



TECHNISCHE HOGESCHOOL
VLIEGTUIGBOUWKUNDE

Rapport VTH-10
(Tunnelrapport A.1)

Algemene richtlijnen voor
het ontwerp van de VTH-windtunnel
door

ir H.Wittenberg en ir G.J. Spies

Delft - Nederland
december 1947

Technische Hogeschool
Vliegtuigbouwkunde.
Rapport 10.

(Tunnelrapport A.1.)

Algemene richtlijnen voor het ontwerp van de
VTH-windtunnel.

Inhoud:

| | |
|---|---------|
| 1. Inleiding | blz. 1 |
| 2. Metingen, die in een windtunnel verricht kunnen worden | blz. 1 |
| 3. Eisen, welke aan de tunnel gesteld worden | blz. 2 |
| 4. Keuze van het windtunneltype | blz. 5 |
| 5. Keuze van de meetdoorsnede en de maximale snelheid | blz. 7 |
| 6. Electriche installatie en ventilator | blz. 14 |
| 7. Meetsystemen | blz. 17 |
| 8. De inrichting van het gebouw | blz. 20 |
| 9. Samenvatting en conclusies | blz. 21 |

Totaal 22 blz. en 2 bladen.

Opgesteld door: H. Wittenberg en G. J. Spies

Afgesloten: December 1947.

Gezien de hoogleraar:

datum:

UW

Rapport 10: Algemene richtlijnen voor het ontwerp
van de VTH-windtunnel.

1. Inleiding.

In dit rapport wordt nagegaan aan welke eisen een windtunnel voor de "Vliegtuigbouwkunde" der Technische Hogeschool zal moeten voldoen om goed bruikbaar te zijn in het practicum "toegepaste aerodynamica" voor studenten en als tunnel voor het verrichten van wetenschappelijk onderzoek.

Er wordt verwacht, dat de windtunnel circa 50% van de beschikbare tijd bezet zal zijn voor het practicum der studenten.

2. Metingen, die in een windtunnel verricht kunnen worden.

Het zou ideaal zijn, wanneer een tunnel kon worden geconstrueerd, waarin alle denkbare metingen op het gebied van modelonderzoek en stromingsonderzoek zouden kunnen worden verricht.

Dit is echter door de vele tegenstrijdige eisen onmogelijk, zelfs al zouden de hoge kosten geen bezwaar zijn.

De universele windtunnel benadert het gestelde ideaal het meest, zodat andere typen, zoals vooral in de laatste jaren veel zijn ontwikkeld, in dit verband buiten beschouwing blijven.

Aan de volgende objecten kunnen in een dergelijke windtunnel metingen verricht worden:

- a. zgn. tweedimensionale, van wand tot wand reikende modellen van vleugelprofielen, ter bepaling van draagkracht en weerstand, de drukverdeling, de maximale draagkracht, ook bij gebruik van kleppen, spleten enz., zowel voor de conventionele als voor "laminar-flow" profielen.
- b. complete vliegtuigmodellen (ook het zgn. "halfmodel"), ter bepaling van polaire, stabiliteit en bestuurbaarheid, algemeen stromingsonderzoek
- c. vliegtuigonderdelen op ware grootte of op grote schaal, voor weerstandsmetingen, interferentie en alg. stromingsonderzoek
- d. geometrische figuren als bol, cylinder, e.d. voor vergelijkende aerodynamische metingen.
- e. instrumenten, vnl. voor ijking en meettechniek.

- f. luchtschroefmodellen, ter bepaling van trekkracht, moment e.d.
- g. enkele bijzondere proefopstellingen voor het bepalen van weerstroming, interferentie, onderzoek van turbulentie, grenslaag, enz.

Als meetmethoden kunnen genoemd worden:

- a. het wegen van krachten

- Hierbij te onderscheiden:
1. één componentenweging (weerstand)
 2. drie componentenweging (lift, weerstand en moment)
 3. zes componentenweging (alle optredende krachten en momenten worden bepaald)

- b. de meting van krachten door impulsverliesberekening.

- c. drukmetingen, ter bepaling van krachten of snelheid.

- d. stromingsonderzoek door vaantjes, draden e.d. ter bepaling van loslatingsverschijnselen.

- e. het blazen van rook langs modellen.

- f. het meten van turbulentie met behulp van de hittedraad-anemometer.

Meer speciale methoden zoals de "Schlieren"-methode, de interferentiemethode, ultramicroscopisch grenslaagonderzoek e.d. blijven hier buiten beschouwing, daar zij minder geschikt in een universele tunnel kunnen worden toegepast, en bovendien door hun complicaties speciaal personeel vereisen.

3. Eisen, welke aan de tunnel worden gesteld.

Wil men de onder 2. genoemde metingen betrouwbaar en vlot kunnen verrichten, dan moet de tunnel aan vele tegenstrijdige eisen voldoen. Er moet dus dikwijls een compromis gemaakt worden.

De voornaamste eisen zijn:

- a. voor de stroming in de meetruimte.

1. Een voldoende hoog getal van Reynolds moet voor de modellen bereikbaar zijn. Dit is nodig om de metingen aan het model te kunnen vergelijken met de ware-grootte toestand. Men stelt als eis, dat voor vliegtuigmodellen het bereikbare getal van Reynolds, betrokken op de koorde minstens $1,5 - 2,5 \cdot 10^6$ moet bedragen.

2. Een lage turbulentie van de stroming, teneinde de invloed hiervan op de grenslaagverschijnselen te kunnen verwaarlozen.

Een lage turbulentie wordt bereikt door een aantal gazen in een doorsnede van het omloopkanaal met lage snelheid te plaatsen.

Er kan dan een turbulentiegraad verkregen worden, die kleiner is dan 0,02°/o.

Voor sommige proeven wordt verlangd, dat de stroming in de meetplaats wél turbulent is. Deze turbulentie is te verkrijgen door een apart turbulentie-gaas.

3. Het stromingsveld in de meetruimte moet homogeen zijn, d.w.z. de snelheidsverdeling moet gelijkmatig zijn, de grenslaag aan de wanden dun en het verloop van de statische druk over de meetlengte gering. Dit brengt mede gladde wanden in het kanaal met kleine divergentie-hoeken (maximaal 6°) en middelen om het drukverloop in de meetruimte te regelen b.v. door verstelbare wanden of klepjes.

