

Nando Timmer

Leerstoel Windenergie

Faculteit Luchtvaart-en Ruimtevaarttechniek

Technische Universiteit Delft

Kluyverweg 1

2629 HS Delft

w.a.timmer@lr.tudelft.nl

Vakantiecursus 2003 De weerstand van schaatsers

Snelle pakken

Van 7 tot en met 9 januari 2005 wordt in Heerenveen het Europees Kampioenschap Allround schaatsen gehouden. Het wereldkampioenschap vindt een maand later, op 5 en 6 februari plaats in Moskou. De Nederlanders zullen als altijd weer sterk vertegenwoordigd zijn. De laatste jaren speelde meerdere keren ook de Nederlandse sporttechnologie een rol. Eerst kwam in 1996 de klapschaats en in 1998 de strips op de schaatspakken. Nando Timmer, aerodynamicus en onderzoeker op het gebied van windenergie, vertelt hoe het werkt.

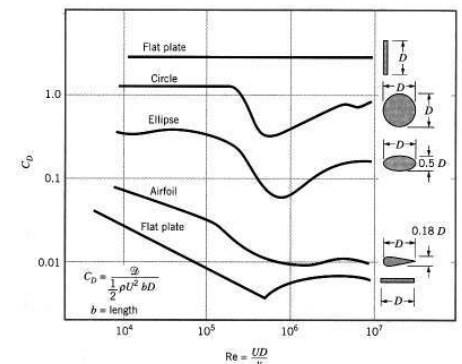
De International Herald Tribune schreef: "speed skaters make history", USA Today sprak van "the new edge in speedskating". In eigen land kopte de Volkskrant "Romme leidt stayers naar nieuw tijdperk" en het NRC Handelsblad jubelde "Nederland zet de schaatswereld op z'n kop met strips". Het is maandag 9 februari 1998, een dag na de 5000 m schaatsen voor heren op de Olympische Winterspelen van Nagano, Japan. De eerste 4 plaatsen van het eindklassement van deze 5 km werden bezet door Nederlanders. Gianni Romme breekt zijn oude wereldrecord met 8,43 seconden. De nummer 2, Rintje Ritsma, haalt 6 seconden van zijn eigen toptijd af en num-

mer 3, Bart Veldkamp, uitkomend voor België, haalt de eerste olympische schaatsmedaille voor onze Zuiderburen binnen door zijn eigen persoonlijk record met maar liefst 11 seconden te verbeteren. Hij eindigde eveneens onder het oude record van Romme. Eindelijk weer eens goud voor Nederland op de 5 km, de tweede gouden medaille ooit op deze afstand, na die van Ard Schenk in Sapporo 1972. De Nederlanders droegen in Nagano als enigen in het internationale gezelschap zigzag strips op het hoofd en de onderbenen. De twee onderzoekers van de TU Delft, die de strips ontwikkeld hadden, waren even het middelpunt van het universum en de TU Delft zette die week paginagrote advertenties in de grote landelijke dagbladen om zichzelf te promoten met dit prachtige resultaat van Delfts onderzoek. Euforie en scepsis, protesten en triomf, het was er allemaal en een paar stukjes foam op de schaatskleding van de heren en dames coryfeeën van de Nederlandse schaatsploeg speelden daarbij een belangrijke rol.

Kwam het door de strips?

Niemand zal het ooit weten. Er is nu eenmaal geen vergelijkingsmateriaal voorhanden; tijden gereden door dezelfde schaatsers op de-

zelfde dag onder dezelfde omstandigheden, maar zonder de zigzagstrips. Het is mogelijk dat de strips alleen een placebo-werking hadden, maar het is niet waarschijnlijk. Echter, de helaas reeds overleden uitvinder van de moderne klapschaats, Gerrit-Jan van Ingen Schenau, heeft eens gezegd: "wetenschappers maken geen kampioenen". Dat is de enige zekerheid; de Nederlandse medaillewinnaars mogen vooral zichzelf op de borst slaan met het succes van Nagano. Toptijden rijdt men niet door 'ribbelstrookjes', zoals de strips ook wel genoemd werden, op het pak te plakken. Daarvoor zijn allereerst ta-



Figuur 1 Het verloop van de weerstandcoëfficiënt met het Reynoldsgetal voor diverse objecten¹

lent, training, techniek en doorzettingsvermogen noodzakelijke vereisten. Maar de juiste materiaalkeuze speelt daarbij een niet geheel ondergeschikte rol. In het volgende zullen de achtergronden van de schaatsstrips belicht worden. Vervolgens zal de lijn doorgetrokken worden naar de huidige snelle schaatspakken.

