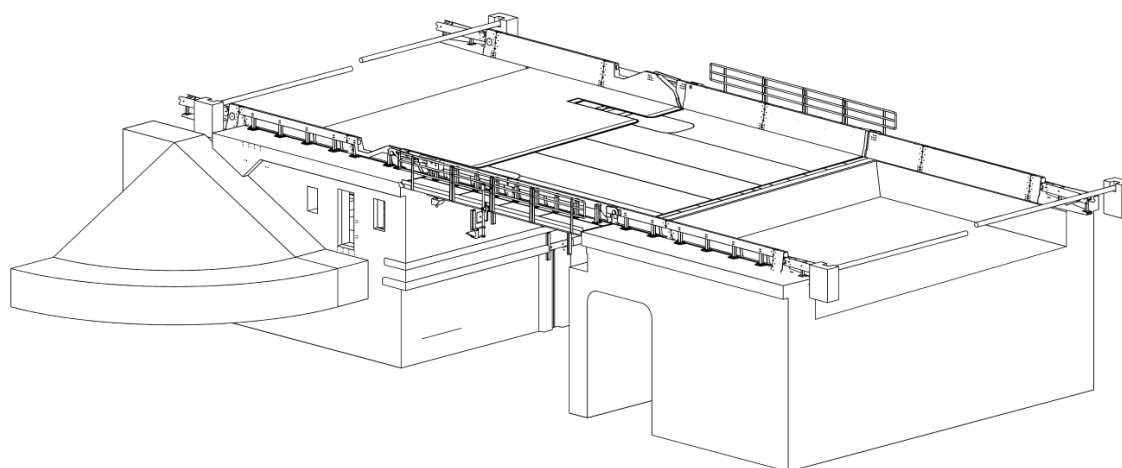




Afstudeeronderzoek HSS in brugdekken

Plan van Aanpak



Document : Plan van aanpak
Revisie : 1
Datum : 19-1-2016
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	19-1-2016	
Gecontroleerd			19-1-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Plan van Aanpak

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 SAMENVATTING	3
1 ACHTERGROND PROJECT	4
1.1 Project	4
1.2 Scope (afbakening)	4
1.3 Onderzoeksvragen	5
1.4 Informatie Volker Staal en Funderingen	6
1.5 Locatie afstuderen	6
1.6 Doeleinde project Volker Staal en Funderingen	6
1.7 Geslaagd afstudeerproject	6
2 PROJECTACTIVITEITEN	7
2.1 Fases	7
2.2 Activiteiten per fase	7
3 RESULTATEN AFSTUDEEROPDRACHT	8
3.1 Tussentijdse resultaten	8
3.1.1 Onderzoeksfase	8
3.1.2 Nieuw ontwerp brugdek	9
3.1.3 Lassen en maatregelen	9
3.1.4 Eindrapport	9
4 PLANNING EN BETROKKENEN	10
4.1 Tijdsplanning	10
4.2 Betrokkenen	10
4.2.1 Student	10
4.2.2 Begeleiders	11
4.3 Projectvergaderingen	12
4.4 Archivering	12
5 KWALITEIT	13
5.1 Onderhouden van de kwaliteit van het werk	13
5.2 Lay-out	13
5.3 Bronvermeldingen	13
5.4 Gebruikte software	13
5.5 Advies	13
6 COMPETENTIES	14
7 PERSOONLIJKE LEERDOELEN	15
BIJLAGE TIJDSPLANNING	1
BIJLAGE STAGEOVEREENKOMST	2

Plan van Aanpak

0 SAMENVATTING

Dit Plan van Aanpak beschrijft de aanpak voor het afstudeerproject van het onderzoek naar HSS. Voor u ligt het Plan van Aanpak van Maurits van der Linden, afstudeerder aan de Hogeschool Rotterdam Civiele Techniek.

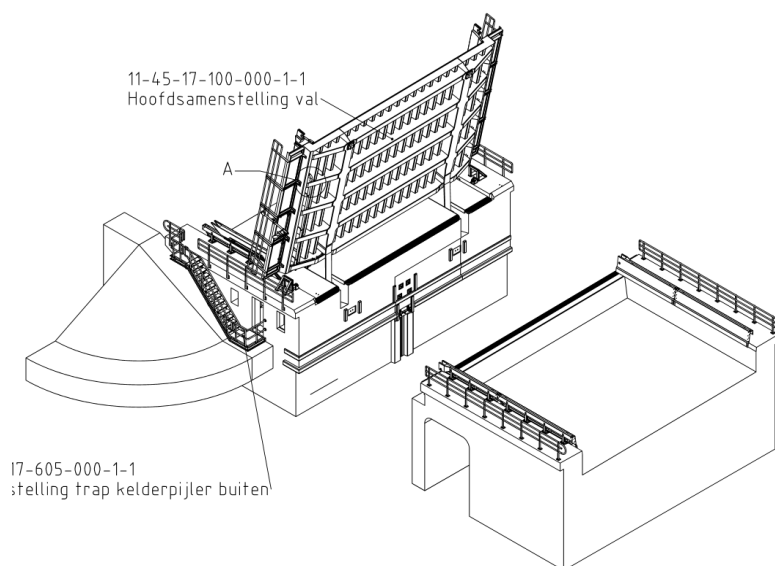
Het afstudeerbedrijf is Volker Staal en Funderingen (VSF). Tijdens het afstuderen verschaft het bedrijf de student een plek om zijn onderzoek uit te voeren en levert het feedback op zijn gemaakte werk. De student kan terecht met vragen bij de werknemers van Volker Staal en Funderingen om kennis te vergaren om zijn onderzoek goed uit te voeren.

Het afstudeeronderzoek richt zich op de introductie voor het gebruik van hoge sterke staal (HSS) binnen VSF voor stalen brugdekken. Tot nu toe wordt S355 als hoogste kwaliteit gebruikt voor bruggen. In het onderzoek worden de mogelijkheden onderzocht voor het toepassen van een nog hogere staalkwaliteit. Als voorbeeld wordt het ontwerp van het brugdek van de Kruiswaterbrug gebruikt, dat berekend is door ingenieursbureau ITBB. De staalkwaliteit die zal worden onderzocht is S460.

De verwachting is dat er minder materiaal nodig is om het brugdek te kunnen realiseren. Dit betekent dat de brug lichter wordt. Waarschijnlijk wordt het uitvoeringstechnische makkelijker, omdat er minder lasuren nodig zullen zijn om de losse en slankere elementen aan elkaar te lassen. Het plaatmateriaal is naar verwachting ook dunner. Door een lichtere en slankere brug te ontwerpen komen er ook andere voordelen naar boven. Voor het openen van de brug is minder energie nodig. Het openen van de brug kan sneller. De fundering hoeft minder belasting te dragen en het transport zal makkelijker gaan.