4. De temperatuur in de meetplaats mag niet hoger zijn dan 45° C, daar anders de was in het model vloeibaar gaat worden en het Re-getal sterk daalt.

5. De geluidsintensiteit in de meetplaats moet zoveel mogelijk beperkt worden, daar geluidsgolven eenzelfde effect op de grenslaag uitoefenen als turbulentie. Naar Batchelor is een geluidsterkte van 110 decibel in dit opzicht vergelijkbaar met een turbulentiegraad van ca. 0,02°/o.

In afzonderlijke rapporten zal uitvoeriger op de genoemde punten 2 tot en met 5 worden ingegaan.

b. voor de vorm van de meetruimte:

1. De doorsnede moet aangepast zijn aan de uit te voeren proeven; over de gekozen afmetingen wordt onder 5. nader gesproken.

2. Er moet zowel met open als met geheel of gedeeltelijk gesloten straal gewerkt kunnen worden. Met open straal werkt men sneller en gemakkelijker dan met gesloten straal, terwijl voor het onderwijs ook de goede zichtbaarheid en toegankelijkheid van het model van belang is. Met gesloten straal kan men echter een hoger getal van Reynolds bereiken, doordat de verliezen geringer zijn, tevens is de luchtstroom gelijkmatiger. Gedeeltelijk gesloten straal kan voordeel opleveren, daar de tunnelwandcorrecties in dat geval kleiner zijn (zie rapport).

- 3e. De modelafmetingen moeten zo praktisch mogelijk zijn, d.w.z. de vlucht van het model ca. 1 à 2 meter bedragen. Een vlucht kleiner dan 1 meter maakt, dat het model moeilijk op nauwkeurige wijze te vervaardigen is, terwijl een vlucht groter dan 2 meter het model duur en onhandelbaar doet zijn.
- 4e. De lengte van de meetruimte moet voldoende groot zijn om een gelijkmatige drukverdeling te krijgen en om impulsmetingen voor en achter het model mogelijk te maken. Deze lengte wordt bij open straal echter sterk beperkt door de grote energieverliezen (zie rapport).

c. voor de aandrijving.

- 1e. De aandrijving en de bediening daarvan moeten eenvoudig, "foolproof" en betrouwbaar zijn, daar er door onervaren studenten wordt gewerkt. Zo nodig moeten zekeringen of uit-schakelrelais ervoor zorgen, dat de installatie niet beschadigd kan worden.
- 2e. De snelheid moet goed regelbaar zijn in een gebied, dat zich tenminste uitstrekt van de maximale snelheid tot ongeveer 1/10 van die snelheid.
- 3e. De snelheid moet zeer goed constant te houden zijn; zo mogelijk moet een regelsysteem worden aangebracht, dat de snelheid automatisch op een ingestelde waarde houdt.
- 4e. Het rendement moet goed zijn. Deze factor is niet zo belangrijk als men zou denken, daar de stroomkosten blijkens de ervaring slechts een klein deel van de totale exploitatiekosten bedragen.

d. voor het meetsysteem:

- 1e. Het moet gevoelig zijn en nauwkeurig. Deze eisen zullen in een later rapport nader beschouwd moeten worden.
- 2e. Door middel van hefboom- en raamconstructies moeten de door de schalen aangewezen krachten zonder herleiding de componenten om langs-, dwars- en topas van het model geven. Indien dit niet bereikbaar is, moet gezorgd worden, dat de herleidingen tot een minimum beperkt blijven.
- 3e. Het veranderen van het meetbereik door het bijplaatsen van gewichten e.d. moet vermeden worden.
- 4e. Aflezings op afstand is wenselijk, om de bediening van de

tunnel centraal te kunnen maken, d.w.z. regeling van snelheid en aflezing van de balansen geschiedt op dezelfde plaats.

5e. De constructie moet robuust zijn, zodat ondeskundig gebruik geen beschadiging veroorzaken kan.

6e. De verplaatsingen van het model door schommeling van de balans moeten klein en gedempt zijn, opdat de stroming om het model niet van karakter wisselt. Het is dan n.l. mogelijk, dat model en balans in onstabiele slingering geraken.

e. overige eisen:

1e. De tunnel moet overal gemakkelijk schoon kunnen worden gehouden, (ook de gazen) dus moet gezorgd worden voor de nodige goed-afgedichte luiken of deuren. Stof in de tunnel beschadigt instrumenten en modellen.

2e. Complicaties als koeling, drukverhoging enz. moeten, indien enigszins mogelijk, vermeden worden.

3e. Hoekschoepen, leiplatten, propellerbladen e.d. moeten zo mogelijk verstelbaar zijn om eventueel later correcties te kunnen aanbrengen.

4. Keuze van het windtunneltype.

In verband met de eis van zo laag mogelijke turbulentie hiervoor in 3. onder a. 2e genoemd, is het van groot belang, dat de tunnel een zgn. "lage turbulentie-tunnel" wordt; een type dat in de laatste jaren is ontwikkeld uit de universele windtunnel. Alleen in een lage turbulentietunnel is modern stromingsonderzoek (bv. grenslaagonderzoek) mogelijk. Van dit type zijn twee uitvoeringen mogelijk:

a. het open type of "Eiffel" tunnel. Er is hier geen omloopkanaal, zodat de bouwkosten hiervan bespaard worden; het effect van een zgn. "modelschaduw" wordt vermeden. (Hieronder verstaat men het effect, waarbij de verhoging van de stroming door het model nog merkbaar is vòòr het model; dit kan bij het omlopende kanaal optreden). Het is echter noodzakelijk om de meetplaats afgesloten te houden, omdat in de straal onderdruk heerst. Ook heeft men bij dit tunneltype veel last van snelheidsfluctuaties in de stroom, die vergeleken kunnen worden met de trillingen in een orgelpijp.

Bovendien moet de tunnel geheel in een hal worden geplaatst.
b. Het "Göttinger" type met omloopkanaal. Dit type verdient hier de voorkeur, omdat het meetgebouw dan veel kleiner kan worden, wat ruim opweegt tegen de kosten van het omloopkanaal.

De snelheid kan beter constant worden gehouden; de kwaliteit van de luchtstroom is beter en het benodigde motorvermogen is geringer dan voor de "Eiffel"tunnel.

