

10. HANGBRUG ONTWIKKELINGEN

ir. C.Q. Klap

Een van de meest bekende hangbruggen in de wereld is de Golden Gate brug in San Francisco. Deze brug is in 1933 opgeleverd en is tot eind jaren zeventig de brug met de grootste hoofdoverspanning in de wereld geweest. De hoofdoverspanning bedraagt 1290 meter. Over een periode van 50 jaar hebben zich nauwelijks spraakmakende ontwikkelingen voorgedaan op het gebied van hangbrugbouw. Het is de Humberbrug geweest, geopend in 1979 die dit record heeft doen sneuvelen met een hoofdoverspanning van 1410 meter. De nu grootste hangbrug is de Akashi Kaikyo brug met een hoofdoverspanning van 1991 meter. De brug in Denemarken over de Storebaelt had nog even de grootste kunnen zijn als deze eerder geopend had kunnen worden dan de Akashi Kaikyo brug. Deze Storebaelt Oost brug heeft een hoofdoverspanning van 1600 meter.

Er zouden meer hangbruggen gebouwd zijn als de toepassing van tuibruggen niet zo sterk naar voren zou zijn gekomen. Zoals al eerder is opgemerkt, zijn deze bruggen meer dan 100 jaar uit de gratie geweest vanwege een aantal slechte ervaringen. Tuibruggen onderscheiden zich van hangbruggen doordat de kabels rechtstreeks tussen pyloon en dek bevestigd zijn en ze min of meer in rechte lijnen het beeld bepalen. Een hangbrug kent een gebogen hoofdkabel waaraan hangkabels zijn bevestigd waaraan het dek hangt. In de zestiger jaren zijn tuibruggen vooral in Duitsland sterk

in opkomst gekomen en werden deze met hoofdoverspanningen met een lengte van ca 300 meter toegepast. Een enkele uitzondering bevestigde ook hier de regel zoals de hangbrug in Emmerich net over de Nederlands – Duitse grens, gebouwd in 1965 met een hoofdoverspanning van 500 meter. In het voorstel van de Tolbrug Exploitatie Maatschappij (TBM) voor de Westerschelde oeververbinding werd destijds ook een tuibrug over het Straatje van Willem voorgesteld. Dat was op deze locatie mogelijk doordat het Straatje relatief smal is. Later zijn tuibruggen met overspanningen tot 450 meter gerealiseerd totdat in 1995 ineens een nieuw record werd gerealiseerd met de Pont Normandie bij Le Havre met een hoofdoverspanning van 850 meter. Of bij die overspanningen een tuibrug nog economisch is valt misschien nog te bezien maar technisch is aangetoond dat een tuibrug met deze lengte mogelijk is. Tuibruggen hebben pylonen die gemiddeld 3 à 3,5 maal zo hoog moeten zijn dan die van een hangbrug bij een gelijke hoofdoverspanning. Dus ook om die reden is de toepassing van een tuibrug bij zeer grote overspanningen een weinig reële oplossing. Een tuibrug over de straat van Messina zou dan een pyloon hoogte van 1 km moeten krijgen.

Daar waar grote overspanningen aan de orde zijn, zeker boven de 850 meter, zijn hangbruggen de aangewezen oplossing.



Golden Gate Bridge 1933.

De hangbrugontwerpen over de Westerschelde zijn sterk gebaseerd op de laatste ontwikkelingen in Engeland. Een groep ontwerpers had daar aansluitend de ontwerpen van de Tamar (test brug), Firth of Forth en de Severnbrug gerealiseerd. Deze ontwerpers zijn later doorgeslagen met de Bosphorusbrug in Istanbul en de Tjing Ma brug in Hong Kong. De kennis van de uitvoering zat in die tijd bij de staalconstructiebedrijven Cleveland Bridge en Redpath Dorman Long. In de periode waarin het ontwerp van de hangbrug over het straatje van Ossenisse werd gemaakt, was in Engeland de Humber brug in aanbouw. Aan deze brug zijn een aantal bezoeken gebracht, zijn er minstens 1000 foto's gemaakt en het gehele spinproces werd in al haar facetten bekeken. Dit heeft er toe geleid dat het ontwerp van de brug over het Straatje van Ossenisse gecombineerd met de berekeningen in Manchester en het aerodynamisch onderzoek volledig afgerond kon worden. Deze brug is zelfs zover voorbereid geweest dat hij volledig bestekklaar was en gereed was om als aanvraag op de markt uit te zetten. Als de financiering geen probleem was gebleven was het ook wel zo uitgevoerd en had er nu een andere oeververbinding gelegen dan degene die op 14 maart 2003 zal worden geopend.

