



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

DI: 156683

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Bouwdienst Rijkswaterstaat

TWEEDE FASE
REVIEW
ERASMUSBRUG
ROTTERDAM

april 1993

Bouwdienst Rijkswaterstaat

DI: 156683

TWEEDE FASE
REVIEW
ERASMUSBRUG
ROTTERDAM

april 1993

Bouwdienst Rijkswaterstaat

T W E E D E F A S E
R E V I E W
E R A S M U S B R U G
R O T T E R D A M

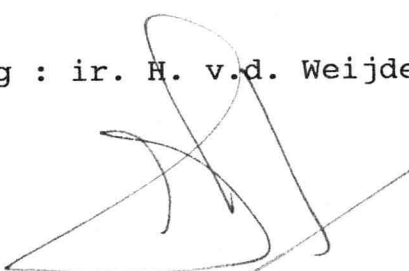
14 APRIL 1993

Opdrachtgever : Gemeentewerken Rotterdam
afd. Ing.bur. Staal- en werktuigbouw

Opdrachtnemer : Bouwdienst Rijkswaterstaat

Gedel. bevoegd gezag : ir. H. v.d. Weijs

reviewteam



: ir. F.J. van Dooren
ing. J.S. Leendertz
ir. H. v.d. Weijs

namens het toetsteam : ir. F.J. van Dooren



INHOUDSOPGAVE

1.	Inleiding.....	1
2.	Taakstelling van het reviewteam.....	2
3.	Beoordeelde materiaal.....	3
4.	Bestek.....	4
5.	Tekeningen.....	4
6.	NLR-onderzoek.....	6
7.	Ontwerpnota.....	8
8.	Berekening knik pyloon.....	9
9.	Berekening hoofddraagsysteem.....	10
9.1	Algemeen.....	10
9.2	Opbouw modellen.....	10
9.3	Belastingen.....	11
9.4	Berekeningsresultaten.....	12
9.5	Oplegreacties/Opleggingen.....	12
9.6	Calamiteiten.....	12
10.	Controle onderdelen.....	13
10.1	Dekplaat.....	13
10.2	Rijvloer.....	13
10.3	Langsliggers.....	13
10.4	Dwarsdragers voor de pyloon.....	13
10.5	Dwarsdragers achter de pyloon.....	14
10.6	Afwijkende dwarsdragers.....	14
10.7	Koppelkoker.....	14
10.8	Hoofdliggers voor de pyloon.....	15
10.9	Hoofdliggers achter de pyloon.....	16
10.10	Pyloon.....	17
10.11	Tuien.....	18
10.12	Consoles.....	18
11.	Stabiliteit.....	19
11.1	DIANA-buckling-modes.....	19
11.2	Langsliggers.....	21
11.3	Niet-lineaire elastische berekening.....	22
11.4	Voorstel ontwerpteam wijziging uitgangspunten.....	24
11.5	Conclusie t.a.v. aanpak stabiliteitsberekeningen..	25
12.	Temperatuur en wind.....	27
13.	Vermoeiing.....	27
14.	Samenvatting en eindconclusie.....	28

1. Inleiding

In opdracht van Gemeentewerken Rotterdam afdeling Ing.bur. Staal- en werktuigbouw heeft de Bouwdienst in september 1992 een review uitgevoerd op het ontwerp van de te bouwen Erasmusbrug te Rotterdam. Het betrof een technische review waarin op basis van door Gemeentewerken Rotterdam toegeleverd materiaal inhoudelijk is gekeken naar de berekening en tekeningen van de brug.

De intentie was de volledige oeververbinding in de review te betrekken, echter door fasering in het gereedkomen van de diverse onderdelen van de oeververbinding zal de review en de rapportage in delen plaatsvinden. In de eerste fase zijn de resultaten van de review van de tuibrug (onder- en bovenbouw) en de betonnen aanbruggen beschreven op basis van de in juli 1992 gereede delen van de berekeningen en tekeningen.

De voorliggende rapportage betreft de tweede fase van de review waarin wederom op basis van door Gemeentewerken Rotterdam toegeleverd materiaal inhoudelijk is gekeken naar de in januari gereede berekeningen en tekeningen van de tuibrug en perceel B van het bestek. Het toegeleverde materiaal is in paragraaf 3 beschreven. Het materiaal betreft alleen de bovenbouw van de stalen tuibrug. Op het moment van gereed komen van deze rapportage zijn de werkzaamheden aan de berekeningen en de tekeningen nog niet gereed.

Het reviewteam, bestaande uit de heren ir. H. van der Weijde, ing. J.S. Leendertz en ir. F.J. van Dooren heeft in de maanden januari en februari 1993 de ter beschikking gestelde documenten bestudeerd. Ter verduidelijking van de stukken zijn bij Gemeentewerken Rotterdam een aantal besprekingen gehouden waarbij de medewerking is verkregen van een aantal leden uit het ontwerpteam (W.A. de Adel, K. Noorlander, B. Lebbink, M. Kuipers).

De meeste belangrijke aandachtspunten voor het ontwerpteam zijn in deze rapportage onderstreept.

Review Erasmusbrug blad 2

2. TAAKSTELLING VAN HET REVIEWTEAM

De taakstelling van de review volgt uit de opdrachtbrief. Daarin wordt gesteld dat het ontwerp op de volgende aspecten beoordeeld dient te worden:

1. programma van eisen (er is geen technisch programma van eisen aanwezig, het aanwezige programma van eisen is reeds in de toets op doelmatigheid en soberheid bekeken)
2. veiligheid
3. incasseringsvermogen bij calamiteiten
4. grenstoestanden
5. ontwerpvoorschriften
6. wettelijke voorschriften
7. toetsing aan vergelijkbare ontwerpen
8. fabricage, montage en assemblage
9. duurzaamheid, betrouwbaarheid en onderhoud
10. toleranties en afkeurcriteria
11. samenhang ontwerp

In aanvulling hierop is eveneens het bestek van de bovenbouw van de tuibrug in de review opgenomen.

3. Beoordeelde materiaal

- Erasmusbrug deel 1 Berekening
Bovenbouw stalen brug
status : voorlopig
datering voorkaft : 03-11-93
- Hoofdstuk 5.10 van de berekening : Knik pyloon
datering : 21-05-92
- Bestek nr. 1-001-93 Erasmusbrug
Perceel B (het staaldeel)
- Ontwerpnota "Erasmusbrug" (bovenbouw)
datering : 29-09-92 revisie 09-11-92
- NLR-windtunnelonderzoek naar het trillingsgedrag van
de Erasmusbrug te Rotterdam
- Tekeningenlijst Erasmusbrug
- Tekeningenset Erasmusbrug m.u.v. teknrs. :
224 verankering achtertui in pyloon
244/245 liften
247 luik bij pyloonkruis
270 t/m 297 leuningen en deuren

Het reviewteam is van mening dat het ter beschikking gestelde materiaal een voldoende compleet beeld van de totale bovenbouw van de tuibrug geeft om een technische review mogelijk te maken.

Aanvullend verkregen informatie:

- Wijziging uitgangspunten t.a.v. belasting- en sterktefactoren t.b.v. de berekening van de bovenbouw van de stalen tuibrug.
- Beschouwing t.a.v. de invloed van lokale instabiliteit op de totale instabiliteit.

4. Bestek

In een gemeenschappelijke bijeenkomst met het ontwerpteam en een deel van het reviewteam is het bestek (perceel B) besproken. De op- en aanmerkingen zijn in die vergadering mondeling gerapporteerd. Het betrof in deze zowel opmerkingen t.a.v. de technische bepalingen alsmede opmerkingen t.a.v. de invulling van de besteksposten. Het reviewteam merkt op dat de RAW-systematiek in de huidige vorm niet specifiek bedoeld is voor het maken van een bestek voor een stalen brug. Dit uit zich met name in de samenstelling van de besteksposten. Hierbij dient zeer veel aandacht te worden besteed aan het onderbrengen van alle te verwachten benodigde werkzaamheden, hoeveelheden resultaatsverplichting en hoeveelheden bouw-stof in de besteksposten. Niet in besteksposten opgenomen of incompleet omschreven werkzaamheden, resultaatsverplichtingen of bouwstoffen zullen niet in de aanbiedingen worden overgenomen en derhalve later als meerwerk moeten worden verrekend.