Meestal bouwt men in het buitenland de tunnels horizontaal; in ons land is het echter voor niet te grote tunnels voordeliger om verticaal te bouwen, om de volgende redenen:

- 1e. het benodigde grondoppervlak is geringer.
- 2e. er behoeft minder grondwerk verricht te worden
- 3e. de fundering is veel goedkoper (heipalen)
- 4e. het gebouw krijgt beter licht,
- 5e. het geheel krijgt aesthetisch een beter aanzien.

Als bouwmateriaal voor het kanaal van de windtunnel wordt genoemd gewapend beton, staal of hout.

Er wordt voorgesteld gewapend beton, daar dit het goedkoopste en het best verkrijgbare materiaal is. Een nadeel is, dat warmte-uitwisseling door beton slechter is dan door staal.

Beton is echter beter bestand tegen weersinvloeden dan staal.

Hout komt alleen in aanmerking voor kleine tunnels, b.v. model-tunnels.

De hoeken in het omloopkanaal kunnen haaks of afgerond worden gemaakt. Hoewel men bij veel nieuwe tunnels afgeronde hoeken ziet, is een haakse hoek met hoekschoepen aerodynamisch beter. De ronde hoeken worden toegepast uit sterke overwegingen bij druk-tunnels. Hier heeft het dus geen zin.

De kanaaldelen binnen het gebouw worden van staal en hout gemaakt; daardoor zijn eventuele veranderingen gemakkelijker aan te brengen. De meetplaats kan zowel open als gesloten worden gebruikt, doordat de opvangtrechter en de wanden van de meetplaats afneembaar gemaakt kunnen worden.

Op het M.L.L. heeft men de stalen tuit afneembaar gemaakt, om ook met grotere straaldorsnede en kleinere snelheid te kunnen werken. In de praktijk blijkt dat steeds de kleine straal wordt gebruikt, zodat het met het oog op de daaraan verbonden complicaties niet aan te bevelen schijnt om de tuit afneembaar te

maken.

Het is voorts zeer belangrijk de tuit bij het beproeven en instellen van de tunnel zeer nauwkeurig te richten, daar de straal zuiver horizontaal moet zijn, teneinde de invalshoeken van de modellen nauwkeurig te kunnen instellen.

Er bestaat grote kans, dat bij montage en demontage van tuiten van verschillende vorm de juiste straalrichting, waarvan het bepalen zeer veel tijd eist, verloren gaat.

5. Keuze van de meetdoorsnede en de maximale snelheid.

a. Vorm der meetdoorsnede.

Stromingstechnisch heeft de cirkelvormige doorsnede voordelen, welke echter niet opwegen tegen de kosten, daar een cirkelvormige doorsnede de wenselijkheid medebrengt het gehele omloopkanaal deze doorsnede te geven.

Ook is een cirkelvormige doorsnede niet economisch voor de meting aan vliegtuigmodellen, daar hiervoor de spanwijdte de maatgevende afmeting is. Hetzelfde geldt voor een vierkante doorsnede. De elliptische straaldorsnede biedt te weinig voordelen boven de rechthoekige vorm met afgesneden of afgeronde hoeken om de hogere verwaardigingskosten te rechtvaardigen.

Daarom wordt voorgesteld de tunnel en rechthoekige doorsnede met afgesneden hoeken te geven. De verhouding tussen de rechthoekszijden mag om de volgende redenen niet te zeer van 0,8 afwijken:

1e. Voor een hoogte- breedte verhouding van 0,8 is de tunnelwandcorrectie het minst afhankelijk van de spanwijdte van het model.

2e. Kiest men de verhouding groter, (dus een meer vierkante vorm), dan is voor hetzelfde model van een vleugel of vliegtuig de straaldorsnede groter, dus ook het energieverbruik. Tevens zijn de ophangdraden of -stijlen langer, wat een grotere weerstandscorrectie nodig maakt. Kiest men hem echter kleiner, dus een plattere rechthoeksvorm, dan verliest de tunnel aan bruikbaarheid voor modellen met cirkelvormige doorsneden b.v. schroeven en gondels.

3e. Een te platte rechthoeksvorm maakt het werken aan het in de tunnel opgehangen model bij gesloten meetplaats moeilijk en maakt dat er, doordat de contractie in een verticaal

en een horizontaal vlak ongelijk zijn, gemakkelijk moeilijkheden met de stroming kunnen ontstaan. (bij de schroef is het kanaal cirkelvormig van doorsnede).

Daar in de VTH-tunnel meestal met vleugel- en vliegtuigmodellen zal worden gewerkt, is het verantwoord de doorsnede iets platter te houden, zodat een verhouding van hoogte tot breedte van de meetplaats van $h/b=0,7$ wordt voorgesteld, hetgeen ook bij het N.L.L. voorontwerp het geval is. (zie hierna onder b.)

Bij het gebruik van 2-dimensionale modellen is het dan aan te bevelen, het model verticaal op te stellen, waardoor het smaller en dus goedkoper kan worden. De tunnelwand correcties zijn dan tevens kleiner, (grotere afstanden van model tot tunnelwand het effect van "blocking" van de doorsnede wordt geringer, terwijl tenslotte de modelschaduw, die vooral bij grote invalshoeken van belang is, kleiner wordt.

Weliswaar zullen dan krachtenwelingen bezwaarlijk zijn, maar impulsmetingen zijn zeer goed uit te voeren, evenals drukmetingen. Voor twee-dimensionale modellen worden beide laatste metingen ook het meest toegepast, omdat de krachten op deze modellen zeer groot zijn en de balansen hiervoor zeer zwaar moeten worden uitgevoerd.

b. Het bereikbare getal van Reynolds.

Dit getal bepaalt de bruikbaarheid van vele metingen, vooral voor metingen van weerstand en maximale draagkracht en is daarom van dominerend belang voor de beoordeling van de gebruiksmogelijkheden van de tunnel.

In het onderstaande zal voor een vliegtuigmodel het getal van Reynolds worden berekend, dat bereikbaar is in de windtunnel, die voorlopig door het N.L.L. voor de Technische Hogeschool ontworpen werd.

Dit voor-ontwerp zal in het volgende nader worden aangeduid als "N.L.L.-voor-ontwerp". Een schets van dit ontwerp is achter in het rapport bijgevoegd. (blad 1).

Aangenomen wordt een rechthoekig vleugelmodel met slankheid 8 (een gemiddelde waarde voor vliegtuigen) en een spanwijdte van 0,7 maal de straalbreedte. De invloed van de tunnelwand varieert dan weinig over de gehele spanwijdte.

