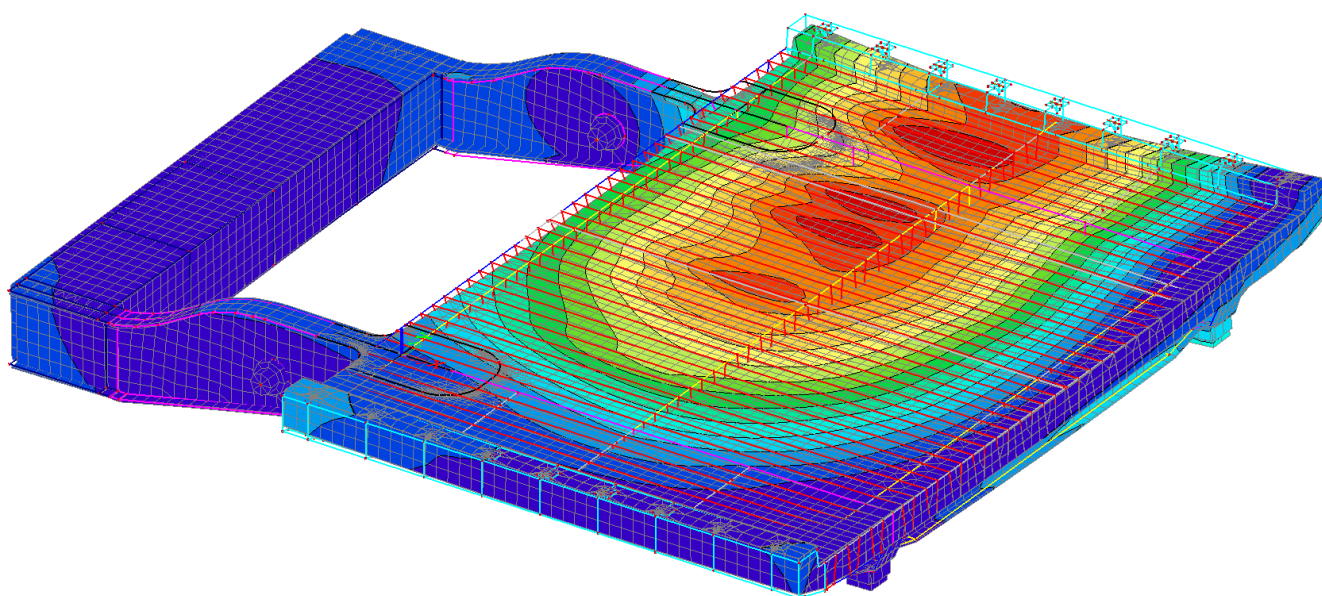


Afstudeeropdracht HSS in brugdekken

Hoofdrapport



Document : Hoofdrapport afstudeeronderzoek HSS in brugdekken
Revisie : 1.0
Datum : 14-6-2016
Status : Definitief

Opdrachtgever : Volker Staal en Funderingen
Opdrachtnemer : Hogeschool Rotterdam

	Naam	Functie	Datum	Paraaf
Opgesteld	M.M.van der Linden (MVL)	Afstudeerder (0868441) Hogeschool Rotterdam	14-6-2016	
Gecontroleerd			14-6-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Hoofdrapport

HSS in brugdekken

Document:	Afstudeeropdracht
Plaats, datum:	Rotterdam, 14 juni 2016
Status, revisie:	Definitief, revisie 1.0
Auteur:	Maurits van der Linden (0868441)
Opdrachtgever:	Volker Staal en Funderingen bv. Quarantaineweg 10 3089 KP Rotterdam
Bedrijfsbegeleiders:	Ing. Björn van der Maale Hans van der Meijs RC
Referentieproject:	Kruiswaterbrug
Onderwijsinstelling:	Hogeschool Rotterdam G.J. de Jonghweg 4 - 6 63015 GG Rotterdam
Opleiding:	Civiele Techniek
Minor:	Constructie
Begeleidende docenten:	Sven van Rosmalen (1 ^{ste} beoordelaar) Dhr. W. Visser (2 ^{de} beoordelaar)



Hoofdrapport

VOORWOORD

De afgelopen drie jaar heb ik als student aan de Hogeschool Rotterdam kennis opgedaan op het gebied van Civiele Techniek. Na de theoretische basis, die behandeld werd in de eerste twee jaar, is in jaar drie praktijkervaring opgedaan met een stageplek bij Volker Staal en Funderingen bv. In het laatste jaar van de bachelor heb ik een constructieve minor gevolgd om mijn kennis te verbreden op het gebied van mechanica en constructief ontwerpen. De bachelor wordt in het vierde jaar afgesloten met een scriptie.

Na een succesvolle stage is besloten om ook bij Volker Staal en Funderingen af te studeren. Mede omdat mijn voorkeur uitging naar het onderzoek doen met staal. In het voorjaar van 2016 moesten de opgedane ervaring, kennis en competenties worden gebruikt om af te studeren op een innovatief/actueel onderwerp. In overleg met Bartho Admiraal en Björn van der Maale zijn we tot het volgende onderwerp gekomen: "Toepassen van een hogere staalkwaliteit in brugdekken".

Tot slot wil ik de betrokken personen van Volker Staal en Funderingen bedanken voor de begeleiding, input en hun bereidwilligheid relevante onderwerpen toe te lichten. Bij deze wil ik in het bijzonder Björn van der Maale bedanken voor de begeleiding en de feedback. Verder gaat mijn dank uit naar Cees Kortleve voor de controle van het basismodel in dit onderzoek en Hans van der Meijs voor het delen van zijn kennis op het gebied van stalen bruggen.

Rotterdam, juni 2016

Maurits van der Linden



Hoofdrapport

SAMENVATTING

Dit onderzoek gaat over het toepassen van een hogere staalkwaliteit in het brugdek van de Kruiswaterbrug. De belangrijkste vraag die hierin centraal staat is in hoeverre het mogelijk is binnen het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug een gewichtreductie te realiseren bij toepassing van S460.

De Kruiswaterbrug is een project uitgevoerd door Volker Staal en Funderingen in 2014 en omvat een stalen dek, uitgevoerd in S355, dat deel uitmaakt van een basculebrug. In een ontwerp onderzoek wordt het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug gemodelleerd, gecontroleerd en vervolgens geoptimaliseerd.

Het brugdek is aan de hand van tekeningen van Volker Staal en Funderingen gemodelleerd met SCIA Engineer 15.3. De uitkomsten worden gecontroleerd door deze te vergelijken met de resultaten van ingenieursbureau ITBB dat destijds de sterkteberekeningen heeft gedaan. Wanneer de resultaten overeenkomen, dient het model als basis voor de volgende stap in het onderzoek. Voor de optimalisatie, waarbij rekening is gehouden met de normen en wetgevingen, zijn de onderdelen van de hoofd draagstructuur van de brug smaller uitgevoerd.

Een reductie van het staal en daarmee het eigen gewicht zorgen ervoor dat de spanningen hoger worden. Door S460 toe te passen, moeten de verhoogde spanningen worden opgenomen en een alternatief bieden ten aanzien van S355.

Tevens is onderzoek gedaan naar de belangrijkste aspecten als stijfheid, temperatuur en vermoeiing die een grote rol spelen bij het ontwerpen van stalen bruggen. Door de toelaatbare vervormingen is het slechts mogelijk op een paar locaties voordeel te halen uit de mechanische eigenschappen van S460. Wanneer de stijfheid bepalend is, zijn slechts de geometrische afmetingen van de constructie en het traagheidsmoment van belang. Een hogere staalkwaliteit heeft hier geen invloed op omdat de elasticiteitsmodulus onveranderd blijft.

Tot slot blijkt dat vermoeiing alleen maar kritischer wordt wanneer de spanningen in de constructie worden verhoogd. Het toepassen van een hogere staalkwaliteit biedt geen voordeel voor de vermoeiingscontrole, omdat de sterkte van de vloeigrens en de vermoeiingssterkte niet evenredig toenemen. Uit de resultaten blijkt dat het geoptimaliseerde ontwerp van de Kruiswaterbrug niet in staat is 100 jaar lang spanningswisselingen van voertuigen te verdragen. De spanningswisselingen zorgen voor scheuren die ontstaan in de lassen. Wanneer de lassen het begeven zal de constructie van de Kruiswaterbrug bezwijken.



Hoofdrapport

SUMMARY

This essay contains the research of the application of a higher quality of steel on the bridge deck of the "Kruiswaterbrug". The main central objective is to what extent within the current design it is possible to achieve a potential weight reduction when applying steel S460.

The Kruiswaterbrug is a project designed and constructed by Volker Staal en Funderingen in 2014. It includes a bascule bridge performed in steel grade S355. In a design study the current design has been modeled, verified and thereafter optimized.

The model of the bridge is made with the use of SCIA Engineer 15.3, based on drawings provided by Volker Staal en Funderingen. The results were verified and compared with the outcome of the calculations made by the company ITBB. They were responsible for the validation of the stress, deformation en fatigue checks in 2013.

A matching model through similar results provide a basic model that is required for the next step in this research. During the optimization the current legislation has been taken into account for the execution in which the main supporting structure of the bridge is adapted.

A reduction of steel and thereby its own weight leads to higher stress concentrations. With the introduction of the steel grade S460, benefit will be extracted with respect to S355.

During the study, aspects as stiffness, temperature and fatigue have been taken into account because they play an important role in the realization of steel bridges. The deformations that are permissible give little benefit from the mechanic characteristics of S460. When stiffness is determinative, a higher steel grade will not provide advantages because the modulus of elasticity remains the same. Only the dimensions of the construction and the moment of inertia affect this matter.

Finally, it appears that fatigue becomes more critical when higher stress concentrations occur in the bridge construction. Using a higher steel grade offers no benefit because the fatigue strength does not increase proportionally as the yield strength of the higher steel grade. The results clarify that the optimization of the Kruiswaterbrug is not able to resist the fluctuating stress concentrations caused by vehicles during a period of hundred years. In time, the fluctuating stress concentrations will cause cracks in the joints that lead to failure of the bridge.



Hoofdrapport

INHOUDSOPGAVE	PAG.
1. AANLEIDING	8
1.1 Opbouw hoofdrapport	9
1.2 Doelstelling	9
2. PROBLEEMANALYSE	10
2.1 Toepassing van HSS in de praktijk	10
2.2 ROK	11
2.3 Kennis en ervaring	12
2.4 Kruiswaterbrug	13
3. THEORETISCH KADER	14
3.1 HSS	14
3.1.1 Voordelen HSS	15
3.1.2 Nadelen HSS	15
3.2 Lassen	16
3.2.1 Constructieve controle van lassen	16
3.2.2 Voorverwarmen	17
3.3 Vervorming	18
3.4 Temperatuur	19
3.5 Vermoeiing	20
4. HOOFD EN DEELVRAGEN	23
5. ONDERZOEKSAANPAK	24
6. RESULTATEN	26
6.1 Project Kruiswaterbrug	26
6.2 Model overgedimensioneerd door geluidseis	26
6.3 Uitgangspunten	28
6.4 Huidige model	29
6.5 Nieuw model	32
6.5.1 Optimalisatie	32
6.5.2 Vervormingen	35
6.5.3 Spanningen	36
6.5.4 Onderdelen in HSS	37
6.6 Lassen en vermoeiing	41
6.6.1 Lassen met HSS	42
6.6.2 Lassen met S355 na optimalisatie	43
7. CONCLUSIE EN AANBEVELING	44
8. BIBLIOGRAFIE	45



Hoofdrapport

INHOUDSOPGAVE BIJLAGERAPPORTEN

Onderstaande bijlagen zijn als losstaande documenten toegevoegd en zijn opgenomen in verschillende tabbladen achter in de afstudeermap.

Bijlage 1	Plan van Aanpak (PvA)
Bijlage 2	Staalkeuze
Bijlage 3	Analyse Kruiswaterbrug
Bijlage 4	Staaieigenschappen
Bijlage 5	Constructieve controles
Bijlage 6	Lassen uitvoeringstechnisch
Bijlage 7	Vermoeiing
Bijlage 8	Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug SCIA
Bijlage 9	Handberekening en netverfijning
Bijlage 10	Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug SCIA
Bijlage 11	Vermoeiing geoptimaliseerd model
Bijlage 12	Evaluatie, reflectie en competentieverantwoording
Bijlage 13	Eindbeoordeling afstuderen

Hoofdrapport

1. AANLEIDING

Door de jaren heen zijn er diverse constructies gerealiseerd waarbij de esthetica een steeds belangrijkere rol is gaan spelen. Bruggen als de Erasmusbrug en de Oversteek in Nijmegen (Figuur 1) zijn daar enkele voorbeelden van. Deze constructies hebben esthetische vormen en slankere elementen door toepassing van staal met een hogere sterkte, ofwel hoge sterkte staal (HSS). Constructiestaal dat veelvuldig wordt toegepast zijn de staalsoorten S235 en S355. De definitie van staalsoorten die als HSS worden beschouwd, hebben een rekgrens die hoger is dan 355 N/mm^2 . Bij de Erasmusbrug is de pyloon uitgevoerd in S460 en bij de Oversteek is voor de boog zowel gebruik gemaakt van S460 als S690.



Figuur 1: De Erasmusbrug en de Oversteek in Nijmegen waarbij HSS is toegepast. Limbomedia en de Gelderlander (2015)

Volker Staal en Funderingen (VSF) vraagt zich af wat het toepassen van HSS kan betekenen voor brugdekken en of er voordeel uit kan worden gehaald. VSF realiseert regelmatig stalen brugdekken voor ophaalbruggen. In 2015 was VSF verantwoordelijk voor het realiseren van de brugdekken van de "Blauwe Klap" in Assen. Een jaar eerder heeft het bedrijf de Kruiswaterbrug in Bolsward opgeleverd. Beide projecten hebben gemeen dat de brugdekken ophaalbaar zijn voor de scheep/pleziervaart met een overspanning van circa 9,0 meter.



Figuur 2: De Blauwe Klap en het brugdek van de Kruiswaterbrug. VSF (2014 en 2015)

Bij de realisatie van veel kunstwerken in Nederland is Rijkswaterstaat (RWS) betrokken. Wanneer de Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken van toepassing zijn, wordt in de laatste versie van april 2015 het volgende gesteld: "Stalsoorten met een sterkteklasse hoger dan S355 zijn niet toegestaan" (RWS, 2015 ROK versie 1.3, pp. 188). Voor de Kruiswaterbrug was RWS de opdrachtgever. Dit betekent dat het toepassen van HSS niet mogelijk was. Bij de Blauwe Klap was de gemeente Assen de opdrachtgever. Ondanks dat de ROK tijdens dit project niet van kracht waren, is er toch S355 toegepast voor de brugdekken.



Hoofdrapport

Greven (2013) pleit in zijn artikel "Waarom S235 achterhaald is" gepubliceerd in het magazine Bouwen met Staal voor het gebruik van hogere staalkwaliteiten. De vele voordelen van voornamelijk S460 scoren goed op veel vlakken ten opzichte van een lagere staalkwaliteit. Onder andere een lagere CO₂ uitstoot, lichtere en slankere constructiemogelijkheden, een reductie van het lasvolume en kostenbesparingen zijn enkele voorbeelden die Greven aandraagt. In de productie van S235 tot en met S460 zit geen verschil. De verhouding van de bestandsdelen en de legeringen zijn voor de verschillende staalsoorten hetzelfde. Het verschil in sterkte wordt verkregen door het nabehandelen van het staal.

Tot de jaren 50 van de vorige eeuw was S235 de standaard en was het gebruik van S355 nog geen gemeengoed zoals nu het geval is. Tegenwoordig kan S355 zonder twijfel worden toegepast in verschillende toepassingen. Op dit moment heerst bij RWS, zeker met betrekking tot stalen bruggen, twijfel ten aanzien van het toepassen van S460 in plaats van S355, zoals dat decennia geleden gold voor S355.

In TGB 1990 was de vloiegrens van het constructiestaal begrensd tot S355. Sinds de uitgave van de Eurocode 3 worden in tabel 3.1 van de NEN-EN 1993-1-1+C2 de toegestane staalsoorten benoemd die geschikt zijn voor nieuwe constructies. De rekenregels die voorheen alleen geldig waren voor S235 tot en met S355 gelden nu ook voor S460.

In overleg met VSF is besloten om de Kruiswaterbrug te nemen voor het afstudeeronderzoek van HSS in brugdekken. Daarbij wordt gesteld dat de ROK buiten beschouwing wordt gelaten, zoals dat bij de Blauwe Klap het geval was. Beide bruggen zijn ontworpen met de laatste Eurocodes en uitgevoerd in S355. De projecten verschillen qua grootte. Het brugdek van de Kruiswaterbrug heeft vier rijbanen en die in Assen maar twee. Daarnaast vormt de Kruiswaterbrug onderdeel van een hoofdweg (A7) en is de Blauwe Klap een stadsbrug. Omdat naar verwachting meer voordeel kan worden bereikt door de toepassing van HSS bij een zwaardere brug, is gekozen voor de Kruiswaterbrug. De eenvoud en overzichtelijkheid van de Kruiswaterbrug waren daarnaast ook doorslaggevend voor de uiteindelijke keuze.