5. Tekeningen

Het commentaar op de beschikbaar gestelde tekeningen is met het ontwerpteam besproken. Een kopie van de tekeningen met de daarop aangegeven opmerkingen is aan Gemeentewerken verstrekt.

Speciale aandacht dient te worden besteed aan het knooppunt pyloon, hoofdligger achterveld, koppelkoker. De overgang van de dekplaat in de hoofdoverspanning naar de pyloon is zeer abrupt en omdat in dit gebied lokaal zeer grote krachten worden overgedragen, gedraagt deze locatie zich als een zeer hard punt. Als gevolg hiervan treden zeer hoge spanningen op vanuit de krachtswerking van het hoofddraag-systeem, welke nog worden versterkt door lokale opgedrongen vervormingen. Mede met het oog op vermoeiing is het reviewteam van mening dat de detaillering op die locatie zodanig dient te worden aangepast dat een geleidelijker overgang van krachten wordt bewerkstelligd.

T.a.v. het zelfde knooppunt is uit de tekeningen niet te herleiden welke platen doorlopen, dan wel welke platen onderbroken zijn en wat voor lassen daarin zijn voorzien. Gezien het belang van het knooppunt en de concentratie van krachten dient hieraan meer aandacht te worden besteed.

Review Erasmusbrug blad 5

Het is op diverse plaatsen op de tekeningen onduidelijk of veranderingen van plaatdikten aan de binnenzijde dan wel aan de buitenzijde van doorsneden zijn aangebracht. Vanuit fabricage-oogpunt is het aan te bevelen dit aan de buitenzijde te doen.

In de berekening zijn voor een beperkt aantal lassen lasberekeningen uitgevoerd. Op de tekeningen zijn over het algemeen de hoofdklassen wel aangegeven, maar ontbreken veel lasafmetingen in de details (b.v. t.a.v. de trogverstijvingen in de pyloon zijn in de berekening relatief zware lassen aangegeven welke niet op tekening zijn terug te vinden.

6. NLR-onderzoek

De geometrie van het windtunnelmodel is op tekening door Gemeentewerken aan het NLR toegeleverd. De constructieschets van het model zoals weergegeven in figuur 2 van het NLR-rapport vertoont afwijkingen t.o.v. de tekeningen van de brugdekdoorsnede (hellingen dek dwars, hoogte en lokatie wegscheidingen en bus/trambaan scheidingen). Kunnen deze geometrieafwijkingen van invloed zijn op het trillingsgedrag?

De eigenfrequenties van de brug zijn in een eerder stadium door het NLR berekend. De resultaten en uitgangspunten van deze berekeningen zijn niet gepresenteerd en kunnen derhalve niet worden getoetst (alleen de laagste buig- en torsiefrequentie staan weergegeven, resp. 0.436 en 0.632 Hz). Kunnen ontwerpwijzigingen sinds de uitvoering van de trillingsberekeningen van invloed zijn op de trillingsfrequenties (wijziging massa's en/of stijfheden).

De dempingswaarden G_b en G_t van het model zijn aanzienlijk groter als de modeldempingswaarden van bijvoorbeeld de brug Zaltbommel (Erasmus : $G_b=0.008$ en $G_t=0.006$; Zaltbommel : $G_b=0.004$ en $G_t=0.002$). Dit heeft tot gevolg dat b.v. de C_m (0.0059 tot 0.0085) nogal afwijkt van de gevonden waarden voor de brug Zaltbommel (staal) en de Willemsbrug (C_m resp. 0.0014 en 0.0013). Kan dit worden verklaard.

Het getal van Strouhal is vastgesteld op 0.117, de eerste buigfrequentie op 0.436 Hz en de aanstroomhoogte d op $0.045 \cdot 60 = 2.7$ m (dus inclusief wegscheiding blijkbaar). De via de Strouhalformule te berekenen kritische windsnelheid bedraagt dan 10.1 m/s. Het rapport geeft $V_{kr.} = 12.4$ m/s. Kan dit worden verklaard.

De conclusie van het NLR rapport luidt:

- buigtrilling bij $V=12.4$ m/s ampl. 10.4 cm ($G_b=0.01$)
- torsietrilling bij $V=14.6$ m/s ampl. 5.8 cm ($G_t=0.02$)

Het NLR stelt op bladzijde 14 van het rapport dat alleen trillingen bij windsnelheden tot 15 m/s van belang zijn. Bij hogere windsnelheden zal de toenemende turbulentie-intensiteit wervelexcitatie tegengaan. De trillingen treden echter op bij windsnelheden lager als 15 m/s. Wat is in die situatie de grootte van de turbulentie-intensiteit en de invloed daarvan op de trillingen. In de conclusie stelt het NLR dat bij 12.4 en 14.6 m/s de turbulentie al zodanig is dat geen trillingen optreden, hetgeen in tegenspraak is met het vermelde op blad 14, tenzij het aangebrachte rooster een turbulentie-intensiteit genereert behorende bij windsnelheden tussen 12.4 en 14.6 m/s.

Wanneer de genoemde trillingsamplituden bij de opgegeven frequenties wel optreden is sprake van ontoelaatbaar trillingsgedrag vanuit het oogpunt van comfort voor voetgangers op de brug. Gezien het feit dat het een stadsbrug betreft dient hiermee rekening te worden gehouden. Sterktetechnisch zijn de trillingen van ondergeschikt belang.

Bij hogere windsnelheden (buiging 25.8 m/s; torsie 21.9 m/s) treedt nogmaals excitatie op (buiging 85 cm; torsie 15 cm). De wind is dan echter niet meer constant en homogeen zodat twijfelachtig is of deze excitatie in de praktijk optreedt. Er dient evenwel, volgens het NLR, rekening te worden gehouden met een verhoogd trillingsniveau. Dit wordt niet nader gekwalificeerd. Waar dient rekening mee te worden gehouden.

Flutter treedt op bij een relatief (t.o.v. andere onderzoeken aan tuibruggen) lage windsnelheid van ca. 40 m/s. Deze windsnelheid komt evenwel volgens het NLR op de locatie Rotterdam niet voor.

In de rapportage wordt geen aandacht besteed aan trillingen welke zich tijdens de bouw van de brug kunnen voordoen. Dit dient onderzocht te worden. Het ontwerpteam stelt dat de aannemer verantwoordelijk is voor de bouw van de brug en daarmee voor de effecten van wind tijdens de bouw. Dit is in het bestek geregeld. Het ontwerpteam zal echter de bevindingen van de aannemer betreffende trillingen a.g.v. wind moeten toetsen en derhalve toch over de daarvoor benodigde gegevens moeten beschikken.

7. Ontwerpnota

Er dient bij de invulling van de doorvaarteis rekening met doorbuigingen van de hoofdligger te worden gehouden. Uit tekening 200 blijkt dat voor de doorbuiging 200 mm t.o.v. de doorvaarteis is gereserveerd t.p.v. de uiteinden van de doorvaartbreedte. Hieraan wordt voldaan wanneer 50% van de maximale mobiele belasting in rekening wordt gebracht hetgeen als een goede aanname kan worden gezien voor de momentane belasting.

Het regenwater wordt d.m.v. een verkanting naar het laagste punt in dwarsrichting afgevoerd (t.p.v. de hoofdliggers) en daar direct op de rivier geloosd. Is afvoer direct op de rivier in het kader van de WVO wel toegestaan (vergunning?).

Er wordt bij het ontwerp rekening gehouden met het uitval-
len van een (achter-)tui a.g.v. een calamiteit in combi-
natie met een gereduceerde verkeersbelasting. Alhoewel deze
berekeningen geen rekening houden met niet-lineaire
effecten, mag worden geconcludeerd dat het mogelijk is een
complete tui te vervangen (naast de mogelijkheid om streng
voor streng te kunnen vervangen, hetgeen, indien gewenst,
in de eisen t.a.v. de tuien dient te zijn vermeld).