Luchtweerstand

Ruwweg 80% van de weerstand die een schaatser ondervindt is luchtweerstand. Enkele procenten winst in deze aëroodynamische weerstand vertaalt zich al snel in een betere eindtijd. De luchtweerstandskracht D , uitgedrukt in Newton wordt gegeven door :

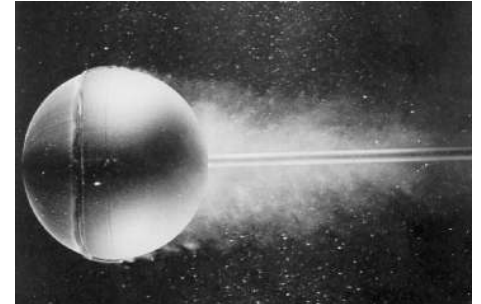
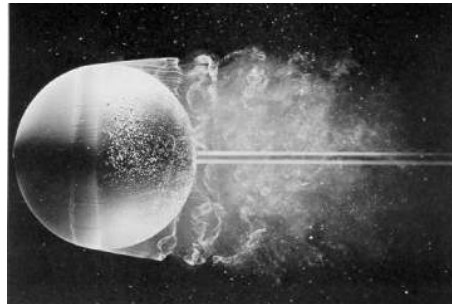
$$D = C_d \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S \quad (1)$$

Hierin is ρ de luchtdichtheid in kg/m^3 , V de snelheid in m/s , S het frontaal oppervlak in m^2 en C_d de weerstandscoefficiënt. Een ieder die de Japanse sprinter Shimizu heeft zien schaatsen met zijn neus bijna op het ijs, beseft dat het verkleinen van het frontaal oppervlak directe gevolgen moet hebben voor de snelheid. De luchtdichtheid speelt eveneens een grote rol bij de eindtijden. Helaas voor de Heerenveense baan Thialf zullen banen op grote hoogte de wereldrecords blijven leveren. De verschillen met laaglandbanen zijn dermate groot, dat dit niet goed gemaakt kan worden door bijvoorbeeld 'beter' ijs te maken. In tabel 1 is de luchtdichtheid gegeven voor de banen in Heerenveen en Salt Lake City, met daarbij de baanrecords voor heren. Die van Salt Lake City zijn tevens de huidige wereldrecords. Voor beide locaties is de haltemperatuur 15°C .

De derde belangrijke parameter die de snelheid bepaald is de weerstandscoefficiënt C_d . De hoogte van deze parameter toont in welke mate het object dat in de stroming staat 'gestroomlijnd' is. Stroomlijn is belang-

Locatie	Heerenveen	Salt Lake City
hoogte (m)	0	1400
ρ (kg/m^3)	1.225	1.035
500 m	34.83	34.22
1000 m	1.10.41	1.07.18
1500m	1.46.63	1.43.95
5 km	6.29.31	6.14.66
10 km	13.03.40	12.58.92

Tabel 1 De relatie tussen de baanhoogte en de baanrecords voor een laag- en een hooglandbaan



Figuur 2 Visualisatie van de stroming om een bol met behulp van rook. Links laat de laminaire grenslaag los. Rechts wordt via een groef langs kunstmatige weg de stroming turbulent gemaakt, zodat het zog kleiner wordt.²

rijk, weten we uit de praktijk. Een vliegtuig (of een auto) moet stroomlijn hebben, anders is de weerstand te hoog en wordt te veel brandstof verbruikt.

Drukweerstand

Bij de weerstandscoefficiënt speelt de vorm van het object een belangrijke rol. Een stomp voorwerp heeft een hogere C_d dan een druppelvormig object. De stroming om lichaamsdelen zoals benen en hoofd heeft wel iets weg van die om bollen en cilinders. Daarom wordt hierna de werking van de strips uitgelegd aan de hand van deze vormen. Van voorwerpen met ronde vormen, zoals bollen en cilinders, varieert de C_d met het Reynoldsgetal. Dit schalingsgetal geeft de verhouding weer tussen de wrijvingskrachten en de mechanische krachten in de stroming. Het Reynoldsgetal wordt gegeven door:

$$Re = V \cdot \frac{D}{\nu} \quad (2)$$

Hierin is V de snelheid, D een karakteristieke lengte, (voor een cilinder of bol is dat de diameter) en ν de kinemaethische viscositeit van het medium. De variabele ν is afhankelijk van de temperatuur en de druk in het medium. Voor lucht bij 15 graden Celcius en 1013 mBar is ν ongeveer 15×10^{-6} . Als van twee objecten met dezelfde vorm, maar andere afmetingen, in een ander medium, met een andere snelheid het Reynoldsgetal overeenkomt, is het stromingspatroon eveneens hetzelfde. Ze hebben dan dezelfde C_d . In figuur 1 is het verloop van de weerstandscoefficiënt met het Reynoldsgetal weergegeven voor diverse objecten.

