

7. HANGBRUGBEREKENINGEN

ir. C.Q. Klap

Op het moment dat de eerste voorstellen voor een hangbrugtoepassing werden gedaan was de kennis en ervaring met dit soort bruggen beperkt. Op hoofdlijnen was wel bekend hoe het hoofdsysteem van een hangbrug werkte maar een gedetailleerd ontwerp was in Nederland nog niet gerealiseerd. Aan de TU Delft waren wel een beperkt aantal studenten afgestudeerd op hangbruggen. Daar dit in die tijd zeker geen kennis was die voor het oprapen lag en er praktisch nog geen computer- programma's beschikbaar waren, was het niet mogelijk tot een ver uitgewerkt voorstel te komen binnen de studietijd die er toen voor stond. De kennis op hoofdlijnen en informatie van bruggen in buitenland was wel voldoende om tot voorstellen te komen zoals gedaan bij de tracéstudies uit 1967.

Eind zestiger jaren ontstond er de behoefte om de variant bij Waarde als hangbrug uit te werken. Binnen Nederland was op dat moment de kennis beperkt om bovengenoemde redenen en werd besloten een buitenlands bureau in te huren genaamd Freeman Fox & Partners. Zij waren destijds door Mott Hay & Anderson (tegenwoordig Mott McDonald) betrokken bij de Forth Road Bridge over de Firth of Forth in Schotland, hoofdover-spanning 975 meter. Deze brug werd in 1964 geopend. Later zouden ze samen de Severnbrug bij Bristol ontwerpen, lengte hoofdoverspanning 988 meter, wat om een aantal redenen een revolutionair ontwerp kan worden genoemd. Deze brug is omstreeks 1969 geopend. Later zou Freeman Fox & Partners op eigen kracht de brug over de Bosporus bouwen die grote overeenkomst met het Severnbrug ontwerp had.

Severnbrug, revolutionaire keuzes

De Severnbrug was revolutionair te noemen daar twee principes duidelijk afweken van de tot dan toe gebouwde hangbruggen. Dit betrof het dek dat als stalen kokerligger is ontworpen en gebouwd met aërodynamische dwarsdoorsnede die veel weg had van een vliegtuigvleugel. De tweede principiële afwijking betrof het vervangen van de verticale hangers door geschoorde (inclined hangers). Dit tweede principe was min of meer een direct afgeleide van de keuze voor een kokerligger (boxgirder). De redenering was dat het traditionele vakwerk tot die tijd gebruikelijk was voor de hoofdligger. Dit type ligger had door zijn inwendige verplaatsingen een goede energieabsorptie wat gunstig is voor de aërodynamische demping. Een kokerligger heeft die eigenschappen niet en om die reden werd er gezocht naar een ander dempingssysteem wat gevonden werd in de toepassing van geschoorde hangers. Bij belasting beschreef de hanger een hysteresislus wat een maat is voor de energie-absorptie.

Tacoma Narrows bridge

Bij de Tacoma Narrowsbridge heeft de wereld het belang van aërodynamische stabiliteit geleerd. Deze brug is vooral bekend geworden door zijn spectaculaire instorting en de film die van deze instorting is gemaakt. Deze film is bij velen bekend daar zij al zeker tientallen malen voor de televisie is vertoond. De film kon gemaakt wor-

den daar de brug al een aantal dagen een afwijkend gedrag vertoonde bij niet eens erg hoge windsnelheden. Van de Tacoma Narrows bridge is geleerd dat de aërodynamische vorm van de dwarsdoorsnede erg belangrijk is. Is dit niet het geval dan ontstaan met een zekere frequentie luchtwervelingen, die de brug telkens een stoot geven. Als die stoot met een bepaalde frequentie, die overeenkomt met de eigenfrequentie van de brug, gebeurt zet die een trilling in gang. We kennen dit fenomeen, reden waarom een peloton soldaten uit de pas over bruggen loopt.

Het bestaan van een stootbelasting is niet wenselijk maar als er dan eigenfrequentie in de brug voorkomt die dat overneemt ontstaat er is een aërodynamische instabiliteit. De Tacoma Narrows had zo'n frequentie. Maar wat nog hinderlijker was dat er naast deze frequentie een aantal eigen bewegingen deze zelfde frequenties hadden. Hierdoor namen een aantal onderdelen deze frequentie over en versterkten ze elkaar ook nog. De buig- en torsiefrequentie van het dek lagen dicht bij elkaar alsmede de eigenfrequentie van de pyloon. Naar huidige inzichten kon het niet anders dan dat er vroeg of laat iets met deze brug zou gebeuren.

Bij tuibruggen liggen deze zaken wat minder gevoelig. Ook daar is het mogelijk dat een bepaald onderdeel in zijn eigen frequentie wordt aangeslagen. Maar men redeneerde altijd de tuien van een tuibrug hebben verschillende lengten en daarom een verschillende eigen frequentie. Dat ze een trilling van elkaar overnemen is dus min of meer uitgesloten. Een trilling van een enkele tui kan voor de tui zelf storend en onwenselijk zijn vandaar dat ze vaak individueel een demper krijgen.

Erasmusbrug

Dat we ook bij tuibruggen alert moeten blijven is in 1996 geleerd bij de Erasmusbrug. Daar het een tuibrug betrof leek deze brug een stuk minder gevoelig voor aërodynamische instabiliteit. Ook de vorm van het dek en een fors verschil tussen de buig- en torsiefrequentie van het dek waren gewaarborgd. Wat bij de Erasmusbrug wel mis ging is de trillingsinitiatie van de tuien als gevolg van afstromend regenwater, een fenomeen dat nog maar een aantal jaren geleden in Japan is ontdekt en bekend staat als flow induced vibration. Verder lagen de frequenties van de langere tuien in de buurt van de buigfrequentie van het dek waardoor een gevaarlijke situatie kon ontstaan.

Nederlandse hangbrug ontwikkelingen

Nadat de eerste hangbrugvoorstellen waren gedaan bij de eerste tracéstudies kwam ook in Nederland meer kennis beschikbaar. Een van de afstudeerwerken op de TU had betrekking een hangbrugontwerp over het Kanaal. Voor dit ontwerp had men, waarschijnlijk bij vergissing, via Professor Taylor van de Guilford University de beschikking gekregen over de uitgewerkte berekeningen van de Forth Roadwaybridge volgens de "Corrected theorie of Crosthwaite" en was men in staat gesteld berekeningen te maken aan de University of Manchester Institute for Science and Technology (

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 de factoren die