Materialen:

pyloon	: Fe E 460	$t \leq 35$	0.2% rekgrens 460 N/mm ²
		$35 < t \leq 50$	0.2% rekgrens 440 N/mm ²
rest	: Fe E 355	$t \leq 40$	0.2% rekgrens 360 N/mm ²
		$40 < t \leq 70$	0.2% rekgrens 340 N/mm ²
tuien	: breuksterkte 1770 N/mm ²		

Voorschriften:

VOSB'63	t.a.v. belastingen en belastingcombinaties
NEN3851	t.a.v. slankheid en knikspanning in aanvulling op de VOSB'63
VVSB	
Dast-richtlinie D12	t.a.v. interactie knik/plooi
NEN 6770, 6771 en 6772	t.a.v. plooi stabiliteit, tweede orde berekening, torsieknik en doorsnedereductie
DIN 18800	t.a.v. torsieknik
ECCS	t.a.v. knikstabiliteit voor HR-staal

Belastingen:

conform VOSB'63 m.u.v. het laststelsel
Klasse 600/750 voor de rijbanen
Klasse 600/450 voor de fiets-voetpaden
Remkracht $0.9 \cdot g \cdot \text{massa}$ laststelsel
Windbelasting conform VOSB'63
Temperatuur conform VOSB'63

Belastingcombinaties zijn in de nota niet gedefinieerd. Aangegeven staat dat de belastingcombinaties conform de VOSB'63 worden gehanteerd. Het reviewteam is van mening dat in afwijking hiervan tevens combinaties van verkeer, wind en temperatuur dienen te worden beschouwd (zonder verhoogde toelaatbare spanningen, maar met momentane waarden van de wind- en temperatuurbelasting, b.v. 50%).

T.a.v. de toegepaste voorschriften dient te worden opgemerkt dat voor de verschillende vormen van instabiliteit verschillende voorschriften zijn gehanteerd en gecombineerd. T.a.v. dit punt is het reviewteam van mening dat uitgegaan dient te worden van één norm. Wanneer onderdelen volgens de betreffende norm niet voldoen, dan wel wanneer geen artikelen betreffende het te onderzoeken geval zijn opgenomen, dient te worden teruggegaan naar de basis, d.w.z. zijn er in de betreffende norm vereenvoudigingen toegepast welke de veiligheid gunstig beïnvloeden, dan kan voor een meer fundamentele rekenmethodiek worden gekozen (de basis van de betreffende norm). Wanneer een bepaald fenomeen niet in de norm wordt behandeld kan gebruik worden gemaakt van andere normen mits die norm volgens dezelfde uitgangspunten is opgesteld als de basisnorm.

Het verdient aanbeveling de tekeningenlijst in de berekening van data te voorzien zodat enerzijds duidelijk is op welke versie van de tekening de berekening is gebaseerd en anderzijds duidelijk is dat de uit sterkte-overwegingen benodigde afmetingen ook op tekening zijn staan weergegeven.

8. Berekening lokale effecten geknikte pyloonvorm

Aan de berekening van de knik van de pyloon m.b.v. DIANA zijn geen conclusies en/of beschrijving van de resultaten toegevoegd. Onduidelijk, maar van groot belang, is of de lokale buigeffecten t.g.v. de knik in de berekeningsresultaten zijn opgenomen. Dit is afhankelijk van de locatie van de integratiepunten (over de dikte van het element) en het gekozen type elementen.

9. Berekeningen Hoofddraagsysteem

9.1 Algemeen

Voor de berekening van het hoofddraagsysteem is gebruik gemaakt van een 3D-DIANA-model opgebouwd uit balken en staven.

Van dit model zijn diverse versies gemaakt en de resultaten uit meerdere versies worden gebruikt voor de controles van de diverse onderdelen van de brug.

Bij de controles van de diverse doorsneden is thans duidelijk vermeld uit welk(e) model(len) de krachten op de betreffende doorsnede afkomstig zijn.

Het reviewteam gaat er van uit dat de invoer (profielgrootheden, geometrie en belastingen) van de modellen overeenkomstig de in de berekening genoemde uitgangspunten is samengesteld.

Het reviewteam gaat er eveneens van uit dat daar waar doorsneden van staven worden gecontroleerd de verdeling van de spanningen in die doorsnede is bepaald op basis van de fysisch in de constructie aanwezige afmetingen van de doorsnede en de maatgevende combinatie van op de doorsnede werkende krachten uit de verschillende modellen. Het is voor het reviewteam onmogelijk na te gaan of bij de doorsnede controles uitgegaan is van de maatgevende krachten op die doorsnede uit de verschillende modellen.

9.2 Opbouw modellen

Ten aanzien van de fictieve stijfheid van de tuien in de modellen is in hoofdstuk 2.08 van de berekening een controleberekening uitgevoerd naar de invloed van een lagere tuistijfheid. Bij deze berekening is de E-modulus van de tuien van gemiddeld $2.05E5 \text{ N/mm}^2$ verlaagd naar gemiddeld $1.85E5 \text{ N/mm}^2$. Op basis van vergelijking van de krachten in de hoofdligger en de pyloon wordt geconcludeerd dat de verschillen tussen de beide berekeningen te gering zijn om in de verdere berekening mee te nemen. Bij de berekening van de montagestadia zal dit effect echter wel meegenomen dienen te worden omdat het effect voor de vervormingen tijdens de bouw wel van belang is.

De buigstijfheid van de hoofdliggerdoorsneden is gebaseerd op aannamen voor de meewerkende breedte. Verificatie van deze aannamen zoals voorgesteld in fase 1 van de review is niet uitgevoerd.

Binnen de aangehouden meewerkende breedte is het oppervlak van de troggen voor 75% in rekening gebracht. Per saldo komt dit overeen met de voorgeschreven beperking van de meewerkende breedte bij verstijfde dekplaten (3.05.40).

Alle doorsnede grootheden van de pyloon zijn thans loodrecht op de as van de staaf in het model bepaald en de lokale assen in het model komen overeen met de assen waarom de doorsnedegrootheden zijn bepaald.

De met de modellen berekende krachtsverdelingen zijn m.u.v. de resultaten in hoofdstuk 4.05 eerste orde krachtsverdelingen. Alle controles van doorsneden van het hoofd-draagsysteem uitgevoerd in de hoofdstukken 1, 2 en 3 zijn derhalve exclusief het tweede orde effect. Gezien de grootte van het tweede orde effect en het feit dat in een aantal doorsneden de uc's (lineair elastisch) de waarde 1 benaderen, hebben deze controles dus slechts een zeer beperkte waarde.

9.3 Belastingen

In hoofdstuk 2.04 wordt de aangenomen belasting door eigen gewicht nader onderbouwd. Niet duidelijk is of de onderbouwing met de aanname voor de op het model aangebrachte belasting overeenkomt en welke van de twee op het model zijn aangebracht.

In de berekening van het eigen gewicht staat niets vermeld t.a.v. de faciliteiten t.b.v. de openbaar vervoer strook. De voorspanning dient voor de aanwezigheid hiervan gecorrigeerd te worden.

T.a.v. de mobiele en de wagen belasting is het niet duidelijk hoe beiden op het model zijn aangebracht (puntlast of verdeelde belasting). Voor een juiste bepaling van de maximale en minimale momenten dient de Q-mobiel als gelijkmatig verdeelde belasting te zijn aangebracht, en de P-mobiel als puntbelasting.

De effecten van temperatuurbelasting eventueel in combinatie met wrijvingskrachten van opleggingen zijn in de berekening niet teruggevonden. Met name voor het raamwerk dat wordt gevormd door de pyloon en de koppelkoker kan dit een significant belastinggeval zijn.

Belasting door wind komt in de berekening in het geheel niet aan de orde.

Ten aanzien van de combinatie van belastinggevallen is het reviewteam van mening dat reële gevallen van temperatuurbelasting, belasting door wrijving van opleggingen en wind in de combinatie met eigen gewicht, voorspanning en mobiele belasting dienen te worden meegenomen.

9.4 Berekeningsresultaten

De berekeningsresultaten zijn m.b.v. een spreadsheet verwerkt tot krachten of spanningen. Bij verwerking tot krachten zullen de berekende extreme waarden van N, M en D niet tot één belastinggeval behoren. Hoe zit dit bij de verwerking tot spanningen. Behoren de berekende spanningen onder en boven tot één belastinggeval en hoe is de relatie met de dwarskracht.

Uit de berekeningsresultaten blijkt dat bij de controle van de hoofdligger uitgegaan is van de extreme krachten en bij de controle van de pyloon van spanningen op basis van reële belastingcombinaties.