Tijdens het onderzoek wordt er aandacht besteed aan de normen op het gebied van bruggen, staal/HSS en uitvoering. De informatie die hier gevonden wordt, samen met de informatie over HSS, moet helpen een nieuw ontwerp voor de brug te realiseren.

In het modelleringsprogramma SCIA Engineer wordt het brugmodel ter vergelijking ingevoerd. Uit de vergelijking tussen dit model en het gegeven ontwerp moet blijken in hoeverre het gebruik van HSS voordelig is. Naast het onderzoek van HSS wordt er ook gekeken naar de lasmethoden voor hogere staalkwaliteiten en of deze haalbaar zijn binnen VSF. Voor VSF is dit interessant omdat VSF, naast het ontwerpen, ook zelf een constructiewerkplaats heeft waar de onderdelen in elkaar worden gelast.



Figuur 1: Ontwerp van de Kruiswaterbrug. Bron: Tekening VSF



Plan van Aanpak

1 ACHTERGROND PROJECT

1.1 Project

In de laatste periode van de opleiding Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam wordt de bachelor afgesloten met een afstudeerproject. Dit project zal worden uitgevoerd voor het bedrijf Volker Staal en Funderingen en luidt als volgt:

Stalen brugdekken worden vanuit de ROK begrensd tot S355. Graag zou het bedrijf willen weten wat de eventuele voordelen/nadelen zijn wanneer er een hogere staalkwaliteit wordt geïntroduceerd. Voor dit project wordt het gerealiseerde brugdek van de Kruiswaterbrug gebruikt als referentieproject.

De hoofdvraag voor dit project luidt:

In hoeverre is het mogelijk het stalen dek (val) van de Kruiswaterbrug uit te voeren in HSS S460 op zo'n manier dat er voordeel kan worden gehaald op het gebied van gewichtsbesparing.

1.2 Scope (afbakening)

Hieronder worden kort de punten weergegeven die van toepassing zijn voor de afbakening van het afstudeeronderwerp:

- De focus licht op het stalen brugdek voor berekeningen, tekeningen, lassen, informatie en SCIA.
- Barriers, passeerpaden met leningswerken en het contragewicht blijven onveranderd. Onderzoek richt zich op het brugdek en de dragende onderdelen.
- In de ROK 1.3 van 2 april 2015 wordt gesteld: "staalsoorten met een sterkteklasse hoger dan S355 zijn niet toegestaan". Deze eis van RWS wordt in het onderzoek niet meegenomen.
- Het onderzoek focust zich op de brug in gesloten toestand.
- De fundering van de brug met funderingspalen en landhoofden wordt buiten beschouwing gelaten. Uit het resultaat zal alleen blijken hoeveel reductie van de belasting er optreedt wanneer het brugdek wordt uitgevoerd in HSS.
- Het modelleren van het brugdek met SCIA wordt beperkt tot de hoofdonderdelen van de brug. Dit geldt ook voor alle mogelijke vormen van belastingen. Het is voor VSF niet interessant wanneer de afstudeerder 20 weken bezig is met modelleren.
- Voor HSS zal er slechts één stap omhoog worden gedaan. De staalkwaliteit die wordt onderzocht is S460.
- De bestaande Kruiswaterbrug wordt berekend met een andere staalkwaliteit. Dit betekent dat er andere staalafmetingen zullen worden toegepast. Een brug met een vakwerk wordt buiten beschouwing gelaten.
- Bruggen met lange overspanningen worden buiten beschouwing gelaten. Voor lengtes van bijvoorbeeld 30 meter kan beter een combinatie van een vakwerk met HSS worden toegepast. Tijdens dit afstudeeronderzoek wordt er gekeken naar brugdekken met lengtes die van toepassing zijn om open te kunnen.
- Er wordt expliciet gekeken naar de reductie van het eigen gewicht van de Kruiswaterbrug. Er wordt geen vergelijking gemaakt met kosten die afhankelijk is van de bestelling, productie en bewerking van HSS.



Plan van Aanpak

1.3 Onderzoeksvragen

Aan de hand van de hoofdvraag zijn er hieronder onderzoeksvragen geformuleerd die moeten helpen om de hoofdvraag te beantwoorden.

Onderzoeksfase

- Waarom HSS toepassen?
- Hoe word HSS bewerkt / gelast en wat zijn de randvoorwaarden?
- Hoe is de Kruiswaterbrug gerealiseerd?
- Wat zijn de verschillen in de normen bij toepassing van LSS en HSS?
- Wat is de reden waarom door de ROK de grens wordt gesteld op S355 voor bruggen?
- Welk staalsoort, kijkend naar S460 is het meest geschikt om te gebruiken voor de realisatie van een brugdek?

Nieuw ontwerp brugdek

- Wat is er mogelijk in de optimalisatie van het ontwerp Kruiswaterbrug met de toepassing van HSS?
- Is het beter om alles in dezelfde staalsoort uit te voeren of juist alleen bepaalde onderdelen?
- Wat volgt er uit de vergelijking wanneer het ontwerp wordt berekend met SCIA t.o.v. het ontwerp van ITBB en het nieuwe ontwerp aan de hand van handberekeningen met HSS?

Lassen en maatregelen

- Welke lasprocessen hanteert VSF in de constructiewerkplaats?
- Is het voor VSF mogelijk om HSS te lassen/bewerken in de constructiewerkplaats met de bewerkingsprocessen die ze beheren?
- Zo nee, wat moet er gedaan worden om HSS lassen mogelijk te maken?



Plan van Aanpak

1.4 Informatie Volker Staal en Funderingen

Volker Staal en Funderingen (VSF) is een civiel aannemingsbedrijf, gespecialiseerd in zwaar en gecompliceerd funderingswerk. Daarnaast ontwerp en vervaardigd VSF waterbouwkundige en infra staalconstructies in haar eigen constructiewerkplaats. Daarbij valt bijvoorbeeld te denken aan afmeervoorzieningen en stalen bruggen. Het werkveld waarin VSF actief is bestaat uit vier disciplines, namelijk: staal- en funderingsconstructies, engineering en offshore.

VSF is een volledige dochteronderneming van Van Hattum en Blankevoort. Beide bedrijven vallen onder de zelfstandige opererende werkmaatschappijen van VolkerWessels. VolkerWessels is een Nederlands bouwconcern dat bestaat uit circa 120 werkmaatschappijen die actief zijn in Nederland, Verenigd Koninkrijk en Canada/Verenigde Staten in de markten Bouw & Vastgoed, Infrastructuur en Energie & Telecom. VolkerWessels behoort tot de grootste bouwbedrijven van Nederland.