Omstreeks 1970, toen de eerste hangbrug ontwerpen aan de orde waren, is er ook een bezoek gebracht aan de Lillebaelt brug in Denemarken, hoofdoverspanning 1600 meter en in 1971 geopend. Bij deze brug zijn geslagen strengen gebruikt voor de opbouw van de hoofdkabel. Uniek was de toepassing van gedroogde lucht bij de ingang van de stalen koker waardoor alleen een lichte conservering kon worden aangebracht. Deze methode ziet men steeds meer maar zij werd eind zestiger jaren al uitgevonden.

Ook zijn er bezoeken gebracht aan de beheerder van de Severnbrug om te horen wat in zijn beleving de belangrijke onderhoudsaspecten zijn.

Gelijktijdig met de ontwikkelingen in Engeland was in Japan het Hoshu Shikoku project in uitvoering. Een waar paradijs voor bruggenbouwers. Hier was een project in uitvoering dat drie verbindingen van ca 15 km lengte zou gaan opleveren tussen drie eilanden. Een enigszins bijzonder plan daar tot op dat moment de verbindingen plaats vonden met veerponten. Dit project omvatte 6 hangbruggen, 8 tuibruggen, één boog- en één vlakke brug. Dit project zou door het overheidsontwerpteam worden bezocht. Dit soort werkbezoeken liggen echter altijd wat gevoelig bij bestuurders die het belang ervan niet kunnen inschatten. Ondanks dat drie man zouden reizen met een charter wat overeenkwam met een normaal ticket was dit te veel gevraagd van de toenmalige secretaris generaal. De delegatie werd van samenstelling veranderd en werd een gecombineerde delegatie van overheid en bedrijfsleven afgevaardigd. Tijdens dit bezoek is onder meer de Ohnaruto en de Innoshima hangbrug bezocht. Een groot probleem bij de beoordeling van de Japanse oplossingen was dat men in Japan omslachtig te werk gaat, veel uren besteedt en met veel extra zekerheden werkt. Het was daarom moeilijk te bepalen welke ervaringen overgenomen konden worden voor zaken die hier nog niet uitgezocht waren.

Waar we bij de voorbereidingen van de Westerschelde hangbruggen veel profijt van hebben gehad is de documentatie van de Japanse Kanmon hangbrug geweest. De extra inspanningen die ze hier verrichten werpen zeker hun vrucht af in het kader van gedetailleerde vastlegging van hoe gewerkt is, kennis overdracht en evaluatie. In Japan wordt een werk afgerond met een volledig ingebonden tekeningenboek en een beschrijving van het hele werk, inclusief onderzoek, uitvoering, testen tijdens de uitvoering etc. Deze beschrijvingen zijn vastgelegd in een boek dat zo'n 1400 pagina's beslaat. Waar de ontwerpploeg Van de Directie Bruggen van de RWS met name veel profijt van heeft gehad is van het hoofdstuk aangaande de bouw van de hoofdkabel. Dit hoofdstuk is geheel vertaald waardoor een goed beeld werd verkregen hoe de prefabricated strengen voor de Kanmon brug waren gemaakt en gemonteerd. In Japan is men verplicht om ca 3 % van de totale bouwkosten te investeren in onderzoek aan het betreffende project. Hierdoor wordt er zeer veel gemeten wat in het kader van het aerodynamisch gedrag veel extra informatie oplevert. Ook worden op de brug proefbelastingen aangebracht van wel honderd vrachtwagens waardoor men het vervormingsgedrag van de brug weer kan toetsen aan de berekeningen. Kortom er is destijds een aardige kennisdrain gedaan ter voorbereiding van een te bouwen hangbrug over de Westerschelde.