De straalafmetingen zijn 1,25 x 1,80 m, de spanwijdte van het onderhavige model wordt dus 0,7 x 1,80 = 1,26 meter, en de vleugelkoorde $\frac{1,26}{8} = \text{ca. } 0,16 \text{ m.}$

Volgens opgave van het N.L.L. is voorts de maximale straalsnelheid 110 m/sec en de luchttemperatuur daarbij 45° C. (zie blad 1). De kinematische viscositeit is $\nu = 0,181 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ voor een druk van 760 mm Hg en een temperatuur van 45° C. Het bereikbare getal van Reynolds wordt $\frac{v l}{\nu} = \frac{110 \times 0,16}{0,181} \cdot 10^4 = 0,97 \cdot 10^6.$

Gebruikt men een 2-dimensionaal vleugelmodel (verticaal opgesteld, van wand tot wand reikend), dan kan men naar schatting een koorde toepassen van 60 cm, en in dat geval wordt het bereikbare getal van Reynolds:

$$R_e = \frac{110 \times 0,60}{0,181} \cdot 10^4 = 3,64 \cdot 10^6.$$

De vraag doet zich voor of dit getal van Reynolds voldoende is voor het uitvoeren van metingen, die betrouwbaar geëxtrapoleerd kunnen worden naar de hogere waarden van R_e , die in de vlucht optreden.

De grootheden, die door het getal van Reynolds beïnvloed worden, zijn vooral de maximale draagkrachtscoëfficiënt en de weerstandscoëfficiënt.

De maximale waarde van de draagkrachtscoëfficiënt is van belang voor het gedrag van een vliegtuig bij lage snelheid. De R_e -waarden, die bij de ware grootte in deze toestand optreden bedragen 10^6 tot 10^7 . Dit getal van Reynolds is bij de meeste windtunnels wel bereikbaar. De oorzaak, dat in de oudere tunnels de max. draagkrachtscoëfficiënt niet betrouwbaar te bepalen is, moet dan ook gezocht worden in de turbulentie van de luchtstroom in de meetplaats.

Bij metingen in een lage-turbulentietunnel kan men dan verwachten, dat de maximale draagkrachtscoëfficiënt betrouwbaarder bepaald kan worden dan bij de oudere windtunnels. Het bereikbare getal van Reynolds voor het N.L.L. voorontwerp is daartoe voldoende, zeker voor de twee-dimensionale modellen.

De waarde van de weerstandscoëfficiënt moet echter zowel bij kleine als bij grote vliegsnelheden worden bepaald. Voor

het laatste geval is het Re-getal, dat voor een drie-dimensionaal model volgens het voorgaande bereikt kan worden, in de meeste gevallen onvoldoende. Dit zal in het volgende worden toegelicht.

Voor een vlakke plaat is het verloop van de weerstandscoefficiënt met het getal van Reynolds op blad 2 aangegeven.

Bij lage waarde van het getal van Reynolds is de grenslaag geheel laminair, bij hoge waarden van dit getal geheel turbulent, waarbij in het gebied met een getal van Reynolds van $5 \cdot 10^5$ tot $5 \cdot 10^6$ een overgangsgebied optreedt met deels laminaire, deels turbulente grenslaag. Bij toenemende waarde van het getal van Reynolds verschuift in dit gebied het omslagpunt van de grenslaag naar voren. Voor een vleugelprofiel heeft ook de optredende drukgradient invloed op het omslagpunt der grenslaag. Ook hier is de invloed van het getal van Reynolds zodanig, dat het omslagpunt meer nabij de neus van het profiel gelegen is, naarmate het getal van Reynolds hoger wordt. Boven een bepaald Re-getal wordt de grenslaag na een zeker overgangsgebied vrijwel geheel turbulent.

Dit laatste getal van Reynolds is voor een normale vleugel ongeveer $5 \cdot 10^6$, zodat de vleugel in de werkelijke vlucht een vrijwel geheel turbulente grenslaag bezit. Bij de meting aan een drie-dimensionaal model, waarvoor het getal van Reynolds volgens bovenstaande $0,97 \cdot 10^6$ bedraagt, zal de grenslaag deels laminair, deels turbulent zijn, zodat de weerstandscoefficiënt niet gelijk is aan die van de werkelijke toestand bij ware grootte. Omdat de variatie van de weerstandscoefficiënt met het getal van Reynolds, dus met de ligging van het omslagpunt onvoldoende bekend is, zal een juiste herleiding van de meetresultaten naar de ware grootte een grote ervaring eisen.

Voor zogenaamde "laminar-flow" profielen wordt het overgangsgebied eerst bij veel hogere getallen van Reynolds bereikt (volgens sommige gegevens bij ongeveer 10^7). Metingen aan vliegtuigmodellen met een dergelijk profiel, zullen dus steeds beneden dit overgangsgebied geschieden. Indien het getal van Reynolds voor het ware grootte vliegtuig ook beneden de waarde ligt, waarvoor het overgangsgebied begint, zal een extra-polatie mogelijk zijn met behulp van de kromme voor de weerstandscoefficiënt voor de vlakke plaat met laminaire grenslaag. Waarschijnlijk zal het ware grootte vliegtuig met "laminar-flow" vleugel-

profiel ook reeds een getal van Reynolds bereiken, dat in het overgangsgebied is gelegen. Gegevens hierover worden slechts sporadisch in de literatuur gevonden.

Bij twee-dimensionale modellen is volgens het voorgaande een getal van Reynolds bereikbaar van $3,64 \cdot 10^6$. Voor normale profielen is hierbij de grenslaag al vrijwel geheel turbulent, zodat extra-polatie naar de werkelijke vlucht mogelijk is met behulp van de kromme voor de vlakke plaat met turbulente grenslaag.

"Laminar-flow" profielen geven echter dezelfde moeilijkheid als bij het drie-dimensionale model.

Wil men de moeilijkheden van extra-polatie vermijden, dan is het nodig het bereikbare getal van Reynolds op te voeren. Dit wordt in een volgend punt besproken.

c. Verhoging van het bereikbare getal van Reynolds.

De volgende methoden zijn daarvoor mogelijk :

1^e. verlaging van de kinematische viscositeit door het opvoeren van de druk. Deze complicatie is voor de V.T.H.tunnel niet gewenst.