VSF is ontstaan nadat de funderingsbedrijven Van Splunder Funderingstechniek bv en Visser & Smit Bouw op 1 januari 2007 zijn gefuseerd. Volker Staal en Funderingen bestaat momenteel uit circa 130 werknemers en is gevestigd aan de Quarantaineweg 10 in de haven van Rotterdam.

1.5 Locatie afstuderen

De locatie waar de afstudeeropdracht wordt gedaan, is op het kantoor van Volker Staal en Funderingen aan de Quarantaineweg 10 in Rotterdam op de afdeling ontwerp en construct waar de staal en geo-ingenieurs werken.

1.6 Doeleinde project Volker Staal en Funderingen

Volker Staal en Funderingen wil weten wat de voordelen/nadelen zijn van een brugdek uitgevoerd in HSS. Hoeveel staal er kan worden bespaard is één punt, maar ook willen ze weten welke lasprocessen en maatregelen er nodig zijn om een goed resultaat te bereiken. Vaak moeten bruggen een beweegbaar dek hebben om het laten passeren van boten/schepen te faciliteren. Hoe lichter het brugdek is, des te makkelijker en met minder energie kan de brug omhoog. Uiteindelijk wil VSF weten of het introduceren van HSS voor brugdekken financiële voordelen heeft ten opzichte van brugdekken met een lage staalkwaliteit.

1.7 Geslaagd afstudeerproject

Het project is geslaagd wanneer:

- De afstuderende student slaagt voor zijn bachelor;
- De Hogeschool Rotterdam en VSF tevreden zijn over het gedane onderzoek;
- Met het resultaat van het onderzoek en het bijbehorende advies Volker Staal en Funderingen adviseren voor een eventuele introductie van HSS. Wanneer het financieel en technisch niet aantrekkelijk is, moet uit het adviesrapport duidelijk blijken waarom niet.



Plan van Aanpak

2 PROJECTACTIVITEITEN

2.1 Fases

Het project is verdeeld in 6 fases:

1. Voorbereidingsfase
2. Onderzoeksfase
3. Nieuw ontwerp brugdek
4. Lassen en maatregelen
5. Eindrapport
6. Voorbereidingen presentatie

2.2 Activiteiten per fase

Elke fase kan worden onderverdeeld in meerdere activiteiten:

1. Voorbereidingsfase
 - 1.1. Plan van Aanpak (PvA)
 - 1.2. Tijdsplanning
 - 1.3. Punten in PvA bespreken met VSF
2. Onderzoeksfase
 - 2.1. Staalsoorten en HSS
 - 2.2. Lasprocessen staal binnen VSF en lasprocessen voor HSS
 - 2.3. Conserveren van HSS
 - 2.4. Project brugdek Kruiswaterbrug
 - 2.5. Normen
3. Nieuw ontwerp brugdek
 - 3.1. Berekeningen nalopen met een hogere staalkwaliteit en afmetingen van het staal
 - 3.2. Welke onderdelen in HSS en welke niet
 - 3.3. Model modelleren in SCIA
 - 3.4. Vergelijking
4. Lassen en maatregelen
 - 4.1. Lasmethoden binnen VSF (vervolg uit fase 2.2)
 - 4.2. Randvoorwaarden voor het mogen lassen aan HSS
 - 4.3. Wat moet er eventueel gebeuren om HSS lassen mogelijk te maken (wel of niet haalbaar).
5. Eindrapport
 - 5.1. Adviesrapport
 - 5.2. Samenvoegen van de gemaakte documenten tot een bijlage
6. Voorbereiden van de presentatie en de verdediging voor het eindrapport

In hoofdstuk 3 worden de bovengenoemde fases dieper toegelicht.



Plan van Aanpak

3 RESULTATEN AFSTUDEEROPDRACHT

3.1 Tussentijdse resultaten

De volgende producten zijn tussentijdse resultaten:

- Plan van Aanpak (einde fase 1)
- Onderzoeksfase (einde fase 2)
- Ontwerp nieuw brugdek. Berekeningen, tekeningen en een model met SCIA (einde fase 3)
- Tussentijdse presentatie (einde fase 3)
- Lassen en maatregelen (einde fase 4)
- Concept van het eindrapport (3 weken voor de deadline van het eindrapport)
- Resultaten die volgen uit de Go/No-Go vergadering (eerste week van juni)
- Eindrapport (datum 14 juni 2016)
- Presentatie en verdediging van het eindrapport (datum onbekend, waarschijnlijk 1 juli)

3.1.1 Onderzoeksfase

Om het brugdek Kruiswaterbrug uit te kunnen voeren in een hogere staalkwaliteit moet er eerst onderzoek worden verricht naar verschillende onderwerpen. De eigenschappen van het HSS en normaal staal worden naast elkaar gelegd om te inventariseren wat de verschillen zijn. Er zal onderzocht worden welke lasprocessen er worden toegepast voor normaal staal en HSS. Het staaloppervlak moet vanwege corrosie voorzien worden van een coating. Er zal gekeken worden hoe dat zit bij HSS. Voordat het brugdek Kruiswaterbrug kan worden gedimensioneerd met een andere staalkwaliteit, is het belangrijk om te weten hoe de huidige brug is opgebouwd. Wanneer deze informatie bekend is, kan de brug na het nalopen van de berekeningen met de bijbehorende normen worden berekend met HSS.

Normen die zullen worden gebruikt voor de berekeningen en informatie zijn:

- NEN-EN 1090-1 en 2 en de EN ISO normen waarnaar verwezen wordt
- NEN 1990+A1+A1/C2
- NEN-EN 1991-2 +NB
- NEN-EN 1993-1-1
- NEN-EN 1993-1-2+C2:2011 +NB
- NEN-EN 1993-1-9
- NEN-EN 10025-1 en 3

Tijdens het afstuderen zullen er waarschijnlijk meer normen naar voren komen waar rekening mee gehouden moet worden.



Plan van Aanpak

3.1.2 Nieuw ontwerp brugdek

Na het onderzoeken van het huidige brugdek en de resultaten die volgen uit het onderzoek naar HSS zal er gekeken worden of de brug in zijn geheel wordt uitgevoerd in een hogere staalkwaliteit of dat er alleen bepaalde onderdelen met HSS worden uitgevoerd. De maatgevende berekeningen voor het stalen brugdek zullen worden nagelopen. Dit zijn voornamelijk de berekeningen waarop de normen andere controles voor voorschrijven dan bij normaal staal. Hierna zal het nieuwe model worden ingevoerd in het computerprogramma SCIA. Het resultaat zal naast de huidige brug worden gelegd om de verschillen aan te tonen.