Het was opvallend om op een gegeven moment te ervaren dat niet alleen Nederlandse ontwerpers naar de het buitenland gingen om kennis te vergaren maar dat ook buitenlandse bruggenbouwers informatie kwamen halen in Nederland. Dat was een goed teken voor het niveau waarop de ontwerpgroep terecht was gekomen bij de voorbereidingen van deze voor Nederland geplande grootste te bouwen brug.

Nieuwe ontwikkelingen bij het ontwerpen van de Westerscheldeoeververbinding

De hangbrug over de Schaar van Ossenisse was tot besteksniveau uitgewerkt, dit betekent dat het definitief ontwerp van deze brug was afgerond en dat het bijbehorende bestek ook gereed was.

Om een project tot dat niveau te kunnen uitwerken dienen alle zaken uitgezocht te zijn. Het project is dan eenduidig gedefinieerd en ver genoeg uitgewerkt zodat bouwbedrijven een aanbieding konden doen. Om de hangbrug ten opzichte van de andere ontwerpen interessant te houden - er waren over de Schaar van Ossenisse immers ook alternatieve vlakke brugontwerpen - diende grote inventiviteit aan de dag te worden gelegd. Dit heeft geleid tot een aantal nieuwe ontwikkelingen die verder in dit hoofdstuk worden behandeld. De toen ontwikkelde kennis is zeer goed bruikbaar gebleken bij het zoeken naar andere oplossingen voor de tracés die zijn opgepakt nadat het tracé Kruinigen – Perkpolder (o.a. over de Schaar van Ossenisse) was verlaten.

Als nieuwe ontwikkelingen zijn te noemen:

1. de geavanceerde berekeningsmethode met daartoe geëigende computerprogramma's,
2. systematisch doorrekenen van een aantal belastinggevallen,
3. berekenen van de brug op eventuele aanvaarbelaastingen,



Humberbridge

4. na de geschoorde hangers opnieuw kiezen voor verticale hangers,
5. risico analyse kans van aanvaren van de bovenbouw,
6. dek bestaande uit dubbele kokers,
7. "groeidek", eerst halve breedte aanleggen, later verbreden.
8. beweegbaar deel in hangbrug.

Ad 1 - De berekeningen zijn beschreven in hoofdstuk 6. Nieuw element was hier dat het voor de bouw van de Forth Road Bridge ontwikkelde programma voor de Westerschelde als ontwerp programma is gebruikt. Dit betekende dat er aanvullende software geschreven moest worden om o.a. tot de ideale afmetingen van de brug te komen en het rekenen met laststelsel. Zoals gezegd werd op deze wijze een beter inzicht verkregen dan met de berekeningsmethoden die tot op dat moment door de consultants gebruikt werden. Zoals eerder opgemerkt hadden we toen geen goed zicht op hoe ontwerpen in Japan tot stand kwamen.

Ad 2 - Belastinggevallen op systematische wijze doorrekenen en het doen van een parameter onderzoek met een computer waren tot op het moment dat het hangbrugontwerp voor de Westerschelde speelde nog niet aan de orde geweest. De Forth Road Bridge en Severnbridge waren immers berekend met de handmatige berekening "the Corrected Theory of Crosthwaite".

Door het relatieve gemak van het rekenen met een computer op het moment dat een hangbrug is gemodelleerd en de zeer grote capaciteit van de computer - zeer belangrijk in die dagen - was het berekenen van extra belastinggevallen relatief eenvoudig. Aan de hand van de beschikbare resultaten waren nog meer conclusies te trekken geweest. Er bestonden in die tijd helaas nog geen pre- en postprocessors zodat het aan één kant makkelijk was een extra berekening uit te voeren maar aan de andere kant ging men bijna ten onder aan de enorme brei van resultaten.