9.5 Oplegreacties/opleggingen

De oplegreacties zijn met uitzondering van de reacties in de trekverankering berekend exclusief de stootcoëfficiënt. Welke factoren zijn aangehouden bij de dimensionering van de opleggingen zelf. De berekening van de opleggingen ontbreekt en kan derhalve niet worden getoetst. Met name de oplegreacties onder de pyloon, rubberopleggingen, hebben extreem grote afmetingen. Uit een aanvullende bespreking met een leverancier van dergelijke opleggingen is gebleken dat vanuit de offshore-industrie ervaringen zijn opgedaan met de fabricage en toepassing van dergelijke grote opleggingen. T.a.v. de kleinere opleggingen vraagt het reviewteam zich af of deze bij minimale belasting en bijbehorende rotatie niet gapen.

9.6 Calamiteiten

Bij het ontwerp van de brug worden twee calamiteits belastinggevallen beschouwd. Het betreft hier een belastinggeval waarbij een voortui wegvalt en een belastinggeval waarbij een achtertui wegvalt. Bij beide calamiteitsgevallen wordt ervan uitgegaan dat de veiligheid 1.0 mag zijn i.p.v. 1.5 . Bij deze belastinggevallen wordt alleen op overschrijding van de vloiegrens gecontroleerd volgens een lineaire berekening. Bij verwijdering van de voortui voldoet de constructie bij volledige verkeersbelasting, bij verwijdering van de achtertui voldoet de constructie alleen bij 50 % mobiele belasting.

Naast de genoemde extreme calamiteiten is het voor dergelijke constructies aan te raden de gevoeligheid voor bouwfouten en zettingen van de fundering te bepalen. Ten aanzien van deze onderwerpen is in de berekening niets terug te vinden.

10 Controle onderdelen

10.1 Dekplaat

De opmerkingen t.a.v. de dekplaat gemaakt in de eerste fase van de review betreffende de verdeling van de buigspanningen over de dikte van de dekplaat en de combinatie van de lokale dekplaatspanningen met spanningen in de dekplaat uit langsligger-, dwarsdrager- en hoofdliggerwerking zijn verwerkt.

10.2 Rijvloer

De rijvloer bestaat uit langsliggers, dwarsdragers en de hoofdliggers (plus consoles in de hoofdoverspanning). In fase 1 van de review is geadviseerd de rijvloer als balkrooster te modelleren om een betere benadering van de krachtsverdeling in de rijvloer te verkrijgen. Dit met name t.b.v. de inklemmingsmomenten in de dwarsdragers en de torsiemomenten in de hoofdliggers. Een dergelijk balkrooster is niet gemaakt.

Een balkrooster is tevens aan te bevelen voor de controle van de thans gedane aannamen t.a.v. de stabiliteit van de rijvloer.

10.3 Langsliggers

Het effect van de doorbuiging van de dwarsdragers op de momenten in de langsliggers is alleen meegenomen voor de dwarsdragers in de hoofdoverspanning. In hoeverre komt dit overeen met de situatie bij de andere type dwarsdragers (met name de overgang van de "harde" naar de "zachte" dwarsdragers b.v. ter plaatse van de pyloon en de dwarsdragers in het achterveld).

10.4 Dwarsdragers voor de pyloon

Bij de plooi controle van de lijfplaat van de dwarsdrager wordt de correctiefactor voor de k-waarde ook toegepast voor de schuifspanning. In de beschikbare normen staan alleen correctiefactoren t.a.v. de normaalspanning vermeld. Bij belastinggeval 1 nabij de hoofdligger wordt uitgegaan van de spanning op één meter uit het lijf van de hoofdligger en bovendien op de statische waarden behorende bij de volledige meewerkende breedte. De γ voor de plooi controle bedraagt in dit geval 1.06. In de berekening wordt aangegeven dat het werkelijke inklemmingsmoment kleiner is (a.g.v. ongunstig aangenomen randvoorwaarden). Dit wordt echter niet geverifieerd. Tevens is niet beschouwd of een combinatie van belasting op de console en op de dwarsdrager niet tot dergelijke inklemmingsmomenten kan leiden.

Review Erasmusbrug blad 14

De plooiveilgheid is in aanvulling op de handberekening aangetoond middels een DIANA-buckling berekening. De uc bedraagt volgens die berekening 0.73, hetgeen voldoende is.

T.a.v. de stabiliteit van het gedrukte deel van de onderflens (nabij de hoofdligger) dient een aanvullende DIANA-buckling berekening te worden gemaakt met aangepaste modelrandvoorwaarden. Tevens dient de stabiliteit van de onderflens te worden gecontroleerd bij volbelasting van de consoles en alleen eigen gewicht op de dwarsdragers.

10.5 Dwarsdragers achter de pyloon

Bij de berekening van de dwarsdragers achter de pyloon dient de belasting uit de verfwagenbaan (inclusief verfwagen) in de berekening te worden betrokken.

Ter plaatse van de knik in de hoofdliggers zal, a.g.v. de knik, een normaalkracht en een moment worden uitgeoefend op de aansluitende dwarsdrager(s). Dit effect is niet in de berekening terug te vinden. De spatkracht t.p.v. de knik wordt opgenomen door drie schoren in de koker. Aangenomen wordt dat de spatkracht gelijkmatig wordt verdeeld over deze drie schoren. Deze aanname lijkt te gunstig en dient te worden geverifieerd.

De plooiveilgheid wordt direct aangetoond met een DIANA-buckling-berekening (geen handberekening). De uc bedraagt in dat geval 0.71. Conform de opmerking bij de dwarsdragers in de hoofdoverspanning dient de stabiliteit van de onderflens van de dwarsdrager in de gedrukte zone te worden getoetst met een model met aangepaste randvoorwaarden.

10.6 Afwijkende dwarsdragers

Ten aanzien van de afwijkende dwarsdragers, zoals de dwarsdragers in de nabijheid van de voegovergangen is in de berekening niets terug te vinden. Bij de berekening van deze dwarsdragers dienen de effecten van de opleggingen in het horizontale vlak te worden beschouwd.

10.7 Koppelkoker

De koppelkoker zal het grootste deel van de spatkracht uit de pyloonbenen voor zijn rekening nemen, echter de eerste dwarsdrager in het achterveld zal ook een deel opnemen. Er dient onderzocht te worden over welk gebied de effecten van de pyloon zich uitstrekken en deze effecten dienen vervolgens bij de controle van die onderdelen in rekening te worden gebracht.

Voor het schuifoppervlak van het dek (overdracht van normaalkracht van pyloon naar dek) is in de berekening 10000 mm aangenomen. Bij controle van de koppelkoker (incl. dekplaat) komen, op basis van de handberekening, uc's groter dan 1 voor. In verband hiermee is door het ontwerpteam een detailberekening gemaakt met behulp van een DIANA-eindige-elementen-model. Met dit model is getracht de punten welke veel spanning naar zich toe trekken ("harde punten") t.p.v. de overgang van de pyloon naar de dekplaat, te ontlasten. Alhoewel dit ten dele wel is gelukt d.m.v. variaties in de dikte van de dekplaat, is het reviewteam van mening dat bij de huidige vormgeving deze harde punten, mede door lokale opgedrongen vervormingen, zeer gevoelig zijn voor vermoeiing. Aangeraden wordt derhalve de concentratie van spanningen te vermijden door aanpassing van de vormgeving. Met behulp van het DIANA-model kunnen alternatieve vormgevingen tegen elkaar worden afgewogen (zie tevens opmerkingen in hoofdstuk 5).

Het detailmodel en de resultaten ervan zijn niet ter beschikking gesteld en konden derhalve niet inhoudelijk worden getoetst.

10.8 Hoofdliggers voor de pyloon

Verificatie van de uitgangspunten t.a.v. de meewerkende breedte heeft niet plaatsgevonden.

Vergelijking van spanningen volgend uit reële combinaties van N en M met spanningen uit extreme combinaties van N en M levert nauwelijks reductie op. Deze spanningsreductie is derhalve niet meegenomen.

In de berekening zijn de lokale spanningen bepaald a.g.v. de inleiding van de tuikrachten. Onduidelijk is in hoeverre deze spanningen in de diverse controles zijn meegenomen.

Tweede orde effecten zijn niet in de controles uitgevoerd in hoofdstuk 3.05 betrokken. Bij de berekeningen uitgevoerd in hoofdstuk 4 blijkt dit effect zo groot te zijn, dat in feite controles uitgevoerd waarbij geen rekening is gehouden met dit effect moeten worden herhaald (lokale stabiliteit, plooi, combinatiespanningen, toelaatbare spanningen enz.).

