

UMIST). Op dat moment voor zover bekend het enige beschikbare programma in de westerse wereld. Wat Japan toen aan kennis beschikbaar had, was hier niet bekend en communicatie met Japanners liep in die tijd ook nog een stuk moeilijker.

De berekening

Hangbruggen kennen drie belangrijke hoofdelementen voor de berekening. Dat zijn de pyloon, de hoofdkabel en het dek.

De pyloon laat zich redelijk traditioneel berekenen. De hoofdkabel heeft als prettige eigenschap dat deze over de gehele lengte van de brug dezelfde horizontale component kent die zich laat berekenen met de volgende formule:

$H = ql^2 / 8f$. (H = horizontale kracht; q = belasting per strekkende meter brug; l = overspanning van de brug; f = pijl van de boog van de hangkabels)

Ingewikkelder wordt de berekening van het dek. De formule die het fenomeen beschrijft is een redelijk eenvoudige differentiaal vergelijking van de vierde orde.

Een rechtstreekse oplossing van deze formule is niet mogelijk. Voor de oplossing worden verschillende benaderingen gekozen waardoor er meer oplosmethoden zijn ontstaan die geen van alle het precieze beeld geven van de werkelijkheid. De laatste handmatige theorie was de eerder genoemde "Corrected theorie of Crothwaite". Deze theorie was gebaseerd op oplosmethoden met Fourieranalyse. Het doorrekenen van een buigend moment kost handmatig bijna twee dagen.

Met het beschikbaar komen van computers is deze laatste theorie snel verlaten daar de computerberekeningen exactere resultaten gaven en veel minder bewerkelijk waren. Op deze manier konden ook veel eenvoudiger parameter studies worden uitgevoerd waardoor duidelijk wordt voor welke wijzigingen van de belastingen op de brug het systeem gevoelig is. Met de "Corrected theorie of Crothwaite" was het b.v. niet mogelijk het effect van rechte of geschoorde hangers mee te nemen.

Lastig bij hangbruggen is ook dat het maximale moment niet in het midden van de hoofdoverspanning optreedt.

Het is altijd een zoektocht om die doorsnede te vinden waar dit maximale moment optreedt. Het ligt meestal ongeveer op 1/8 van de lengte van de hoofdoverspanning. Heeft men de doorsnede van het maximale moment gevonden dan moet men daarna op zoek naar de maximale belasting voor die doorsnede. Laat men de lengte van de gelijkmatig verdeelde belasting op de brug groeien dat ziet men het moment ter plaatse van de doorsnede toenemen. Bij verdere groei ziet men het moment weer teruglopen. Men weet dan dat men het maximale moment heeft bereikt. Dit ligt voor iedere doorsnede weer anders. Men kan zich voorstellen dat deze berekeningen met de hand bijna onmogelijk zijn. Voor de ontwerpen heeft men deze exercitie voor een aantal dwarsdoorsneden gedaan met drie verschillende lengten gelijkmatig verdeelde belastingen.

Verder waren schaakbordbelastingen van belang om de maximale belastingen op de pyloon te vinden. Ook is er voor het Westerscheldeontwerp een aanvaring gesimuleerd.

Geschoorde hangers

De meest interessante resultaten werden gevonden bij de verdere analyse van de hangerkrachten. Voor alle verschillende belastinggevallen kregen we automatisch een uitdraai van de hangerkrachten. Deze zijn in een grote tabel verwerkt en gaven aan dat de krachten in geval van geschoorde hangers wel drie maal zo groot konden zijn dan uit een eenvoudige statische deelbelasting zou volgen. Op basis van deze resultaten bleek de enorme belasting van de hangers als gevolg van het niet geometrisch lineaire gedrag zo nadelig te zijn dat afgestapt werd van geschoorde hangers en gekozen werd voor verticale hangers. Het gaf ook gelijk een antwoord op de vraag waarom bij de Severn na ca 15 jaar alle hangers al vervangen moesten worden. Dit was een uniek resultaat van het onderzoek voor de Westerschelde omdat tot op dat moment dit fenomeen nog niet bekend was. Veel later is deze conclusie bevestigd door Dr. Homberg, de ontwerper van de Dartfordbrug te Londen.