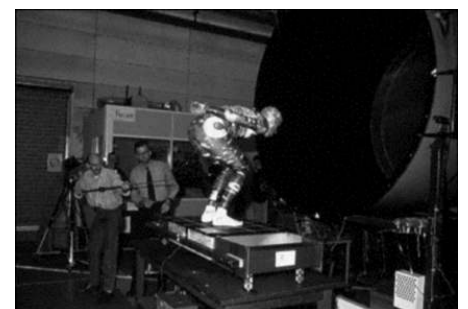
Het kritieke Reynoldsgetal

Voor niet-gestroomlijnde objecten met ronde vormen blijkt er een significante vermindering van de C_d plaats te vinden bij een bepaald Reynoldsgetal. Dit noemen we het kritieke Reynoldsgetal. De verlaging van C_d , voor

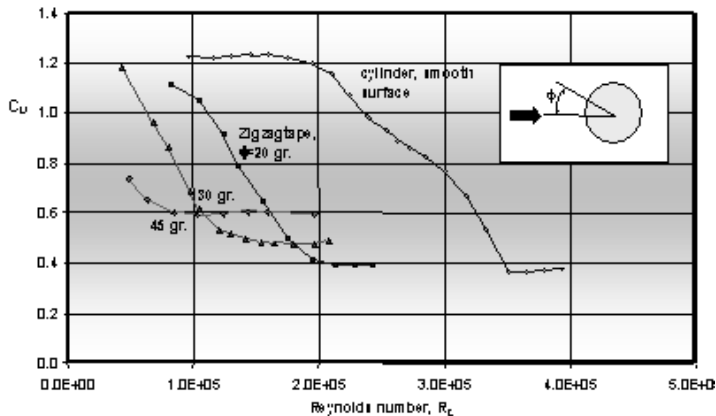
cilinders zelfs tot eenderde van de oorspronkelijke waarde, hangt samen met een verandering in het karakter van de stroming rond de cilinder. Het luchtlaagje dat over het oppervlak stroomt noemen we de 'grenslaag'. Bij lage Re is de grenslaag laminair, dwz netjes gelaagd en rustig. Het nadeel van deze laminaire grenslaag is dat hij — door de wrijving — snel zijn energie kwijtraakt en niet de ronding van de bol helemaal kan blijven volgen. Ergens in de buurt van het dikste punt van de cilinder laat de grenslaag los van het oppervlak en duwt de buitenstroming weg, zodat er een breed 'zog' ontstaat. In dit zog zijn de snelheid en de druk laag. Een en ander is te vergelijken met de 'sliptestream' achter een vrachtauto. Men wordt als het ware meegezogen. Het resultaat is dat er een groot drukverschil is tussen de voorkant (waar de lucht tegen op botst) en achterkant van de cilinder (waar de lage druk heerst). De cilinder heeft dan een grote 'drukweerstand'. Deze drukweerstand is veel groter dan de wrijvingsweerstand van de luchtdeeltjes langs het oppervlak.

Glad is niet altijd beter

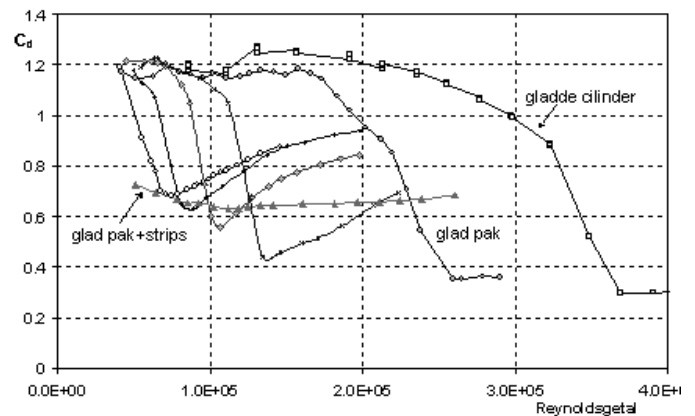
Als we het Reynoldsgetal groter maken (hetzij door de snelheid te vergroten bij vaste diameter en omgevingscondities, hetzij door de diameter te vergroten bij vaste snelheid, hetzij door het medium te variëren) tot aan het kritieke Reynoldsgetal dan verandert het ka-



Figuur 3 Bart Veldkamp in de openstraal windtunnel van de TUDelft. Hij staat op een rekstrookbalans om de weerstandskracht te meten. Met een woldraadje worden loslaatgebieden getraceerd.