In hoofdstuk 3.05 zijn tevens de effecten bepaald van de lokale wagenbelasting t.o.v. de in het model gelijkmatig gespreide wagenbelasting. Uit deze berekening volgen t.a.v. de spanningen in de onderflens alleen positieve spanningen, terwijl ook extra negatieve spanningen uit dergelijke belastinggevallen kunnen volgen, hetgeen voor de onderflens van de hoofdligger ongunstiger is.

Review Erasmusbrug blad 16

Bij de plooi controle van het lijf wordt uitgegaan van correctiefactoren volgens Johnston/DIN4114. Is het volgens deze normen toegestaan de correctie tevens voor de schuifspanning toe te passen. De aanname voor de basis k-waarde (correctie) van 1.35 is niet juist. Voor veld 3 van het lijf ligt namelijk de grootste drukspanning (bij de in rekening gebrachte momenten welke een drukspanning aan de onderzijde veroorzaken) voor het beschouwde moment aan de zijde van de scharnierende ondersteuning. Zijn de correctiefactoren van toepassing voor alle combinaties van plaatdiktes. Kunnen de belastinggevallen waarbij de momenten andersom staan (drukspanning uit moment aan de bovenzijde) t.o.v. de in de berekening aangenomen waarden niet maatgevend worden voor veld 3. T.a.v. het torsiemoment in de hoofdligger is uitgegaan van een aangenomen waarde van 1000 KNm. Deze waarde dient geverifieerd te worden.

Het overzicht van de uc's t.a.v. plooï van het hoofdliggerlijf klopt niet met de berekende waarden.

Aan het begin van hoofdstuk 3.06 van de berekening wordt een verificatie uitgevoerd van de plooiberekening volgens NEN6771 (in- en exclusief Johnston-correctie factoren) en de DIANA-bucklingberekening. Bij deze berekening worden alleen normaalspanningen beschouwd. Bij verschillende belastinggevallen wordt voor de koker van de hoofdligger aangetoond dat de veiligheid t.a.v. plooï berekend met DIANA nagenoeg overeen komt met de veiligheid volgens NEN 6771 inclusief de niet in deze norm opgenomen correctiefactor volgens Johnston. Niet aangetoond wordt of de correctiefactor ook voor de kritische schuifspanning mag worden toegepast, hetgeen bij de diverse controles wel is toegepast.

10.9 Hoofdliggers achter de pyloon

De controle van de hoofdligger achter de pyloon is volledig uitgevoerd met behulp van spreadsheet resulterend in een aantal unity checks. Het toetsteam kan derhalve alleen de waarde van de uc's toetsen.

De controles in de spreadsheets zijn uitgevoerd exclusief de tweede orde effecten. Of de hoofdligger achter de pyloon gevoelig is voor tweede orde effecten wordt in de berekening niet aangegeven.

Er wordt gebruik gemaakt van het spreadsheet wat tevens bij de pyloon wordt gehanteerd. Bij het hoofdstuk waarin de pyloon wordt behandeld wordt de spreadsheet uitgelegd.

Spreadsheet

- 1. : bepaling profielgrootheden
- uc1 : maximale drukspanning
- uc2 : maximale schuifspanning
- uc3 : maximale vergelijkingsspanning
- uc4 : maximale trekspanning
- uc5 : plooi controle wand pyloon tussen hoek en verstijver
- uc6 : knik controle verstijver
- uc7 : dekspanning inclusief langsliggerwerking
- uc8 : trogspanning inclusief langsliggerwerking

De berekende u.c.'s liggen beneden de 1.0 .

Er dient bij de berekening van de spanningen in de achterliggers rekening mee gehouden dat platen onder hoeken op elkaar aansluiten waardoor mogelijk a.g.v. spatkrachten extra spanningen ontstaan.

Voor opmerking t.a.v. de knik in de hoofdliggers achter de pyloon zie paragraaf 10.5.

10.10 Pyloon globaal

Bij de pyloon is net als bij de hoofdligger vergeleken of reële spanningscombinaties een reductie geven t.o.v. spanningen samengesteld uit extreme krachten. De spanningsreducties zijn aanzienlijk. In de berekening staat vermeld dat uit veiligheidsoverwegingen de detaillering van de pyloon bepaald is op basis van de extreme krachten. Bij de controle t.p.v. de pyloonknik wordt echter toch gebruik gemaakt van de reductie van de spanningen a.g.v. reële combinaties, terwijl ook de eindcontrole wordt uitgegaan van de reële spanningen (controles uitgaande van combinatie van extreme momenten en normaalkrachten zijn ook weergegeven).

De pyloon is gecontroleerd op basis van snedekrachten volgend uit de lineaire hoofdberekening. Bij de controle is derhalve geen rekening gehouden met tweede orde effecten. Spanningen volgend uit de lokale inleiding van de tuikrachten zijn eveneens niet in rekening gebracht.

Spreadsheet

- 1. : bepaling profielgrootheden
- uc1 : maximale drukspanning
- uc2 : maximale schuifspanning
- uc3 : maximale vergelijkingsspanning
- uc4 : maximale trekspanning
- uc5 : plooi controle wand pyloon tussen hoek en verstijver
- uc6 : knik controle verstijver

Review Erasmusbrug blad 18

De wijze waarop bovenstaande controles zijn uitgevoerd is in de berekening nader toegelicht, maar is voor beoordeling ontoegankelijk. Het reviewteam gaat derhalve uit van de juistheid van het spreadsheet. De bepaalde uc's zijn lager als 1.0 (exclusief tweede orde effect en inleiding normaalkracht).

De plooi en knikcontrole worden uitgevoerd met NEN6771 welke niet bedoeld is voor het toegepaste materiaal. Er mag echter van uitgaan worden dat voor de toegepaste staalsoort extrapolatie toegestaan is.

Het ontwerp van de pyloon, en met name de aansluiting van de tuien daarin, is op het moment van de review nog aan wijzigingen onderhevig. Het is vooralsnog op de tekeningen onduidelijk hoe de dwarsschotten t.b.v. tuiaansluitingen verlopen t.o.v. de in de pyloon opgenomen plaatverstijvingen.

In de berekening zijn geen controles terug te vinden van combinatie van eigengewicht en verkeer met lokale invloeden als inleiding van normaalkrachten, torsiemomenten, asymmetrische temperatuurbelastinggevallen, het effect van wrijving bij de opleggingen, wind, bouwfouten. Deze aspecten dienen in de berekening te worden betrokken.

10.11 Tuien

De maximale tuispanningen zijn, i.v.m. de grootte van het aandeel wisselende belasting, in het ontwerp beperkt tot 600 N/mm². De grootte van de buigspanningen in de strengen a.g.v. van hoekverdraaiingen van de hoofdligger wordt beperkt middels het individueel ondersteunen van de strengen op enige afstand van de wigverankeringen. De maximale doorhang van de tuien onder belasting a.g.v. eigen gewicht en voorspanning bedraagt 1:160.

10.12 Consoles

De controle van het consolelijf m.b.v. de handberekening gaat uit van een inklemming van het lijf aan de onderzijde in de "geknikte" onderflens en de daarbij behorende correctiefactor volgens DIN4114 en Johnston. Deze aanname is niet reëel. Ook met deze aanname voldoet het lijf niet.

De plooiveilgheid van het consolelijf wordt vervolgens aangetoond met een DIANA-buckling-berekening. Onduidelijk is of bij deze berekening de onderflens zijdelings is gesteund (zoals onterecht is aangenomen bij de buckling-berekeningen van de dwarsdraggers). De aanname van de inklemming van de onderflens t.p.v. de aansluiting aan de hoofdliggerflens dient geverifieerd te worden. De berekening van de randligger ontbreekt.

11. Stabiliteit

De stabiliteitscontrole van de brug is in hoofdstuk 4 van de berekening opgenomen. Hierbij zijn door het ontwerpteam twee methoden gehanteerd. Enerzijds is de stabiliteit met behulp van de lineair elastische berekening en een buckling-mode berekening aan de hand van de norm gecontroleerd (NEN6771, ECCS), anderzijds is de stabiliteit met behulp van een geometrisch niet-lineaire berekening gecontroleerd. Het reviewteam heeft aanvullend op de eigen bevindingen de heren Bijlaard en Steenbergen van TNO-bouw geconsulteerd voor de toetsing van de uitgangspunten van beide berekeningen.