2^e. verhoging van de snelheid. Het benodigde vermogen is ongeveer evenredig met de derde macht van de snelheid in de meetplaats. Zou men b.v. de snelheid opvoeren van $v = 110$ m/sec tot $v = 140$ m/sec, dan wordt het bereikbare getal van Reynolds dus $\frac{140}{110} \times 0,97 \cdot 10^6 = 1,23 \cdot 10^6$ (ca 27% hoger).

Het benodigde vermogen wordt echter in plaats van 600 pk nu $600 \times \left(\frac{140}{110}\right)^3 = \text{ca } 1200$ pk, dus 100% hoger. Dit is dus een kostbare methode. Dit gehele vermogen is nodig om de weerstandsverliezen in de tunnel te overwinnen en wordt dus in warmte omgezet. Wanneer bij een snelheid van 110 m/sec een temperatuur verwacht mag worden van 45°C (volgens opgave van het N.L.L.), dan zal deze bij een $v = 140$ m/sec nog aanzienlijk hoger worden, hetgeen ontoelaatbaar is.

Koeling van de tunnel zou dus noodzakelijk worden; hiervoor bestaan de volgende systemen :

a. koelradiator in de grootste tunneldoorsnede (om de weerstand laag te houden).

b. door water gekoelde hoekschoepen.

c. toevoeren van verse lucht en afvoeren van warme lucht.

d. besproeien van het kanaal aan de buitenzijde.

e. inspuiten van water in de tunnel.

Voor de koeling met water (a en b) is een pompinstallatie nodig, terwijl onthardwater gebruikt moet worden. Het tunnelbedrijf wordt dus gecompliceerder, de kans op storingen wordt groter en de economie wordt slechter.

Ook voor systeem e (luchtverversing) is een pompinstallatie nodig.

Het systeem d (besproeien) wordt alleen bij metalen tunnels gebruikt; door de slechte warmtegeleiding in beton is dit systeem bij betonnen tunnels niet toe te passen. Insputting van water (systeem e) vereist ook een pompinstallatie, terwijl bovendien luchtverversing moet worden toegepast, daar anders de lucht in de tunnel al spoedig met waterdamp verzadigd zou worden.

Met het oog op de eenvoud is dus opvoering van de snelheid bij het tunnelontwerp van het N.L.L. boven 110 m/sec ongewenst.

3^e. Vergroting van de tunnelafmetingen.

De lage turbulentie-tunnel van het N.L.L. zal een meetdoorsnede krijgen van $2 \times 3 \text{ m}^2$ en een vermogen van ca 2000 pk.

Berekent men hiervoor op dezelfde wijze als aan het begin van dit hoofdstuk gedaan is het bereikbare getal van Reynolds, dan vindt men bij een windsnelheid van 120 m/sec :

$Re = 1,8 \cdot 10^6$ voor 3 dim. modellen en $Re = 6,75 \cdot 10^6$ voor 2-dimensionale, verticaal opgestelde modellen.

Ook bij deze tunnel is het overgangsgebied dus nog niet gepasseerd. Hieruit volgt, dat zelfs voor deze tunnel de mogelijkheid van extra-polatie van modelproef naar ware grootte voor de weerstand niet geheel zeker is. Een tunnel van dergelijke afmetingen vereist zeer zeker een staf van ervaren personeel en is niet geschikt voor het studenten-practicum. Bovendien mag niet uit het oog worden verloren, dat de vliegtuigmodellen voor dergelijke tunnels zeer kostbaar worden.

In het volgende zal nagegaan worden, wat bereikt kan worden met een kleine vergroting van het voor-ontwerp van het N.L.L. Vergroot men de meetdoorsnede van 2 m^2 tot 3 m^2 , dan komt men tot de volgende getallen : de breedte van de meetdoorsnede wordt $\sqrt{\frac{3}{2}} \times$ zo groot, het bereikbare getal van Reynolds (met behoud van $v = 110 \text{ m/sec}$) dus ook. Dit getal wordt dus $0,97 \cdot 10^6 \times \sqrt{\frac{3}{2}} = 1,19 \cdot 10^6$ voor 3-dim. modellen en $4,45 \cdot 10^6$ voor 2-dim. modellen.

Het benodigde vermogen wordt $\frac{3}{2}$ x zo groot, dus 900 pk in plaats van 600 pk. Daar de hele tunnel groter wordt, is koeling ook hierbij waarschijnlijk niet nodig.

Uitgaande van de begroting van de kostprijs voor het N.L.L.-ontwerp, wordt een schatting van de kostprijs opgesteld voor dit vergrote ontwerp.

Aangenomen wordt :

- 1^e. de kosten van het betonkanaal zijn evenredig met de derde macht van een lengte-afmeting, en worden dus ca $(\frac{3}{2})^{3/2} = 1,8$ x zo hoog.
- 2^e. de prijs van schroef, hoekschoepen en gazen neemt ongeveer evenredig met de meetdoorsnede toe, en wordt dus 1,5 x zo hoog.
- 3^e. volgens inlichtingen van het N.L.L. kan de prijs van de 900 pk motorinstallatie op f. 125.000 geschat worden.
- 4^e. de prijs van het meetsysteem wordt evenredig gesteld aan de lengte-afmeting, en wordt dus $\sqrt{\frac{3}{2}} = 1,225$ x zo hoog, dus $1,225 \times f. 30.000 = f. 37.000$.
- 5^e. de outillage wordt geschat op ca 23000 gulden.
- 6^e. het gebouw kan ongeveer even groot blijven.

De kostprijsbegroting wordt dan als volgt :

| Gegevens | N.L.L.voor-ontwerp | Vergroot Ontwerp |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|
| meetdoorsnede (m ²) | 2 | 3 |
| snelheid (m/sec) | 110 | 110 |
| vermogen (pk) | 600 | 900 |
| bereikbaar Re-model | $0,97 \cdot 10^6$ | $1,19 \cdot 10^6$ |
| Begroting | N.L.L.voor-ontwerp | Vergroot Ontwerp |
| betonkanaal | f. 50.000 | f. 90.000 |
| schroef, hoekschoepen, gazen enz. | f. 100.000 | f. 150.000 |
| aandrijfsysteem | f. 100.000 | f. 125.000 |
| meetsysteem | f. 30.000 | f. 37.000 |
| outillage | f. 20.000 | f. 23.000 |
| gebouw | f. 150.000 | f. 150.000 |
| totaal | f. 450.000 | f. 575.000 |

De geschatte kosten zijn dus 28% hoger, het getal van Reynolds ca 23% hoger. De vergroting van het getal van Reynolds verhoogt echter de bruikbaarheid van de tunnel niet veel, omdat men nog evenzeer midden in het overgangsgebied van de c_w -Re kromme meet voor een drie-dimensionaal model met normaal profiel. De aanzienlijk hogere aanschaffingsprijs is daarom niet gerechtvaardigd; bovendien zijn de exploitatiekosten veel hoger, daar ook de modellen duurder worden.