1.1 Opbouw hoofdrapport

Het hoofdrapport is opgedeeld in de volgende hoofdstukken:

- Hoofdstuk 2 vormt de probleemanalyse. Hierin wordt dieper ingegaan op de onderwerpen die in de aanleiding zijn genoemd en wat de aandachtspunten zijn waar rekening mee moet worden gehouden tijdens dit afstudeeronderzoek.
- Hoofdstuk 3 omvat het theoretisch kader dat inzicht geeft over de onderwerpen die in de probleemanalyse naar voren komen. Daarnaast wordt er ook algemene informatie verschaft die nodig is voor het onderzoek zelf.
- In hoofdstuk 4 zal de hoofdvraag worden geformuleerd, gevolgd door een aantal deelvragen.
- Hoofdstuk 5 behandelt de onderzoeksaanpak.
- In hoofdstuk 6 worden de resultaten van het onderzoek beschreven.
- In hoofdstuk 7 wordt de conclusie getrokken aan de hand van de resultaten van het onderzoek. Het onderzoek wordt tot slot afgesloten met een aanbeveling voor VSF.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om te kijken wat het eventuele voordeel zou kunnen zijn voor het toepassen van HSS in het brugdek (val) van de Kruiswaterbrug.



Hoofdrapport

2. PROBLEEMANALYSE

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de onderwerpen die in de aanleiding zijn genoemd. Er wordt gekeken waar rekening mee moet worden gehouden wanneer HSS wordt toegepast. De onderwerpen die naar voren komen, geven inzicht in de volgende stappen van het onderzoek (het theoretisch kader en de onderzoeks aanpak) en spelen uiteindelijk een belangrijke rol voor het eindadvies.

De onderwerpen die in dit hoofdstuk behandeld worden:

- Het toepassing van HSS in de praktijk
- De ROK van RWS en wat de achterliggende denkwijze is binnen het bedrijf voor de begrenzing op S355
- Kennis en ervaring

2.1 Toepassing van HSS in de praktijk

Om een beeld te krijgen waar HSS in de civiele sector wordt toegepast, wordt gekeken naar verschillende constructies. Eerder werden al in de aanleiding de pyloon van de Erasmusbrug en de boog van de Oversteek genoemd. In de sector infrastructuur zijn meerdere bruggen gebouwd met onderdelen van HSS. Bij de Uyllanderbrug in Amsterdam is S355 toegepast voor de dwarsdragers in het dek en S460 voor de boogconstructie. Bij de Botlekbrug is ook HSS toegepast voor de witte vakwerkconstructies. Andere bruggen in Nederland waarin S460 is verwerkt zijn o.a. de Galecopperbrug, de Theo Fransmanbrug en de Plofsluisbrug in Nieuwegein. In de infrastructuur wordt HSS niet alleen toegepast bij brugonderdelen. Ook in de Maeslantkering en in sluisdeuren zijn hogere staalkwaliteiten verwerkt.

Uit de beschreven voorbeelden blijkt dat voldoende voorbeelden van bruggen bestaan waarbij HSS is toegepast. Het valt wel op dat HSS alleen wordt toegepast in pylonen, bogen en vakwerkconstructies. Vaak wordt het brugdek zelf uitgevoerd in S355.



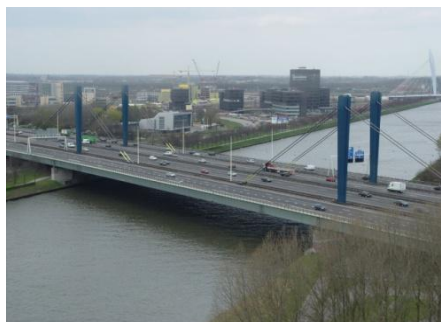
Figuur 3: De Uyllanderbrug, Wikipedia, (2013)



Figuur 4: De Botlekbrug, Van Houdt, J. (2015), defotograaf.eu



Figuur 5: De Maeslantkering, Van Houdt, J. (2007), Beeldbank RWS



Figuur 6: De Galecopperbrug, RWS, Beeldbank RWS, (2003)



Hoofdrapport

2.2 ROK

Om meer inzicht te krijgen in de gedachtegang van RWS voor het uitsluiten van het toepassen van HSS voor stalen brugdekken, is er gesproken met een aantal partijen. Na gesproken te hebben met Dhr. Bouwman, nu werkzaam bij Hollandia en voorheen bij RWS, is meer duidelijk geworden op het gebied van de ROK. Daarnaast is er gesproken met Dhr. Van der Wiel van Volker Infradesign en verschillende collega's bij VSF. De volgende punten die naar voren zijn gekomen, geven aan waar rekening mee gehouden moet worden wanneer HSS wordt toegepast:

- Risico's ten opzichte van S355
- Lassen, onderhoud en reparaties
- De ROK
- Vermoeiing

Risico's ten opzichte van S355

Eén van de belangrijkste redenen voor het uitsluiten van een hogere vloeisterkte dan 355 berust volgens Dhr. Bouwman in de manier waarop de betere materiaaleigenschappen worden bereikt. Wanneer thermo-mechanisch gewalst staal gelast en voorverwarmd wordt, bestaat het risico dat de structuurverbeteringen teniet kunnen worden gedaan. Dit betekent dat de gemaakte originele sterkte controles niet meer overeenkomen met de werkelijkheid.

Lassen, onderhoud en reparaties

Wanneer onderdelen van HSS aan elkaar worden gelast, is een gecontroleerde warmte behandeling vereist om de las goed te kunnen realiseren. Ook moet de las gelegd worden door gecertificeerde lassers. Hoe hoger de vloeigrens, des te kritischer bovengenoemde punten zullen zijn. RWS wil te allen tijde aan een constructie kunnen lassen voor onderhoud en reparaties zonder dat dit nadelige gevolgen heeft voor de sterkte van de constructie, want aan de buitenkant kan men niet zien wat de staalkwaliteit is.

De ROK

Ondanks het feit dat in dit afstudeeronderzoek de invloed van de ROK buiten beschouwing wordt gehouden, worden in de laatste versie een aantal punten genoemd die van belang zijn voor de realisatie van een stalen brug. Van Dhr. Bouwman is een aanvullende lijst ontvangen met eisen van RWS voor het gebruik van S460 (Bijlage 2). Volgens deze eisen mag het koolstofpercentage van het staal niet hoger zijn dan 0,20%. Het koolstofequivalent, dat van belang is voor de benodigde warmte-inbreng, mag niet hoger zijn dan 0,45 en moet aangetoond worden dat de geschikte lasprocedures met de nodige ervaring binnen het bedrijf aanwezig zijn.

Vermoeiing

Een andere belangrijke reden is dat de vermoeiingssterkte van HSS kritischer wordt dan bij staalsoorten S355 en lager. Wanneer RWS de opdrachtgever is voor een stalen brug, is het belangrijk dat de constructie zijn gestelde levensduur van 100 jaar moet kunnen halen. In hoofdstuk 3.5 zal het onderwerp vermoeiing worden behandeld.

Het enige waar bewust van wordt afgeweken, is de begrenzing van S355 voor stalen bruggen. In de aanleiding werd behandeld dat de vloeigrens van S235 is verschoven naar S355. Stel dat dit ooit opschuift naar S460. Het is interessanter om voor dit onderzoek te kijken naar S460 (één stap omhoog), dan naar een nog hogere staalkwaliteit als S690. Daarbij geldt dat de moeilijkheden en extra eisen alleen maar strenger worden wanneer wordt gekeken naar een vloeigrens hoger dan die van S460.



Hoofdrapport

2.3 Kennis en ervaring

Ir. A.M. Gresnigt (2008) heeft aan de TU Delft een cursus gegeven omtrent het onderwerp HSS. Hierin wees hij op een aantal hoofdlijnen voor het gebruik van HSS. HSS wordt vooral toegepast bij constructies onderhevig aan hoge belastingen en wanneer een reductie van het eigen gewicht voorop staat. Verder gaf hij een aantal basisvoorwaarden voor de toepassing van HSS:

- stabiliteit moet niet veruit maatgevend zijn
- stijfheid moet niet maatgevend zijn
- de constructie moet niet in hoge mate op vermoeiing worden belast

Wanneer constructies zijn opgebouwd uit hoge samengestelde liggers moet rekening gehouden worden met de breedte en dikte verhoudingen. Ook pleit hij ervoor om over te stappen op vakwerkconstructies. Naast de algemene informatie over HSS wordt in de cursus aandacht besteed aan vermoeiing.

Eén van de redenen waarom VSF geen HSS toepast in brugdekken is vanwege de informatie die hierboven behandeld is. Aan de hand van de beweringen klinkt het erg lastig om HSS te verwerken in een brugdek waarin juist de stijfheid en het aspect vermoeiing aan de orde zijn. Om HSS in een brugdek te kunnen verwerken, moeten de spanningen worden opgevoerd door staal te reduceren en het brugdek zo optimaal te ontwerpen dat nog wordt voldaan aan stijfheid en vermoeiing.

De bruggen die VSF tot dusver heeft gerealiseerd bestaan uit S355. De reden hiervoor was dat de daarvoor benodigde kennis en ervaring reeds aanwezig waren binnen het bedrijf. Dit betekent dat er niet van alles moest worden uitgezocht en dat het ontwerpen van de constructie voorspoediger verliep. Aan de andere kant wil VSF wel graag weten of het toepassen van HSS in brugdekken mogelijk is en of eventueel voordeel gehaald kan worden. Voordat een constructie wordt ontworpen, wordt gekeken of het uitvoeringstechnisch haalbaar is. Wanneer dit niet het geval is, moet de ontwerprichting worden aangepast. Een stalen brug bestaat uit stalen platen die aan elkaar worden gelast. VSF heeft aangegeven dat ze de certificaten hebben om HSS te kunnen lassen in haar eigen constructiewerkplaats.



Hoofdrapport

2.4 Kruiswaterbrug

Aan het eind van de inleiding is in de doelstelling besloten om de Kruiswaterbrug (Figuur 7) te nemen voor het onderzoek naar HSS in brugdekken. De Kruiswaterbrug is een dubbele basculebrug in Bolsward in de provincie Friesland, gelegen tussen Sneek en de afsluitdijk (A7) ter hoogte van Bolswardervaart in splitsing met de Wijmerts en de Workumertrekvaart. Omdat de brug zich op de kruising van deze wateren bevindt, wordt de brug de "Kruiswaterbrug" genoemd. De brug heeft twee verschillende brugdekken. Het brugdek dat VSF heeft gerenoveerd is de Zuidbrug richting Sneek. Bij een basculebrug is het brugdek ophaalbaar door een rotatie om de horizontale as haaks op het wegdek. De brug draait door middel van een aandrijving om een draaipunt met aan de ene kant het brugdek en aan de andere kant een contragewicht. Deze ballastkist zorgt ervoor dat minder energie nodig is om de brug te openen.



Figuur 7: De oude Kruiswaterbrug. VSF (2014) en Google Street View (2016)

Voor het definitieve ontwerp heeft VSF de sterkteberekeningen uitbesteedt aan ingenieursbureau ITBB. In het rapport van ITBB worden de invoer met de bijbehorende uitgangspunten verwerkt in het modelleringsprogramma ANSYS. Aan de hand van de uitvoer worden de onderdelen van de Kruiswaterbrug gecontroleerd. In Bijlage 3 worden naast de controle van de optredende spanningen een aantal aspecten behandeld waar rekening mee moest worden gehouden voor het huidige ontwerp:

- Geluidsafstraling
- Vervormingen
- Temperatuur
- Vermoeiing

RWS heeft een geluidseis gesteld voor het nieuwe ontwerp van de Kruiswaterbrug, omdat omwonenden klaagden over geluidsoverlast wanneer voertuigen het stalen dek van de Zuidbrug passeerden. Het onderwerp geluid wordt verder toegelicht in hoofdstuk 6.2. De overige aspecten zullen worden behandeld in het theoretisch kader.

Hoofdrapport

3. THEORETISCH KADER

Onderwerpen die in de probleemanalyse naar voren zijn gekomen, kunnen invloed hebben op het onderzoek van HSS in brugdekken. Om die reden worden de eerder behandelde aspecten toegelicht in dit hoofdstuk. De onderwerpen die worden behandeld zijn:

- HSS met de bijbehorende voor- en nadelen
- Lassen
- Vervorming
- Temperatuur
- Vermoeiing

3.1 HSS

In de aanleiding van dit rapport is de definitie van HSS behandeld. Wanneer de rekgrens boven de 355 N/mm^2 komt, is er sprake van HSS. De vloeigrens van S460 wordt bereikt door direct na de productie van het staal behandelingen te verrichten om de gewenste eigenschappen te bereiken. Hierbij wordt het aanwezige koolstofpercentage gereduceerd wat zorgt voor een hogere sterkte. In de samenstelling van de legeringselementen zit geen verschil tussen S355 en S460. In Bijlage 2 en Bijlage 4 wordt behandeld dat het veranderen van de chemische eigenschappen zorgt voor betere mechanische eigenschappen. De verschillende nabehandelingprocessen zorgen voor de volgende staalsoorten:

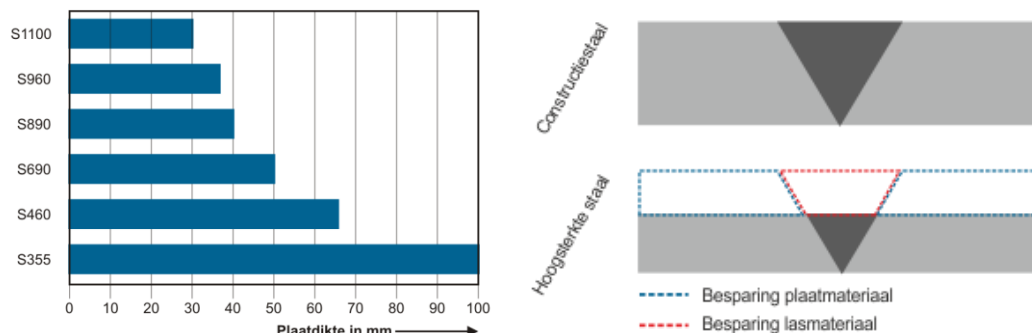
- Genormaliseerd gewalst staal (S460 N/NL)
- Thermo- mechanisch gewalst staal (S460 M/ML)

Hoofdrapport

3.1.1 Voordelen HSS

Voor het gebruik van HSS zijn een aantal voordelen van toepassing die mogelijk kunnen bijdragen aan de gewichtsbesparing van de Kruiswaterbrug. De volgende voordelen worden behandeld door Tosec, een bedrijf gespecialiseerd in plaatbewerkingen, lassen en frezen:

- Met HSS kunnen hogere belastingen worden opgenomen door de aanwezigheid van een hogere vloeigrens. De opneembare belasting per mm^2 is veel hoger.
- Met HSS kan lichter en esthetischer geconstrueerd worden. De aanwezige plaatdiktes kunnen worden gereduceerd.
- De verhoogde vloeigrens heeft positieve invloed voor andere controles, onder andere voor knik en plooi (Bijlage 5).
- HSS is taai en zal niet snel breken. Door de aanwezigheid van een hoge rekgrens wordt het materiaal alleen maar betrouwbaarder.
- Minder energie is nodig voor verschillende handelingen (openen van bruggen en transport)
- De hoeveelheid materiaal die men bespaart bedraagt 35% voor S460 en 50% voor S690 ten opzichte van S355 (zie Figuur 8).
- Naast een gewichtsbesparing heeft HSS nog andere economische voordelen. Bij een optimaal ontwerp kan de totaalprijs een stuk lager uitvallen.
- De belasting op de fundering wordt minder door een reductie van het eigen gewicht
- Wanneer de platen dunner worden, wordt het lasvolume kleiner. Hierdoor kan de las sneller en met minder lasmateriaal worden gerealiseerd, wat zorgt voor lagere productiekosten.



Figuur 8: Verhouding tussen plaatdiktes/sterkte van verschillende staalsoorten en de reductie van het plaat en lasmateriaal. www.Tosec.nl

3.1.2 Nadelen HSS

- Het is minder goed lastbaar dan de staalsoorten S235 en S355. Extra handelingen, zoals voorverwarmen moeten worden verricht om een goede verbinding te creëren.
- De ervaring van staalleveranciers en bedrijven in de civiele sector voor bruggen is meer gericht op S355. Meer kennis op het gebied van HSS is nodig voor een goede uitvoering.
- De verhouding tussen de variabele en permanente belastingen nemen toe bij een brugdek uitgevoerd in HSS. Dit kan ervoor zorgen dat de vermoeiing kritischer wordt (zie hoofdstuk 3.5)
- Voor de bepaling van de profielklasse zorgt een hogere vloeigrens dat het moeilijker wordt profielen in hun klasse te houden. De klasse bepaalt of elastisch of plastisch rekenen moet worden toegepast. De breedte- dikteverhouding bepalen samen met de staalkwaliteit welke doorsnede classificatie van toepassing is.

Hoofdrapport

3.2 Lassen

Een stalen brug bestaat uit stalen platen die door middel van lassen aan elkaar worden verbonden. In dit hoofdstuk wordt behandeld waar rekening mee moet worden gehouden wanneer wordt gewerkt met een hogere staalkwaliteit (Bijlage 6). Volgens de NEN-EN 1090-2 vallen de lassen van bruggen, door het gebruik van HSS, in executieklasse 4 (EXC4) met aanvullende eisen niveau B⁺. Het betreft aanvullende eisen voor het leggen van de lassen. Daarnaast worden in de aanvullende eisen van de ROK (eind Bijlage 2) nog een aantal eisen gesteld. Zo dient onder andere te worden aangetoond dat de lasprocedures beschikbaar zijn en dat de lasser de nodige ervaring heeft om S460 te lassen.

Volgens metaalmagazine 9 (2009) moeten de hoeklassen in constructies gevoelig voor vermoeiing worden vervangen door volledig doorgelaste hoeklassen (full penetration) om bij een grotere spanningsvariatie de levensduur te halen.