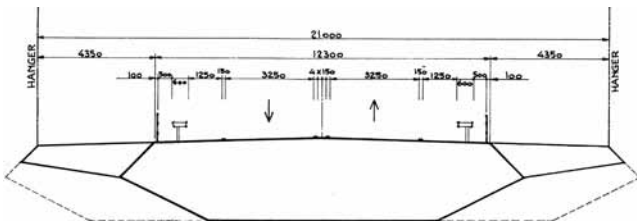
Ad 3 - De berekeningen die eveneens zinvol waren en die nu eenvoudig uitgevoerd konden worden waren de berekeningen van aanvaarbelaastingen. Daar een hangbrug vrij flexibel reageert met een groot aantal secundaire effecten kwam het zeer goed van pas deze resultaten beschikbaar te krijgen.

Ad 4 - Hangerconfiguraties konden met de beschikbaarheid van het programma ook op eenvoudige wijze worden onderzocht. Zoals eerder aangegeven is bij de Severnhangbrug en de Bosphorusbrug gekozen voor geschoorde hangers. De effecten van deze keuze waren niet geheel bekend. Ook waren er in de praktijk problemen met deze hangers. Door de kwaliteit van de berekening was het mogelijk de effecten van de beide varianten boven water te krijgen en was het mogelijk om op eenvoudige wijze de oorzaak van de problemen met de geschoorde hangers inzichtelijk te maken. Later is ook bij andere projecten over dit fenomeen gerapporteerd.

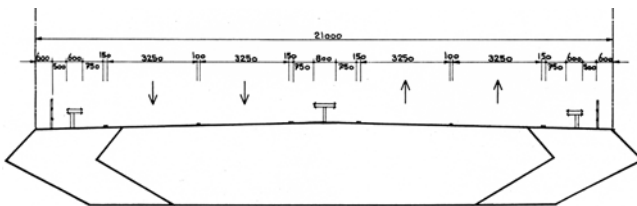
Ad 5 - Een risicoanalyse van de kans op aanvaren van de bovenbouw van de hangbrug over de Schaar van Ossensisse was een logische stap na de ervaringen met probabilistische berekeningen die bij de Oosterscheldedekering zijn gemaakt. Een aantal ervaringen opgedaan bij deze analyse zijn weer toegepast bij de Oosterscheldedekering. Het bijzondere van het onderzoek naar de aanvaarkans van de brug over de Schaar was dat de brug in feite hoog genoeg lag voor de scheepvaart in de Schaar. Daar zij echter een kortsluitverbinding was tussen de overloop van Hansweert en het Zuidergat voeren er in de buurt van de brug ook hogere schepen en zou een van deze schepen bij vergissing gebruik kunnen maken van de Schaar. Aan de andere kant was er ook een zekere limitering van schepen die per vergissing in de buurt zouden komen daar de grootste schepen door de geringere diepte van de Schaar al aan de grond zouden lopen voordat ze de brug konden bereiken. Een ander risico was dat een schip dat gebruik maakte van de hoofdvaargeul stuurloos zou raken. Een schip die dit overkomt zou als gevolg hiervan de Schaar in kunnen schieten en zo de brug kunnen raken. Het risico dat dit zou gebeuren was aan de oostkant van de brug groter dan aan de westkant. Enerzijds omdat het Straatje van Ossensisse aan de oostkant meer in het verlengde van de hoofdvaargeul ligt, het Zuiderdiep, en anderzijds omdat de Schaar een ebeugel is en deze aan de oostzijde van de brug dieper is. Genoeg reden voor een nader onderzoek. Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met de TU – Delft, professor van Douwen en TNO.

Ad 6 - Een dek met een dubbele koker is ontstaan als gevolg van de moeilijker handelbaarheid van een brede enkele koker boven de slikken onder de zijoverspanningen van de brug en een voortdurend streven om tot de meest economische oplossingen te komen.