8. AËRODYNAMISCH ONDERZOEK

A.J. Persoon

Inleiding

In het begin van de jaren 80 is, als alternatief voor een tunnel onder de Westerschelde, in opdracht van de stichting Westerschelde Oever Verbinding (W.O.V), het ontwerp van een hangbrug onderzocht in de lagesnelheidwindtunnels van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium. De beoogde brug, onderdeel van de oeververbinding, zou met een vrije overspanning van 918 m en pylonen van 92 m hoogte, één van de grotere hangbruggen in Europa zijn geworden.

Sedert 1970 wordt op het NLR met regelmaat onderzoek verricht naar het trillingsgedrag van nieuw te bouwen verkeersbruggen. Doordat een brugdek als een slanke vliegtuigvleugel kan worden beschouwd, kan de bij het NLR aanwezige (aëro-elastische) rekenprogrammatuur worden toegepast. Zo kunnen de stabiliteit van een brugdek tegen ongewenst trillingsgedrag (flutter) en de res-

ponsie op wervelexcitatie door de wind worden voorspeld. Daarnaast wordt met schaalmodellen in de windtunnel gewerkt. De procedures waarop het windtunnelonderzoek is gebaseerd, komen overeen met die welke zijn ontwikkeld in de Verenigde Staten na het instorten van de Tacoma Narrows brug op 7 November 1940.

Bij het construeren van moderne verkeersbruggen speelt de wind een belangrijke rol.

Reden daarvan is dat, door nieuwe berekening- en constructietechnieken, verkeersbruggen kunnen worden voorzien van een lange vrije overspanning met een relatief laag eigen gewicht, die echter gevoeliger zijn voor trillingen.

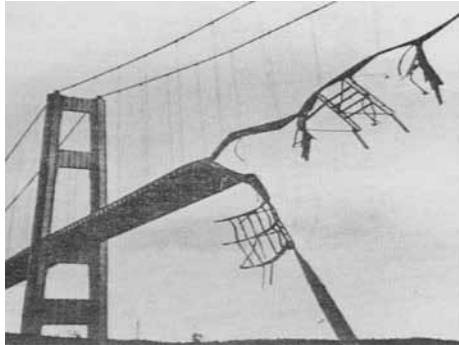
Wordt de brug in staal uitgevoerd, dan zal ook de constructiedemping laag zijn. Is daarnaast de geometrie van het brugdek verre van gestroomlijnd (zoals bij de voorgestelde hangbrug), dan zijn dit dé factoren die

een windtunnelonderzoek rechtvaardigen. Om deze redenen is destijds dan ook aan het trillingsgedrag van de hangbrug over de Westerschelde, onder invloed van wind, de nodige aandacht besteed.

In deze bijdrage wordt nader ingegaan op het aëro-dynamisch onderzoek in 1981 verricht op het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium.

Oorzaken van door wind opgewekte trillingen

Globaal genomen zijn er twee oorzaken aan te wijzen waardoor een verkeersbrug met een lange vrije overspanning in trilling kan geraken: wervel-excitatie en flutter [Lit.1].