3.1.3 Lassen en maatregelen

Het aan elkaar lassen van de losse elementen die uiteindelijk een brugdek moeten vormen is een belangrijk onderdeel in dit onderzoek. VSF last in haar eigen constructiewerkplaats de verschillende onderdelen. Om te onderzoeken of het mogelijk is om HSS te lassen, moet er worden gekeken welke lasmethodes VSF gebruikt. Na het onderzoek van HSS lassen moet er worden gekeken of het mogelijk is om dit te realiseren in de constructiewerkplaats. Wanneer dit niet het geval is, moet er worden gekeken wat er moet worden gedaan aan bijvoorbeeld scholing van lassers en aanschaf van materieel voordat het mogelijk is HSS te lassen.

De vraag die dan naar voren komt is:

Zijn de financiële resultaten van de brug, uitgevoerd in HSS, zo aantrekkelijk voor VSF dat het de moeite waard loont om nieuwe lasmethoden te introduceren.

3.1.4 Eindrapport

Het eindrapport bestaat uit een advies voor het uitvoeren van brugdekken in HSS. Er zal gekeken worden naar gewicht, kosten en de mogelijkheid om het uit te voeren. De vermelde onderzoeken en bevindingen zullen terug te vinden zijn in de bijlages.

- Plan van Aanpak
- De vermelde onderwerpen uit de onderzoeksfase
- Nieuw ontwerp brugdek
- Lassen en maatregelen



Plan van Aanpak

4 PLANNING EN BETROKKENEN

4.1 Tijdsplanning

Voor dit afstudeeronderzoek staan 20 weken gereserveerd. Per fase zijn er een aantal benodigde weken geschat om het onderdeel af te ronden:

1. Voorbereidingsfase (2 weken)
2. Onderzoeksfase (4 weken)
3. Nieuw ontwerp brugdek (8 weken)
4. Lassen en maatregelen (3 weken)
5. Eindrapport (2 weken)
6. Voorbereidingen presentatie (2 weken)

Werk uit de onderzoeksfase wordt herhaalt in de fases 3 en 4. Fases 5 en 6 overlappen elkaar deels.

4.2 Betrokkenen

4.2.1 Student

Het afstudeerwerk wordt uitgevoerd door één student:

Naam:	Maurits Maarten van der Linden	geslacht: man
Adres:	Voorschoterlaan 27e 3062 KG Rotterdam	
Mobiele nummer:	+31 6 12 31 54 21	
E-mail:	m.vanderlinden@vsf.nl (mvl@vsf.nl)	
Functie:	Afstudeerder	
Beschikbaar:	Alle werkdagen tenzij anders vermeld in de tijdsplanning	



Plan van Aanpak

4.2.2 Begeleiders

Tijdens het afstuderen zijn er twee begeleiders aanwezig. Eén persoon vanuit VSF en de ander vanuit de Hogeschool Rotterdam:

Naam:	Björn van der Maale	geslacht: man
Adres:	Quarantaineweg 10 (havennummer 2642) 3089 KP Rotterdam	
Mobiele nummer:	+31 6 50 22 59 82	
E-mail:	b.vandermaale@vsf.nl (bvm@vsf.nl)	
Functie:	Afdelingshoofd Ontwerp en Constructies	
Bevoegdheden:	Begeleiden van de student, advies richting afstudeerdocent, bedrijfsevaluatie	
Beschikbaar:	Alle werkdagen (van maandag t/m vrijdag)	

Naam:	Sven van Rosmalen	geslacht: man
Adres:	G.J. de Jonghweg 4-6 3015 GG Rotterdam	
Mobiele nummer:	+31 6 41 64 01 69	
E-mail:	s.g.van.rosmalen@hr.nl	
Functie:	Afstudeerdocent	
Bevoegdheden:	Begeleiden van de student, beoordelen afstudeerrapport en afstudeerpresentatie	
Beschikbaar:	Alle werkdagen (van maandag t/m vrijdag)	



Plan van Aanpak

4.3 Projectvergaderingen

Tijdens de afstudeerperiode zullen er een aantal vergaderingen plaatsvinden met Björn van der Maale en de begeleider van de Hogeschool. De Student is verantwoordelijk voor regeling van deze vergaderingen.

Eens per week zal er een vergadering gepland worden met Björn van der Maale. Wanneer het afgesproken tijdstip niet uitkomt, wordt de vergadering verschoven naar een ander tijdstip/dag van die week.

Vergaderingen met de begeleider van de Hogeschool zullen om de drie weken gepland worden of iets eerder/later wanneer een tussenproduct is afgerond.

4.4 Archivering

De gemaakte producten worden door de student opgeslagen op de "F-schijf" onder zijn eigen naam in de map van afstudeerders. Uiteindelijk zullen hier voor VSF ook de eindresultaten komen te staan.



Plan van Aanpak

5 KWALITEIT

5.1 Onderhouden van de kwaliteit van het werk

Om de kwaliteit van het gemaakte werk van de verschillende producten te onderhouden, zal elk product door de student zelf worden gecontroleerd. De opgeleverde tussenproducten en het eindrapport worden besproken met Björn van der Maale van VSF en de begeleider van de Hogeschool Rotterdam. De verkregen feedback zal na de besprekingen worden verwerkt om het product af te ronden.

5.2 Lay-out

Voor de gemaakte producten zal een standaard lay-out worden gebruikt van Volker staal en Funderingen.

5.3 Bronvermeldingen

Bronnen gebruikt tijdens dit afstudeeronderzoek zullen worden vermeld volgens het APA-model.

5.4 Gebruikte software

De software die zal worden gebruikt tijdens afstudeerperiode zal worden gehanteerd zoals die op de Hogeschool Rotterdam is uitgelegd of door één van de medewerkers van Volker Staal en Funderingen. Het gebruik van het modelleringsprogramma SCIA Engineer 15.3 is nieuw voor de student.

5.5 Advies

Wanneer er door gebrek aan kennis of vaardigheden advies nodig is, kan de student terecht bij één van de medewerkers van Volker Staal en Funderingen of bij één van de docenten van de Hogeschool Rotterdam.



Plan van Aanpak

6 COMPETENTIES

Vanuit de Hoge school Rotterdam worden er van de student verschillende competenties verwacht van een bepaald niveau. Tijdens het afstuderen wordt niveau 3 verwacht van de student.