Het commentaar op de toegeleverde stabiliteitsberekeningen is beschreven in de paragrafen 11.1, 11.2 en 11.3 .

In paragraaf 11.4 is een voorstel van de ontwerpgroep voor de wijziging van de uitgangspunten van de berekeningen t.a.v. de belasting- en sterktefactoren beschreven.

In een gezamenlijke bijeenkomst met het ontwerpteam, TNO-bouw (de heer F. Bijlaard) en het reviewteam, zijn de te hanteren uitgangspunten t.a.v. de stabiliteitsberekening besproken. Het resultaat van deze bespreking is in paragraaf 11.5 beschreven.

11.1 DIANA-buckling modes

Voor drie maatgevend geachte belastinggevallen worden met een DIANA-staaf-model van de gehele brug een aantal buckling-modes met bijbehorende bucklingvalues bepaald. De aangebrachte belastingen zijn gebruiks(-VOSB'63)belastingen (alleen bestaande uit eigen gewicht, voorspanning en mobiele belasting; geen temperatuur en wind). Vermenigvuldiging van de optredende normaalspanning met de bucklingvalue geeft de Eulerse knikspanning. M.b.v. de traagheidsstraal kan hieruit de kniklengte worden bepaald. Tevens kan de knikkracht worden bepaald.

Toetsing van de stabiliteit van de hoofdligger vindt plaats middels de toetsingsregels volgens op druk en buiging belaste staven bij eerste orde elastische berekeningen (NEN6771;12.3.1.2.1). Hierbij wordt uitgegaan van rekenwaarden ($1.5 \cdot$ de krachten volgend uit de gebruiksbelasting) van de doorsnede krachten en e_y volgens instabiliteitskromme b. Bij de toetsing is een splitsing gemaakt tussen het aandeel moment t.g.v. eigen gewicht en het moment t.g.v. mobiele belasting. Op het moment t.g.v. eigen gewicht is niet de tweede orde factor $n/(n-1)$ betrokken. Bij de controle blijkt dan plooi (onderflens, het lijf wordt niet gecontroleerd) maatgevend te zijn en derhalve voldoet de hoofdligger op die locatie (knoop 282) niet.

Review Erasmusbrug blad 20

Het niet in rekening brengen van de tweede orde effecten op het aandeel moment t.g.v. eigen gewicht wordt door het reviewteam slechts te dele onderschreven. In de normformule is $M_{\text{equivalent}} * n/(n-1)$ opgenomen. Deze term kan worden gezien als een vereenvoudiging van een term bestaande uit het lineair elastisch aanwezige moment plus de $n/(n-1)$ maal de normaalkracht maal een "verplaatsing" (t.g.v. de dwarsbelasting). Het ontwerpteam stelt deze verplaatsing op nul omdat het dek een zodanige voorvervorming krijgt dat het dek onder invloed van eigen gewicht en voorvervormingskrachten op de beoogde hoogte komt te liggen. Deze hoogteligging is echter getolereerd zodat het reviewteam vindt dat ten minste de bouwtolerantie als "verplaatsing" in de controleformule (12.3-1) meegenomen dient te worden.

Bij de controle van de interactie op lokale plooï van het hoofdliggerlijf en globale knik wordt gebruik gemaakt van Thimoshenko en de Dast. De toegepaste formules zijn echter alleen geldig wanneer de stijfheid van de verstijver beneden een bepaalde grenswaarde ligt (Thimoshenko en DIN4114). De toegepaste verstijver ligt boven de bedoelde grenswaarde.

De stabiliteitscontrole van de pyloon wordt op een gelijksoortige wijze uitgevoerd als de hoofdligger waarbij van knikcurve a conform de ECCS wordt uitgegaan met een verlaagde vloeispanning. Bij deze controle wordt geen onderscheidt gemaakt tussen momenten t.g.v. eigen gewicht en momenten t.g.v. mobiele belasting. De controle leidt tot u_c 's groter dan 1 welke derhalve niet voldoen. Bij controle volgens NEN6771 waarbij geen verlaagde vloeigrens in rekening behoeft te worden gebracht, omdat deze norm niet voor hoge rekgrens staal is bedoeld, voldoet de doorsnede ($u_c < 1$). Hierbij is tevens uitgegaan van een geschoord raamwerk om de zwakke as van de pyloon (dwars op de lengteas van de brug) hetgeen niet op voorhand mag worden aangenomen. Belastingen dwars op de pyloon, wind, temperatuur(-gradienten) en steunpuntszakkingen, thans niet in de berekening beschouwd, dienen bij deze controle in rekening te worden gebracht.

T.a.v. de controle tussen lokale plooï en globale knik van de pyloon gelden dezelfde opmerkingen als voor de hoofdligger.

Ook bij de controle van de pyloontop komen u_c 's groter dan 1 voor.

Bij de controle van de stabiliteit dienen de bouwfouten zoals toegestaan op de tolerantie tekening in de controle te worden betrokken.

Op basis van de resultaten van de stabiliteitsberekening volgens de eerste orde elastische toetsingsregels in combinatie met de buckling-mode berekeningen is door het ontwerpteam besloten een niet lineaire elastische berekening uit te voeren (zie paragraaf 11.3).

11.2 Langsliggers

Bij de controle van de stabiliteit van de langsliggers in het dek (troggen) is de veerstijfheid van de dwarsdragers bepaald op basis van de aanname van een puntlast per trog uitgesmeerd over de volledige dwarsdragerlengte tot een gelijkmatig verdeelde belasting en inklemming van de dwarsdragers in de hoofdliggers. De verhouding tussen de puntlast op één trog en de zakking van het dwarsdragermidden bepaald de ondersteuningsstijfheid. De mate van inklemming in de hoofdligger is echter gerelateerd aan de knikvorm van het dek. Een volledige inklemming mag derhalve niet op voorhand worden aangenomen. Ook het effect van de uitkragingen dient in de stabiliteitsbeschouwing van het dek te worden meegenomen evenals de extra spanningen vanuit het tweede orde effect van het hoofddraagsysteem.

Bovenstaande controle is alleen uitgevoerd voor de langsliggers in de hoofdo overspanning, maar dient tevens te worden uitgevoerd voor de langsliggers in de zijoverspanning.

Bij de controle wordt voor de effecten van het eigen gewicht een belastingfactor 1.35 gehanteerd welke afwijkt van de tot dan aangehouden veiligheidsfactoren en van de uitgangspunten van de berekening.

In het ontwerp wordt ervan uitgegaan dat de normaalkracht zich volledig verdeelt over de totale doorsnede van het dek. De stabiliteit van dit dek is derhalve van zeer groot belang voor het totale draagvermogen. De stabiliteit van het dek wordt uiteindelijk bepaald door de hoofdliggers. Stel dat de langsliggers scharnierend aan de dwarsdragers zijn aangesloten. De dwarsdragers zijn de stabiliserende elementen voor de langsliggers. Door de normaalkracht in de langsliggers worden de dwarsdragers verticaal belast. Deze extra belasting op de dwarsdragers wordt afgevoerd naar het hoofddraagsysteem (hoofdligger, tuien en pyloon), waar met deze extra belasting rekening dient te worden gehouden. Het is afhankelijk van de golflengte in het dek welk draagsysteem het meest wordt aangesproken. Bij een zeer korte golflengte worden de dwarsdragers het meest aangesproken, bij een lange golflengte, bijvoorbeeld de tweede bucklingmode, wordt het hoofddraagsysteem het meest aangesproken. De effecten van het stabiliseren van het dek dienen nader onderzocht te worden.

11.3 Niet-lineaire (elastische) berekening

De niet lineaire berekening is in de eerste fase van de review voorgesteld als alternatief voor de lineaire berekening en ter verificatie van de stabiliteitscontroles volgens de lineaire berekening. Echter, bij de niet-lineaire berekening wordt uitgegaan van een gewijzigde veiligheidsfilosofie door de belastingfactor voor eigen gewicht en voorspanning t.o.v. de als uitgangspunt aangehouden waarde van 1.5 te verlagen tot 1.35.