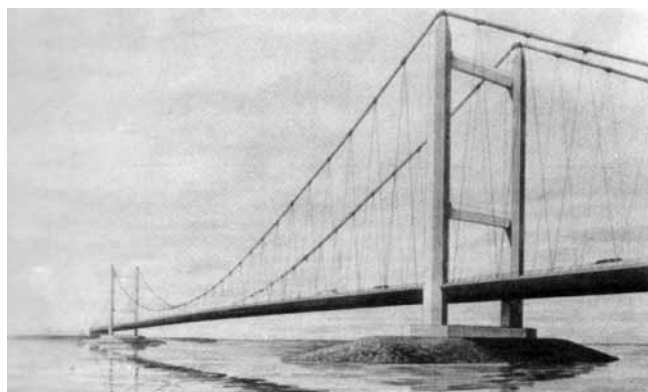


Instorting van de Tacoma Narrows Bridge

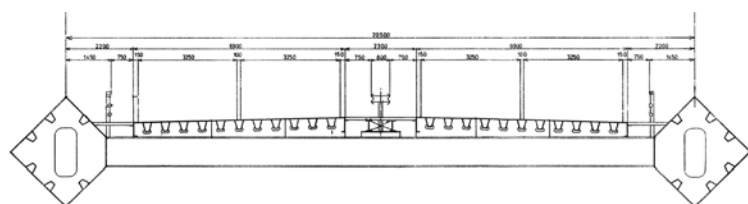
a) "wervel - excitatie" Hierbij is het brugdek door zijn vormgeving (zoals scherpe randen) in staat een (Von-Kármánse) wervelstraat te genereren. Trillingen ontstaan als de frequentie waarmee de wervels loslaten, samenvalt met een eigenfrequentie van de brug.

Kenmerkend voor dit verschijnsel is dat het optreedt bij één specifieke windsnelheid omdat de wervelfrequentie (f) evenredig is met de windsnelheid (V). Voor het karakteristieke getal van Strouhal (S) geldt: $S = f \cdot D / V$, waarin D de hoogte (m) van het brugdek voorstelt. De waarde van S bedraagt voor de meeste brugdekvormen $S = 0,1 \text{ à } 0,15$.

Wervel-excitatie doet zich meestal voor in een trillingsvorm met de laagste eigenfrequentie. Is deze frequentie bekend uit berekeningen, dan is ook de windsnelheid te schatten waarbij dit verschijnsel zich in de praktijk zal voordoen. Vaak blijkt deze lager te zijn dan $V = 15 \text{ m/s}$ (windkracht 6 à 7). Wervel-excitatie komt dan ook regelmatig voor. De responsie van een brugdek op wervel-excitatie kan in een windtunnel op relatief eenvoudige wijze worden vastgesteld en worden getoetst aan de normen geldend voor passanten.



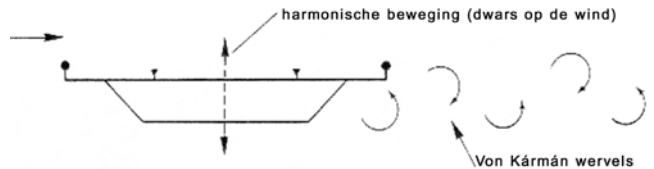
Ontwerp hangbrug over de Westerschelde



Dwarsdoorsnede brugdek

b) "Flutter"

Het brugdek wordt instabiel onder invloed van wind als twee trillingsvormen onder invloed van de luchtkrachten (aëro-dynamica) met elkaar gaan koppelen. Hierbij wordt door de wind arbeid geleverd in één van beide trillingsvormen, meestal de laagste torsietrillingsvorm. De demping zal door een onderlinge faserelatie afnemen, waardoor de trillingsamplitude in die trillingsvorm toeneemt. Boven een zekere windsnelheid zal de demping negatief worden. Het brugdek is dus niet meer gedempt en de amplitude wordt dermate groot dat breuk volgt. Dit verschijnsel is bekend uit de vliegtuigbouw, waar het "flutter" wordt genoemd. In de civiele sector spreekt men van "brugdek flutter" en dat moet worden voorkomen.



Von Kármánse wervelstraat

Onderzoek in de windtunnel (1981)

Onderzocht zijn de windinvloeden op het brugdek en de pyloon.

a) Brugdek

Gezien de specifieke vormgeving van het brugdek (de beide kokerprofielen) is met name aandacht besteed aan het fluttergedrag [Lit.2]. Uit de literatuur is bekend dat de luchtkrachten van weinig gestroomlijnde brugdekvormen de theoretisch berekende fluttersnelheid van de constructie aanzienlijk zullen verlagen. Voor het flutteronderzoek is een model van een sectie van de brug gebruikt.

