

AANDACHTS- PUNTEN BIJ ONTWERP VAN BIJZONDERE OPHAALBRUGGEN

Jaco Reusink



Op de Bruggendag van de Bruggenstichting in maart van dit jaar ontstond, na de presentatie van René van Zuuk van het ontwerp van de Weiersbrug in de Blauwe As in Assen, een discussie met Jaco Reusink over het principe van een ophaalbrug. De Weiersbrug zou hier niet aan voldoen. Omdat voor een discussie hierover op de dag zelf te weinig ruimte was, waarmee geen eer kon worden gedaan aan de betogen van beide heren, volgt hier eerst het betoog van Jaco Reusink en daarna het weerwoord van René van Zuuk.

Redactie



Verandering van functioneel gebruik, constructieve eisen en aandacht voor architectuur maakt dat de moderne ophaalbrug sterk afwijkt van zijn voorgangers. Dit betekent dat er ook nieuwe aandachtspunten zijn voor de constructief ontwerper. De praktijk wijst uit dat deze specifieke aandachtspunten niet altijd worden onderkend. Dit houdt in dat er in dat geval veelal niet voldaan wordt aan de constructieve eisen waardoor er functionele of veiligheidsrisico's optreden.

Voorbeelden van projecten waarbij de bijzondere aspecten van het bijzondere vormontwerp van de moderne ophaalbrug samenkomen, zijn de Groningerbrug en Weiersbrug in Assen. Tegen de achtergrond van deze projecten worden enkele aandachtspunten van de constructieve werking van de nieuwe generatie ophaalbruggen toegelicht.

De ophaalbrug is één van de oudste typen beweegbare bruggen en kan getypeerd worden als een doorontwikkeling van de hand-aangedreven middeleeuwse valbrug bij kastelen en stadsmuren. De ophaalbrug is nog steeds zeer populair. Dit komt vooral omdat dit brugtype geen kelder nodig heeft zoals de basculebrug en, belangrijker nog, dat de brug zich als geen ander brugtype leent voor bijzondere vormgeving, resulterend in een krachtige, locatie gebonden identiteit.

De ophaalbrug is één van de oudste typen beweegbare bruggen en kan getypeerd worden als een doorontwikkeling van de hand-aangedreven middeleeuwse valbrug.

Het brugtype zelf is in de loop der tijd sterk geëvolueerd.

- De aanrijdgevoelige balanspriemkoppelingen en ballastliggers zijn in de meeste gevallen vervallen en er is sprake van duurzame, onderhoudsvriendelijke ontwerpen.
- Houten en gestapelde dekken zijn vervangen door lichte, stalen, orthotrope rijdekken. Om weerstand te bieden aan zwaarder en intensiever wegverkeer worden deze dekken tegenwoordig echter weer zwaarder uitgevoerd.
- Bovenbouw (balans en hameistijl) zijn gewijzigd van samengestelde open constructies naar duurzame stalen kokerliggers. De balans wordt zwaarder uitgevoerd omdat deze maatgevend wordt belast door vermoeiing als gevolg van openen-sluiten.
- De capaciteit van bewegingswerken is verzwaard omdat beweegbare bruggen moeten voldoen aan de eisen van de VOBB, met hogere belastingen en strengere toetsingseisen in vergelijking met eerdere ontwerprichtlijnen voor bewegingswerken.
- Door toepassing van populaire elektro-hydraulische bewegingswerken zijn vergrendelingen van het val voor de vaste ligging overbodig omdat met grotere sluitende onbalans kan worden ontworpen. In sommige gevallen wordt de balans aangedreven waardoor de balans en hangstang zwaarder worden belast en geprofileerd.
- Verscherpte regelgeving vanuit de Machinerichtlijn en Arbeidsmiddelenrichtlijn resulteren onder meer in de definitie van Noodstop-categorieën waarbij de brug bij een incident snel en veilig gestopt moet kunnen worden. Dit stelt onder meer zwaardere eisen aan het remvermogen (krachtcapaciteit) en aan de overbrenging.
- Aanpassing van het draaipuntkwadrant-systeem van de brug. In het verleden werden balansliggers aan de voorzijde kort uitgevoerd waarbij de hangstang juist voorbij het midden op het val aangreep. Dit was optimaal omdat het gewichtsmoment van het val op het kwetsbare draaipunt op deze wijze werd beperkt. Aan de achterzijde werd de

balansligger lang uitgevoerd om de hoeveelheid balancerende ballast te beperken en daarmee de belasting op draaipunten en hamei. Met de opkomst van zwaar verkeer resulteerde deze opstelling in opgedrongen verkeers-trillingen in de bovenbouw en daarom werd de hangstang bij voorkeur op de voorhar van het val aangesloten, waar in principe geen sprake is van trillingen.