Figuur 4 Het effect van de plaats van het zigzagtape (gemeten vanuit het voorste punt) op de weerstandscoefficient van een cilinder. Het tape werd aan weerszijden van de neus aangebracht.



Figuur 5 De weerstandscoefficient van een cilinder bekleed met stoffen met verschillende ruwheid als functie van het Reynoldsgetal

rakter van de grenslaag gaandeweg van laminair naar 'turbulent', dat wil zeggen, warrelige en chaotische bewegingen van de luchtdeeltjes van de grenslaag. Hierdoor vindt er energieuitwisseling plaats met de stroming die eerst nog buiten de grenslaag zat, en niet te maken had met de wandwrijving, zodat de turbulente grenslaag meer energie heeft en veel langer de ronding van de cilinder kan blijven volgen. Het resultaat is dan dat het zog kleiner is en de druk in het zog hoger. De drukweerstand is dan drastisch afgenomen en de totale weerstand van de cilinder ook. De snelheid waarbij deze overgang van laminair naar turbulent op de juiste manier plaatsvindt hangt af van de grootte van v en de diameter van de cilinder. Voor cilinders met een diameter van circa 15 cm ligt deze snelheid op minstens 30 m/s. Er is

echter een mogelijkheid deze snelheid te verlagen. Op kunstmatige wijze kan de grenslaag turbulent gemaakt worden door het oppervlak ruw te maken of door een ander soort verstoring aan te brengen. Dit is in beeld gebracht in figuur 2.

Door een juiste keuze kan zo het kritieke getal van Reynolds verlaagd worden tot een waarde, die bijvoorbeeld in het schaatsen voorkomt. Ook de putjes in een golfballetje zijn aangebracht met hetzelfde doel: verlagings van de drukweerstand, zodat het balletje verder komt.

Zigzagtape

Dat voor de benen en het hoofd van de schaatsers zigzagtape gebruikt werd, verbaast insiders niet. Bij windtunnelproeven aan profielen voor zweefvliegtuigen werd dit tape al

langer gebruikt. Ook bij deze profielen komt loslating van de laminaire grenslaag voor. Het zigzagtape bleek door de werveltjes die van de puntjes afkomen een zeer efficiënte manier om de grenslaag turbulent te krijgen. Hoe dat in de praktijk werkt laat figuur 6 zien. Met behulp van fluorescerende olie is de stroming op het been zichtbaar gemaakt. Links het kale been, rechts het been met zigzagtape. De brede, lichtgekleurde lijn op het been links laat de loslaatlijn zien. De stroming laat daar los en van achteren wordt olie aangevoerd door terugstroming in het zog achter het been. Rechts is te zien dat de stroming het been beter omvat. De loslaatlijn ligt een stuk meer naar achteren. Goed zijn ook de werveltjes te zien die van de puntjes van het tape afkomen. De vraag is nu, waar het tape precies moet worden aangebracht en hoe dik het moet zijn. Daar is met behulp van cilindermetingen informatie over verkregen. Figuur 4 laat de relatie zien tussen de positie van het tape en de resulterende weerstandscoefficient van de cilinder als functie van het Reynoldsgetal. De onderbenen van een schaatser hebben een gemiddelde Reynoldsgetal in de orde van 10^5 . Een hoek van 30 tot 45 graden vanaf het voorste punt van het been lijkt daarvoor het meest geschikt. Het blijkt, dat het kunstmatig storen van de grenslaag ook een prijs heeft. Het kritieke Reynoldsgetal komt wel bij een lagere waarde te liggen, maar het minimum van de C_d komt niet meer zo laag. Variatie van de dikte van het tape geeft een vergelijkbaar verloop te zien.



Figuur 6 Het effect van zigzagtape op de loslaatlijn. Het been links vertoont vroege laminaire loslating (de dikke lijn door het midden van het been). Het been rechts heeft turbulente loslating ten gevolge van de zigzagstrip.