Verkleining van de tunnelafmetingen zou echter leiden tot een al te laag getal van Reynolds. Voor een getal van Reynolds, dat lager is dan 10^6 is men namelijk om de vlakke plaat in een gebied, waarvoor de variatie van de weerstandscoefficiënt met het getal van Reynolds zeer sterk is, hetgeen ook voor normale profielen volgens verschillende metingen het geval is. Het minimale getal van Reynolds is derhalve wel 10^6 . Bovendien worden dan de modellen voor een windtunnel kleiner dan het N.L.L.-voorontwerp zó klein, dat een nauwkeurige afwerking niet goed meer mogelijk is.

d. Conclusie.

De afmetingen van het N.L.L.-ontwerp (blad 1) moeten als een minimum beschouwd worden, waarbij metingen kunnen geschieden, die met een redelijke betrouwbaarheid vergelijkbaar zijn met de ware-grootte toestand van de verschillende meetobjecten.

Een naar verhouding kleine vergroting van dit ontwerp moet worden afgeraden, daar de kosten onevenredig hoger worden, zonder dat de bruikbaarheid veel groter wordt.

De weerstandscoefficiënt kan eerst voldoende nauwkeurig bepaald worden, indien de meetdoorsnede minstens 6 m^2 en de windsnelheid 120-150 m/sec bedraagt; het benodigde vermogen is dan ca 2000 pk. De tunnel is dan echter te gecompliceerd om te worden gebruikt voor het studenten-practicum. Het is daarom aan te bevelen, de afmetingen van het N.L.L.-voorontwerp aan te houden en deze voorlopige opzet te kiezen als uitgangspunt voor het ontwerp der V.T.H.-windtunnel.

6. Electrische installatie en ventilator.

Gedurende de laatste jaren zijn er in Amerika vele systemen ontwikkeld voor een electrische ventilatoraandrijving met regelbaar toerental. De meeste daarvan kunnen hier onbesproken blijven, omdat zij door hun grote complicaties slechts geschikt

zijn voor toepassing bij grote vermogens van b.v. 4000 pk of meer. De hieronder aangeduide methoden worden later in een uitvoeriger rapport nader beschouwd, daar zij door hun eenvoud en gemakkelijke hanteerbaarheid mogelijk geschikt zijn voor toepassing in de V.T.H.-tunnel.

- a. Het Ward-Leonard systeem, waarbij het draaistroomnet een omvormer voedt, die gelijkstroom levert voor het anker van de gelijkstroommotor, die de ventilator aandrijft. Door een afzonderlijke kleinere dynamo op één as met de omvormer, wordt de bekrachtigingsstroom voor de veldmagneten van de gelijkstroomdynamo ~~of omvormer~~ geleverd. De regeling van het ventilatortoerental geschiedt door wijziging van deze bekrachtigingsstroom d.m.v. weerstanden.

Voordelen : zeer betrouwbaar, eenvoudig te bedienen, goed regelbaar, vrij goed nuttig effect, kan in Nederland gebouwd worden.

Nadelen : omvangrijk en vrij kostbaar.

In Nederland is in windtunnels alleen ervaring opgedaan met dit systeem, en deze ervaring is onverdeeld gunstig.

- b. De draaistroom-inductiemotor met sleepringen. Het toerental kan geregeld worden door olieweerstanden in te schakelen in de rotor-keten. Teneinde het toerental constant te houden, is op de as van de motor een kleine gelijkstroommachine gebouwd, die bij te hoog toerental als generator, bij te laag toerental als motor werkt. Deze kleine motor wordt geregeld door een Ward-Leonard-schakeling.

Beneden 0,3 x het max. toerental wordt de inductie-motor uitgeschakeld en wordt alleen de gelijkstroommotor voor de aandrijving gebruikt.

Voordelen : goedkoop en weinig omvangrijk; goed rendement bij max. toeren.

Nadelen : laag nuttig effect bij ca 70% van de max. snelheid, t.g.v. de extra weerstand in de ankerkring van de inductiemotor. Regelbaarheid minder goed, bediening minder eenvoudig. Het is de vraag of de benodigde olieweerstand in Nederland kan worden vervaardigd.

Dit systeem staat zeker ten achter bij het onder a genoemde het zou echter in aanmerking komen, indien een Ward Leonard aggregaat te duur of niet op redelijk termijn leverbaar is.

c. Draaistroom-synchroonmotor met poolomschakeling.

Deze motor kan op enkele constante toerentallen draaien; de verdere toerenregeling kan geschieden door spoedverstelling van de schroef.

Voordelen : goedkope, eenvoudige en gemakkelijk te bedienen motorinstallatie weinig omvangrijk.

Nadelen : gecompliceerde schroefnaaf, bij een van de ontwerptoestand afwijkende spoed van de ventilator minder goede snelheidsverdeling in de tunnel, sterke stroomstoten in het net bij inschakelen.

De Nederlandse machinefabrieken hebben geen ervaring in het bouwen van een schroefnaaf met spoedverstelling, waardoor de betrouwbaarheid waarschijnlijk niet gegarandeerd kan worden.

Evenmin is het zeker of het G.E.B. geneegen zal nemen met de grote optredende stroomstoten. Het nuttig effect is problematisch, daar de ventilator bij een bepaalde bladstand de beste snelheidsverdeling en max. rendement levert; bij afwijkende bladstanden is derhalve het schroefrendement lager en zijn er misschien extra gazen nodig voor verbetering van de snelheidsverdeling. Daardoor kan het voordeel van een goed electrisch rendement van de installatie teniet gedaan worden.

Ook deze installatie staat derhalve ten achter bij het W.L. systeem en komt dus pas in aanmerking, wanneer een W.L. aggregaat niet naar wens leverbaar zou zijn.

d. Draaistroom-shunt-collectormotor. De snelheid hiervan is goed regelbaar en het rendement is uitstekend door het ontbreken van omvormers e.d.