- Door vormgeving gedreven, wordt de ophaalbrug in toenemende mate uitgevoerd met een detaillering waarbij het draaipuntkwadrant geen zuiver parallellogram vormt. In dat geval treden de volgende wijzigingen op:
 - de draaihoek van de balans is ongelijk aan de draaihoek van het val;
 - de standhoek van de hangstang tijdens openen van de brug is niet constant;
 - de werkmarm van de hangstang om het hoofddraaipunt is afwijkend ten opzichte van een parallelsituatie waarbij deze gegeven wordt door de openingshoek en standhoek van de hangstang;
 - de balancering van de brug wijzigt continu bij het openen omdat het contragewicht een andere draaihoek maakt, dan het gewichtsmoment van het val (ontkoppelde, ongelijke werkarmen).

De constructieve opgave voor de Groningerbrug en Weiersbrug omvat de volgende facetten:

- de aangeboden vormkwaliteit is onderscheidend bij de gunning van het werk;
- een brugdek uitgevoerd als een dubbel gescheiden brugdek waarbij elk dek aan de buitenzijde gesteund wordt door een enkelvoudige bovenbouw (hangstang, balans, hamei);
- een brugdek met een slanke dekconstructie omdat onderdoorvaart in gesloten stand is vereist;
- een brug met een elektro-hydraulisch bewegingswerk, opgesteld in een kleine kelder. De horizontaal geplaatste cilinder grijpt aan op een koppelkoker tussen de beide hoofddraaipunten. De cilinder is uitgevoerd met een korte slag om

minimale vrijloop van de voorwand van de kelder te realiseren.

- het draaipuntkwadrant is sterk asymmetrisch waarbij de hangstanglengte sterk is ingekort ten opzichte van een zuiver parallellogram;
- de priem is gekromd waarmee het zwaartepunt van de ballast is vastgelegd.

1 CONSTRUCTIEVE AANDACHTSPUNTEN

Doorslag en dynamische stabiliteit

Het fenomeen van doorslag is vooral bekend van oude ophaalbruggen met dubbele dekken die onder een kleine hoek staan en die als driescharnierspant zijn uitgevoerd. Bij variabele belasting van het dek ontstaat een grote horizontale spatkracht die 5 tot 10 maal zo groot is als de verticale belasting. Als het landhoofdscharnier iets vervormt onder belasting, wordt de oploophoek van de dekken kleiner en daarmee de horizontale spatkracht groter en daarmee de vervorming in de wand van het landhoofd. Bij overschrijding van de kritische belasting ontstaat doorslaginstabiliteit. Hetzelfde fenomeen doet zich voor indien de ingesloten hoek tussen balans en hangstang te klein wordt. De hoek die de hangstang met de balans maakt, resulteert in een werkmarm van de hangstang (pendelstaaf) om het hamedraaipunt waarmee er momenten vanuit de balans kunnen worden afgedragen naar het val. Als de ingesloten hoek in geopende stand te klein is, ontstaan er grote spatkrachten in de hangstang en balansligger die vervolgens resulteren in tweede orde vervorming en mogelijk resulteren in doorslag (ingesloten hoek wordt kleiner dan 0°).

2 VORMGEVINGSASPECTEN

De vormgevingskeuze, waarbij de balans op een 'stokje' wordt geplaatst, en de gekromde vorm van de balansligger geven de visuele suggestie dat de ingesloten hoek tussen balans en hangstang relatief groot is. Deze is echter bij grote (84°) openingshoeken extreem klein. Een tweede effect is dat het contragewicht niet om het balansdraaipunt draait en zelfs bij grotere openingshoeken nog een openend moment genereert en geen evenwicht maakt met het sluitend gewichtsmoment van het val.