3.2.1 Constructieve controle van lassen

De rekenwaarde van de weerstand van een las voldoet wanneer aan de volgende twee bepalingen wordt voldaan volgens de NEN-EN 1993-1-8+C2:2011:

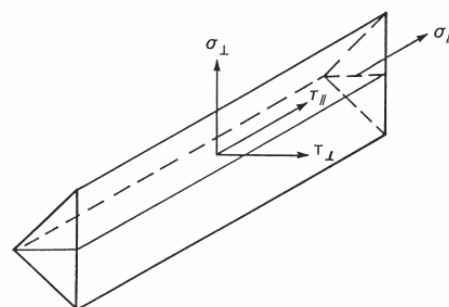
$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq f_u / (\beta_w \gamma_{M2}) \quad \text{en} \quad \sigma_{\perp} \leq 0,9 f_u / \gamma_{M2}$$

waarin:

- f_u is de nominale trekspanning van het zwakst verbonden onderdeel
- β_w is de correlatiefactor (gegeven in tabel 1)

Tabel 1: correlatiefactoren β_w voor lassen. Tabel 4.1 NEN-EN 1993-1-8

Norm en staalsoort			Correlatiefactor β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0



Wanneer staalsoorten met verschillende sterktes aan elkaar worden gelast, moeten de eigenschappen van het materiaal met de laagste sterkteklasse worden gehanteerd voor de controle op sterkte. Wanneer S355 en S460N met elkaar worden verbonden is dus een β_w van 0,9 van toepassing en de trekspanning van S355 voor de controle van de las. Verder geldt voor de eigenschappen van het lasmateriaal dat deze hoger of gelijk moeten zijn aan die van het moedermateriaal. Wanneer S355 en S460N aan elkaar worden gelast, zijn dus minimaal de mechanische eigenschappen van S460N nodig om aan deze eis te voldoen.

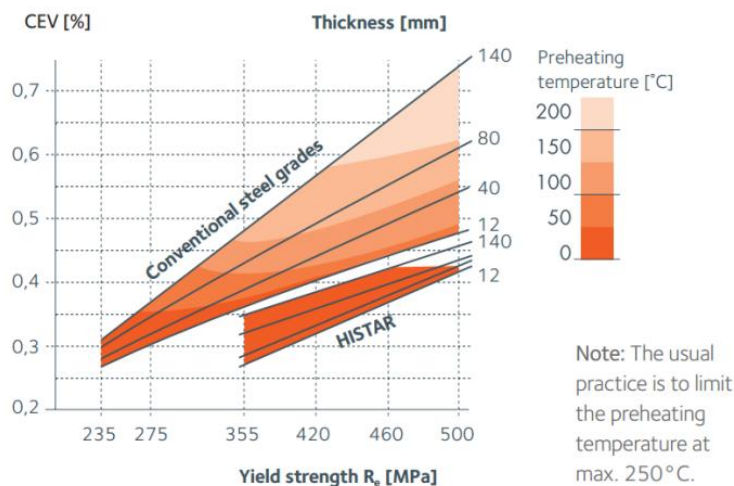
Hoofdrapport

3.2.2 Voorverwarmen

In de probleemanalyse is behandeld dat lassen gecombineerd met HSS extra bewerkelijk zijn, omdat rekening dient te worden gehouden met een gecontroleerd warmtebehandelingsproces. Afhankelijk van de chemische samenstelling kan berekend worden hoeveel warmte moet worden toegevoegd en hoe lang deze moet worden gereguleerd nadat de las is gelegd. Deze warmtebehandeling is van essentieel belang om koudscheuren tegen te gaan. Wanneer het materiaal te snel afkoelt door een ongecontroleerde warmtebehandeling zullen er scheuren optreden doordat de materialen te snel krimpen. Aan de hand van de volgende formule kan het koolstof equivalent worden bepaald:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Voor de CEV- waarde worden in de aanvullende eisen van de ROK eisen gesteld voor S460. Wanneer de berekende CEV-waarde na afspraken met de fabrikant overeenkomen, kan de warmtebehandeling worden bepaald met behulp van de grafiek in Figuur 9.



Figuur 9: Benodigde warmtetoevoer aan de hand van het CEV- gehalte. Bron: ArcelorMittal / Histar

Nast het CEV- gehalte is de warmtebehandeling afhankelijk van nog twee andere factoren, namelijk de dikte van het staal en de hoeveelheid waterstof dat aanwezig is in het lasmateriaal (afhankelijk van de elektrode). Aan de hand van de scheurfactor (P_c) formule wordt de warmte berekend die rekening houdt met deze variabelen:

$$P_c = C + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{t}{600} + \frac{H}{60}$$

t = plaatdikte in mm

H = hoeveelheid waterstof in het lasmateriaal in ml/100 gr

Met de P_c factor kan de voorverwarmingstemperatuur worden bepaald met de volgende formule:

$$T = 1,440 P_c - 392 \quad (T \text{ in graden Celcius})$$

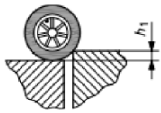
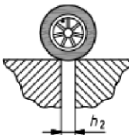
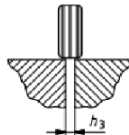
Binnen VSF zijn de te bepalen hoeveelheid warmte- inbreng, temperatuur tijdens het lassen en de nabehandelingstemperatuur bekend bij de lastechnische dienst. Na afspraken met de fabrikant kunnen de percentages van de elementen in een pre- heat programma worden ingevoerd. De invoer bestaat uit de percentages van de P_c en CEV elementen en de uitvoer bestaat uit de waarden die met de bovenstaande formules worden berekend. Het programma toont de resultaten in grafieken.

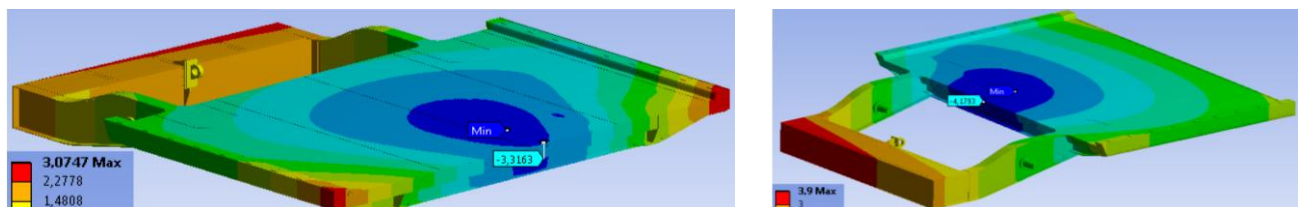
Hoofdrapport

3.3 Vervorming

Naast de spanningscontroles voor de verschillende onderdelen van de brug wordt door ITBB aandacht besteed aan de optredende doorbuiging. Uit de resultaten van het ANSYS model blijkt dat de voor- en achterhar (buitenste dwarsdragers) zeer stijf zijn omdat deze niet meer dan 5,0 mm mogen doorbuigen volgens de Tabel 2. Wanneer voertuigen de overgang h_1 tussen de brug en het landhoofd passeren, moet worden voorkomen dat de band een stootkracht genereert tegen het landhoofd. Wanneer dit wel het geval is, zal het landhoofd na verloop van tijd kapot worden gereden. De doorbuigingen die bepaald zijn door ITBB zijn gegeven in Figuur 10.

Tabel 2: Toegelaten spleetgrootten bij voegovergangen. Tabel NB.4 NEN-EN 1993-2

						
			⊥ Bewegingsrichting van verkeer		// Bewegingsrichting van verkeer ^c	
	Aanbevolen h_1 [mm]	Maximum h_1 [mm]	Aanbevolen h_2 [mm]	Maximum h_2 [mm]	Aanbevolen h_3 [mm]	Maximum h_3 [mm]
Motorvoertuigen (autosnelwegen)	0	5	20	80	10	20



Figuur 10: Doorbuigingen op de voor- en achterhar, afhankelijk van de positionering van de tandemstels in de BGT. Rapport ITBB, (2013)

Voor de overige onderdelen wordt rekening gehouden dat de doorbuiging van het ene onderdeel invloed heeft op de onderdelen die ernaast aanwezig zijn. Wanneer de dwarsdrager in het midden wordt gecontroleerd op vervorming, dan vervormt deze meer door de eerdere doorbuiging afkomstig van de hoofdligger, omdat de onderdelen stijf aan elkaar verbonden zijn. Het is daarom belangrijk dat naar de doorbuigingen van de hele constructie wordt gekeken en niet naar de losse onderdelen. Voor de overige vervormingscontroles wordt aangehouden:

$$\delta \leq \delta_{\max}$$

$$\delta_{\max} = (1/500) * L$$

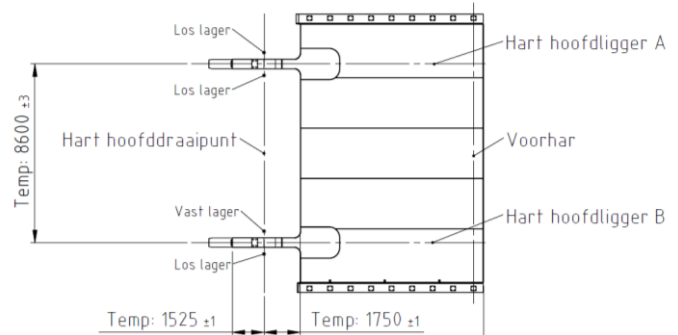
Hoofdrapport

3.4 Temperatuur

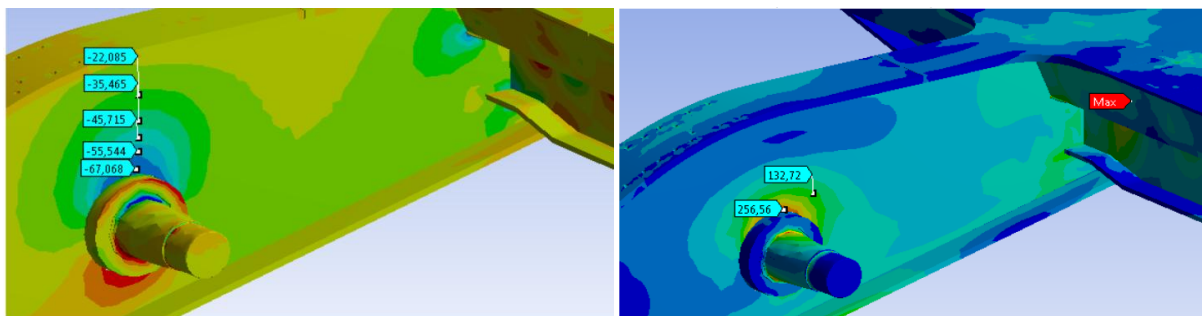
Van materialen is bekend dat ze uitzetten bij een temperatuursverhoging en krimpen bij een afkoeling. Voor staal is de uitzetting te bepalen aan de hand van de uitzettingscoëfficiënt ($\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$) en de volgende formule:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

Bruggen moeten in staat zijn de uitzettingen op te kunnen nemen. Om deze reden worden de opleggingen in Figuur 11 (losse lagers) zo ontworpen dat de brug in zijn geheel in staat is zich te verplaatsen in alle richtingen. Op de losse lagers zorgt een zijdelingse verplaatsing van het brugdek voor een spanningstoename rondom het draaipunt (Figuur 12).



Figuur 11: Kruiswaterbrug met de opleggingen. VSF (2013)

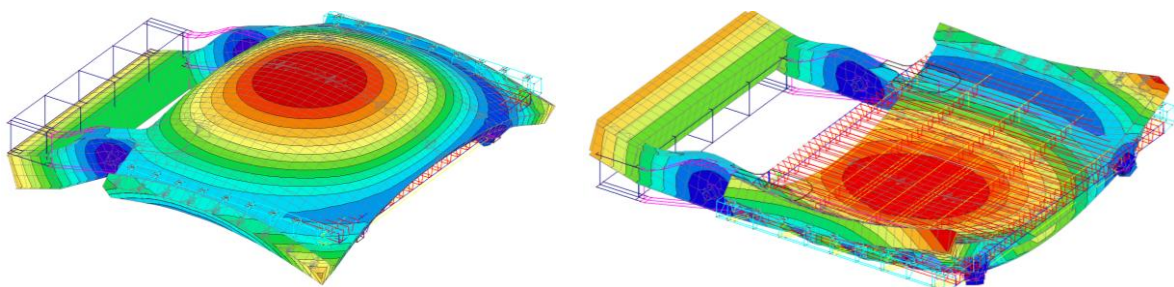


Figuur 12: Spanningen rondom het draaipunt van de losse lagers. Links zonder zijdelingse verplaatsing met een spanning Van -67 N/mm² en recht een spanning van 256,56 N/mm² voor een zijdelingse verplaatsing van 4,0 mm. ITBB (2013)

ITBB heeft in het rapport rekening gehouden met twee situaties die belangrijk zijn voor de controles van de brug waarin:

1. Het dek $\Delta T = 30$ Kelvin warmer wordt dan de onderzijde
2. De onderzijde van het dek en troggen $\Delta T = 10$ Kelvin kouder zijn

In de bovenstaande gevallen zorgt de afkoeling van het dek ervoor dat de vervorming toeneemt doordat het brugdek hol komt te staan. Een temperatuursverhoging van het dek genereert een bolling van het dek en zorgt voor hogere spanningen. In Figuur 13 zijn de situaties van belastingsgevallen weergegeven die alleen onderhevig zijn aan de beschreven temperatuursbelastingen.



Figuur 13: Links situatie 1: opwarming van het dek $\Delta T = 30$ Kelvin en rechts situatie 2: afkoeling $\Delta T = -10$ Kelvin van het dek en de troggen. Situatie 2 zorgt ervoor dat de doorbuiging door temperatuur alleen maar kritischer wordt. SCIA (2016)

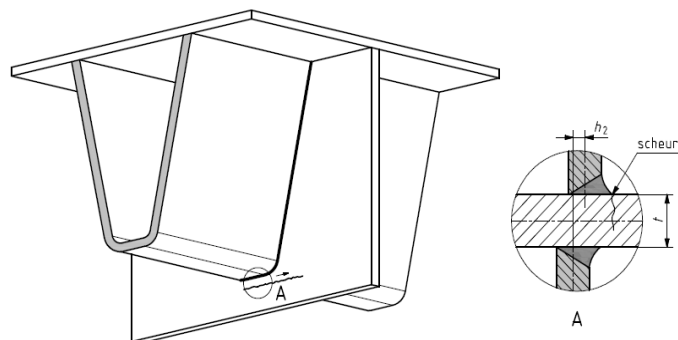
Hoofdrapport

3.5 Vermoeiing

Stalen bruggen worden ontworpen voor een levensduur van 100 jaar. In de praktijk zijn er gevallen bekend van bruggen die sneller in aanmerking kwamen voor onderhoud. Het bekendste geval in Nederland is waarschijnlijk het brugdek van de basculebrug van de Tweede Van Brienoordbrug in 1997 (Figuur 14). Zeven jaar na de oplevering werd al vermoeiingsschade geconstateerd in het nieuwe brugdek van het beweegbare gedeelte van de brug. Dit werd veroorzaakt door de toename van de verkeersintensiteit en de veranderingen van de wielprent (dubbellucht i.p.v. enkellucht) van het verkeer ten opzichte van de laststelsels waarmee de brug was ontworpen. Het probleem werd veroorzaakt doordat het dek te dun was ontworpen en uitgevoerd.



Figuur 14: De Van Brienoordbrug. nufoto.nl, (2014)



Figuur 15: Detailcategorie $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$
NEN-EN 1993-2

Vermoeiing is het verschijnsel waarbij een materiaal bezwijkt door de aanwezigheid van dynamische of wisselende belastingen. Vouw een paperclip 20 keer heen en weer en hij zal breken.

In het geval van een stalen brug zal dit plaatsvinden in de lassen die de verschillende onderdelen met elkaar verbinden. Voor de Kruiswaterbrug is het van belang dat de brug 100 jaar lang wisselingen ten gevolge van zwaar verkeer kan opnemen zonder dat de lassen bezwijken. Dit betekent dat de vermoeiingsschade in de lassen voor een tijdsbestek van 100 jaar moet voldoen aan de gestelde eisen volgens de rekenmethode in de NEN-EN 1993-1-9.

Vermoeiingsschade kan worden verdeeld in twee fasen (bron: Use and Application of High Performance Steels (HPS) for Steel Structures):

1. Scheurinwijding: afhankelijk van het materiaal en de mate waarin het belast wordt, ontstaan microscopische scheurtjes in het materiaal. Deze microscopische scheuren kunnen zich uitbreiden en wanneer ze andere microscopische scheuren tegenkomen, kunnen ze samen één scheur vormen. Een scheur wordt als kenmerkend beschouwd bij lengtes van 0,5 tot 1,0 mm.
2. Scheurvoortplanting: de aanwezigheid van de scheur veroorzaakt een spanningsconcentratie in het aanwezige gebied. Door de aanwezigheid van spanningswisselingen zal de kleine scheur continu open gaan en vervolgens weer dicht. Door dit verschijnsel zal de scheur zich voortplanten totdat het gebied waarin de scheur zich bevindt instabiel wordt.

Voor de lassen die toegepast worden, zijn aan de hand van testen waarden verkregen, zogenaamde detailcategorieën, die bepalend zijn voor het vaststellen van de eventuele vermoeiingsschade. Voor de testen is gekeken naar het vermoeiingsgedrag van verschillende lasdetails bij verscheidene wisselende spanningen. Hierbij is rekening gehouden met meetkundige en structurele imperfecties. Aan de hand van de resultaten is aan ieder lasdetail een waarde verbonden (detailcategorie $\Delta\sigma_c$ bij 2 miljoen wisselingen) waarmee kan worden aangetoond hoeveel weerstand het detail kan bieden tegen vermoeiing. De detailcategorieën, vastgesteld door de Commissie Europese Norm (CEN), worden gegeven in de NEN-EN 1993-1-9 en de NEN-EN 1993-2. Van de laatste norm is een lasdetail gegeven in Figuur 15.