Het is nog niet bekend of deze machine leverbaar is in deze grootte; nadere informaties zullen worden ingewonnen bij fabrikanten en importeurs.

Voordelen : goed rendement, goed regelbaar, eenvoudig en gemakkelijk te bedienen, weinig plaatsruimte.

Nadeel : door gebrek aan ervaring is de betrouwbaarheid onbekend. Ook is het niet zeker of deze machine in ons land gebouwd kan worden.

Het N.L.L. heeft met de W.L. aggregaten goede ervaringen in de beide bestaande tunnels. In de nieuwe tunnel, die aangesloten wordt op de te bouwen N.L.L.-centrale, zal de snelheids-

regeling door frequentievariatie geschieden.

Samenvattend kan dus gezegd worden, dat een Ward-Leonard aggregaat het beste (maar ook het duurste) is, tenzij de draaistroom-shunt-collectormotor gunstige resultaten blijkt op te leveren en in ons land kan worden gebouwd.

Voorlopig wordt een Ward-Leonard-aggregaat aanbevolen, terwijl over de draaistroom-shunt-collectormotor nadere informatie zullen worden ingewonnen.

7. Meetsystemen.

Allereerst doet zich de vraag voor, of er drie- of zescomponentenmeting zal moeten worden toegepast.

Voor wetenschappelijk onderzoek is volgens de ervaring van het N.L.L. een 6-componentenbalans onontbeerlijk. In de grote tunnel heeft men aanvankelijk 3-comp. meting toegepast, maar al spoedig deed de behoefte aan een zescomponentenbalans zich gevoelen. Voor het eenvoudige werk in de kleine tunnel voldoet de driecomponentenbalans zeer goed.

De tunnel voor de T.H. zal afwisselend voor het studentenpracticum en voor wetenschappelijk werk worden gebruikt. Bij het practicum zal doorgaans met drie componenten kunnen worden volstaan, voor het wetenschappelijk werk is dit echter niet voldoende.

Wanneer de verwisseling snel moet kunnen geschieden, dan moeten er twee meetwagens zijn, zodat het model niet behoeft te worden gedemonteerd. Daarom wordt voorgesteld een driecomponentenbalans (voornamelijk voor het studenten-practicum) en een zescomponentenbalans (voor wetenschappelijk werk) toe te passen.

Het meetsysteem bestaat uit 2 delen :

- a. het ophangstelsel.
- b. het balansstelsel.

Hieronder zullen deze beide delen in het kort besproken worden; nadere bestudering is echter nodig om definitieve conclusies te trekken.

a. Het ophangstelsel.

Ophanging van het model aan een raamconstructie door middel van draden heeft de volgende voordelen :

- 1^e. Het gehele ophangstelsel is eenvoudig en goedkoop.
- 2^e. Men heeft veel vrijheid in het kiezen van de ophangpunten van het model (mogelijkheid van "improviseren").

De nadelen van draadophanging zijn :

- 1^e. De draden geven een hoge weerstand (tot 250% van de modelweerstand!).
- 2^e. De kans op breuk van een draad en het dientengevolge verloren gaan van een model is niet gering. De draden worden belast tot 50 kg/mm²; corrosie van één der draden kan breuk tengevolge hebben, waarna meestal ook de andere draden zullen breken.
- 3^e. Doordat de draden scheef geblazen worden moet er een correctie worden aangebracht.

Wanneer het model op een of meerdere stijlen wordt bevestigd, heeft men de volgende voordelen :

- 1^e. De stijlweerstand is laag (ca 15% van de modelweerstand).
- 2^e. De opstelling is overzichtelijk.
- 3^e. Correctie op vervorming is overbodig, wanneer de stijl stijf genoeg is; bij een stijl voor drie-componentenmeting is dit zeker te bereiken. De stijl wordt hier niet zijdelings aangeblazen; men kan hem daarom een gunstige doorsnede geven (stroomlijnform).
- 4^e. Minder kans op losraken van het model.
- 5^e. De interferentie, die mogelijk groter is dan voor draadophanging, kan bepaald worden met behulp van een loze stijl, die het spiegelbeeld is van de bevestigingsstijl ("dummy strut"). Bij draden is iets dergelijks niet mogelijk.

De nadelen van bevestiging op een stijl zijn :

- 1^e. Bij gieren van het model moet de stroomlijnbe kleiding van de stijl (stijlen) in de stroomrichting blijven staan; dit geeft complicaties en kans op storingen.
- 2^e. Bij zescomponentenmeting worden de stijlen zwaar belast en het meetsysteem is ingewikkeld.
- 3^e. De eventuele vervorming van de stijl (stijlen) bij meting onder een sliphoek is moeilijk te berekenen.

Uit het voorgaande kan geconcludeerd worden, dat, gezien de nadelen van bevestiging op een of meer stijlen hierbij, bij de zescomponentenmeetwagen, het model het beste aan draden kan worden opgehangen; voor de drie-componentenbalans, waarvoor deze nadelen niet gelden, komt echter bevestiging op stijlen het meest in aanmerking.

Men heeft dan tevens het voordeel, dat de beide ophangmethoden onderling vergeleken kunnen worden. Men moet er dan voor zorgen, dat het model zowel aan de stijl als aan draden hevestigd kan worden.

b. De balansen.

Voor de krachtmeting zijn de volgende instrumenten in gebruik :

- 1^o. De gewone balans of weegschaal: deze kan zeer nauwkeurig en gevoelig worden geconstrueerd, maar de meettijd is zeer groot en de kans op vergissingen, vooral bij onervaren gebruikers, is eveneens groot.
- 2^o. De schuifgewichtbalans. Door schuifgewichten met de hand te verstellen wordt evenwicht gemaakt. De nauwkeurigheid is zeer groot, hoewel minder dan die van de gewone balans. De meettijd is groot, evenals de kans op vergissingen.
- 3^o. Snelwegers. Het meetbereik moet vergroot worden door het bijplaatsen van gewichten, waarmee de nauwkeurigheid voldoende is op te voeren. De meettijden zijn veel kleiner dan voor de beide hiervoor genoemde methoden (max. $2\frac{1}{2}$ sec).
- 4^o. De balans met electrisch looppgewicht. Een groot voordeel is, dat hier de gehele weging automatisch gaat, zodat afstandsaflëzing kan worden toegepast; de nauwkeurigheid is voldoende. De prijs is veel hoger dan die van de hiervoor genoemde apparaten. De meettijd is vrij groot (ca 30 sec).
- 5^o. De electromagnetische balans. Het evenwicht wordt tot stand gebracht door een regelbare electromagneet. Electrisch wordt het benodigde aantal aanvullingsgewichten bijgeschakeld. Temperatuurcorrectie is waarschijnlijk nodig. De nauwkeurigheid van de Amerikaanse uitvoering (Eastman) is onvoldoende.
- 6^o. Hydraulische meting, waarbij gebruik gemaakt wordt van meetdozen. Er bestaat ook een systeem, waarbij er evenwicht met behulp van oliedruk wordt gemaakt.
- 7^o. Rekstrootjes, waarbij krachten gemeten worden d.m.v. de weerstandsverandering van een metaaldraadje tengevolge van de optredende rek.