Het brugtype zelf is in de loop der tijd
sterk geëvolueerd.



↑ ↓ Brug Groningerstraat na aanpassing openingshoek van 84° naar 75°



3 DYNAMISCHE BELASTINGEN BEWEGINGSBEDRIJF

Ophaalbruggen worden constructief ontworpen voor de bedrijfssituaties 'brug buiten bewegingsbedrijf' vermenigvuldigd jF' en 'brug tijdens bewegingsbedrijf', waarbij quasi-statische evenwichtssituaties kunnen worden geschematiseerd en gemodelleerd met numerieke modellen (EEM). Dynamische effecten door verkeer worden rekenkundig verdisconteerd door dynamische factoren (stootfactor op ontwerpverkeerslasten en trillingsfactoren op massastraagheids-elementen). Echter, in geval van dynamische belastingen 'tijdens bewegingsbedrijf', (zoals bij een noodstop, waarbij de kleppen op een hydraulische cilinder abrupt sluiten, of het maximale remkoppel bij een elektro-mechanische aandrijving wordt geleverd) is er geen evenwichtssituatie. Dit betekent dat dynamische belastingssituaties uit het bewegingsbedrijf alleen dáár worden getoetst, waar ze ingeleid worden vanuit de bewegingswerkoverbrenging naar de staalconstructie. In werkelijkheid maken de dynamische krachten uit het bewegingswerk dynamisch evenwicht met massastraagheids-elementen van de brug: ze vertragen immers de hoeksnelheid van de brugmassa.

Bij een ophaalbrug zijn er twee dominante massastraagheids-elementen: het brugdek en het contragewicht. Niet ongebruikelijk bij moderne gebalanceerde ophaalbruggen is een massastraagheidsverhouding van 60% brugdek en 40% contragewicht. Voor de overstortkracht bij hydraulische aandrijvingen moet bij het ontwerp minimaal 1,5 maal de instelwaarde van de overstortkleppen op de cilinder worden aangenomen.

Het aandeel van de noodstopkracht voor het contragewicht in de balans $[F_{HS;s;d}]$ is nu gegeven door de rekenwaarde van de noodstopkracht vanuit de aandrijving $[F_{cil;ov;s;d}]$, te vermenigvuldigen met:

- de werkmarmverhouding van contragewicht tot aandrijvingen $[e_{cil;a} / e_{hs;a}]$ en
- het relatieve percentage van de massastraagheid van het ballastgewicht $[M_{ballast} / M_{brug}]$.

In formulevorm:

$$F_{HS;s;d} = F_{cil;ov;s;d} * [e_{cil;a} / e_{hs;a}] * [M_{ballast} / M_{brug}]$$

Dit betekent dat de hangstangkracht vanuit de noodstop situatie extreem sterk op kan lopen in de volgende gevallen:

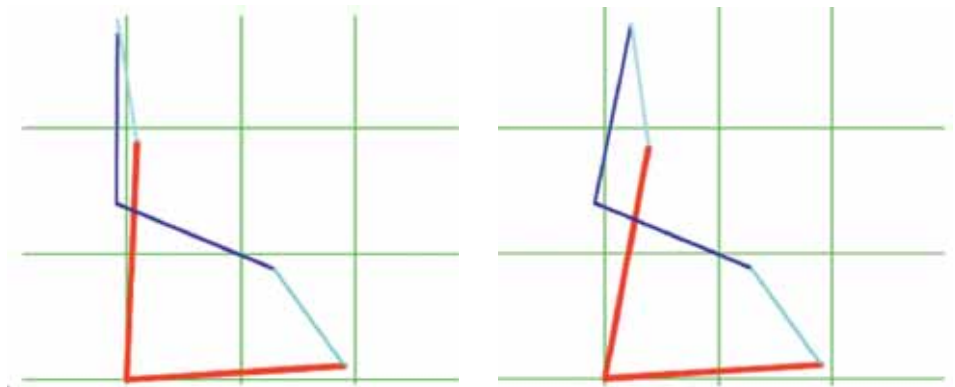
- hoge afstelwaarde van de overstortventielen;
- grote massastraagheid ballast;
- kleine werkmarm van de hangstang om het hameidraaipunt.