1. Initiëren;
 - Signaleren en/of analyseren van (de behoefte aan) een civieltechnisch project in de gebouwde omgeving;
 - Ontwikkelen van een Programma van Eisen voor een te maken civiel technisch project;
2. Ontwerpen
 - Ontwerpen van oplossingsvarianten in de vorm van bv. schema's, tekeningen en/of berekeningen voor civieltechnische (deel)problemen;
 - Oplossingsvarianten beoordelen en de meest passende kiezen;
 - Inventariseren en verzamelen van gegevens;
3. Specificeren
 - Schematiseren van de werkelijke situatie in een (vereenvoudigd) rekenkundig of fysisch model;
 - Detailleren en/of berekenen en tekenen van een (deel van een) civieltechnische ontwerp;
 - Contract-, begrotings- en vergunningsdocumenten opstellen en contractvorming organiseren en begeleiden;
4. Monitoren, toetsen en evalueren
 - Hanteren van plan-do-check-act cyclus;
 - Omgevingsbewust en maatschappelijk verantwoord handelen;
5. Analyseren en onderzoeken
 - Uitvoeren van onderzoek;
6. Communiceren en samenwerken
 - Verwoorden en verbeelden van informatie;
 - Functioneren in teams;
7. Managen en ondernemen
 - Regie voeren over eigen leerproces;
 - Projectmatig werken en processen aansturen.



Plan van Aanpak

7 PERSOONLIJKE LEERDOELEN

- Tijdens de afstudeerperiode is één van de persoonlijke leerdoelen om informatie te verzamelen over verschillende onderwerpen die relevant zijn voor het gekozen onderwerp. De gevonden informatie wordt vervolgens gefilterd op juistheid en bruikbaarheid voor de afstudeeropdracht.

(Dit leerdoel dekt de volgende competenties: 2. Ontwerpen, 5. Analyseren en onderzoeken)

- Ook maken van goede berekeningen en ontwerpen aan de hand van eerder gevonden en gefilterde informatie.

(Dit leerdoel dekt de volgende competenties: 2. Ontwerpen, 3. Specificeren)

- Het toetsen van het gemaakte ontwerp in SCIA om vervolgens de uitkomsten te vergelijken met het model van de Kruiswaterbrug van ingenieursbureau ITBB en de gemaakte berekeningen uit punt 2.

(Dit leerdoel dekt de volgende competenties: 1. Initiëren, 4. Monitoren, toetsen en evalueren, 5. Analyseren en onderzoeken)

- Het opstellen van voorschriften/toetsing voor het ontwerpen van stalen brugdekken in HSS voor in de toekomst.

(Dit leerdoel dekt de volgende competenties: 1. Initiëren, 2. specificeren 6. Communiceren en samenwerken)

- Functioneren naar behoren binnen het bedrijfsleven.

(Dit leerdoel dekt de volgende competenties: 6. Communiceren en samenwerken, 7. Managen en ondernemen)



BIJLAGE TIJDSPLANNING



[illegible]

(voorbereidingsfase en eerste gesprek al klaar/gehad voor februari)

	april																												mei														juni																												juli																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Maand																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Week	12							13							14							15							16							17							18							19							20							21							22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Dag	m	d	w	d	v	z	z	m	d	w	d	v	z	z	m	d	w	d	v	z	z	m	d	w	d	v	z	z	m	d	w	d	v	z	z	m	d	w	d	v	z	z	m	d	w	d	v	z	z	m	d	w	d	v	z	z																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
# fasen	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

presentatie voor VSF

werken aan fases		alleen vrije dagen in de planning (gesprek in de ochtend op de HRO en rond 10.00 op VSF) als het uitkomt begin van de week
weekend		
studiereis Lissabon		
vrije dagen/verhindert		
deadline eindrapport		
afpraak met begeleider HRO		
overleg met begeleider VSF		
tussentijdse presentatie VSF		
presentatie generale VSF		
Eindpresentatie HRO		



BIJLAGE STAGEOVEREENKOMST





Model Stageovereenkomst

Bestemd voor stages, leer-werktrajecten, praktijkonderwijs.
Voor studenten uit Nederland en uit EU-landen.

Ondergetekenden

1. Naam school en opleiding Hogeschool Rotterdam, opleiding
Gevestigd te Rotterdam
Vertegenwoordigd door William Kuppen
In de functie van afstudeercoördinator civiele techniek
Hierna te noemen "hogeschool"

en

2. Naam stagegever Volker Staal en Funderingen bv
Gevestigd te Rotterdam
Vertegenwoordigd door B. van der Maale
In de functie van Hoofd ontwerp & Constructie bureau
Hierna te noemen "stagegever"

en

3. Naam stagiair Maurits van der Linden
Adres Voorschoterlaan 27e
Woonplaats Rotterdam
Geboortedatum 30-12-1990
Studentnummer 0868441
Bij de opleiding Civiele Techniek
E-mail maupi72@gmail.com of 0868441@hr.nl
Huisadres tijdens stage Voorschoterlaan 27e
Telefoonnummer tijdens stage 06 12315421

Student aan de hierboven genoemde hogeschool,

Hierna te noemen "stagiair"

Verklaren het volgende te zijn overeengekomen:

Artikel 1

1. De stagegever stelt de stagiair in de gelegenheid om in het kader van het onderwijsprogramma van de hogeschool stage te lopen.
2. De stage beoogt de stagiair die leeractiviteiten te laten ontplooiën die in het stageplan zijn opgenomen.
3. De stagegever draagt de stagiair slechts taken op die passen in het stageprogramma.
4. Het stageplan maakt onderdeel uit van deze overeenkomst.

Artikel 2

1. De stage omvat in totaal 612 uur. Zij vangt aan op 01-02 en eindigt op 01-07.
2. De stage vindt plaats op de door de stagegever aangewezen stageplaats(en) en tijdstippen. Voor de stagetijden kan daarbij worden aangesloten bij een bestaande werktijdregeling.

Artikel 3

De begeleiding van de stagiair zal zowel vanuit de hogeschool als vanuit de stagegever plaatsvinden.

- a. De stagegever verbindt zich voldoende tijd aan het begeleiden van de stagiair te besteden en wijst een stagebegeleider aan die belast is met de dagelijkse begeleiding van de stagiair waar het gaat om het feitelijk verrichten van werkzaamheden, alsmede met het contact met de hogeschool. Vanuit de stagegever zal als stagebegeleider optreden: B. van der Maale
- b. De hogeschool wijst een stagedocent aan die belast is met de begeleiding van de stagiair waar het gaat om de realisatie van de leeractiviteiten. De stagedocent kan voor het goede verloop van de stage aanbeveling doen aan de stagegever en de stagiair. Vanuit de hogeschool zal als stagedocent optreden:

Artikel 4

De stagiair volgt bij de stagegever de aanwijzingen van de stagebegeleider op.