Hoofdrapport

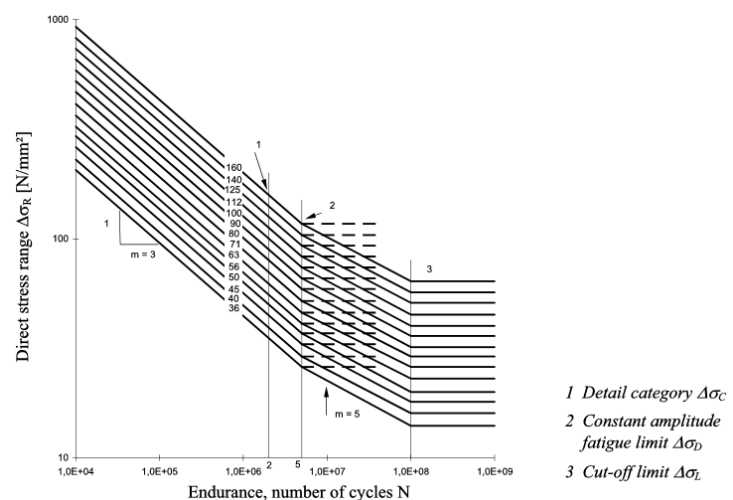
Aan de hand van de analyse van de gerealiseerde Kruiswaterbrug, waarin aandacht werd besteed aan vermoeiing, bleek dat de volgende factoren een belangrijke rol spelen:

- De spanningsconcentratie ten gevolge van de aanwezige wiellasten;
- Het percentage van de aanwezigheid van de verschillende type wiellasten;
- Dikte van het staal;
- Het verwachte aantal wisselingen binnen een tijdsbestek van 100 jaar.

De bepaling voor de eventuele vermoeiingsschade geschiedt volgens de spannings-wisselingen methode (SN- curve) die in Figuur 16 is weergegeven. In de grafiek zijn de detailcategorieën terug te vinden die de norm voorschrijft. Afhankelijk van het gebied waarin het detail zich bevindt, kan de vermoeiing worden getoetst. De gebieden worden als volgt bepaald:

Formule voor de bepaling van de "Constant amplitude fatigue limit":

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{m}} * \Delta\sigma_C$$



Figuur 16: SN- curve. Figuur 7.1 NEN-EN 1993-1-9

Formule voor de bepaling van de "Cut- off limit":

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{m}} * \Delta\sigma_D$$

Aan de hand van de onderstaande bereiken kan het gebied met de bijbehoren helling (m) worden vastgesteld aan de hand van de designspanning ($\Delta\sigma_{i;d}$):

- 1: $m = 3$ (voor $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$)
- 2: $m = 5$ (voor $\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$)
- 3: $m = \infty$ (voor $\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$)

Wanneer de designspanning zich bevindt in het gebied 3 (cut- off limit) met $m = \infty$, dan treedt er geen schade op door vermoeiing.

Designspanning

$\Delta\sigma_{i;d}$ is voor alle details afhankelijk van de beoordelingsmethode. De optredende spanning wordt vermenigvuldigd met de partiële factor γ_{Mf} . Voor sommige details moet er rekening gehouden worden met het dikte-effect k_s .

$$\Delta\sigma_{i;d} = \Delta\sigma_i * \gamma_{Mf} / k_s$$

Hoofdrapport

Controle Vermoeiing:

Het lasdetail voldoet aan vermoeiing wanneer geen schade optreedt na de sommatie van de losse schadecontroles voor alle mogelijke simulaties (alle posities op het brugdek van verschillende voertuigen met verschillende wieltypes). Voor elke simulatie geldt:

$$\text{Schade } D_o = \text{optredende aantal wisselingen} / \text{toelaatbare aantal wisselingen } (N_i) \leq 1,0$$

$$N_i = (\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i * \gamma_{Mf})^m * N_k$$

$$\text{Optredende wisselingen} = \text{Levensduur} * (\text{wisselingen/jaar}) * \text{percentage aanwezigheid type wiellast}$$

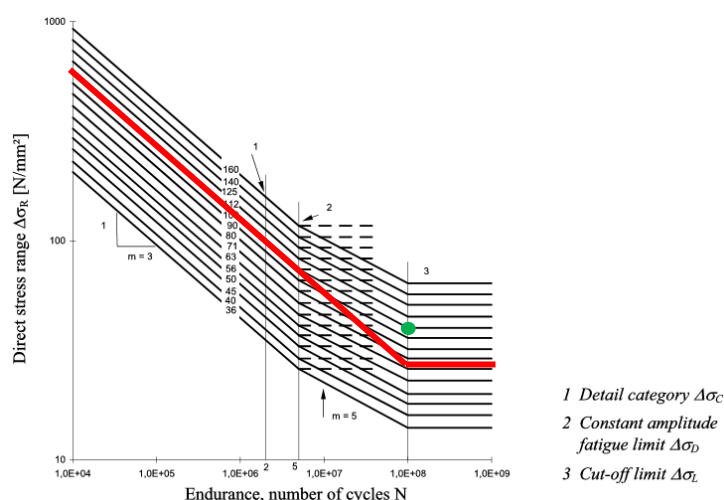
HSS en vermoeiing:

Het materiaal wordt dunner wat het niet alleen gunstiger maakt voor het aantal lasuren, maar het verlaagt ook het dikte-effect wanneer dat van toepassing is (hangt af van het soort detail). Het nadeel is dat de sterkte van de vloeigrens en de vermoeiingssterkte niet evenredig toenemen. Dit betekent dat de weerstand tegen vermoeiing niet in dezelfde verhouding toeneemt als de sterkte van gekozen staalsoort en dat de constructie gevoeliger wordt of kan worden voor vermoeiing.

Bij HSS is de helling van $m = 5$ niet meer van toepassing, alleen $m = 3$. Dit zorgt ervoor dat het aantal toegestane wisselingen (N_i) flink zal afnemen. Wanneer dit ervoor zorgt dat teveel vermoeiingsschade optreedt, kunnen achteraf verbeteringsmethoden worden toegepast om de vermoeiingssterkte te verhogen (Bijlage 7). In Tabel 3 en Figuur 17 wordt getoond dat de cut-off limit (punt waarbij geen schade optreedt) bij HSS lager komt te liggen dan bij S355 het geval is. Voor een detail met een $\Delta\sigma_c$ van 100 N/mm^2 is in het rood aangegeven hoe een detail zich gedraagt in combinatie met HSS. De groene stip geeft aan vanaf waar S355 geen schade oplevert. Dit punt ligt per detailcategorie hoger door de helling van $m = 5$ die ontbreekt bij HSS.

Tabel 3: tussen S355 en S460 voor een detailcategorie met 100 N/mm^2

staal	Detailcategorie $\Delta\sigma_c$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
S355	100	73,7	40,5
S460	100	73,7	27,1



Figuur 17: Verloop van de SN-curve van HSS ten aanzien van S355 voor vermoeiing. (Figuur 7.1 NEN-EN 1993-1-9)



Hoofdrapport

4. HOOFD EN DEELVRAGEN

Aan de hand van de tot nu toe behandelde informatie wordt een concrete hoofdvraag geformuleerd. Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden, worden een paar deelvragen opgesteld. De hoofd en deelvragen zijn hieronder geformuleerd:

Hoofdvraag:

In hoeverre is het mogelijk binnen het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug een gewichtsreductie van het stalen dek te realiseren bij toepassing van S460?

Deelvragen:

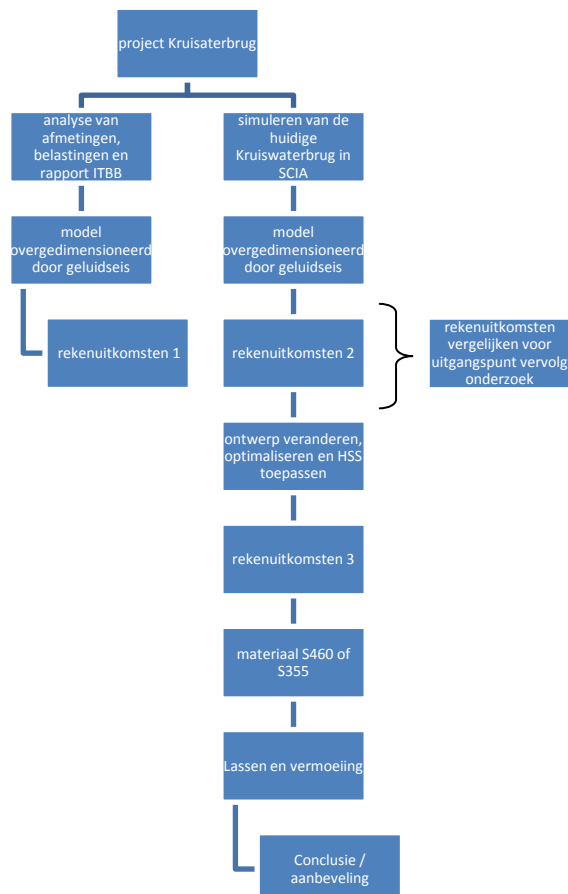
- Wat is constructief mogelijk aan optimalisaties van het ontwerp van de Kruiswaterbrug door de toepassing van HSS?
- Welke onderdelen van de hoofdconstructie kunnen door middel van HSS lichter worden uitgevoerd?
- In hoeverre voldoen de lasen aan vermoeiing bij toepassing van S460 in het geoptimaliseerde ontwerp?
- In hoeverre is vermoeiing bepalend voor het geoptimaliseerde ontwerp van de Kruiswaterbrug?

Bovenstaande deelvragen bevatten in grote lijnen de stappen die in het onderzoeksplan (hoofdstuk 5) aan bod komen.

Hoofdrapport

5. ONDERZOEKSAANPAK

Om de deelvragen te kunnen beantwoorden, die antwoord geven op de geformuleerde hoofdvraag, wordt onderzoek gedaan in de vorm van een ontwerponderzoek. Om een beeld te krijgen hoe het onderzoek in elkaar steekt, is hieronder een schema afgebeeld met wat zal worden onderzocht. Per blok zal een korte toelichting worden gegeven van de werkzaamheden.



- *Project Kruiswaterbrug:*

Het project dat dient ter referentie van het onderzoek (beschreven in hoofdstuk 1: Aanleiding en hoofdstuk 2: Probleemanalyse).

- *Analyse van afmetingen, belastingen en rapport ITBB:*

Gegevens die een beeld geven van hoe het project is gerealiseerd en waar rekening mee moet worden gehouden.

- *Model overgedimensioneerd door geluidseis:*

Door een geluidseis van RWS is de brug overgedimensioneerd (nader toegelicht in hoofdstuk 6.2).

- *Rekenuitkomsten 1:*

Dit zijn de rekenuitkomsten uit het sterkterapport van ingenieursbureau ITBB dat is opgesteld met behulp van het modelleringsprogramma ANSYS.



Hoofdrapport

- *Simulatie van de huidige Kruiswaterbrug in SCIA:*

In deze stap wordt alle beschikbare informatie (afmetingen, belasting, combinaties ect.) verwerkt in het modelleringsprogramma SCIA Engineer 15.3.

- *Model overgedimensioneerd door geluidseis:*

Het overgedimensioneerde model blijft in deze stap nog onveranderd. Het is belangrijk dat het model in SCIA net als het model van ITBB overgedimensioneerd is. Anders is het niet mogelijk de modellen naast elkaar te leggen en de resultaten te vergelijken.

- *Rekenuitkomsten 2:*

Rekenuitkomsten berekend door SCIA

- *Rekenuitkomsten vergelijken voor uitgangspunt vervolg onderzoek:*

Dit is een belangrijke stap. Hier worden de rekenuitkomsten 1 van ITBB met ANSYS vergeleken met de rekenuitkomsten 2 uit SCIA. Wanneer de resultaten overeenkomen is er een goed model opgesteld dat dient als uitgangsmodel/basismodel voor de volgende stappen in het onderzoek.

- *Ontwerp veranderen, optimaliseren en HSS toepassen:*

Het overgedimensioneerde model wordt in SCIA geoptimaliseerd. Vervolgens worden de nodige aanpassingen gemaakt om de spanningen te verhogen. Daarnaast moet voor alle onderdelen worden voldaan aan de vervormingseisen.

- *Rekenuitkomsten 3:*

Uit de resultaten moet blijken of HSS nodig is om de verhoogde spanningen op te kunnen vangen.

- *Materiaal S460 of S355:*

Om aan te tonen dat het geoptimaliseerde ontwerp in SCIA daadwerkelijk S460 vereist, zal voor de verschillende onderdelen aandacht worden besteed aan de resultaten. Daar waar S460 voordeel biedt boven S355, zal dit duidelijk worden aangetoond.

- *Lassen en vermoeiing:*

De vermoeiing in de lassen wordt aan het eind gecontroleerd. Uit deze stap moet blijken dat de spanningsconcentraties nabij de lassen niet teveel schade opleveren binnen een tijdsbestek van 100 jaar. In de normen staat beschreven dat vermoeiing niet in de sterkteberekeningen wordt opgenomen. Deze moet aan het eind los worden gecontroleerd. Zodoende wordt vermoeiing ook pas aan het eind van dit onderzoek getoetst.

- *Conclusie en aanbeveling:*

Aan de hand van de resultaten van het onderzoek zullen conclusies worden geformuleerd, gevolgd door een aanbeveling (hoofdstuk 7).

Hoofdrapport

6. RESULTATEN

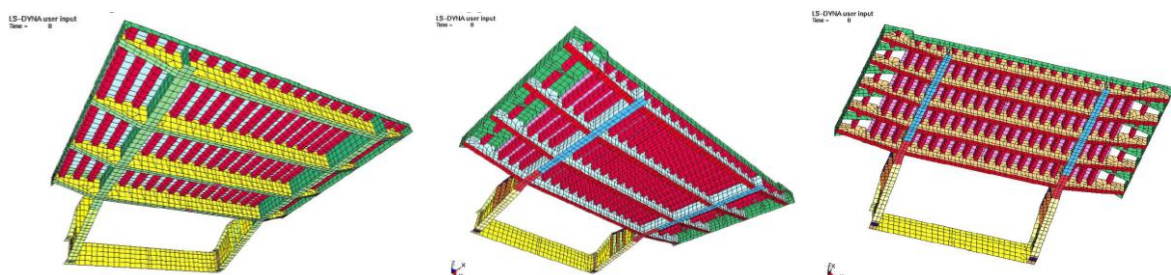
6.1 Project Kruiswaterbrug

Door de tekeningen en berekeningen van de Kruiswaterbrug te analyseren, ontstaat er een goed beeld van het referentieproject. Eerder in hoofdstuk 2.4 is al ingezoomd op de Kruiswaterbrug. Voor dit onderzoek is vastgesteld dat voordeel wil worden gehaald door het ontwerp te optimaliseren en HSS toe te passen. Kijkend naar de Kruiswaterbrug zijn er een aantal onderdelen waar dit niet van toepassing zal zijn. In Bijlage 3 is beschreven dat de passeerpaden inclusief leuningen, de barriers, geleiderail en het contragewicht niet zullen worden onderzocht. Ze worden puur gemodelleerd om het totale eigen gewicht van het brugdek te laten kloppen met de berekende oplegreacties.

6.2 Model overgedimensioneerd door geluidseis

Uit het PVA opgesteld door VSF voor de renovatie van de Kruiswaterbrug bleek dat RWS een eis had gesteld voor de geluidsafstraling van het val. Na het voorlopig ontwerp, waarin de Kruiswaterbrug was uitgevoerd met vier dwarsdragers, heeft VSF de geluidsafstraling laten controleren door Movares. Door een combinatie van de eindige elementen methode (FEM) en een randelementenprogramma (BEM) konden de trillingen in de constructie ten gevolge van het aanwezige verkeer worden omgezet naar een geluidsafstraling. Daarbij werd door RWS gesteld dat het nieuwe ontwerp 10 dB stiller moest worden voor de 63 Hz octaafband en 7 dB voor de 125 Hz octaafband.

Uit de resultaten van Movares kwam naar voren dat er nog een te grote geluidsafstraling aanwezig was. Door de strengere regels in de Eurocode moest de Kruiswaterbrug al zwaarder worden uitgevoerd dan de huidige situatie. Om zo goed mogelijk te voldoen aan de geluidsafstralingseis heeft Movares aangetoond dat de brug met één extra dwarsdrager en een dikkere dekplaat van 22 mm bijna voldoet aan de gestelde eis. Ondanks een reductie van 8,1 dB voor de 63 Hz octaafband keurde RWS het alternatieve ontwerp goed. In Figuur 18 zijn de ontwerpfasen weergegeven die de Kruiswaterbrug heeft ondergaan.



Figuur 18: Van links naar rechts: De te vervangen Kruiswaterbrug, het voorlopige ontwerp en het definitieve ontwerp na het advies van Movares met een dikkere dekplaat en één extra dwarsdrager. Rapport Movares analyse geluidsafstraling, (2013)

Hoofdrapport

In Tabel 4 zijn de dimensies weergegeven van de oude en de nieuwe Kruiswaterbrug. Het is duidelijk te zien dat de brug zwaarder werd uitgevoerd. Ook door de toevoeging van passeerpaden aan de zijkanten van de brug nam het gewicht van het val toe. Voor de geluidreductie werden roosters toegepast voor de loopgedeelten.