Bij hangbruggen wordt het dek in zijn algemeenheid gemonteerd met behulp van hijsliggers die op houten wielen over de hoofdkabel kunnen worden verplaatst. De hijsliggers zijn voorzien van kabels die de deksecties omhoog kunnen hijsen. Deze kabels lopen via de catwalk naar de voet van de pyloon waar voor dit doel lieren staan opgesteld. Een lier op de hijsligger zou deze te zwaar maken. Om de secties met de hijskabels op te pakken worden de secties met pontons onder de brug gevaren, aangekoppeld en opgehesen. Bij de zijoverspanningen is het soms niet mogelijk met de secties onder de brug te varen. Er zijn dan wel oplossingen beschikbaar door de secties op te hijsen en daarna met de naastliggende hangers over te pakken en stap voor stap door te zwaaien. Dit is een complexe operatie. Om die reden is er gezocht naar een methode om het dek op te bouwen met lichtere elementen die over het gereede deel van de brug konden worden aangevoerd.



Dwarsdoorsnede bij de start twee rijstroken



Dwarsdoorsnede na verbreding tot vier rijstroken

Daar dit een geheel nieuwe doorsnede zou worden die ook elders nog niet was toegepast was een nader aërodynamisch onderzoek nodig. Over het onderzoek zelf is gerapporteerd in artikel 8. Interessant is om te constateren dat bij recente ontwerpen van de wat grotere bruggen meer en meer ontworpen wordt met dekconstructies die zijn opgebouwd uit meerdere kokers. Bij deze bruggen is de belangrijkste reden om breedte te geven aan het dek zodat extra stijfheid ontstaat in de dwarsrichting van de brug.

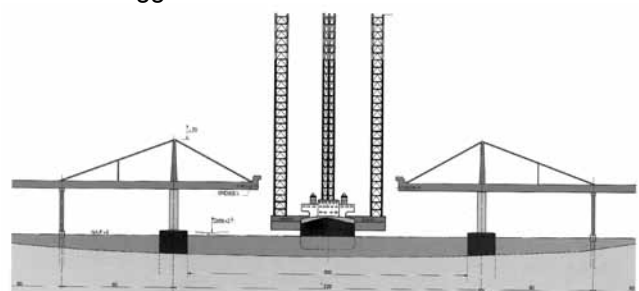
Ad 7 - Een "groeidek" kwam er op neer dat in eerste instantie een smaller dek aangelegd zou worden en dat dit later met de verkeerstoename mee zou groeien. Deze oplossing is voorgesteld in de nota van Directie Bruggen: "Feasibility alternatieve tracés" van 18 april 1986. In deze nota werd voorgesteld dat met een alternatief tracé de inkomsten meer dan verdubbeld konden worden en dat met twee hangbruggen ook de stichtingskosten substantieel naar beneden konden worden bijgesteld. De lagere investeringskosten werden onder meer veroorzaakt door de toepassing van een groeidek. De hoofdkabels en de pylonen zouden op de uiteindelijke definitieve breedte worden aangelegd

en het wegdek voorshands voor twee rijstroken. Zo voorzichtig werd in die dagen over het verkeersaanbod gedacht. Dwarsdragers zouden om de vier liggers op circa 18 meter hart op hart verbreed kunnen worden tot de uiteindelijke breedte zodat deze recht onder de hangers konden worden bevestigd. Op deze wijze was het later verbreden ook weer een eenvoudige zaak.

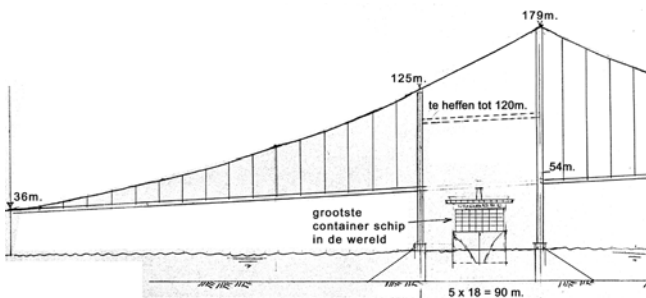
Ad 8 - Een beweegbaar deel in een hangbrug is voor zover bekend ook nog niet eerder vertoond en is de laatste innovatie die hier wordt vermeld. De hoogte van een eventuele hangbrug is voor Antwerpen een voortdurende punt van zorg geweest. Hoewel van Nederlandse zijde er alles aan werd gedaan om met zo realistisch mogelijke ontwerpen te komen was er aan de Belgische zijde een voortdurend wantrouwen tegen deze oplossingen. Belangrijk in deze discussie was ook het Scheidingsverdrag tussen Nederland en België uit 19 april 1839, verder uitgewerkt in 1842 en ten uitvoer gelegd in het verdrag van 20 mei 1843. In dit verdrag was met België overeengekomen een vrije vaart over de Westerschelde. Grondslag hiervoor was de slotakte van het Congres van Wenen uit 1815. Vraag is dan of een brug op 50 – 70 meter hoogte wel of niet tot vrije vaart moet worden gerekend.