Artikel 5

1. De stagegever draagt er zorg voor dat de werkplek en –situatie van de stagiair voldoet aan de geldende (arbo-)wet- en regelgeving.
2. De stagiair neemt in het belang van orde, veiligheid en gezondheid de door de stagegever gegeven gedragsregels en aanwijzingen in acht.
3. De stagiair is verplicht tot geheimhouding van hetgeen hem/haar gedurende zijn/haar stageperiode ter kennis is gekomen en waarvan hij/zij weet of redelijkerwijs behoort te weten dat het van vertrouwelijke aard is. Voor zover noodzakelijk voor de beoordeling door de hogeschool is/zijn de begeleidende docent(en) gerechtigd kennis te nemen ook van vertrouwelijke gegevens; voor deze docent(en) geldt vervolgens een zelfde plicht m.b.t. de vertrouwelijke behandeling als geldt voor de stagiair. Voor publicatie van het stageverslag is voorafgaande toestemming van de stagegever vereist.

Artikel 6

In het geval van ziekte of afwezigheid wegens een dringende reden, alsmede van hervatting na ziekte of na afwezigheid, stelt de stagiair de stagegever en de hogeschool onverwijld op de hoogte. De stagegever informeert de hogeschool direct in geval van verzuim van de stagiair. Zodra de afwezigheid een zodanig betekende omvang heeft dat er naar het oordeel van de hogeschool een onvoldoende basis is om de stage nog te kunnen beoordelen zullen partijen trachten tot nadere afspraken te komen (b.v. overeenkomstige verlenging van de oorspronkelijke afspraken).

Artikel 7

Optioneel:

Gedurende de stage zal er van generlei vergoeding sprake zijn, met uitzondering van een eventuele redelijke reiskostenvergoeding.

Of:

De stagiair ontvangt van de stagegever een vergoeding van € ^{250,-} ~~.....~~ bruto per ^{4 weken} ~~maand~~. Dit bedrag strekt tot vergoeding van de door de stagiair gemaakt kosten voor het reizen van en naar de instellingen van de stagegever en van eventuele overige kosten die verband houden met de stage. De vergoeding is uitdrukkelijk niet bedoeld als loon. De afgesproken vergoeding is een bepaling die slechts de stagiair en stageverlener binden; de Hogeschool is noch betrokkene, noch belanghebbende hierbij.

Artikel 8

Bij problemen tijdens de stage richt de stagiair zich allereerst tot de stagebegeleider. Geschillen tussen de stagiair en de stagebegeleider worden voorgelegd aan de stagedocent. Indien de stagebegeleider, de stagedocent en de stagiair niet tot een oplossing komen wordt het probleem voorgelegd aan de vertegenwoordiger van de hogeschool en de vertegenwoordiger van de stagegever, zoals vermeld boven aan deze overeenkomst.

Artikel 9

De beoordeling van de stagiair en de toekenning van studiepunten geschiedt door de hogeschool. Bij deze beoordeling zal door de hogeschool het oordeel van de stagebegeleider worden meegewogen.

Artikel 10

De auteursrechten met betrekking tot de bereikte resultaten berusten bij de studentstagiair, tenzij uitdrukkelijk anders bepaald. Zowel de studentstagiair als de Nederlandse onderwijsinstelling mogen de resultaten gebruiken voor interne doeleinden zonder raadpleging van de stagebiedende organisatie.

Artikel 11 De overeenkomst eindigt aan het einde van het onder artikel 2 genoemde tijdvak. Tussentijdse beëindiging geschiedt bij onderling goedvinden van partijen en in ieder geval:

1. Na schriftelijke aanzegging van de hogeschool aan de stagegever, indien de hogeschool – na de stagiair, de stagebegeleider en de stagedocent te hebben gehoord – zich ervan heeft overtuigd dat:
 - de stagegever de uit deze overeenkomst voortvloeiende verplichting niet of onvoldoende nakomt; ofwel
 - zich zodanige omstandigheden voordoet dat van de stagiair of hogeschool redelijkerwijs niet kan worden verlangd dat hij/zij de stage voortzet.
2. Na een met redenen omklede schriftelijke aanzegging van de stagegever aan de hogeschool en de stagiair, indien zich zodanige omstandigheden voordoet, dat van de stagegever het laten voortduren van deze overeenkomst redelijkerwijs niet kan worden verlangd.

Artikel 12

Deze stageovereenkomst is geen arbeidsovereenkomst in de zin van artikel 7:610 van het Burgerlijk Wetboek.

Aldus overeengekomen en in drievoud getekend:

Plaats Rotterdam
Datum 1 februari 2016

1. Voor de school

Naam

William Kruppen

Handtekening

W. Kruppen

2. Voor de stagegever

Naam

B. van der Maale

B. van der Maale

3. De stagiair

Naam

Maurits van der Linden

Handtekening

Maurits van der Linden



Afstudeeronderzoek HSS in burgdekken

Staalkeuze

Document : Staalkeuze
Revisie : 0
Datum : 7-3-2016
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	7-3-2016	
Gecontroleerd			7-3-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Staalkeuze

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 INLEIDING	3
2 STAALSOORTEN MET HUN AANDUIDINGEN	4
3 STAALSOORTEN	5
3.1 Histar	5
3.2 Thermo-mechanisch gewalst staal	7
3.3 Genormaliseerd staal	9
4 OVERWEGING KEUZE STAALSOORT/ CONCLUSIE	11
AANNULLENDE EISEN RWS (ROK) S460	1



Staalkeuze

0 INLEIDING

Na de basisinformatie van het staal met de chemische en mechanische eigenschappen (Bijlage 4) is duidelijk wat de voordelen zijn van het toepassen van HSS. Om te beslissen welk HSS staalsoort het meest geschikt is voor dit afstudeeronderzoek wordt in dit rapport een overweging gemaakt. Verder is gekeken naar de leveringsvoorwaarden (10025-1, 10025-3 en 10025-4) en de ROK om de uiteindelijke keuze te kunnen onderbouwen.



Staalkeuze

2 STAALSOORTEN MET HUN AANDUIDINGEN

In de Europese norm worden staalsoorten aangeduid met letters en cijfers die uniek zijn. Deze zeggen iets over de basiseigenschappen van het staal betreft de mechanische, fysische en chemische eigenschappen. Voor het afstudeeronderzoek wordt gebruik gemaakt van constructiestaal. Dit wordt in de normen aangeduid met de letter "S".