Tabel 4: Afmetingen van de huidige en de nieuwe Kruiswaterbrug. Movares (2013)

Onderdeel	Huidige afmetingen [mm]	Afmetingen ontwerp [mm]
Dikte brugdek	12	22
Dikte lijf hoofdliggers	12	12
Dikte flens hoofdliggers	20	60
Hoogte hoofdliggers	926	911
Dikte lijf dwarsdragers	12	12
Hoogte dwarsdragers	926	911
Dikte flens dwarsdragers	20	30
Dikte plaatmateriaal troggen	6	6
Hoogte troggen	174	378
Dikte zijplaten	8	8
Hoogte zijplaten	400	603
Dikte plaatmateriaal inspectiepad	-	8
Breedte inspectiepad	-	1538

Merk op dat de bovenstaande afmetingen zijn geadviseerd door Movares. VSF heeft in een latere fase van het definitieve ontwerp voor de hoofdliggers, dwarsdragers en troggen de dimensies licht aangepast. De eis voor de reductie van geluidsafstraling was begrijpelijk. Aan de ene kant bevindt zich een open weiland en de andere bewoond gebied (Bolsward). Tot nu toe is dit de enige brug in heel Nederland waar een geluidseis aan verbonden was. VSF had destijds dit werk binnengehaald omdat ze rekening zouden houden met geluidsafstraling. Verder hebben ze nog nooit vergelijkbare projecten meegemaakt met een dergelijke eis. Waarschijnlijk is de Kruiswaterbrug de eerste en de laatste brug die met dit aspect te maken heeft gehad.

Vanwege deze reden wordt deze eis voor het onderzoek buiten beschouwing gelaten. Het buiten beschouwing laten van deze eis zorgt ervoor dat in ieder geval meer mogelijk is om de spanningen op te voeren en de doelstelling te bereiken. Zo is het vanzelfsprekend om terug te gaan naar vier dwarsdragers en een dunnere dekplaat.



Hoofdrapport

6.3 Uitgangspunten

De uitgangspunten die van toepassing zijn voor de optimalisatie van de Kruiswaterbrug zijn gebaseerd op de normen en richtlijnen en vormen de eisen die van toepassing zijn voor dit onderzoek.

Gevolgklasse (CC) en Betrouwbaarheidsklasse (RC)

Voor de constructie geldt gevolgklasse 3 (CC3) en betrouwbaarheidsklasse RC3. Volgens de NEN-EN 1990 NB Tabel 8.1 heeft het brugdek een levensduur van 100 jaar.

Normen en richtlijnen met Nationale Bijlagen

NEN-EN 1090-2 / NB	Technische eisen voor staalconstructies
NEN-EN 1990 / NB	Grondslagen voor het constructief ontwerp
NEN-EN 1991-2 / NB	Verkeersbelasting op bruggen
NEN-EN 1993-1-1 / NB	Ontwerpen en berekenen van staalconstructies, algemene regels
NEN-EN 1993-1-8 / NB	Ontwerpen en berekenen van staalconstructies, ontwerp en berekenen van verbindingen
NEN-EN 1993-1-9 / NB	Ontwerpen en berekenen van staalconstructies, vermoeiing
NEN-EN 1993-2 / NB	Ontwerpen en berekenen van staalconstructies, stalen bruggen
ROK versie 1.3	Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken
Vermoeiing en HSS	Use and Application of High Performance Steels (HPS) for Steel Structures

Gebruikte software

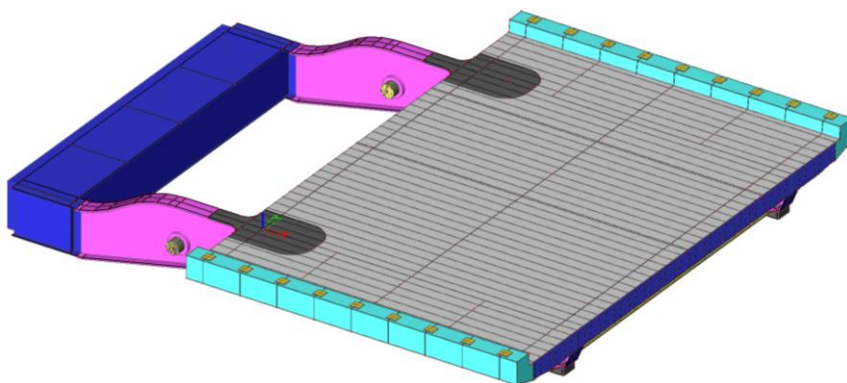
- Office 2007
- SCIA Engineer 15.3
- AutoCAD LT 2013

Hoofdrapport

6.4 Huidige model

Voordat gestart kan worden met de optimalisatie, is het belangrijk dat een goed basismodel aanwezig is. ITBB heeft destijds het model opgebouwd in ANSYS en de resultaten uit dit model gerapporteerd. VSF gebruikt SCIA Engineer als rekensoftware. Om een goed vergelijk te kunnen maken, wordt het model opnieuw opgebouwd in SCIA waarbij de resultaten uit SCIA overeen moeten komen met de resultaten zoals ITBB die heeft gerapporteerd uit ANSYS.

In Bijlage 8 zijn de resultaten van ITBB vergeleken met die van het huidige ontwerp doorgevoerd in SCIA (Figuur 19). Na het invoeren van de plaatafmetingen van de verschillende onderdelen, de belastingen en de belastingscombinaties zijn de resultaten naast elkaar gelegd ter vergelijking. Daarbij is gekeken naar de maatgevende vervormingen (BGT) en de optredende spanningen (UGT).



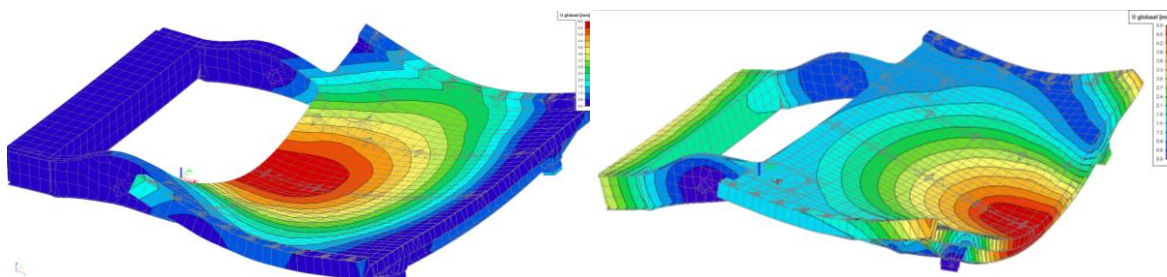
Figuur 19: Ontwerp van de Kruiswaterbrug gemodelleerd in SCIA zoals deze is opgeleverd door VSF. SCIA (2016)

Vervorming:

De vervormingen die SCIA berekent heeft zijn weergegeven in Tabel 5. In dezelfde tabel zijn de vervormingen van ITBB opgenomen. Figuur 20 geeft weer hoe de doorbuigingen ten gevolge van de tandemstelsels geschiedt.

Tabel 5: Vervormingen van de voor- en achterhar in ANSYS en SCIA. SCIA (2016)

Onderdeel	ITBB met Ansys	Model in SCIA
Achterhar	4,1793 mm	5,7 mm
Voorhar	3,3163 mm	4,7 mm



Figuur 20: Maatgevende vervormingen op de achterhar (5,7 mm) en voorhar (4,7 mm). SCIA (2016)

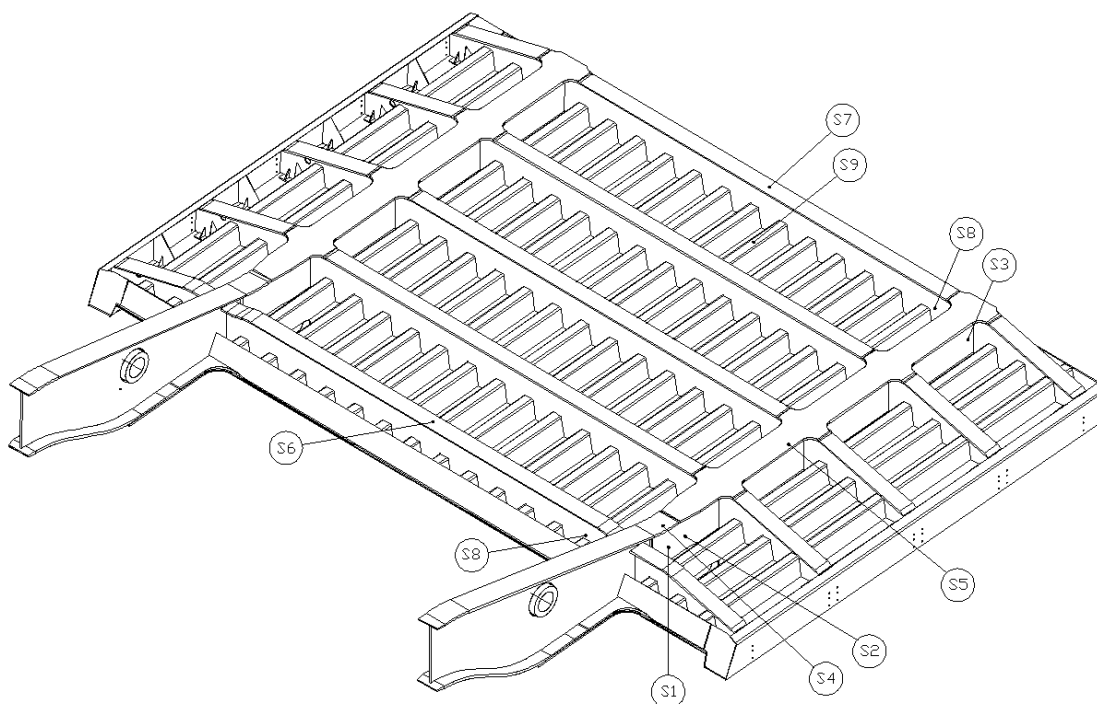
Hoofdrapport

Spanningen:

In Tabel 6 zijn de resultaten weergegeven van de optredende spanningen in de twee modellen op vergelijkbare posities van het model (Figuur 21). Merk op dat het bij SCIA gaat om spanningsconcentraties tussen bepaalde waarden. Per onderdeel zijn verschillende spanningen gegeven. Deze verschillende waarden worden verkregen door tandemstelsels die zich kunnen verplaatsen over het brugdek (simulaties). Voor het complete rapport met de spanningsconcentraties van de vergelijking wordt verwezen naar Bijlage 8.

Tabel 6: Spanningen van het basismodel in SCIA naast de resultaten van ITBB. SCIA (2016) en ITBB (2013)

Onderdeel	locatie	ITBB met Ansys	Model in SCIA
Lijfplaat hoofdligger	S1	128,12 N/mm ²	90 – 120 N/mm ²
	S2	169,43 N/mm ²	150 – 180 N/mm ²
	S3	181,02 N/mm ²	120 – 150 N/mm ²
Onderflens hoofdligger	S4	113,74 N/mm ²	90 – 120 N/mm ²
	S5	149,45 N/mm ²	120 – 150 N/mm ²
Onderflens dwarsdrager	S6	90,642 N/mm ²	90 – 120 N/mm ²
	S7	140,37 N/mm ²	120 – 150 N/mm ²
Lijfplaat dwarsdrager	S8	345,00 N/mm ²	318 – 348 N/mm ²
Troggen	S9	188,25 N/mm ²	120 – 150 N/mm ²



Figuur 21: Onderaanzicht van het basismodel Kruiswaterbrug met de locaties van de spanningen. VSF (2013)

De spanningen op locatie S8 in de lijfplaat van de dwarsdrager gelden voor de situatie wanneer de troggen doorlopen. Wanneer geen trogopeningen in de dwarsdrager zitten treden er in SCIA spanningen op met waarden tussen de 120 en 150 N/mm². Omdat 345 N/mm² de enige waarde was waarmee de vergelijking kon worden gemaakt, zijn in de Bijlage 8 de spanningen van tussen de 120 en 150 N/mm² omgerekend naar de spanningen die in de bovenstaande tabel staan vermeld voor de lijfplaats van de dwarsdrager. Omdat de spanning gunstiger (lager) wordt heeft ITBB de dwarsdrager veranderd (laten doorlopen) zonder dit verder aan te tonen.



Hoofdrapport

Omdat het basismodel van essentieel belang is voor de volgende stap, is het model gecontroleerd door een senior constructeur van VSF met veel kennis van SCIA. De resultaten uit SCIA komen in zekere mate overeen met de resultaten uit het rapport van ITBB. Op sommige onderdelen is toch net een verschil aanwezig. Daarvoor zijn een aantal verklaringen.

Model met vereenvoudigde onderdelen:

Het is voor VSF niet interessant als de afstudeerder zich twintig weken focust op het perfect modelleren van de Kruiswaterbrug in SCIA. Om die reden zijn er een aantal onderdelen vereenvoudigd:

- Het afschot van de brug is buiten beschouwing gelaten.
- De hoofdliggers rondom de draaipunten verschillen licht van elkaar. Dit verschil is niet gemodelleerd.
- Het contragewicht zelf vormt geen onderdeel voor dit onderzoek. HSS wordt hierin niet toegepast, maar voor de vervormingen van het geheel is het wel belangrijk dat de massa's overeenkomen. Door zeer dikke platen te modelleren, is de juiste belasting ten gevolge van het eigen gewicht verkregen, maar verder is het een vereenvoudigde invoer waardoor de verdelingen in de kist niet 100% overeenkomen met de werkelijkheid.
- In de cilinder van het draaipunt zijn dubbele massieve staven gebruikt waarbij de één is gemodelleerd als 2D element en de andere als 1D-staaf. Dit was nodig om de brug te verbinden met de opleggingen. Dit is ook gedaan aan de andere kant bij de oplegblokken. Hierdoor ontstaat er meer stijfheid en een grotere belasting ten gevolge van het eigen gewicht.

ANSYS vs. SCIA:

De resultaten van de spanningen en vervormingen komen uit twee verschillende modelleringprogramma's. Beide programma's tonen 3D volumes, maar in het berekenen van de modellen verschillen de programma's. ANSYS is uitgebreider, omdat het in staat is te meshen in de dikterichting. SCIA kan alleen netverfijningen toepassen op 2D vlakken. Door het gebruik van verschillende programma's is het logisch dat niet exact dezelfde resultaten worden gevonden.

Netverfijning (mesh):

Hoe fijner de netinstelling, des te nauwkeuriger zijn de resultaten. Dit wordt in Bijlage 9 aangetoond met een eenvoudige handberekening. Ook wordt aangetoond dat een grof net al een redelijke uitkomst geeft. Omdat het gaat om een redelijk groot model wordt een grove netverfijning toegepast voor het gehele model. Door dit te doen wordt de laadtijd gereduceerd en komen de resultaten in de buurt van de resultaten van ITBB. De uitkomsten kunnen door de aanwezigheid van een grovere netverdeling licht afwijken van de resultaten verkregen door ITBB. Voor de netverdeling wordt geadviseerd 3 á 4 maal de dikte van het staal te nemen, wat overeenkomt met ongeveer 100 mm. Voor dit model is 400 mm toegepast.

Maatgevende vervormingen:

In hoofdstuk 3.3 zijn de vervormingseisen behandeld voor de voor- en achterhar en wat het belang daarvan is. In SCIA is veel tijd besteed om deze overeen te laten komen. Aan de hand van de bovengenoemde punten is vastgesteld dat dit niet mogelijk is. De doorbuigingsresultaten in Tabel 5 die met SCIA zijn bepaald, bedragen 1,4 á 1,5 mm meer dan de resultaten uit ANSYS. De bepaalde doorbuigingen worden in het basismodel als acceptabel aangehouden. Zodoende worden doorbuigingen van rond de 6,0 mm als toelaatbaar beschouwd voor de achterhar en rond de 5,0 mm voor de voorhar.

Hoofdrapport

6.5 Nieuw model

6.5.1 Optimalisatie

Nu het basismodel klopt, kan in de volgende stap het model worden aangepast. Tijdens de aanpassingen is rekening gehouden met de toegestane vervormingen. De Figuren 23 tot en met 26 bestaan uit schetsen om aan te tonen wat per onderdeel is gewijzigd. Voor de voor- en achterhar moet een waarde rond de 6,0 mm worden aangehouden. Voor de overige onderdelen geldt $1/500 \cdot L$. Om de spanningen op te voeren zijn de volgende aanpassingen doorgevoerd:

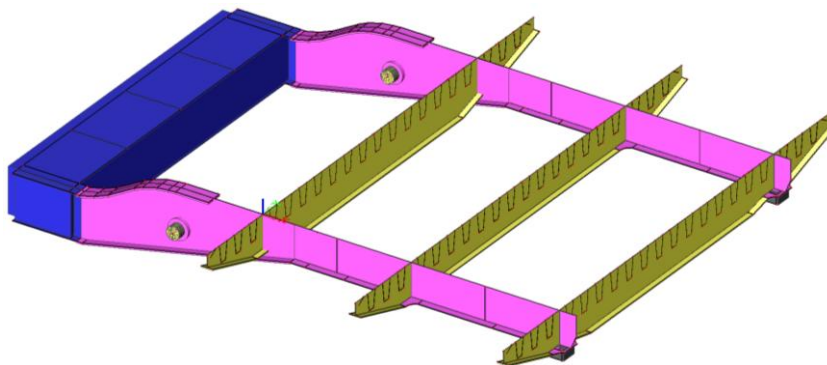
- Er zijn twee dwarsdragers verwijderd (van vijf naar drie dwarsdragers);
- Het dek is verdund naar 18 mm
- Hoofdliggers zijn smaller en dunner gemaakt op twee locaties, namelijk onder het brugdek en rondom het draaipunt;
- De middelste dwarsdrager is smaller gemodelleerd, ook is de flens dunner gemaakt.

Om qua vervorming te blijven voldoen zijn aanpassingen aan de onderstaande onderdelen vereist:

- De voor- en achterhar zijn iets hoger gemaakt;
- De troggen zijn iets hoger geworden.