Het houten, maar starre, brugdekmodel (1100 mm lengte) was in de windtunnel opgesteld tussen twee eindschotten waardoor de vereiste twee-dimensionale stroming rondom het model was gewaarborgd. Het model was bevestigd op drie elektrodynamische excitatoren, elk voorzien van een één-component rekstrookbalans waarmee de liftkracht werd gemeten. De excitatoren konden zowel in fase als in amplitude worden geregeld,



Modellen van brugsecties

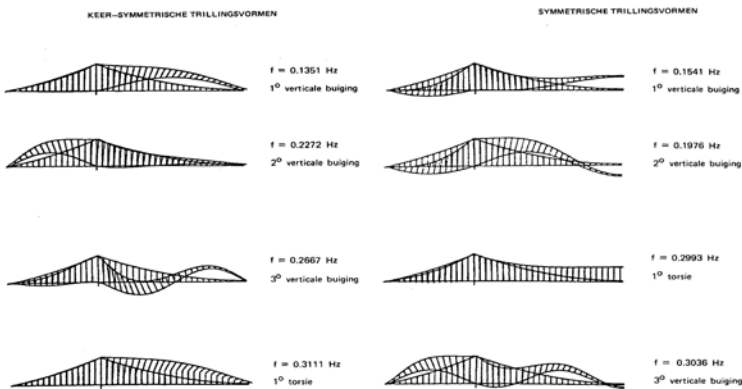
zodat een zuivere slagtrilling (translatie) of een zuivere rotatie om de lengte-as (halfkooepunt) van het model mogelijk was. Beide bewegingen zijn noodzakelijk om de luchtkrachten voor een flutterberekening te genereren. Het model was uitgerust met versnellingsmeters om de amplitude van de model trilling, zonder en met wind, op een zelfde wijze in te stellen. Na meting van de luchtkrachten bij een aantal windsnelheden en aandrijffrequenties van het model in de windtunnel, zijn flutterberekeningen uitgevoerd.

Daarvoor moesten eerst de eigenfrequenties en trillings-ormen van de brug bekend zijn. Deze zijn bepaald met een eindige-elementenmethode (destijds het programma "Trilstaaf" van het NLR). Voorbeelden



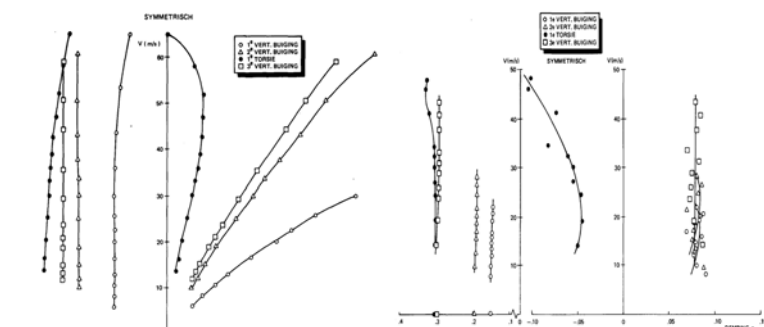
Opstelling meetapparatuur

van rekenresultaten zijn weergegeven in onderstaande figuur. Vervolgens zijn met deze gegevens flutterberekeningen gemaakt met theoretische luchtkrachten geldend voor een oneindig dunne vlakke plaat. De resultaten kunnen een indicatie geven of de windsnelheid waarboven flutter kan optreden niet te laag is. Een windsnelheid > 40 m/s (als 10 minuten gemiddelde) wordt volgens de normen in ons land als een minimum beschouwd.



Voorbeelden van rekenresultaten

Een voorbeeld van een flutterberekening wordt getoond in onderstaande figuren. In het linker deel van de grafieken zijn de eigenfrequenties uitgezet tegen de windsnelheid. In het rechter deel is de demping van het brugdek uitgezet als functie van de windsnelheid. Hieruit blijkt, theoretisch gezien, dat flutter optreedt boven 60 m/s (links) in de laagste torsietrillingsvorm; de demping is nu nihil (flutter onset). Maar met gemeten luchtkrachten (rechts) laat de eerste torsietrillingsvorm een negatieve