De volgende symbolen worden toegepast door de norm:

- S	=	Sturctual ofwel constructiestaal
- 235	=	Vloeigrens bij een dikte van 16 mm in MPa
- J2,K2,JR,J0	=	hardheid volgens de kerfslagtest
- W	=	weervast
- Z	=	verhoogd hardheid aan het oppervlak
- C	=	met bijzondere koudvervormbaarheid
- N	=	normaalgeglueid of normaliserend gewalst
- NL	=	geglueid of normaliserend gewalst met een kerfslagproef < 50°C
- Q	=	veredeld
- M	=	thermo-mechanisch gewalst
- L	=	voor lage temperaturen
- H	=	buisprofiel
- P	=	damwandstaal
- S	=	voor scheepsbouw (staat achter de vloeigrens)
- E	=	voor emailleren
- F	=	voor smeden
- T	=	voor buizen

Aan het begin van het onderzoek is gekeken naar de ROK van RWS. In de laatste versie van de ROK wordt gesteld dat het gebruik van staalsoorten hoger dan S355 niet zijn toestaan voor de realisatie van stalen brugdekken. In het hoofdrapport werd al vermeld dat deze eis buiten beschouwing zal worden gelaten voor dit afstudeeronderzoek. In overleg met VSF is besloten om voor dit onderzoek één stap omhoog te gaan. De vloeigrens die voor dit onderzoek gebruikt zal worden, is zodoende bepaald op 460 N/mm². In het artikel "Waarom S235 achterhaald is" wordt vermeld dat de zaken inmiddels anders liggen. Vroeger was S235 het constructiestaal dat als standaard werd gebruikt. Deze vloeigrens is inmiddels opgeschoven naar S355. Daarnaast pleit Greven dat nu hetzelfde wordt gedaan voor S460 als dat destijds bij S355 is gedaan. Omdat het aannemelijker is dat deze grens eerder één stap omhoog zal gaan (van S355 naar S460) dan twee wordt S460 gekozen voor dit onderzoek.

Afhankelijk van het project waarvoor het staal wordt gebruikt, kunnen overweging worden gemaakt waardoor een aantal staalsoorten of staalsoorten met bepaalde eigenschappen afvallen. 'Q' is een aanduiding die veel wordt gebruikt in de offshore sector. Het heeft eigenschappen die niet van toepassing zullen zijn voor een brugdek. Offshore constructies bevinden zich in een milieu waarbij rekening moet worden gehouden met zout water. Bij de Kruiswaterbrug is dit niet aan de orde. Om het staal goedkoper te bestellen, kan worden gekeken naar andere staalsoorten. Normaal constructiestaal gaat maar tot S460 in de NEN-EN 1993-1-1. Dan blijven de staalsoorten 'M' en 'N' over. In de norm wordt verwezen naar de leveringsvoorwaarden van de NEN-EN 10025-3 en de NEN-EN 10025-4. Daarin staat dat het productieproces van elkaar verschilt. In deel 3 wordt het staal geproduceerd door middel van nagloeien en in deel 4 worden de staaleigenschappen bereikt door het staal thermo-mechanische te walsen. Tot slot heeft ArcelorMittal de staalsoort Histar ontwikkeld met een vloeigrens van 460 N/mm². Voor de uiteindelijke keuze zal gekeken worden naar de drie S460 soorten voordat definitief een keuze zal worden gemaakt.

Staalkeuze

3 STAALSOORTEN

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de drie staalsoorten die in het vorige hoofdstuk na de eerste overweging zijn overgebleven. Het betreft de staalsoorten:

- S460 Histar
- S460 M/ML
- S460 N/NL

3.1 Histar

Staalproducent ArcelorMittal heeft een innovatief hoge sterkte staal ontwikkeld met de naam Histar. Naast de eerder beschreven voordelen van HSS, heeft Histar nog een aantal extra voordelen. Deze worden verkregen door in de chemische samenstelling het koolstofgehalte nog meer te reduceren.

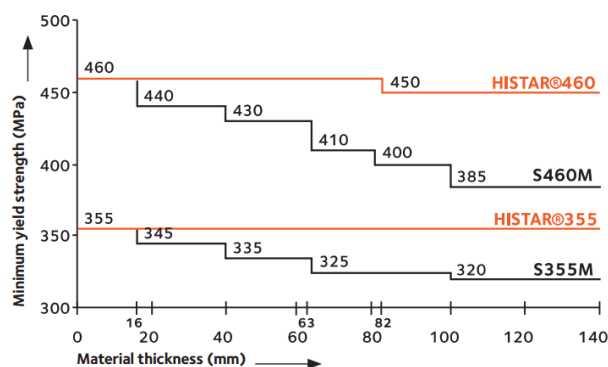
Bij de gebruikelijke staalsoorten neemt de vloeigrens af naarmate het materiaal dikker wordt (zie Tabel 1). Histar staal blijft over alle diktes bijna constant. De 460 gaat alleen van 460 naar 450 wanneer het staal dikker wordt dan 82 mm. Zie Ziguur 1

Tabel 1: Mechanische eigenschappen voor normaalgegloeid staal. Bron: Tabel 5 NEN-EN 10025-3

Aanduiding		Minimumvloeigrens R_{eH}^a MPa ^b								Treksterkte R_m^a MPa ^b			Minimumrek na breuk ^a %					
Volgens EN 10027-1 en CR 10260	Volgens EN 10027-2	Nominale dikte mm								Nominale dikte mm			L ₀ = 5,65 √S ₀ Nominale dikte mm					
		≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 100	> 100 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 200	> 200 ≤ 250
S275N	1.0490	275	265	255	245	235	225	215	205	370 t.m. 510	350 t.m. 480	350 t.m. 480	24	24	24	23	23	23
S275NL	1.0491																	
S355N	1.0545	355	345	335	325	315	295	285	275	470 t.m. 630	450 t.m. 600	450 t.m. 600	22	22	22	21	21	21
S355NL	1.0546																	
S420N	1.8902	420	400	390	370	360	340	330	320	520 t.m. 680	500 t.m. 650	500 t.m. 650	19	19	19	18	18	18
S420NL	1.8912																	
S460N	1.8901	460	440	430	410	400	380	370	—	540 t.m. 720	530 t.m. 710	—	17	17	17	17	17	—
S460NL	1.8903																	

^a Voor plaat, band en universeelstaal met breedten ≥ 600 mm geldt de richting dwars (t) op de walsrichting. Voor alle andere producten gelden de waarden in de richting evenwijdig (l) aan de walsrichting.