Eerder is opgemerkt dat aan schepen een praktische hoogte verbonden is. Met hogere schepen is het merendeel van de grote wereldhavens niet meer te bereiken. Bovendien hoorden bij de hoogten die België verordonneerde een diepgang die op de Schelde ook niet mogelijk was.

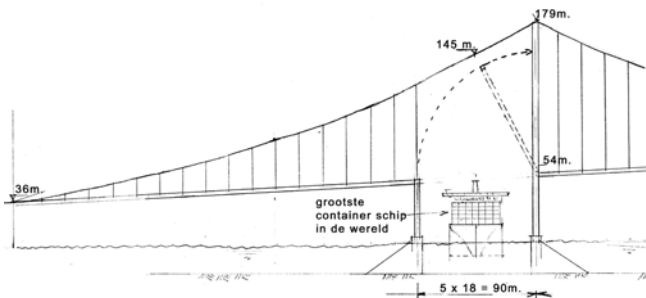
België heeft in januari 1989 pogen aan te tonen met het transport van de Yatzi dat grote doorvaarthoogten noodzakelijk waren. De Yatzi was een booreiland waarop men de boortoren zelf al gemonteerd had. Een dergelijke toren bestaat uit een lichte stalen vakwerkconstructie die vaak wordt neergelegd. In het Panama kanaal is zelfs een bedrijf gespecialiseerd in het neerleggen of aftoppen van dergelijke torens als zij ter plaatse een hoogspanningsleiding moeten passeren. De diepgang was ook een probleem. Ten behoeve van het transport moesten daarom extra pontons worden toegevoegd. De trusters, schroeven die van richting veranderd kunnen worden, onder de drijvers van het eiland moesten zelfs in de Europoort gemonteerd worden omdat hiervoor al helemaal geen diepgang aanwezig was. Dat de Yatzi ooit nog over de Westerschelde zou worden gesleept is dus praktisch uitgesloten. Toch is het een demonstratie geweest waar veel mensen zich door hebben laten beïnvloeden op een cruciaal moment waarin over de doorvaarthoogte beslissingen moesten worden genomen. Probleem bij het ontwerp was hoe hoog moet de brug komen te liggen voor dat enkele incident en moet dan



Uitneembaar bruggedeelte t.b.v. uitzonderlijk transport



Hefbaar gedeelte te openen tot een doorvaarthoogte van 120 meter



Beweegbare klapbrug geeft een doorvaarthoogte van 145 meter

iedere auto die de brug passeert worden geconfronteerd met deze keuze. Om die reden is gezocht naar oplossingen die incidenteel waren te gebruiken en die toch een beperkte invloed zouden hebben op het dagelijkse gebruik van de brug. TBM kwam met zijn uitneembaar deel in de tuibrug over het Straatje van Willem. Directie Bruggen stelde een beweegbaar deel in de hangbrug zelf voor. Nadeel was wel dat deze oplossing hogere investeringskosten tot gevolg zou hebben en dat zware remmingswerken nodig zouden zijn. Echt funest voor de besluitvorming over de hoogte van de brug is de aanbesteding voor de stormvloedkering over de Nieuwe Waterweg geweest. Bij deze aanbesteding waren ook Belgische aannemers betrokken. Langs die weg zagen ze dat in de aanbestedingsdocumenten was aangegeven dat de consortia voorstellen moesten uitwerken maar dat geen van deze voorstellen een beperking mochten inhouden voor de doorvaarthoogte. Ondanks dat Antwerpen zelf een stormvloedkering overwoog met een doorvaarthoogte van 70 meter was dit toch een gegeven dat de deur voor een beperking van de doorvaarthoogte door een hoge brug definitief dicht deed.