Voorbeeld van flutterberekening

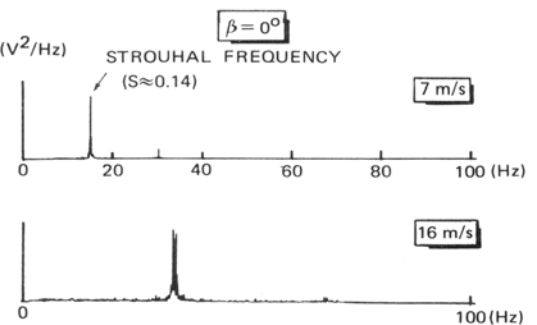
damping zien, al bij regelmatig voorkomende windsnelheden. De vormgeving van dit brugdek, met name de beide kokerprofielen, veroorzaakt kennelijk bij lage windsnelheden al een aërodynamische instabiliteit. Geadviseerd werd dan ook de geometrie aan te passen en een vervolgonderzoek uit te voeren. Dit heeft echter nooit plaatsgevonden door het destijds genomen besluit, een tunnel te realiseren.

b) Pyloon

Een ander aspect van het onderzoek betrof de pyloon

van de brug. Alhoewel van beton wordt in de literatuur vermeld dat dit soort constructies, ondanks een aanzienlijke constructiedemping bij relatief lage en daardoor vaak voorkomende windsnelheden in trilling kunnen geraken. Aangezien de pylonen voorafgaande aan de bouw van de overspanning een zekere tijd vrij zouden zijn opgesteld, leek het gezien de eerder berekende lage eigen frequenties niet uitgesloten dat trillingen zich voor zouden kunnen doen door wervel-excitatie (flutter wordt voor dit soort constructies uitgesloten geacht). Om deze reden is een windtunnelonderzoek uitgevoerd aan een elastisch geschaald model (1: 60) van staal, waarbij (geringe) responsies bij een aantal windrichtingen werden vastgesteld. Met de gemeten luchtkracht coëfficiënten is via een berekeningsprocedure het responsiegedrag van de betonnen pyloon op ware grootte voorspeld.

Onderdeel van het onderzoek was verder het aantonen van wervels in het zog van de pyloon. Dit is gebeurd door middel van snelheidsmetingen. Van de meetsignalen is



Spectraal analyse van het zog-sigitaal

een vermogenspectrum bepaald. Een duidelijke wervel vertoont zich als een piek in het frequentiespectrum. De frequentie van de wervel neemt li-neair toe met de windsnelheid waaruit het getal van Strouhal kon worden bepaald ($S = 0.14$) en daarmee dus ook de windsnelheid die voor wervel-excitatie kon zorgen bij de pyloon op ware grootte.

Met behulp van rook zijn de wervels zichtbaar gemaakt, waarbij gebleken is dat alleen een duidelijke wervel achter de stroomopwaartse kolom ontstaat. Er is geen sprake van een wervelstraat achter de pyloon zelf, wat voor de responsie van een dergelijke constructie gunstig genoemd kan worden. De pyloon, als bouwphase van de Westerschelde hangbrug, heeft dan ook voldaan aan de verwachtingen.

Ten slotte

Dit artikel is tot stand gekomen op verzoek van Ir. C.Q. Klap, destijds werkzaam bij Rijkswaterstaat Directie Bruggen. Ir. Klap heeft de diverse windtunnelonderzoekingen bij het NLR aangestuurd en met interesse gevolgd. De medewerkers van de toenmalige afdeling Aëro-Elasticiteit (thans van de afdeling Aerodynamic Engineering en Trillingsonderzoek) van het NLR denken met plezier terug aan deze, ook voor hen, leerzame en interessante periode.

Literatuur

[1] Simiu, E and Scanlan, R.H.: "Wind effects on Structures": An Introduction to Wind Engineering, A Wiley-Interscience Publication, 1978.
 [2] Persoon, A.J., Siebert, C.M.: "The aerodynamic stability of the proposed Western-Scheldt suspension bridge; International Conference on Flow Induced Vibrations in Fluid Engineering Reading University, England, September 1982.

Voor meer informatie: www.nlr.nl