Bij de niet-lineaire berekening zijn de volgende zaken in rekening gebracht:

1. Voorvervorming dek (pyloon niet) zodanig dat na aanbrengen van eg+vo de gewenste brugvorm ontstaat.
2. Imperfecties conform NEN6771;10.2.5.1.3. Deze imperfecties gelden voor star geschoorde raamwerken. Alleen de vooruitbuigingen worden in rekening gebracht, de scheefstanden niet. De verdeling van de imperfecties volgt de uitbuigingslijn van de eerste knikvorm van de buckling-berekening (pyloon maatgevend).
3. De stijfheid van de tuien is aangepast aan de bij de belastinggevallen behorende tuispanningen. (spanning op basis van belasting*belastingfactoren geeft hoge tuispanningen en derhalve hoge tuistijfheden)
4. Om plooicontroles te omzeilen is gebruik gemaakt van de doorsnede reductiemethode op basis van de lineair berekende spanningen met een inschatting voor het tweede orde effect. (reductie volgens NEN6771 voor Fe510; ook toepasbaar voor HR-staal?) De aannamen voor het tweede orde effect dienen geverifieerd te worden m.b.v. de uitkomsten van de niet-lineaire berekening. De verschuiving van de neutrale lijn van de doorsnede a.g.v. de reductiemethode is in de berekening meegenomen. De gereduceerde oppervlakten en stijfheden zijn in de modellering opgenomen.

5. Belastingcombinaties

a) $1.35 \cdot (eg+vo)nl + 1.5 \cdot (mobiel)nl$

b) $1.35 \cdot (eg+vo)nl + 1.5 \cdot (mobiel)nl + 0.15 \cdot (eg+vo)l$

Er zijn drie belastinggevallen beschouwd samengesteld uit eigen gewicht, voorspanning en mobiele belasting. Temperatuur en wind zijn niet in de beschouwing betrokken. Een belastinggeval met alleen eigen gewicht is niet beschouwd. De belastinggevallen 1 en 2 betreffen maatgevende situaties in de pyloon (overeen komend met de gekozen imperfectievorm). Belastinggeval 3 betreft maximale opbuiging van de hoofdligger (de gekozen imperfectie behoort niet tot dit belastinggeval).

Bij een niet lineaire elastische berekening is geen nadere toetsing van de globale stabiliteit vereist wanneer het evenwicht in de vervormde toestand wordt bereikt bij ten minste de rekenwaarde van de belasting. De controle bestaat derhalve uit het controleren van de spanningen en de controle van de lokale stabiliteit. Alleen de spanningscontrole is uitgevoerd voor een zeer beperkt aantal lokaties (enkele in de pyloon en maar één in de hoofdligger). Op basis van de gedane aannamen voldoet de constructie voor dat beperkte aantal punten.

Het reviewteam plaatst hierbij echter de volgende kanttekeningen :

- de belastingfactor voor het eigengewicht wijkt af van de als uitgangspunt gekozen waarde
- voor de imperfectie van hoofdligger is niet gekozen voor de meest ongunstigste buckling-mode vorm (tweede buckling-mode)
- wind-, temperatuurbelasting (momentane waarden) steunpuntszakkingen, met name ten behoeve van de stabiliteit van de pyloon, zijn niet in de berekening betrokken.
- de stabiliseringskrachten vanuit het dek op de hoofdligger zijn niet in de berekening betrokken.

11.4 Wijziging uitgangspunten

In de ontwerpnota staan de uitgangspunten vermeld volgens welke de brug dient te worden uitgerekend. Alhoewel niet expliciet vermeld is er in de ontwerpnota vanuitgegaan dat de belastingfactor 1.5 bedraagt en de sterktefactor 1.0. In verband met dit uitgangspunt stelt het reviewteam vast dat de gekozen werkwijze bij de niet-lineaire berekening (belastingfactor voor eigen gewicht en voorspanning 1.35 en voor mobiele belasting 1.5) niet conform de gestelde uitgangspunten is.

In een aanvullende notitie geeft het ontwerpteam aan een wijziging van de uitgangspunten door te voeren met betrekking tot de belasting- en sterktefactoren.

Voorstel:

belastingfactor eigen gewicht	: 1.35
belastingfactor permanente belasting	: 1.35
belastingfactor mobiele belasting	: 1.35
belastingfactor wind	: 1.35
belastingfactor voorvervormingskrachten	: 1.20 en 1.35

Onder de voorvervormingskrachten wordt in deze verstaan de extra krachten in de tuien om vanuit eigengewichtssituatie de situatie met optimale momentenlijn te verkrijgen. In deze situatie heeft de brug het beoogde verticale alligement.

Om toch een gewenste totaalfactor van 1.5 te verkrijgen wordt de sterktefactor op 1.1 gesteld in plaats van 1.0.

Tevens zal rekening worden gehouden met steunpuntszakkingen.

Wanneer een sterktefactor van 1.1 wordt toegepast, dient echter gerealiseerd te worden dat de normformules welke de sterktekant beschrijven niet lineair van karakter zijn waardoor de kans bestaat dat de uiteindelijke constructie minder veilig is dan mag worden verwacht.

11.5 Conclusie t.a.v. aanpak stabiliteitsberekeningen

In een gezamenlijke bijeenkomst van het ontwerpteam, de heer Bijlaard van TNO-bouw en het reviewteam, zijn de door het reviewteam voorgestelde uitgangspunten en aanpak van de stabiliteitsberekeningen doorgenomen.

Het ontwerpteam stelt dat de in paragraaf 11.1 beschreven stabiliteitscontrole volgens de norm (lineair elastisch met buckling-modes) bedoeld is als aftasting van de gevoeligheid van de constructie voor tweede orde effecten. De geometrisch niet-lineaire berekening (paragraaf 11.3) dient als basis te worden beschouwd voor de definitieve stabiliteitscontrole.

Het reviewteam onderschrijft de keuze van een niet-lineaire berekening als basis voor de (stabiliteits-)controle, maar stelt dat wind- en temperatuur(gradient-) belastingen en steunpunts-zakkingen en -rotaties in de combinaties dienen te worden betrokken en dat van een sterktefactor 1.0 uitgegaan dient te worden. De keuze voor een belastingfactor 1.35 op het eigen gewicht kan worden aangehouden omdat de onzekerheid in de grootte van dit belastinggeval beperkt kan worden middels een nauwkeurige gewichtsuittrek.

De te hanteren uitgangspunten voor de niet-lineaire berekening van het hoofddraagsysteem kunnen als volgt worden samengevat:

- belastingfactor eigen gewicht 1.35
- belastingfactor permanente belasting 1.35
- belastingfactor mobiele belasting 1.50
- belastingfactor windbelasting 1.50
- belastingfactor temperatuurbelasting 1.50
- belastingfactor steunpuntszakkingen en steunpuntsrotaties 1.50
- belastingfactor voorvervormingskrachten met een variatie naar 1.35 1.20 en 1.50
- sterktefactor 1.00
- de belasting op de hoofdliggers vanuit de stabiliserende functie van de dwarsdragers voor de langsliggers dient nader te worden onderzocht en wanneer relevant als extra belasting in de niet-lineaire berekening te worden betrokken.
- in de modellering dient de voorvervorming van de constructie te worden meegenomen, zodanig dat deze na aanbrengen van eigen gewicht en voorvervormingskrachten op de beoogde hoogte ligt.
- in de modellering dienen imperfecties in rekening te worden gebracht overeenkomstig NEN6771 welke qua grootte geschaald dienen te worden naar de ongunstigste bucklingmode voor het beschouwde onderdeel van de hoofddraagconstructie

Review Erasmusbrug blad 26

- in de modellering dienen de tuistijfheden te worden aangepast aan de eindwaarde van de tuispanning uit de niet-lineaire berekening

De spanningsresultaten van de niet-lineaire berekening van het hoofddraagsysteem dienen te worden gebruikt voor de (stabiliteits-)controle van de onderdelen.

Ten behoeve van de bepaling van de stabiliteit van het rijdek dienen aanvullende berekeningen te worden gemaakt waarbij tevens de torsiestijfheid van de hoofdliggers in rekening wordt gebracht en het effect van de consoles wordt bepaald. De tweede orde belasting op de dwarsdragers en de hoofdliggers vanuit de langsliggers dient vastgesteld te worden en op de betreffende onderdelen in rekening te worden gebracht. Hierbij dient onderscheidt te worden gemaakt tussen het gedeelte van de rijvloer voor en achter de pyloon.

In de bijeenkomst heeft het ontwerpteam aangegeven bovenstaande uitgangspunten te zullen hanteren.