Omdat bij het voorbeeldproject de werkmarm ongunstig is door de grote openingshoek van het val en de afwijking van het parallellogram (korte hangstang) resulteert de toetsing aan de noodstop-situatie in een hogere trek/drukbelasting in de hangstang.

Deze dynamische drukbelasting in de hangstang vereist daarbij in de regel een aanvullende knikstabiliteitstoets waardoor de hangstang niet als slank trekelement kan worden uitgevoerd.

4 VERMOEIINGSANALYSE

De draaihoek van de hangstang ten opzichte van het val is veel groter dan de openingshoek van de brug. Dit betekent dat de vermoeiingsberekening van de hangstangconsole een complexer en ongunstiger verloop kent door de grotere draaihoek van de hangstang ten opzichte van het val. Ook de hangstangkracht kent een afwijkend verloop over de openingshoek van het val.



Situatie draaipuntkwadrant openingshoek 84° en openingshoek 75°

	Openingshoek 75°	Openingshoek 84°
Ingesloten hoek hangstang - balans	21,5°	10,1°
Werkarm val minimaal	3.344 mm	2.048 mm
Werkarm balans minimaal	3.477 mm	1.670 mm

GEKOZEN CONSTRUCTIEVE OPLOSSINGSRICHTINGEN BIJ DE OPHALBRUGGEN IN ASSEN

- 1 Optimalisatie (reductie) bruggewicht. Het bruggewicht is geoptimaliseerd door met het werkelijke aantal zware vrachtvoertuigen te rekenen in plaats van de tabelwaarden uit de verkeersbelastingennorm aan te houden.
- 2 De brug is overwegend ongebalanceerd uitgevoerd. Dit betekent dat de hoeveelheid ballast kon worden teruggebracht, wat mogelijk was door de toepassing van hydraulische cilinders met relatief grote krachtscapaciteit.
- 3 De openingshoek van de brug is teruggebracht van 84° naar 75°. Dit was mogelijk omdat de dagmaat van de brug tussen de pijlerwanden groter is dan de minimale functionele vaarwegbreedte.
- 4 De bovenbouw is ontworpen op de dynamische effecten van een noodstop. Omdat het aandeel massastraagheid van het contragewicht sterk is teruggebracht, wordt slechts een klein deel (ca. 20%) van het noodstopkoppel vanuit de aandrijving via de hangstang opgedrongen aan de balansligger.

CONCLUSIE

Vooral bij ophaalbruggen met een kleine werkarm tussen hangstang en hameidraaipunt of met een sterke afwijking van het parallellogram, moet specifieke aandacht gegeven worden aan dynamische evenwichtssituaties (bijv. categorie 0 noodstop en 'in de buffer lopen') en het tweede orde gedrag tijdens het bewegingsbedrijf van de brug. In het algemeen geldt dat een vereenvoudigde, quasi statische benadering mogelijk is, als voldaan wordt aan de volgende voorwaarden:

- de ingesloten hoek tussen balans en hangstang is groter dan 20°;
- de werkarm van hangstang om het hameidraaipunt is groter dan 20% van de lengte van het val;
- de overbrenging van de aandrijving grijpt aan op het val.

Wordt hier niet aan voldaan, dan moet bijzondere aandacht worden gegeven aan dynamische evenwichtssituaties (noodstop: overstorten of maximaal remkoppel) In dit specifieke geval is er door een meewerkende houding van aannemer (grotere cilinderkrachten en zwaardere overbrenging) en opdrachtgever (beperking openingshoek) een object met een bijzondere verschijningsvorm gerealiseerd waarbij in uitwerking volledig aangesloten is bij enerzijds de wensen van de architect en anderzijds de constructieve eisen vanuit de regelgeving.

Reactie René van Zuuk

In het kader van het bevaarbaar maken van het kanaal in Assen moesten zes nieuwe bruggen gebouwd worden, drie fiets+voetgangersbruggen en drie fiets-voetgangers-autobruggen.