Twee dwarsdragers minder:

Na het verwijderen van twee dwarsdragers is het model in Figuur 22 afgebeeld. Door een grotere overspanning nemen zowel de doorbuiging als de spanningen toe.



Figuur 22: Draagstructuur van het nieuwe model van de Kruiswaterbrug. SCIA (2016)

Dekplaat:

In hoofdstuk 6.2 is behandeld dat een dikkere dekplaat is toegepast dan nodig was om de geluidsafstraling te reduceren. Na de informatie over de Van Brienoordbrug, behandeld in hoofdstuk 3.5 en de informatie die wordt verschaft over geadviseerde diktes voor brugdekken volgens de Eurocode, is gekozen om een dikte van 18 mm te modelleren.

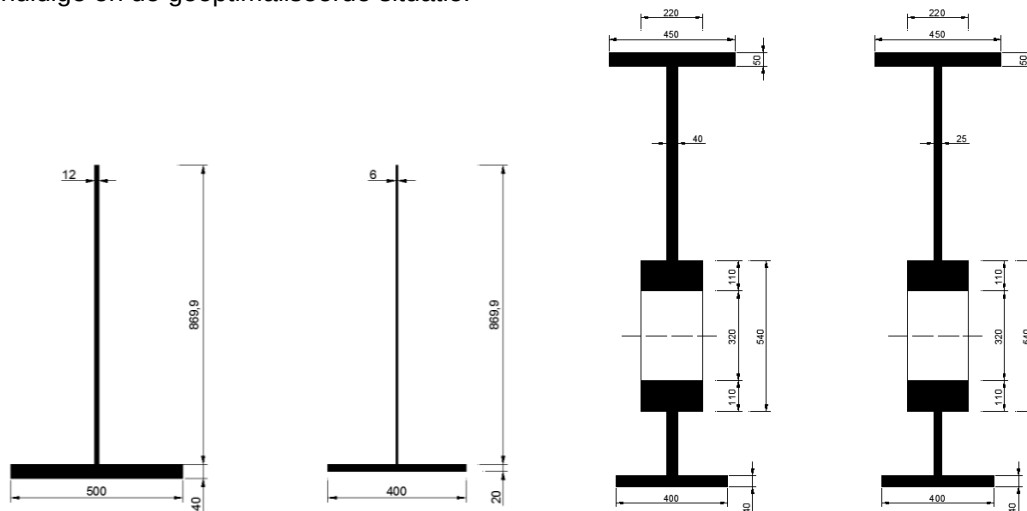


Figuur 23: Aanpassing van de dekplaat. Voorheen 22 mm, nu 18 mm.

Hoofdrapport

Hoofdligger:

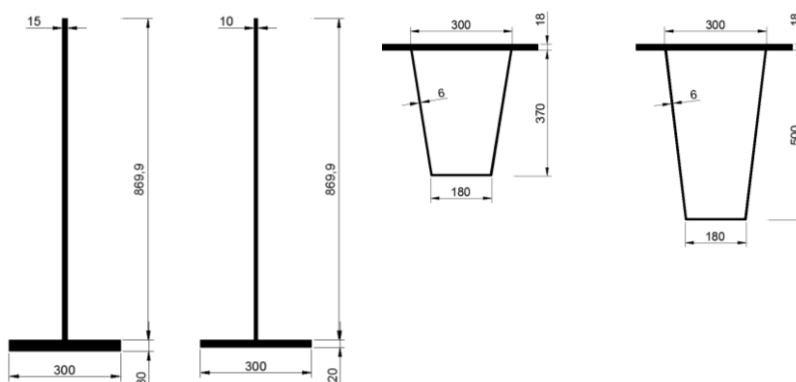
De hoofdligger is op twee locaties aangepast. Onder het brugdek zijn van de hoofdligger zowel het lijf als de onderflens dunner gemaakt. De hoofdligger rondom het draaipunt heeft slechts een dunner lijf gekregen. Op de onderstaande tekeningen zijn doorsneden van de hoofdliggers afgebeeld van de huidige en de geoptimaliseerde situatie.



Figuur 24: Aanpassingen van de hoofdliggers. Links de hoofdligger onder het brugdek en rechts die rond het draaipunt.

Middelste dwarsdrager en troggen:

De middelste dwarsdrager heeft niet de doorbuigingseis die geldt voor de voor- en achterhar. Doordat meer vervormingen worden toegelaten, zijn van deze ligger het lijf en de flens dunner uitgevoerd. Het lichter uitvoeren van deze dwarsdrager, in combinatie met het weglaten van twee dwarsdragers, betekent dat grotere troggen nodig zijn om te voldoen aan de vervormingseisen. In hoofdstuk 6.5 worden de doorbuigingen van de onderdelen gecontroleerd.

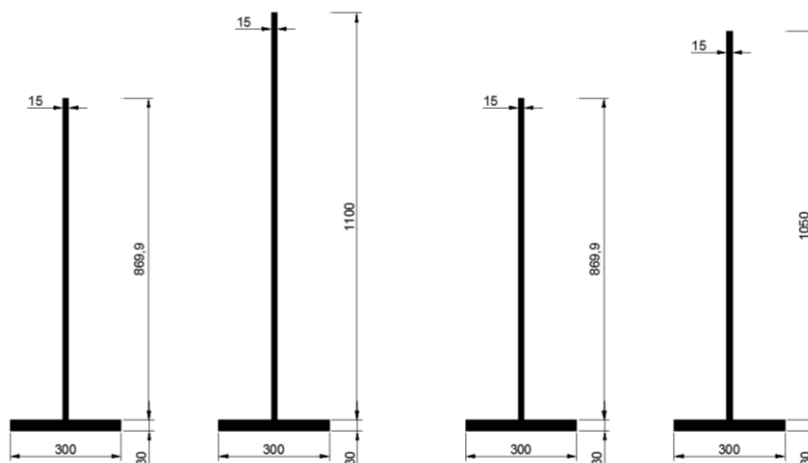


Figuur 25: Links de gemaakte aanpassing voor de middelste dwarsdrager en rechts de nodige aanpassing voor de troggen.

Hoofdrapport

Voor- en achterhar:

Rekening houdend met de eis die gesteld is voor de maximale doorbuiging van de voor- en achterhar, is het net als bij de troggen nodig een hogere weerstand te creëren tegen vervorming. Door de liggers in de hoogte aan te passen, neemt het traagheidsmoment veel toe. De hoogte werkt immers tot de derde macht in de formule $I = (1/12)bh^3$. In onderstaande schets zijn de aanpassingen aangegeven. Het laten toenemen van de constructiehoogte vormt geen belemmering voor de vrije doorvaart omdat deze liggers zich buiten het profiel van vrije ruimte bevinden.



Figuur 26: Links de gemaakte aanpassing voor de achterhar en rechts die van de voorhar.

Hoofdrapport

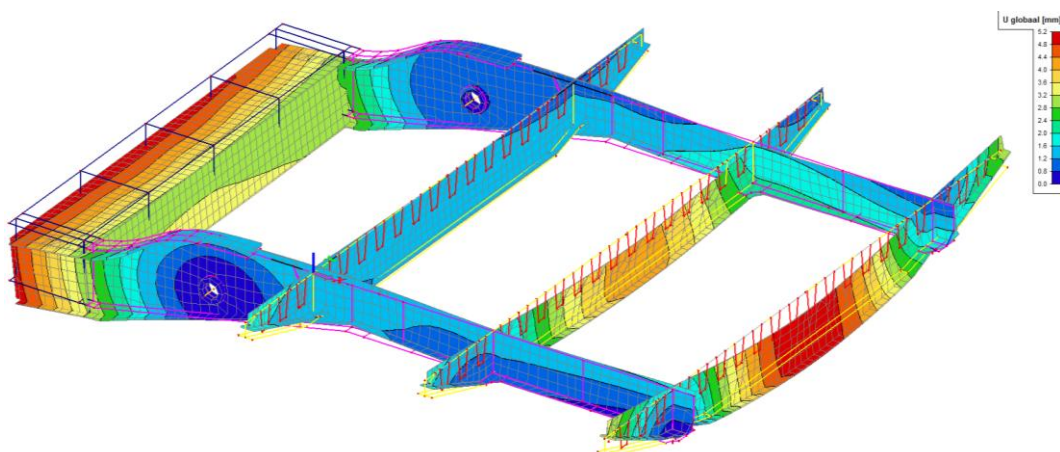
6.5.2 Vervormingen

Voordat gekeken wordt naar de aanwezige spanningen, wordt eerst gecontroleerd of de onderdelen voldoen qua vervorming.

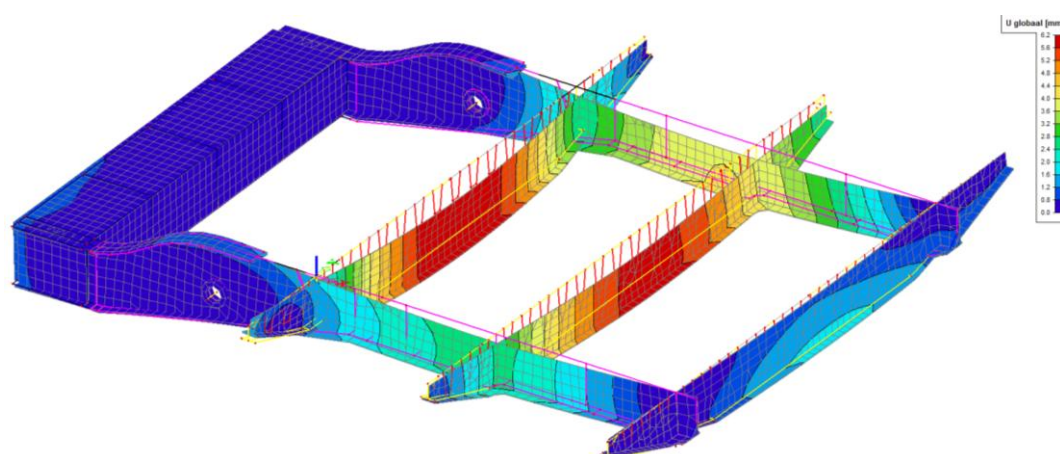
Tabel 7: Toegestane en optredende vervormingen van het geoptimaliseerde model.

Onderdeel	Toegestane vervorming	Optredende vervorming SCIA
Voorhar	$\pm 5,0$ mm	5,2 mm
Achterhar	$\pm 6,0$ mm	6,2 mm
Middelste dwarsdrager	17,2 mm	8,3 mm
Troggen	7,92 mm	7,6 mm
Hoofdligger	7,92 mm	7,3 mm

In Tabel 7 is te zien dat zoveel mogelijk is geprobeerd de grens op te zoeken. Voor de middelste dwarsdrager kon deze grens niet worden bereikt, omdat de troggen dan meegaan met de dwarsligger. In Bijlage 10 zijn de verschillende simulaties weergegeven van de optredende vervormingen. In dit rapport zijn in Figuur 27 en Figuur 28 slechts die van de buitenste dwarsliggers weergegeven.



Figuur 27: Vervorming van 5,2 mm op de voorhar. SCIA (2016)

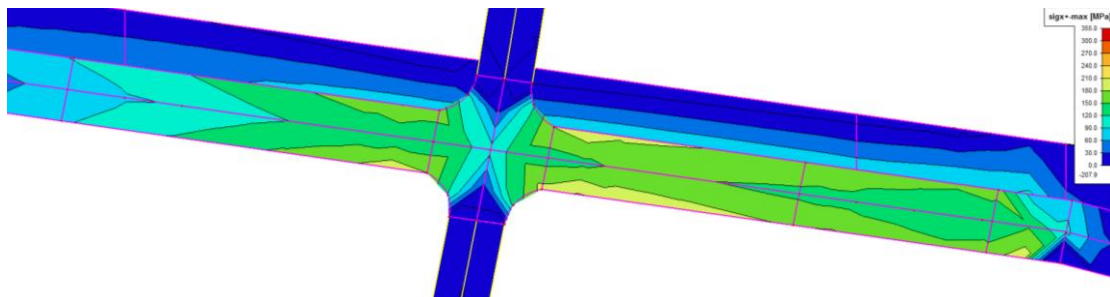


Figuur 28: Vervorming van 6,2 mm ter plaatse van de achterhar. SCIA (2016)

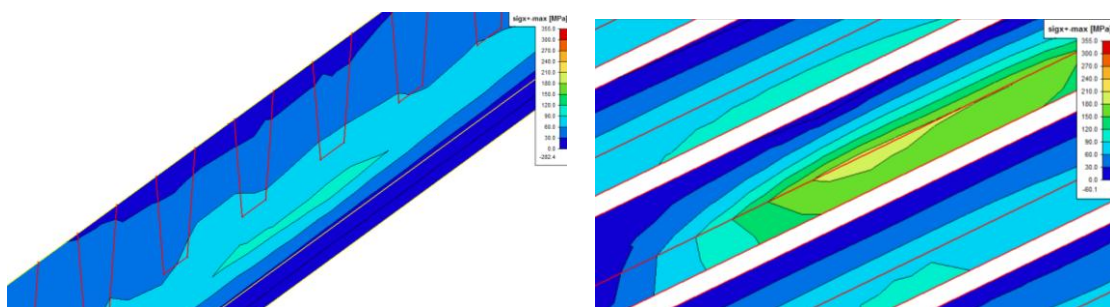
Hoofdrapport

6.5.3 Spanningen

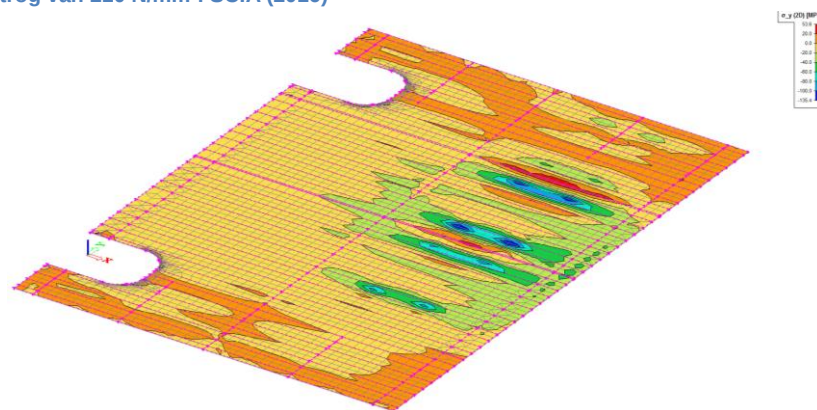
Na het berekenen van de spanningen in SCIA valt op dat de spanningen toenemen maar voor veel onderdelen niet boven de vloeigrens van S355 komen. Hieronder zijn een paar figuren afgebeeld met de bijbehorende spanningen.



Figuur 29: Onderflens van de hoofdligger met een maximale spanning van 240 N/mm². SCIA (2016)



Figuur 30: Links de middelste dwarsdrager met een spanning van 120 N/mm². Rechts de grootst optredende spanning in een trog van 210 N/mm². SCIA (2016)



Figuur 31: Het dek met 135 N/mm² als grootste spanning die voorkomt. SCIA (2016)

Bovenstaande simulaties tonen aan dat het niet mogelijk is om in een constructie, waarin stijfheid een belangrijke rol speelt, de spanningen te verhogen tot boven de 355 N/mm². Voor deze onderdelen loont het niet om S460 toe te passen. Hetzelfde geldt voor de voor- en achterhar waar de stijfheid eveneens een grote rol speelt. In Bijlage 10 worden de overige onderdelen behandeld waarbij S355 na de optimalisatie van toepassing blijft. In hoofdstuk 6.5.4. worden de onderdelen behandeld waar het wel loont om S460 toe te passen.