12. Temperatuur en wind

De behandeling van de effecten uit temperatuurbelasting is zeer summier en betreft alleen een algehele temperatuurverhoging en verlaging. Temperatuurgradienten dienen ook beschouwd te worden. Windbelasting wordt in de berekening totaal niet behandeld. Genoemde effecten dienen nader onderzocht te worden en als momentane waarden (bv 50 %) betrokken te worden in de combinaties met eigen gewicht en mobiele belasting.

13. Vermoeiing

Het ontwerpteam gaat er van uit dat alleen de troggen gevoelig zijn voor vermoeiing. De doorsneden in het veldmidden en t.p.v. de dwarsdragers worden gecontroleerd. De controle geschiedt volgens de VOSB'63. De voor vermoeiing gevoeligste doorsnede van de trog is echter de stuiknaad. De lokatie van de stuiknaden is het reviewteam niet bekend maar wanneer deze op bv 1/4 van de langsliggeroverspanning wordt aangenomen zal de spanningswisseling nagenoeg gelijk zijn aan die in het veldmidden. Middels een aan te nemen belastingspectrum en de laskwalificatie conform NEN 2063 kan vervolgens een vermoeiingsberekening worden uitgevoerd.

Het reviewteam is van mening dat niet alleen de troggen maar ook de dekplaat, de dwarsdragers (aansluiting trog aan dwarsdrager, onderflens en aansluiting aan hoofdligger) op vermoeiing dienen te worden gecontroleerd middels een aan te nemen belastingspectrum en NEN2063.

Voor opmerkingen t.a.v. het knooppunt pyloon, hoofdliggers en koppelkoker zie hoofdstuk 5.

14. Samenvatting en conclusies

De aangeboden stukken maken het mogelijk om het ontwerp van de bovenbouw van de tuibrug te beoordelen. Hierbij dient te worden vermeld dat de berekening is getoetst op hoofdonderdelen (hoofdliggers, pyloon, dwarsdragers, langsliggers, consoles). Detailberekeningen zoals bijvoorbeeld de trekverankering, het knooppunt pyloon/hoofdligger/koppelkoker en de tuiaansluitingen zijn niet ter toetsing aangeboden.

De opmerkingen t.a.v. het bestek zijn mondeling aan het ontwerpteam gerapporteerd. Speciale aandacht dient te worden besteed aan de volledigheid van de besteksposten.

Het commentaar op de beschikbaar gestelde tekeningen is met het ontwerpteam besproken. Een kopie van de tekeningen met de daarop aangegeven opmerkingen is aan Gemeentewerken verstrekt. Speciale aandacht dient te worden besteed aan het knooppunt pyloon, hoofdligger achterveld, koppelkoker waar met het oog op krachtsconcentraties en opgedrongen vervormingen kans op vermoeiing bestaat. Geadviseerd wordt de vormgeving aan te passen teneinde een geleidelijker overgang van krachten te verkrijgen.

T.a.v. het NLR-onderzoek resteren vragen met betrekking tot de turbulentie-intensiteit bij de kritische windsnelheden en het effect daarvan op de trillingsamplitude (comfort voetgangers op de brug) en met betrekking tot de kwantificering van het verhoogde trillingsniveau bij hogere windsnelheden. De aannemer wordt belast met en is verantwoordelijk voor het bepalen van de effecten van wind tijdens de bouw.

Het regenwater wordt direct op de rivier afgevoerd. T.a.v. dit punt vraagt het reviewteam zich af of dit in het kader van de WVO nog is toegestaan.

T.a.v. de toegepaste voorschriften dient te worden opgemerkt dat voor de verschillende vormen van instabiliteit verschillende voorschriften zijn gehanteerd en gecombineerd. T.a.v. dit punt is het reviewteam van mening dat uitgegaan dient te worden van één norm. Wanneer onderdelen volgens de betreffende norm niet voldoen, dan wel wanneer geen artikelen betreffende het te onderzoeken geval zijn opgenomen, dient te worden teruggegaan naar de basis, d.w.z. zijn er in de betreffende norm vereenvoudigingen toegepast welke de veiligheid gunstig beïnvloeden, dan kan voor een meer fundamentele rekenmethodiek worden gekozen (de basis van de betreffende norm). Wanneer een bepaald fenomeen niet in de norm wordt behandeld kan gebruik worden gemaakt van andere normen mits die norm volgens dezelfde uitgangspunten is opgesteld als de basisnorm.

De berekening van de bovenbouw van de tuibrug is overzichtelijk opgezet. Het is voor het reviewteam door het gebruik van meerdere FEM-modellen onmogelijk na te gaan of bij de doorsnede controles uitgegaan is van de maatgevende krachten op de doorsneden uit de verschillende modellen.

Alle controles van doorsneden van het hoofddraagsysteem uitgevoerd in de hoofdstukken 1, 2 en 3 van de berekening zijn exclusief het tweede orde effect. Gezien de grootte van het tweede orde effect hebben deze controles dus slechts een beperkte waarde.

Ten aanzien van de combinatie van belastinggevallen is het reviewteam van mening dat reële gevallen van temperatuurbelasting, belasting door wrijving van opleggingen, wind en steunpuntszakkingen in de combinatie met eigen gewicht, voorspanning en mobiele belasting dienen te worden meegenomen (zonder verhoging van de toelaatbare spanningen).

T.a.v. de grote opleggingen is uit overleg met een leverancier gebleken dat vanuit de offshore voldoende ervaring is opgebouwd met de fabricage van dergelijke grote opleggingen.

Ten aanzien van de controle van de onderdelen wordt verwezen naar hoofdstuk 10. De voornaamste opmerkingen betreffen :

- de (lokale) aanpassing van de randvoorwaarden bij de bepaling van de plooi stabiliteit van de dwarsdragers en de consoles (tevens knik van de gedrukte delen van de onderflens
- het mogen toepassen van de correctiefactor op de kritieke schuifspanning bij plooi berekeningen is niet aangetoond
- het effect van de knik in de hoofdligger in het achterveld op de dwarsdragers dient onderzocht te worden.
- de afwijkende dwarsdragers dienen berekend te worden.
- in de berekening van de dwarsdragers in het achterveld dient de belasting uit de verfwagenbaan te worden betrokken.
- plooi veiligheid veld 3 van het hoofdliggerlijf bij belasting combinaties welke de grootste drukspanning aan de bovenzijde van de hoofdligger geven.
- het maken van een model van de rijvloer ter verificatie van de inklemmingsmomenten van de dwarsdragers in de hoofdligger, en mogelijk voor de bepaling van de niet-lineaire krachten vanuit de langsliggers op de dwarsdragers en de hoofdliggers.
- lokale spanningen t.g.v. inleiding normaalkracht vanuit de tuilen in de pyloon.
- controle van alle onderdelen van de constructie met inbegrip van de niet-lineaire effecten

Review Erasmusbrug blad 30

Ten aanzien van het commentaar op de uitgevoerde stabiliteitscontroles van het hoofddraagsysteem en het rijdek wordt verwezen naar hoofdstuk 11 van deze rapportage. De te hanteren uitgangspunten voor de niet-lineaire berekening zijn in paragraaf 11.4 beschreven en reeds mondeling met het ontwerpteam besproken. Het ontwerpteam heeft bij deze bespreking aangegeven genoemde uitgangspunten te zullen hanteren en de controle van de onderdelen van de brug uit te voeren op basis van de resultaten van de niet-lineaire berekening.

Eindconclusie:

Op basis van de ter toetsing aangeboden stukken concludeert het reviewteam dat de berekeningen nog op een aantal onderdelen dienen te worden aangepast c.q. uitgebreid om van een voldoende aangetoonde veiligheid en een consistent ontwerp te kunnen spreken. Bovenstaande heeft met name betrekking op de bepaling en de uitwerking van de niet-lineaire effecten. T.a.v. deze effecten zijn in de rapportage de te adviseren berekeningsuitgangspunten genoemd welke als basis kunnen dienen voor de verdere uitwerking van de berekening van het hoofddraagsysteem en de controle van de onderdelen.

De verwerking van de niet-lineaire effecten en de overige gemaakte opmerkingen is op het moment van completeren van deze rapportage nog niet afgerond zodat het reviewteam over deze verwerking geen uitspraak kan doen. De aanvullende berekeningen kunnen nog aanleiding geven tot aanpassingen in het ontwerp. Het reviewteam deelt de mening van de ontwerpgroep dat de aanvullende werkzaamheden voor de gunning dienen te zijn afgerond.