De drie fiets+voetgangersbruggen zijn als eerste aanbesteed, later volgden de drie autobruggen. Als eerste is het ontwerp van de autobrug, gewonnen door Zwarts & Jansma, vergeven. De aanbesteding van de brug in het verlengde van de Groningerstraat en de brug in het verlengde van de Weiersstraat zijn daarna gezamenlijk aanbesteed. Twee bruggen op verschillende locaties, die niet hetzelfde maar wel familie van elkaar moesten zijn. Beide locaties bevinden zich aan de rand van de binnenstad en bevinden zich op delicate locaties waarmee je zorgvuldig moet omgaan. Het ambitiedocument schreef voor dat de constructies van de bruggen slank, smal en transparant gedimensioneerd en uitgevoerd moesten worden. Met dekken van respectievelijk (2x) 8,5 en (2x) 10 meter breed was het ondoenlijk om winnende, volledig gebalanceerde bruggen te ontwerpen die aan de gestelde criteria voldeden. Het lag daarom voor de hand om slechts een gedeelte van het

valgewicht te balanceren. Daarmee volgden we de strategie van Zwarts & Jansma, voor wiens ontwerp van de brug aan de Industrieweg al een paar maanden eerder was gekozen.

Met de huidige techniek, waarbij ophaalbruggen niet meer door tandradheugels maar hydraulisch door een plunjerzuigerstang bewogen worden, is het niet meer noodzakelijk dat bruggen volledig gebalanceerd zijn. Dat geeft meer vrijheid aan de ontwerpende partijen.

Binnen een prijsvraag is het maken van een gebalanceerde brug niet noodzakelijk goedkoper. Het volledig balanceren van de meer dan 30 ton zware vallen van de Groningerbrug zou extra ballastgewicht vergen. De hiermee gepaard gaande extra kosten van het ballastdeel, de zwaardere constructie en draaipunten, wogen ruimschoots op tegen de extra kosten van een iets grotere hydraulische installatie. Daarnaast is de Groningerstraat zo breed dat we de brug moesten opdelen in twee afzonderlijke stukken waardoor elk val alleen



Ontwerp Zwarts & Jansma voor de brug aan de Industrieweg, Assen

gebalanceerd kan worden door één trekstang die aan de zijkant van elk dek bevestigd is. Een volledige balancerende zou erg veel torsie in het val opleveren. Met de keuze voor de balans op een 'stokje' is een brug gecreëerd met een solide oplegging die, naarmate de brug verder omhoog gaat, steeds verder gebalanceerd wordt zonder dat de torsie in het val toeneemt.

Een aandachtspunt bij zo'n uitvoering is, dat de verhouding tussen:

- de horizontale afstand van het zwaartepunt van de balans tot het balansdraaipunt, en
- de loodrechte afstand van de trekstang tot het balansdraaipunt, niet groter mag zijn dan 20% omdat dan de belasting op de trekstang te hoog kan oplopen.