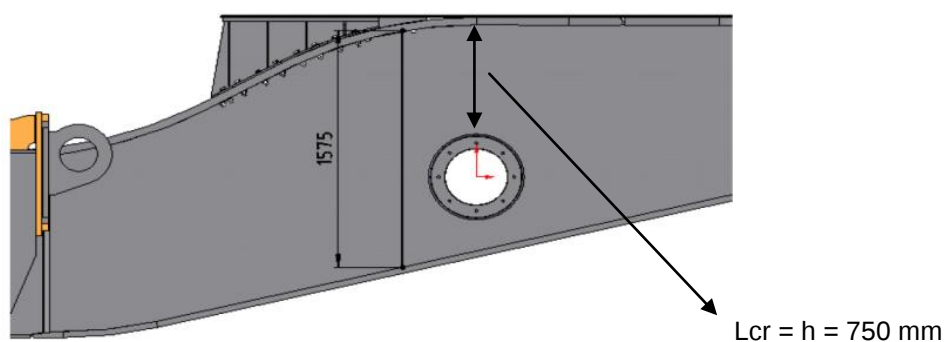
Hoofdrapport

6.5.4 Onderdelen in HSS

HSS in het lijf van de hoofdligger rondom het draaipunt:

Uit het rapport van ITBB was de spanning boven het draaipunt de enige locatie waar de spanning relatief hoog was, namelijk $256,56 \text{ N/mm}^2$. Op deze locatie (Figuur 32) worden de krachten van het brugdek ingeleid en naar de opleggingen afgedragen. Door deze inleiding van krachten ontstaat er een hoge spanningsconcentratie. Door hier het lijf met 15 mm te reduceren is de spanning toegenomen tot $358,9 \text{ N/mm}^2$. Het dunner uitvoeren van het lijf wordt in Bijlage 10 aangetoond als haalbaar. Voor de optimalisatie is gekeken naar:

- De klassebepaling voor de maximale breedte-dikteverhoudingen van het op buiging belaste onderdeel
- Lokale stabiliteit boven het draaipunt (knikcontrole)
- Optredende spanningen door een zijwaartse verplaatsing van 4,0 mm ten gevolge van de temperatuur ($\Delta T = 30 \text{ K}$)



Figuur 32: Aanzicht van de hoofdligger rondom het draaipunt van de brug. Afbeelding rapport ITBB (2013)

Klassebepaling

Met tabel 5.2 uit de NEN-EN 1993-1-1+C2:2011 is aangetoond dat het profiel binnen klasse 3 valt na de optimalisatie van het lijf en het aanpassen van S355 naar S460. Hierdoor veranderen er twee onderdelen voor de klassebepaling, namelijk de dikte t en de ϵ .

$$\begin{aligned}\epsilon &= \sqrt{(235 / f_y)} \\ \epsilon &= \sqrt{(235 / 460)} = 0,71 [-]\end{aligned}$$

Voor klasse 3 geldt de volgende formule:

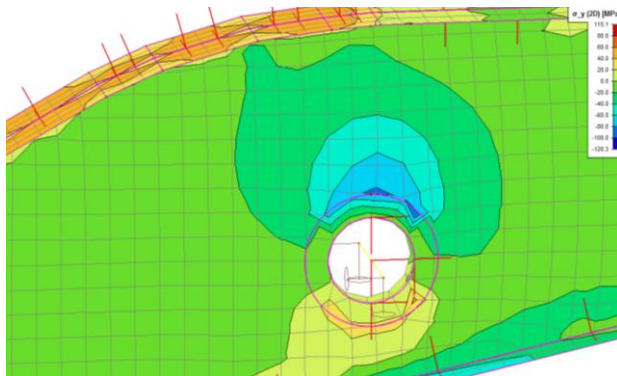
$$\begin{aligned}c/t &\leq 124 \epsilon \\ 1575 / 25 &\leq 124 * 0,71 \\ 63 &\leq 88,04\end{aligned}$$

Doordat de berekende waarde onder de bovengrens blijft, betekent dit dat het lijf ten gevolge van buiging niet gevoelig is voor plooi. Het lijf naast het draaipunt is niet gevoelig voor knik, omdat hier de kracht niet wordt ingeleid. Voor de overige optimalisaties uit hoofdstuk 6.5.1 is tevens gebruik gemaakt van tabel 5.2 uit de NEN-EN 1993-1-1. Hierbij is rekening gehouden dat de onderdelen binnen profielklasse 3 vallen.

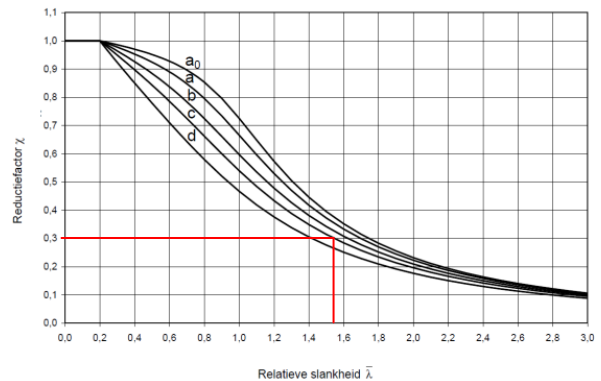
Hoofdrapport

Knik

Voor de stabiliteitscontrole van de lijfplaat boven het draaipunt wordt de optredende spanning zonder de zijwaartse verplaatsing van 4,0 mm gebruikt. De spanning berekend door ITBB met Ansys bedroeg 55 N/mm². In Bijlage 10 is dezelfde waarde verkregen met het overgedimensioneerde model. Wanneer het lijf met een dikte van 25 mm wordt gemodelleerd, neemt de spanning toe tot 120,3 N/mm² (Figuur 33). Deze spanning wordt gecontroleerd op knik conform de NEN-EN 1993-1-1 + NB.



Figuur 33: Spanning van 120,3 N/mm² bij een lijfdikte van 25 mm. SCIA (2016)



Figuur 34: Reductiefactor: Figuur 6.4 van de NEN-EN 1993-1-1

Relatieve slankheid

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \pi \sqrt{E / f_y} = 93,9\varepsilon &= 67,1 &[-] \\ i_y &= \sqrt{(1/12) * t_w^2} &= 7,216 &[m] \\ \bar{\lambda} &= L_{cr} / (i_y * \lambda_1) &= 1,548 &[-]\end{aligned}$$

Aan de hand van de berekende relatieve slankheid kan voor knikkromme c de reductiefactor χ worden afgelezen (Figuur 34). Hieronder wordt de reductiefactor ter controle exact berekend bij een imperfectiefactor α van 0,49.

Waarde bepalend voor de reductiefactor

$$\Phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) = 2,029 \quad [-]$$

Reductiefactor knik

$$\chi = 1 / (\Phi + \sqrt{(\Phi^2 - \bar{\lambda}^{-2})}) = 0,299 \quad [-]$$

Knikcontrole

$$\sigma_{toel} = \chi * f_y / \gamma_{M1} = 137,7 \quad [N/mm^2]$$

$$UC = \sigma_{optredend} / \sigma_{toel} = 0,87 \quad [-]$$

Hoofdrapport

Spanning bij een zijwaartse verplaatsing

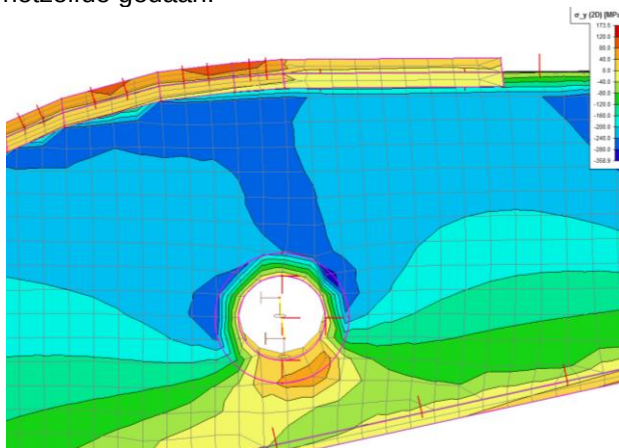
Na in SCIA de zijwaartse verplaatsing te hebben doorgevoerd wordt in Figuur 35 een spanning verkregen van $358,9 \text{ N/mm}^2$. Deze spanning neemt dermate toe doordat de ligger verplaatst over zijn vrije lager in de y-richting van het model. De verplaatsing (ΔL) is hieronder berekend.

$$\Delta L = \alpha * L * \Delta T \quad \text{waarin:}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 12 \cdot 10^{-6} \\ L &= 8600 \text{ [mm]} \\ \Delta T &= 30 \text{ [K]} \end{aligned}$$

$$\Delta L = 3,096 \text{ [mm]}$$

Omdat voor de gerealiseerde Kruiswaterbrug 4,0 mm werd aangehouden door ITBB, is voor dit model hetzelfde gedaan.



Figuur 35: Model met de bijbehorende spanning van $358,9 \text{ N/mm}^2$ bij een lijfdikte van 25 mm en een zijwaartse verplaatsing van 4,0 mm. SCIA (2016)

De spanning die wordt verkregen in het lijf van de hoofdligger rondom het draaipunt kan niet meer worden opgenomen door S355. Voor deze spanning biedt S460 een oplossing.

Tabel 8: Mechanische eigenschappen van normaalgeglueid staal. Tabel 5 NEN-EN 10025-3

Aanduiding	Minimumvloeigrens bij nominale dikte	
	$t \leq 16 \text{ mm}$	$t > 16 \text{ mm} \text{ \& } t \leq 40 \text{ mm}$
S355 N/NL	355 N/mm^2	345 N/mm^2
S460 N/NL	460 N/mm^2	440 N/mm^2

$$UC = 358,9 / 345 = 1,04 \text{ [-]} \quad \text{voldoet niet}$$

$$UC = 358,9 / 440 = 0,816 \text{ [-]} \quad \text{voldoet}$$

Hoofdrapport

HSS in het lijf van de hoofdligger onder het brugdek:

Door twee dwarsdragers uit het huidige model te halen, worden de plaatoppervlakten groter en zodoende gevoeliger voor plooi. De dwarsdragers dienden als dwarsverstijvers voor de hoofdliggers. Het slanker maken van het lijf zorgt er des te meer voor dat plooi gevoeligheid moet worden gecontroleerd. Het lijf van de hoofdligger is van 12 mm omgezet naar 6,0 mm. Voor het lijf onder het brugdek is een plooi controle gedaan die is toegelicht in Bijlage 10. Hieronder worden de conclusies gegeven die kunnen worden gedaan na een controle met S355 en S460.

Aan het eind van de berekening moet de grootste optredende spanning in het lijf lager uitvallen dan de berekende plooi spanning:

$$UC = \sigma_{2;d} / \sigma_{plooi} \leq 1,0$$

De plooi spanning wordt berekend door de vloeigrens te reduceren. De uitkomst van deze reductie is afhankelijk van de geometrie van het plaatveld, de relatieve slankheid van de plaat en de aanwezige vloeispanning.

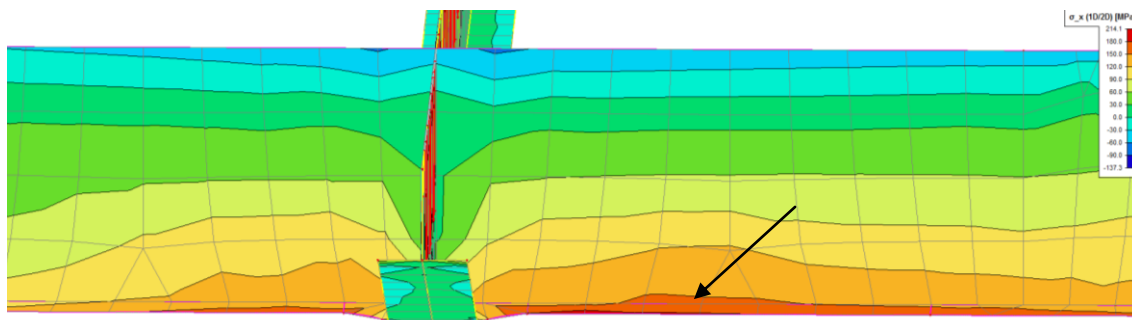
$$\sigma_{plooi} = \sigma_{plooi;rel} * f_{yd} \quad \text{waarin:}$$

$$\sigma_{plooi;rel} = 1/\lambda^2_{plt;rel} + 0,132 \lambda_{plt;rel} - 0,17$$

$$\lambda_{plt;rel} = \sqrt{(f_{yd} / \sigma_{i;k;v})}$$

Uit deze berekeningen met S355 en S460 (Bijlage 10) blijkt dat een hogere plooi spanning overblijft wanneer S460 wordt gereduceerd dan die van S355. Hieronder staan de resultaten van de berekening:

Figuur 36 toont de grootste optredende spanning in het lijf van de hoofdligger ($\sigma_{2;d}$) = 180 N/mm²



Figuur 36: Spanning in het lijf die gecontroleerd wordt op plooi met de grootste spanning van 180 N/mm². SCIA (2016)

$\sigma_{plooi\ 355}$	=	$0,501 * 355$	=	$177,83 \text{ N/mm}^2$	voldoet niet
$\sigma_{plooi\ 460}$	=	$0,4176 * 460$	=	$192,09 \text{ N/mm}^2$	voldoet

Hoofdrapport

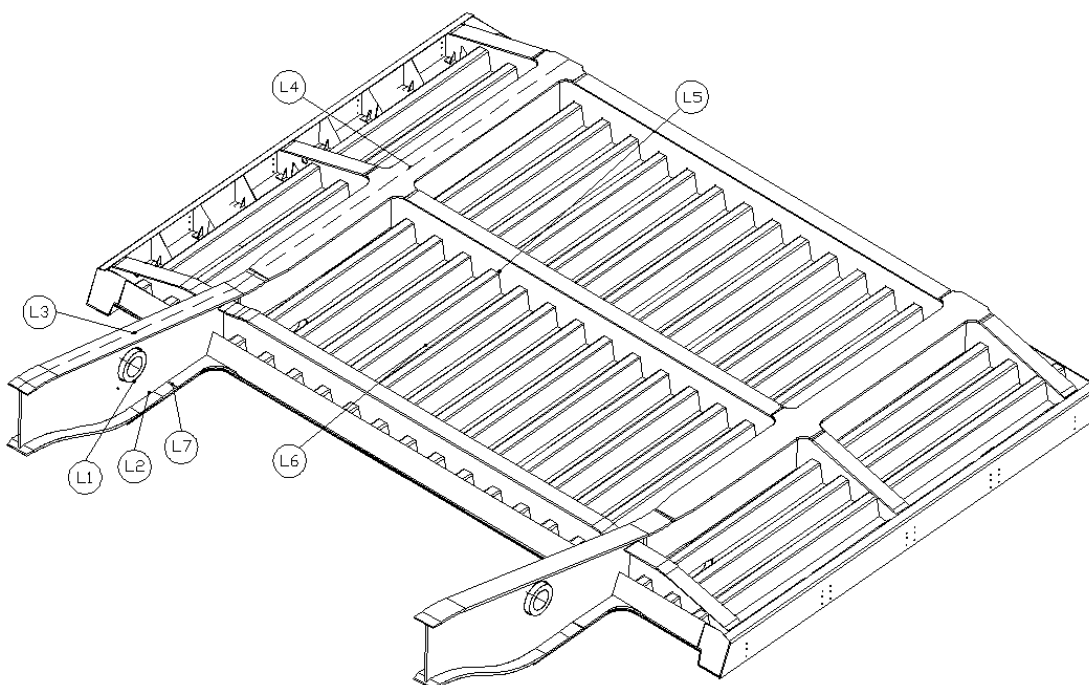
6.6 Lassen en vermoeiing

In hoofdstuk 3.5 is de theorie van vermoeiing in het algemeen behandeld en hoe het werkt met HSS. In dit hoofdstuk worden de lassen voor het geoptimaliseerde model met onderdelen in HSS gecontroleerd. Ook de onderdelen waar geen HSS is verwerkt zullen gecontroleerd worden op vermoeiing. De spanningen afkomstig van simulaties en vermoeiingsberekeningen zijn opgenomen in Bijlage 11.

De controles in Tabel 9 zijn gedaan aan de hand van gevalideerde rekensheets van VSF. Uit de resultaten blijkt dat te veel schade ontstaat. Alle schadecontroles moeten namelijk onder de 1,0 blijven. Zowel de lassen in combinatie met het toepassen van HSS als de lassen van het geoptimaliseerde model zijn niet in staat voldoende weerstand te bieden. De optredende schades zijn per detail bepaald met één enkele simulatie. Het controleren van de overige 18 simulaties zal alleen maar meer schade opleveren. In Figuur 37 zijn de locaties van de lassen voor de vermoeiingscontrole aangegeven.

Tabel 9: Vermoeiingscontrole van een aantal lassen van het geoptimaliseerde model

las	locatie	Detailcategorie $\Delta\sigma_c$	Spanning $\Delta\sigma_i$	Schade
Draaipunt	L1	100 N/mm ²	15 N/mm ²	0
Onderflens nabij het draaipunt	L2	100 N/mm ²	28 N/mm ²	2,70
Bovenflens nabij het draaipunt	L3	100 N/mm ²	40 N/mm ²	7,87
Onderflens onder het brugdek	L4	100 N/mm ²	32 N/mm ²	4,03
Trog aan dwarsdrager	L5	80 N/mm ²	42 N/mm ²	16,47
Trog aan dekplaat	L6	125 N/mm ²	70 N/mm ²	2,70
Hamerkopplaat en hoofdligger	L7	80 N/mm ²	44 N/mm ²	20,47

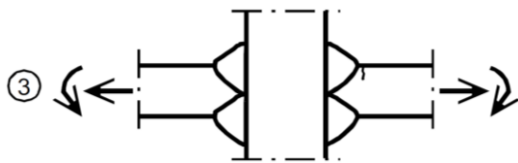


Figuur 37: Onderaanzicht van het geoptimaliseerde model met de locaties van de lassen.

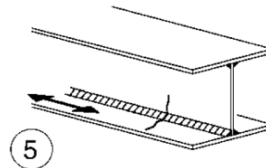
Hoofdrapport

6.6.1 Lassen met HSS

Het lijf van de hoofdligger rondom het draaipunt en onder het brugdek is in dit onderzoek uitgevoerd in HSS. Uit Tabel 9 is één lasdetail in staat weerstand te bieden tegen de optredende spanning. Op locatie L1 wordt de spanning gegenereerd door de buiging van het brugdek. De lage spanning van 15 N/mm^2 blijft volgens de berekeningen onder de cut off limit. Hierdoor ontstaat voor 19 simulaties geen vermoeiingsschade. De las die wordt toegepast is een volledige doorgelaste K-naad (Figuur 38) met een detailcategorie van 100 N/mm^2 .