11. RISICOANALYSES AANVAREN

ir. C.Q. Klap

Bij de huidige civiele projecten is een van de eerste opgaven het in beeld brengen van de aan een project verbonden risico's. Dit geldt met name voor de grotere projecten. Dit risico denken is vooral naar voren gekomen bij die projecten waarbij aan een of andere financieringsconstructie wordt gedacht. Met name het financierings-model dat daarbij gehanteerd wordt - genaamd pfi (privat finance initiative) - vraagt heel nadrukkelijk om het in kaart brengen van de aan het project verbonden risico's.

Het is uiteraard, net zoals dit in het verleden het geval was, van het grootste belang dat risico's tijdens het ontwerpproces al onderkend worden. Zeker bij de Oosterschelde Stormvloedkering is er op alle mogelijke manieren tijdens het ontwerpproces gekeken hoe de enorme risico's van dit project konden worden beheerst. Daar werd nadat het ontwerp voltooid was een risico analyse uitgevoerd. Als resultaat van deze analyse werd bepaald of het ontwerp aangepast moest worden of dat een aantal extra voorzorgmaatregelen moesten worden afgesproken. Daar waren geen financiers, zoals tegenwoordig gebruikelijk, voor nodig om de risico's in beeld te brengen om ze vervolgens bij een partij onder te brengen. Beter is het om een onderkend risico op te lossen of te verminderen en als laatste ze aan een partij toe te bedelen. Ook bij de Westerschelde oeververbinding is destijds geprobeerd de risico's zo veel mogelijk vooraf aan te pakken. Vandaar dat er een risicoanalyse werd gemaakt naar de kans van aanvaren van de bovenbouw.

Ook wordt tegenwoordig terecht meer aandacht gevraagd voor architectuur, inpassing in de omgeving en milieuvraagstukken, hetgeen geresulteerd heeft in

de MER en Tracéwet procedures. Net als de financieringsproblematiek zijn dit zaken die in het verleden wat stiefmoederlijk werden bedeed. Dit betekent echter niet dat deze ogenschijnlijk nieuwe zaken zoveel aandacht moeten krijgen dat de primaire processen opzij geschoven kunnen worden. De brede maatschappelijke discussies gaan tegenwoordig bijna alleen nog maar over de Tracé- of MER-procedures waardoor de primaire processen op de achtergrond dreigen te geraken. Hierdoor ontstaan in het verdere traject ernstige nieuwe problemen. Als reactie hierop worden dan weer nieuwe procedures gestart terwijl men alleen maar meer aandacht zou moeten geven aan de primaire ontwerp processen. Ontwerp, Tracé, MER en risicoanalyses dienen evenwichtig en parallel aan elkaar te lopen. Momenteel wordt te vaak gedacht dat als de Tracé- en MER-procedure doorlopen is dat dan automatisch het ontwerp gereed is. Dit is niet het geval. Net zomin kan men een bouwvergunning aanvragen als het ontwerp nog niet gereed is. Een bouwvergunning toetst zelfs of dit het geval is. Een Tracé- en een MER-procedure kan rustig afgerond worden voordat het ontwerp gereed is. Schetsen zijn hiervoor voldoende. Deze gang van zaken is des te ernstiger omdat de discussie over het ontwerp zelf niet in brede kring gevoerd wordt en men dus de neiging heeft om dit proces dan als onbelangrijk te bestempelen. Een goed ontwerpproces kan vele van de huidige als onbeheersbaar ervaren zaken zonder meer oplossen. Hier zijn geen extra procedures voor nodig. In geval van de WOV werden alle zaken die bij de huidige projecten expliciet aan de orde worden gesteld, zoals Tracé- en MER- en risicoanalyse, nog impliciet opgepakt. Dit bleef zo tot het moment dat over