De beide laatste methoden zijn duur en gecompliceerd; temperatuurcorrecties zijn nodig en de betrouwbaarheid is niet

voldoende bekend door het gebrek aan ervaring. Voor de V.T.H.-tunnel is mechanische weging het eenvoudigst en meest overzichtelijk.

Uit het bovenstaande volgt, dat voor het gestelde doel voornamelijk de snelweger of de balans met electrisch loopgewicht in aanmerking komt. Welke van deze twee het meest geschikt is, zal in een nader rapport worden bestudeerd. Voorlopig kan de keuze bepaald worden op de balans met electrisch loopgewicht, daar de snelwegers, die normaal in de handel zijn, niet nauwkeurig genoeg zijn, zodat men aangewezen is op de Toledo balans. Volgens door het N.L.L. ingewonnen inlichtingen levert Toledo echter uitsluitend complete meetsystemen, zodat de kostprijs zeer hoog wordt.

8. De inrichting van het gebouw.

Behalve de meetkamer en de machine-kamer moeten nog aanwezig zijn :

- a. Een kamer voor de assistent.
- b. Een kamer voor de technicus, die het toezicht op het tunnelbedrijf houdt.
- c. Een werkkamer met geluidsisolatie nabij de meetplaats.
- d. Een ijkkamer.
- e. Een montage-ruimte voor de modellen.
- f. Een opslagruimte voor de modellen.
- g. Een bergplaats voor het meetgereedschap.
- h. Een of meerdere experimenteer-ruimten, waarin de kleine, reeds aanwezige Eiffel-tunnel en het te vervaardigen model van de grote tunnel kunnen worden opgesteld.
- k. Een hoogspanningsruimte, die alleen van buiten af bereikbaar is, naar aanwijzingen van de G.E.B.
- l. Een werkplaats voor het vervaardigen der modellen.

Het is wenselijk de bergplaatsen voor modellen en gereedschap op de verdieping bij de meetkamer te bouwen.

Rekening moet worden gehouden met mogelijke uitbreidingen. Met het oog op trillingen en lawaai moeten gebouw en tunnel los van elkaar gefundeerd worden. Ook de verbinding van de instroomtuit en de diffusor met de muren van het gebouw moet zó zijn, dat er geen trillingen overgedragen kunnen worden.

9. Samenvatting en conclusies.

a. De afdeling Vliegtuigbouwkunde der Technische Hogeschool te Delft heeft een wind-tunnel nodig, die zowel geschikt is voor het practicum van studenten als voor het verrichten van wetenschappelijk onderzoek. Deze windtunnel zal samen met de reeds ter beschikking staande kleine windtunnel en met het model van de grote tunnel in één gebouw worden ondergebracht.

De voornaamste eisen, die aan deze tunnel moeten worden gesteld zijn:

1. een bereikbaar Re-getal van tenminste 1×10^6 .
2. een turbulentiegraad van ten hoogste 0,02%
3. de straal moet homogeen zijn, zowel bij open als bij gesloten meetruimte.
4. de straald doorsnede moet niet te groot zijn, nl. 2 à 3 m².
5. de bediening moet eenvoudig en "foolproof" zijn.
6. complicaties in de constructie (koeling, drukverhoging) moeten worden vermeden.

b. In dit rapport wordt aangetoond, dat het door het N.L.L. vervaardigde voor-ontwerp (zie blad 1) een gunstige oplossing geeft en dat vergroting noch verkleining voordeel oplevert voor het gestelde doel. Het voorlopige ontwerp van het N.L.L. kan dus al uitgangspunt worden gekozen voor het ontwerp van de VTH-wind-tunnel. De tunnel van dit voor-ontwerp heeft een dusdanige grootte, dat zij het verrichten van proeven door studenten zeer goed mogelijk maakt. De afmetingen zijn echter ook zodanig, dat metingen voor wetenschappelijk onderzoek verricht kunnen worden.

c. Voor de onder b genoemde windtunnel kan worden verwacht, dat het bereikbare getal van Reynolds voor vliegtuigmodellen zodanig is, dat uit de meetresultaten een redelijk beeld gevormd kan worden van de eigenschappen, die het vliegtuig op ware-grootte zal bezitten.

Het bereikbare getal van Reynolds voor tweedimensionale modellen is groot genoeg om het onderzoek en eventueel ontwikkelingswerk aan vleugelprofielen mogelijk te maken.

De afmetingen van de tunnel zijn voldoende groot om de verschillende meetobjecten, die onder punt 2 genoemd zijn, op te stellen.

Stromingsonderzoek met rook zal het beste kunnen geschieden in de kleine Eiffel-tunnel, omdat de rook de gazen en wanden der grote tunnel te zeer zal verontreinigen.

d. Voor de electrische installatie wordt aanbevolen het Ward-Leonard-systeem; over de draaistroom-shunt-collectormotor worden nadere inlichtingen ingewonnen.

e. Er wordt voorgesteld de tunnel-installatie zodanig uit te voeren, dat de verwisseling van modellen snel kan geschieden, hetgeen nodig is om afwisselend wetenschappelijk onderzoek en practicum-proeven der studenten te kunnen verrichten.

Met het oog op de onderwijs-doeleinden is het wenselijk, dat ook metingen met open straal kunnen geschieden.

f. Het zal wenselijk zijn minstens twee meetwagens te vervaardigen. Hiervan worden één of meerdere wagens gebruikt voor onderwijs-doeleinden en uitgevoerd met 3-componenten-weging, waarbij het model op stijlen is bevestigd.

Voor het wetenschappelijk onderzoek wordt een meetwagen met 6-componenten-weging en een modelophanging aan draden voorgesteld.