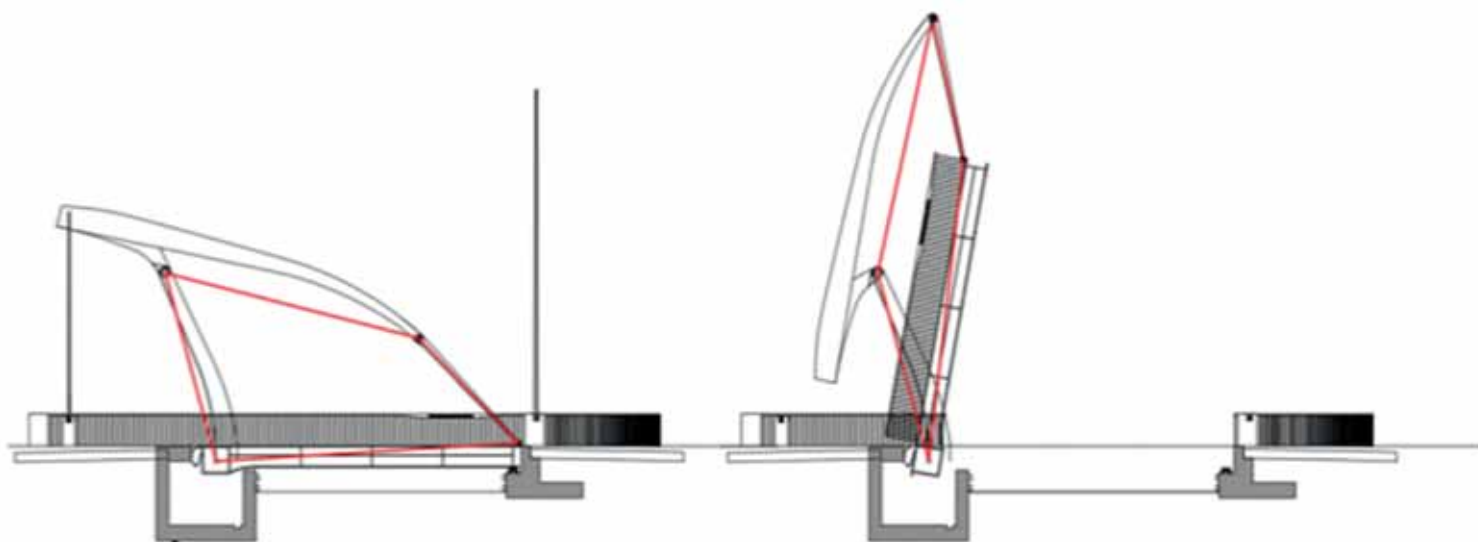
Ofschoon de Weiers- en Groningerbrug erg veel op elkaar lijken, zijn ze niet identiek. Bij de Weiersbrug, de brug die wij als eerste hadden ontworpen, buigt de hameistijl naar het water af. De hierboven aangegeven verhouding is kleiner dan de gestelde 20% en ook de hoek tussen de balansarm en de pendelstaaf is meer dan 20°.

Bij de Groningerstraat hadden wij stedenbouwkundig minder ruimte en als gevolg daarvan hebben wij de hameistijl naar het water gebogen. Daarmee komt het balansdraaipunt dichterbij het valdraaipunt te liggen waardoor het systeemlijnen-parallelogram meer geknepen wordt. Het feit dat de systeemlijnen bij de Groningerbrug en de Weiersbrug niet volgens een parallelogram verlopen, doet daar niets aan af. Ook bij de brug van Zwarts & Jansma zien we een geknepen parallelogram en zien we dat de hoek tussen de balansarm en de trekstang veel minder is dan de gewenste 20° (ongeveer 9°). Daarnaast zit de werkarm van hangstang om het hameidraaipunt ruim onder de 20% van de lengte van het val.

Aangezien bij de Groningerbrug de openingshelling niet maatgevend was, omdat de maximale doorvaartbreedte en doorvaarthoogte al met een opening van 75° bereikt werd, viel de brug sowieso al binnen de door Jaco Reusink gestelde normen.

Met de huidige diversiteit aan technieken moet elke brug op zichzelf bekeken worden. De moderne bewegingstechniek kan heel verfijnd ingesteld en gemonitord worden. De beweging van het val begint met een versnelling, verloopt dan eenparig en wordt vervolgens vertraagd. Tegen de tijd dat de balansarm en de trekstang de eindhoek naderen, staat het bewegingssysteem al nagenoeg stil en heeft een noodstop, die in drie seconden vertraagt, geen enkel nadelig effect meer. Daarnaast komt een noodstop voornamelijk voor aan het begin van de beweging en zelden aan het eind als de brug al nagenoeg open is.

Ondanks het feit dat bij de brug aan de Groningerstraat het krachtenverloop iets ongunstiger is, als gevolg van de stedenbouwkundige situatie, is de realiteit dat je niet simpelweg kan blindvaren op oude vuistregels die de laatste 100 jaar ontwikkeld zijn voor bruggen zoals die toen ontworpen werden. Met de huidige technieken ontstaan nieuwe mogelijkheden die een eigentijdse vormgeving mogelijk maken.



Weiersbrug in gesloten en in open stand

Met de huidige technieken ontstaan nieuwe mogelijkheden die een eigentijdse vormgeving mogelijk maken.