De openstraal windtunnel

Op echte benen is een en ander geverifieerd met topschaatsers als proefkonijn. In Figuur 3 ondergaat Bart Veldkamp een test in de openstraal windtunnel van de TUDelft. Hij staat op een plateau, waarmee de weerstand wordt ge-

meten met behulp van een rekstrookbalans.

Gemiddeld werd bij de topschaatsers in de wintunnel een verlaging in weerstand ten gevolge van de strips gevonden van circa 5%, hetgeen overeenkomt met circa 0,5 seconde per rondje. In de bochten bevindt de schaatser zich uiteraard niet in de standaardhouding, zodat de totale winst wat lager uitvalt. Men heeft nogal getwijfeld aan de waarde van de metingen voor de praktijk, omdat men vond dat de statische houding van de schaatser in de windtunnel niet overeenkomt met de schaatspraktijk. Dat blijkt reuze mee te vallen. De dynamiek bij het schaatsen op de wat langere afstanden zou zich moeten vertalen in variatie van de invalshoek van het been. Omdat de lucht stilstaat is deze bij het grootste gedeelte van de schaatsbeweging — zelfs in de bochten — betrekkelijk gering. Metingen aan het been van figuur 6 lieten zien, dat bij invalshoek variaties van circa +/-15 graden gebruik van het tape nog steeds een weerstandsverlaging oplevert.

Nieuwe pakken

Het nadeel van de zigzagstrips is het feit dat ze bij iedere wedstrijd weer opnieuw moeten worden aangebracht. Bovendien is het moeilijk om voor de armen en de bovenbenen, die veel meer dynamiek vertonen dan de rest van het lichaam, een eenduidige locatie te vin-

den waarop de strips kunnen worden aangebracht. In de huidige generatie wedstrijdpakken is daarom het versturende effect van de strips verwerkt via het gebruik van verschillende ruwe stoffen. Afhankelijk van het Reynoldsgetal (c.q. de lokale dikte van arm of been en de snelheid) moet dan de stof worden gekozen die de laagste weerstand geeft. In samenwerking met het Rotterdamse adviesbureau FlowTec Aerodynamics is onderzoek verricht naar stoffen die in aanmerking komen voor toepassing in sportkleding. Figuur 5 laat de experimenteel bepaalde weerstandscoefficienten zien van een cilinder bekleed met verschillende stoffen, ieder met zijn eigen specifieke ruwheid.

Gaan we ervan uit dat de onderbenen van een schaatser een gemiddeld Reynoldsgetal van ca. 100.000 hebben, dan zijn er volgens figuur 5 stoffen die beslist niet in aanmerking komen, omdat ze wel effect hebben, maar bij een te hoge snelheid. Duidelijk is het afwijkende gedrag te zien van een gladde stof met zigzagstrips. In tegenstelling tot de ruwe stoffen, die een duidelijke 'dip' in de weerstand laten zien, blijft de weerstandscoefficient van een cilinder met gladde stof en zigzagtape constant over een breed gebied van snelheden. Als de strips niet gebruikt worden, moet de ontwerper dus gerichter keuzes maken, meer weten van het materiaal waarmee hij



Figuur 7 De Poolse Pavel Zygmunt in de windtunnel tijdens proeven aan een pak met driehoekige applicaties en verschillende stoffen op armen en benen

werkt, om met de juiste configuratie te komen. De ruwheid van de stof kan gemaakt worden door verschillende breisels toe te passen, maar ook stoffen met applicaties komen in aanmerking. In figuur 7 is de Poolse schaatser Zygmunt te zien, die een windtunneltest ondergaat gehuld in een pak van Nederlands fabrikaat, waarop een driehoekige applicatie is aangebracht op bovenbenen en hoofd. Op de onderbenen en armen is een stof met verschillend breisel toegepast. De rest van het lichaam heeft een gladde stof.

De nieuwe generatie pakken zonder strips werd voor het eerst gebruikt op de Olympische Winterspelen van Salt Lake City, 2002. De Nederlandse schaatser kwamen uit in een pak van Amerikaanse makelij. ◀

Referenties

- 1 D.F. Young, B.R. Munson en Th.H. Okiishi, *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc. New York 1997.
- 2 H. Werlé, 'Transition et décollement: visualisations au tunnel hydrodynamique de l'ONERA, *Recherche Aérospatiale* 198, p. 331–345, 1980.