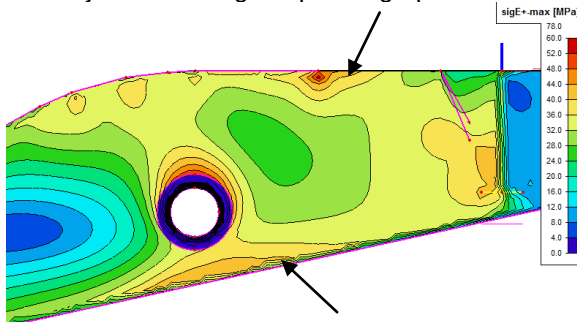


Figuur 38: Las L1 rondom het draaipunt
NEN-EN 1993-1-9

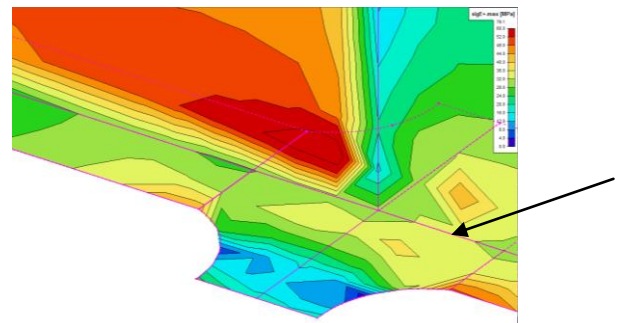


Figuur 39: Lassen flenzen en lijf op locaties L2, L3 en L4
NEN-EN 1993-1-9

Bij de andere lassen, die tussen de flenzen en het lijf, wordt de levensduur van 100 jaar niet gehaald omdat de vermoeiingcontrole teveel schade genereert. In Figuur 39 is het lasdetail weergegeven met een detailcategorie van 100 N/mm^2 . In Figuur 40 en Figuur 41 wordt ingezoomd op de spanningsconcentraties van de locaties L2, L3 en L4. De spanningsconcentraties op de overgang van het lijf naar de flens zijn de optredende spanningen ($\Delta\sigma_i$) die in de rekensheets wordt ingevoerd. In het onderzoek is geprobeerd de spanningen te verhogen om gebruik te kunnen maken van de verbeterde mechanische eigenschappen van S460. Uit de resultaten van SCIA blijkt dat daarbij ook de spanningen in de overgangen (lassen) van de platen toenemen. Uit Tabel 9 wordt duidelijk dat de lasdetails niet in staat zijn de verhoogde spanning op te kunnen nemen.



Figuur 40: Las L2 met $\Delta\sigma_i = 28 \text{ N/mm}^2$ en las L3 $\Delta\sigma_i = 40 \text{ N/mm}^2$



Figuur 41: Las L4 met een $\Delta\sigma_i = 32 \text{ N/mm}^2$

De optredende spanning van 28 N/mm^2 heeft een designspanning van $37,8 \text{ N/mm}^2$. Deze waarde overschrijdt de cut off limit van $27,1 \text{ N/mm}^2$ dat hoort bij detailcategorie 5 uit Figuur 37. Ondanks dat de designspanning niet heel groot is, zorgt de spanningsconcentratie in de las voor een vermoeiingsschade van 2,70. Uit de Excelberekeningen in Bijlage 11 blijkt dat de volgende factoren, naast de optredende spanning, invloed hebben op vermoeiing in combinatie met HSS:

- De helling $m = 5$ verandert in $m = 3$ vanaf de cut off limit. Hierdoor neemt de schade toe doordat minder wisselingen worden toegelaten;
- Het hoge percentage van 40% van één simulatie zorgt in de gecontroleerde lassen voor veel optredende wisselingen. De levensduur van 100 jaar en de 2.500.000 wisselingen per jaar verhogen tevens deze waarde.

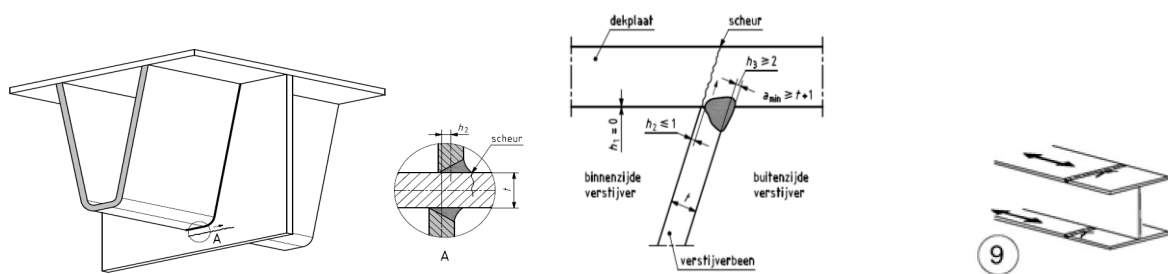
Per simulatie hebben de bovenstaande punten een nadelig effect voor de bepaling van de vermoeiingsschade volgens de controleformule uit de rekensheets:

$$\text{Schade } D_o = \text{optredende aantal wisselingen} / \text{toelaatbare aantal wisselingen } (N_i) \leq 1,0$$

Hoofdrapport

6.6.2 Lassen met S355 na optimalisatie

De lassen in Figuur 42 hebben alleen een hogere spanning verkregen door de optimalisatie van het model. In hoofdstuk 6.4.3 is aangetoond dat geen HSS nodig is om de spanningstoenames op te kunnen nemen. Hiervoor is S355 geschikt. De spanningsconcentraties worden gecontroleerd om aan te tonen of de optimalisatie überhaupt wel mogelijk is. Ondanks dat voor deze lassen wel een helling van $m = 5$ van toepassing is, zorgen de spanningstoenames, ook voor deze scenario's, ervoor dat één enkele simulatie al leidt tot teveel vermoeiingsschade.



Figuur 42: Las L5: trog aan dwarsdrager, las L6: trog aan dekplaat en las L7: hamerkopplaat aan bovenflens. NEN-EN-1993-1-9

Hier geldt wederom dat teveel vermoeiingsschade ontstaat wanneer de spanningen boven de cut off limit komen. Om de totale schade van 19 simulaties onder de 1,0 te houden, moeten voor constructies die gevoelig zijn voor vermoeiing, de designspanningen onder de cut off limit worden gehouden. Alleen op deze manier zal er voldaan worden aan vermoeiing.



Hoofdrapport

7. CONCLUSIE EN AANBEVELING

Naar aanleiding van het onderzoek voor het toepassen van HSS in het brugdek van de Kruiswaterbrug wordt antwoord gegeven op de geformuleerde hoofd en deelvragen.

De hoofdvraag luidt als volgt:

In hoeverre is het mogelijk binnen het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug een gewichtsreductie van het stalen dek te realiseren bij toepassing van S460?

Voor het brugdek van de Kruiswaterbrug is het niet mogelijk gewicht te reduceren door gebruik te maken van de hogere staalkwaliteit S460. Hierdoor levert het mogelijk geen financieel voordeel op.

Deelvragen: Wat is constructief mogelijk aan optimalisaties van het ontwerp van de Kruiswaterbrug door toepassing van HSS / Welke onderdelen van de hoofdconstructie kunnen door middel van HSS lichter worden uitgevoerd?

Door in het SCIA basismodel de hoofdconstructie van de brug te optimaliseren, is geprobeerd de plaatafmetingen van het staal te reduceren. Uit de resultaten blijkt dat de vervormingseisen (vooral bij de voor- en achterhar) en de breedte- dikteverhoudingen ervoor zorgen dat het nauwelijks mogelijk is spanningen te creëren die de vloeigrens van S355 overschrijden. Op twee locaties biedt het toepassen van S460 voordeel ten opzichte van S355. Het betreft het lijf rondom het draaipunt en het lijf van de hoofdligger onder het brugdek. Rondom het draaipunt wordt een spanning gevonden van 358,9 N/mm². Het lijf van de hoofdligger onder het brugdek heeft niet zo'n hoge spanning maar ondervindt een gunstiger effect voor de plooi controle. De gereduceerde plooi spanning blijkt hoger uit te vallen voor gereduceerd S460 dan voor een reductie op de vloeigrens van S355.

Deelvragen: In hoeverre voldoen de lassen aan vermoeiing bij toepassing van S460 in het geoptimaliseerde ontwerp / In hoeverre is vermoeiing bepalend voor het geoptimaliseerde ontwerp van de Kruiswaterbrug?

Ondanks dat het toepassen van HSS een paar voordelen heeft, (ten aanzien van de hoge vloeigrens rondom het draaipunt en voor de plooi en knik controle) blijkt aan het eind van het onderzoek dat de lassen niet genoeg weerstand kunnen bieden tegen de spanningswisselingen om te voldoen aan vermoeiing.

Uit het onderzoek komt naar voren dat juist het willen creëren van hogere spanningen door lichter te construeren ervoor zorgt dat de brug gevoeliger wordt voor vermoeiing. Niet alleen voldoen de lassen niet bij het toepassen van HSS, maar ook de optimalisatie zorgt ervoor dat in de onderdelen met S355 teveel vermoeiingsschade optreedt. Mogelijk verklaard dit waarom de spanningen in het huidige model van de Kruiswaterbrug door ingenieursbureau ITBB zo laag werden gehouden. Bij projecten waar HSS wordt toegepast in bruggen zijn de overspanningen groter dan die van de Kruiswaterbrug. Een grotere overspanning zorgt ervoor dat het eigen gewicht van de constructie maatgevender wordt dan de spanningswisselingen. Zodoende kan, rekening houdend met de vervormingseisen, wel HSS worden toegepast.

Advies:

Aan de hand van de gevonden resultaten in mijn onderzoek wordt Volker Staal en Funderingen geadviseerd geen HSS toe te passen voor stalen brugdekken met een korte overspanning. Om te voldoen aan de eisen met betrekking tot vermoeiing moet in het ontwerp rekening worden gehouden met zulke lage toelaatbare spanningen dat het gebruik van HSS S460 geen meerwaarde oplevert. Voor vergelijkbare projecten blijft het toepassen van S355 voor VSF dus het meest aantrekkelijk.



Hoofdrapport

8. BIBLIOGRAFIE

- [1] Greven, S. (2013, oktober) "Waarom S235 achterhaald is." *Bouwen met staal*, vol. 46, pp 62-63. Geraadpleegd op 3 februari 2016, van http://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/evenementen/BMS_235_S235.pdf
- [2] Van Houdt, J. (2015). De nieuwe Botlekbrug [foto]. Geraadpleegd van <http://defotograaf.eu/blog/botlekbrug-3/>
- [3] Limbomedia (2015). Erasmusbrug [foto]. Geraadpleegd van <http://www.limbomedia.nl/trefwoord/erasmusbrug>
- [4] De Gelderlander (2015, 8 oktober). De oversteek [foto]. Geraadpleegd van <http://www.gelderlander.nl/regio/nijmegen-e-o/nijmegen/opnieuw-actie-voor-70-kilometer-op-de-oversteek-1.5379049>
- [5] Greven, S. (2013, oktober). Uyllanderbrug [foto]. *Bouwen met staal*, vol. 46, pp 63. Geraadpleegd van http://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/evenementen/BMS_235_S235.pdf
- [6] Van Houdt, J. Beeldbank RWS (2007). Maeslantkering [foto]. Geraadpleegd van https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/De_Maeslantkering_is_een_stormvloedkering_op_de_grens_van_Het_Scheur_en_de_Nieuwe_Waterweg_bij_Hoek_van_Holland_406305
- [7] RWS, Beeldbank RWS. (2003). De Galecopperbrug [foto]. Geraadpleegd van https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/A12%20Galecopperbrug%20%20Overzicht%20bruggen%20over%20het%20Amsterdamrijnkanaal%20in%20de%20A12_435004
- [8] Nu. (2014, 3 juni). De Van Brienenoordbrug [foto]. Geraadpleegd van <http://www.nufoto.nl/fotos/464325/storing-van-brienenoordbrug-verholpen.html>
- [9] RWS. Beeldbank RWS (2008, 31 maart). Kruiswaterbrug [foto] Geraadpleegd van [https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Renovatie%20stalen%20bruggen%20\(2008\)_tcm21-32868.pdf](https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Renovatie%20stalen%20bruggen%20(2008)_tcm21-32868.pdf).
- [10] "Street view Bolsward." Geraadpleegd op 4 februari 2016, van <https://www.google.nl/maps/@53.0598186,5.5197719,16.46z?hl=nl>.
- [11] VSF. (2014). VSF renoveert Kruiswaterbrug [foto] Geraadpleegd van <http://www.vsf.nl/nl/projecten/detail/vsf-renoveert-kruiswaterbrug>
- [12] Rijkswaterstaat. (2015, 2 april). "Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken (ROK)". ROK 1.3, 2 april 2015, pp 188-190. Geraadpleegd op 15 februari 2016, van https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Richtlijnen%20ontwerpen%20kunstwerken_tcm21-12359.pdf
- [13] Holthuijsen, R.J. (2010, 4 mei). Overzicht ingetrokken GTB-normen. Geraadpleegd van <http://www.koudeenluchtbehandeling.nl/products/advies-koeltechniek/overzicht-ingetrokken-tgb-normen-8403>
- [14] Artikel verkeersbrug De Oversteek, "*Bouwen met staal (nationale staalprijs 2014)*." pp 80- 81, oktober 2014
- [15] Tosec. (2016)"Eigenschappen staal" [info & foto]. Geraadpleegd op 1 februari 2016, van <http://www.tosec.nl/wiki/materiaaleigenschappen/>.



Hoofdrapport

- [16] De vermoeidheid van stalen bruggen. Geraadpleegd op 16 mei 2016, van <http://www.stw.nl/sites/stw.nl/files/18-e%20vermoeidheid%20van%20stalen%20bruggen-5979-def-fotos.pdf>
- [17] (1997), *Het MCB Boek (Metaalcompagnie Brabant)* (9^{de} druk). Valkenswaard, Nederland: Metaalcompagnie Brabant B.V.
- [18] Romeijn, E. TLuijendijk, T. (2009). "Constructie hogesterkte staal". *Metaalmagazine*, vol. 9, pp 30-32. Geraadpleegd op 27 mei 2016, van http://www.metaalmagazine.nl/wp-content/uploads/2009/10/Artikel_Constructie-hogesterkte-staal.pdf
- [19] Meijer, H.A. *Hoogvaste staalsoorten en hun lasbaarheid*. Utrecht, Nederland: Filarc lastechniek b.v.
- [20] VSF. (2008). PAO Cursus HSS_05_Gresnigt [1]. Geraadpleegd op 11 maart 2016, van interne documenten binnen VSF.
- [21] VSF. (2015, oktober) Graduation Report_Mirjam Pruijssers. Geraadpleegd op 5 februari 2016, van interne documenten binnen VSF.
- [22] VSF. (2012, 7 juli). PvA Kruiswaterbrug vs 1 0 DEFINITIEF (2). Geraadpleegd op 27 februari 2016, van interne documenten binnen VSF.
- [23] VSF. (2013, 13 november) KRUIS-ONCT-BER-0001 Sterkte- en vermoeiingsberekening val rev 4. Geraadpleegd op 27 februari 2016, van interne documenten binnen VSF.
- [24] VSF. (2015). Blauwe Klap te Assen [foto]. Geraadpleegd van interne documenten binnen VSF.
- [25] VSF. (2014). Kruiswaterbrug in Bolsward [foto]. Geraadpleegd van interne documenten binnen VSF.
- [26] VSF. (2014). Vermoeiing en HSS: Use and Application of High Performance Steels (HPS) for Steel Structures. Geraadpleegd van interne documenten binnen VSF.
- [27] VSF. (2013). Rapport Movares analyse geluidsafstraling Geraadpleegd van interne documenten binnen VSF/ VID.
- [28] ISC Consulting Engineers A/S. (2013). Natural Ventilation in Offshore Substations [foto]. Geraadpleegd van <http://www.iesve.com/software/case-studies/info?building=isc-consulting-engineers-as--natural-ventilation-in-offshore-substations&id=4083>
- [29] Hilco. (2016). Transport en kranenbouw [foto] Geraadpleegd van <https://www.hilco-welding.com/nl/sectoren/transport-en-kranenbouw>
- [30] ArcelorMittal.(2013, oktober). Grevenmacherbridge [foto]. Geraadpleegd van <http://industry.arcelormittal.com/news/august/grevenmacherbridge>
- [31] High Strength Simple Steel Truss Structure Bridge with Concrete Deck [foto]. Geraadpleegd van <http://www.steel-trussbridge.com/sale-580490-high-strength-simple-steel-truss-structure-bridge-with-concrete-deck.html>
- [32] Van Oevelen, J. (2016). Moerdijkbrug [foto]. Geraadpleegd van <http://www.jevo-fotografie.nl/index.php/moerdijkbrug/>
- [33] ArcelorMittal Europe, *Histar: innovative high strength steels for economical steel structures* [foto & foto]. Geraadpleegd van http://ds.arcelormittal.com/repo/amds_uk/Histar.pdf



Hoofdrapport

- [34] Magnetisme "Lassen magnetisme." Geraadpleegd op 2 februari 2016, van <http://eemc.nl/nl/pdf/Magnetisme.pdf>
- [35] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 1090-2+A1/NB: Eurocode 0: Het vervaardigen van staal- en aluminiumconstructies- Deel 2: Technische eisen voor staalconstructies* (2011)
- [36] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 1990/NB: Eurocode 0: Grondslagen van het constructief ontwerp* (2011)
- [37] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 1991-2/NB: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen* (2011)
- [38] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 1993-1-1/NB: Eurocode 3: Ontwerpen en berekenen van staalconstructies, algemene regels* (2011)
- [39] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 1993-1-8/NB: Eurocode 3: Ontwerpen en berekenen van staalconstructies, ontwerp en berekenen van verbindingen* (2011)
- [40] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 1993-1-9/NB (en): Eurocode 3: Ontwerpen en berekenen van staalconstructies, vermoeiing* (2006)
- [41] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 1993-2/NB: Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 2: Stalen bruggen* (2007)
- [42] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 10025-1: Warmgewalste producten van constructiestaal - Deel 1: Algemene technische leveringsvoorwaarden* (2004)
- [43] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 10025-3: Warmgewalste producten van constructiestaal -Deel 3: Technische leveringsvoorwaarden voor normaalgegloeid/normaliserend gewalst fijnkorrelig constructiestaal* (2004)
- [44] European Committee for Standardization (CEN), *NEN-EN 10025-4: Warmgewalste producten van constructiestaal - Deel 4: Technische leveringsvoorwaarden voor thermomechanisch gewalst lasbaar fijnkorrelig constructiestaal* (2004)

