-17	9.94	- 9	9.91	- 9
	8.91	- 6	8.88	- 6	8.94	- 6
	7.89	-12	7.97	-14	7.88	- 3
	6.88	-10	6.77	-12	6.89	- 9
	5.92	- 8	5.83	- 8	5.94	-10
	4.91	- 6	4.92	0	5.07	+ 1
	4.43	- 5	3.91	-11	4.44	- 7
	3.97	- 2	3.03	- 1	3.99	- 3
	3.48	- 4	2.34	- 4	3.57	+ 5
	3.04	0			3.06	+ 2
2.26	- 2			2.35	+ 7	

In deze tabel is $du = 100(u_y - u_p(1,2,3))$.

Tabel 12. KNMI-windtunnel, november 1966. Anemometergroep D contra vleugelrad.

016-XVI-01		016-XVI-06		016-XVI-12	
u_c	du	u_c	du	u_c	du
(17.21)	- 4	(17.47)	- 6	(17.21)	+ 3
13.84	- 1	(17.42)	+ 1	(17.11)	- 4
9.92	- 6	13.96	+ 1	(17.06)	+ 5
8.04	+ 5	13.88	- 4	13.55	- 2
6.37	+ 4	9.92	- 3	9.80	+ 5
4.20	- 1	7.90	+ 7	8.04	+ 2
3.27	- 1	6.22	+ 5	7.95	+ 2
2.23	- 3	4.11	+ 1	6.32	+ 4
(1.76)	- 4	3.12	- 1	4.17	+ 1
(1.34)	- 6	2.17	- 6	3.17	- 2
(1.05)	- 7	(1.73)	- 6	2.15	- 4
(0.68)	- 8	(1.18)	- 7	(1.72)	- 2
(0.37)	- 3	(0.82)	-10	(1.12)	- 6
$a=1.9241$		(0.62)	-10	(0.72)	- 9
$u_o=0.17$		(0.34)	- 6	(0.56)	- 7
		$a=1.9050$		$a=1.9015$	
		$u_o=0.20$		$u_o=0.16$	

Tabel 13. KNMI-windtunnel: februari 1968, anemometergroep E contra vleugelrad;
april 1968, anemometergroep F contra vleugelrad.

Lambrecht-1440		015-XV-14		015-XV-16	
u_c	du	u_k	du	u_k	du
(16.44)	+11	(16.89)	-31	(16.85)	- 6
(15.23)	+10	(16.13)	+10	(16.03)	-14
(14.10)	+ 6	(14.79)	-21	(15.28)	+ 4
13.01	0	14.05	- 1	14.01	- 4
12.13	+ 1	13.19	- 4	(13.00)	-20 (£)
11.14	- 1	12.11	+ 3	12.13	+ 2
10.19	- 2	11.17	- 1	11.15	0
9.12	+ 4	10.36	- 8	10.24	+ 2
8.07	- 3	9.15	+ 1	9.18	- 3
7.19	+ 2	8.15	+ 8	8.22	+ 2
6.14	- 1	7.21	+ 3	7.14	+ 4
5.41	+ 1	6.23	- 2	6.08	- 1
(4.21)	- 7	4.99	+ 1	5.24	+ 1
(3.24)	-16	4.50	+ 4	4.57	+ 2
(2.03)	-24	4.09	+ 3	4.06	+ 2
(1.71)	-34	3.59	+ 2	3.40	- 2
(1.12)	-43	3.05	0	3.12	- 1
(0.69)	-53	(2.63)	-13 (£)	2.54	0
$0.42 = u_g$		2.07	- 1	2.12	- 4
$a=1.9543$		(1.50)	0	(1.52)	- 5
$u_o=0.83$		(1.25)	+ 2	(1.10)	- 6
		(0.52)	+ 3	(0.52)	- 6
		$a=1.9772$		$a=1.9887$	
		$u_o=0.12$		$u_o=0.14$	

(£): waarschijnlijk meetfout

Tabel 14. Samenvatting 016-XVI-ijkingen.

Eigen codenummer anemometer	Nummer tabel	Helling (m/s per R)	Nulsnelheid u_0 (m/s)	Aanloopsnelheid u_s (m/s)	Opmerkingen
01	12	1.9241	0.17	0.37	
06	12	1.9050	0.20	0.34	
12	12	1.9015	0.16	0.56	
05	8	(1.8815)	0.16	0.29	Cups gerepareerd
07	8	1.8949	0.20	0.29	
15	8	1.9062	0.24	0.49	
07	8	1.9065	0.15	0.49	Na revisie
15	8	1.8978	0.20	0.31	Na revisie

Tabel 15. Lineariteitsafwijkingen 016-XVI en 016-p, in klassen gecombineerd; klassegrootte $\pm 0,15$ m/s voor 016-XVI, $\pm 0,20$ m/s voor 016-p.

016-XVI			016-p		
u_t -klasse (m/s)	Aantal metingen	\bar{du}	u_t -klasse (m/s)	Aantal metingen	\bar{du}
2.65	4	- 2	2.4	4	- 3
2.35	4	- 4	2.0	4	- 4
2.05	6	- 5	1.6	3	- 7
1.75	8	- 6	1.2	5	- 9
1.45	3	- 9	0.8	3	-10
1.15	8	- 9	0.4	3	-11
0.85	5	-11			
0.55	7	- 9			
0.25	5	- 8			

Tabel 16. Verloop van helling der ijking tijdens revisie van cupanemometers.

Anemometer	Nummer tabel	Helling vóór revisie	Helling na revisie	Verskil
016-XVI	8	1.8949	1.8978	+ 0,15%
-07 & -15	8	1.9062	1.9065	+ 0,03%
016-p	1,7	1.977	1.964	- 0,66%
Hellingsverloop vleugelradijking tijdens transport naar Bracknell:				- 0,7%

$\sqrt{(\text{verschil})^2} = 0,56\%$