^b 1 MPa = 1 N/mm²



Figuur 1: reductie van de vloeigrens bij Histar staal ten opzichte van thermo-mechanisch gewalst staal.

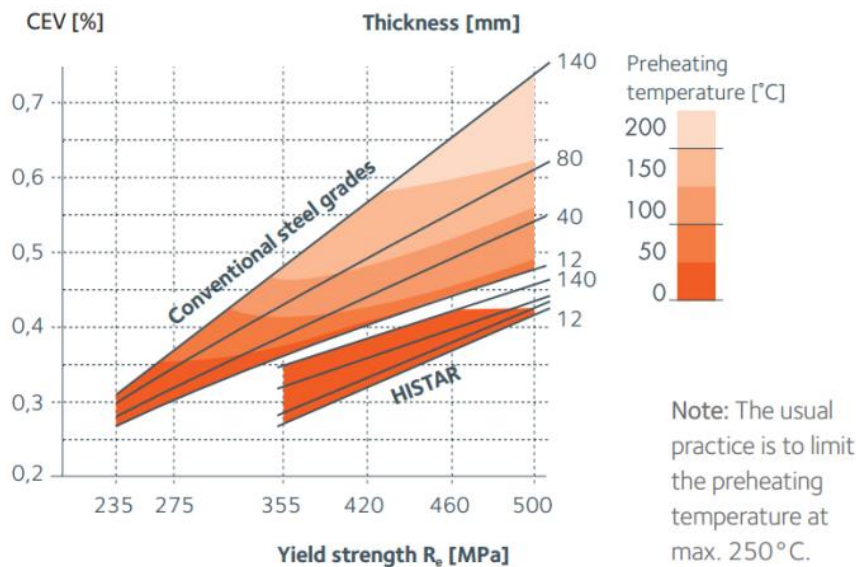
Bron: ArcelorMittal / Histar

Staalkeuze

Bij de toepassing van Histar staal zullen de plaatdiktes tussen de 16 en 50 mm (die als grootste dikte van toepassing zullen zijn voor de optimalisatie van de Kruiswaterbrug op basis van de tekeningen van de gerealiseerde Kruiswaterbrug) geen reductie meer ondervinden van de vloeigrens. Aan de hand van Tabel 1 wordt duidelijk dat naarmate de plaatdiktes toenemen de vloeigrens afneemt.

Voor HSS in het algemeen geldt dat een warmtebehandeling is vereist wanneer platen aan elkaar worden gelast. Het staal moet worden voorverwarmd. Wanneer de warmtetoevoer de juiste temperatuur heeft bereikt, moeten de platen aan elkaar worden gelast. Na het lassen moet de warmte nog worden gecontroleerd. De warmtetoevoer moet rustig worden gereduceerd om een goede lasverbinding te garanderen. De hoeveelheid warmte die nodig is, is voornamelijk afhankelijk van het koolstofpercentage van het staalsoort.

Een voordeel van Histar staal is dat het materiaal niet of nauwelijks hoeft te worden voorverwarmd vanwege een nog lagere CEV-waarde (carbon equivalent values). Zie Figuur 2



Figuur 2: Benodigde voorverwarming van het staal voor het lassen. Bron: ArcelorMittal / Histar

Voor het gebruik van Histar staal zijn een aantal eisen van toepassing die volgens ArcelorMittal van belang zijn:

- Het is belangrijk dat de lassen worden uitgevoerd boven 0 °C;
- De energietoevoeging ligt tussen de 10-60 kJ/cm;
- Het waterstofpercentage is slechts in een hele kleine hoeveelheden aanwezig zijn ($\leq 5\text{ml}/100\text{g}$). Zie Tabel 2

Tabel 2: Voorverwarmen van Histar staal in combinatie met de staaldikte en het vereiste aanwezige waterstofpercentage
Bron: ArcelorMittal / Histar

Thickness [mm]	Hydrgen content of consumables			
	5-10		≤ 5	
	Heat input [kJ/cm]		Heat input [kJ/cm]	
≤ 50	No preheat	No preheat	No preheat	No preheat
> 50	100 °C	No preheat	No preheat	No preheat

Staalkeuze

Wereldwijd zijn verschillende constructies gebouwd met Histar staal. Het wordt veel toegepast in kolommen van wolkenkrabbers en bruggen (onder andere een vakwerk voetgangersbrug en een brug in Istanbul zijn gerealiseerd met Histar). De constructies worden voornamelijk gecontroleerd op knik. In dit afstudeeronderzoek moet meer de nadruk liggen op een door buiging belaste constructie. Histar staal valt, ondanks dat de eigenschappen beter zijn ten opzichte van ander S460 staal, binnen de onderzoekrichting voor de keuze van het staalsoort. Doordat de behandeling na het productieproces net iets anders zijn dan bij die van het thermo-mechanisch gewalste staal, zijn de eigenschappen beter. Omdat in de normen nog geen specifieke eisen worden gesteld voor Histar staal valt het materiaal onder dezelfde regels die gelden voor thermo-mechanisch gewalst staal.

3.2 Thermo-mechanisch gewalst staal

Voor dit afstudeeronderzoek is voorgenomen om zo dicht mogelijk bij de waarheid te blijven. RWS bepaalt in de ROK een aantal eisen voor het toepassen van HSS. De eis waarin een staalkwaliteit hoger dan S355 niet mag worden gebruikt voor kunstwerken, is de enige die buiten beschouwing valt. Voor de rest wordt geprobeerd in de buurt te blijven van de aanvullende eisen die zijn opgesteld voor het gebruik van S460. Aan het eind van dit rapport is in de bijlage de aanvullende informatie te vinden betreft de toepassing van S460 in afwijking van de ROK versie 1.2. Met de onderstaande formule kan volgens de NEN-EN 10025-1 het koolstof equivalent worden berekend:

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

De percentages van de elementen zijn gegeven in de leveringsvoorwaarden. Voor thermo-mechanisch gewalst staal moet gekeken worden naar tabel 2 uit de NEN-EN 10025-4. Hieronder is de tabel met de percentages van de elementen weergegeven.

Uit de aanvullende informatie van RWS blijkt dat voor het gebruik van thermo-mechanisch gewalst staal veel eisen van toepassing zijn. Zo mag het CEV-gehalte (koolstof-equivalent) niet hoger zijn dan 0,41 procent en het koolstofpercentage zelf mag niet meer bedragen dan 0,12 procent.

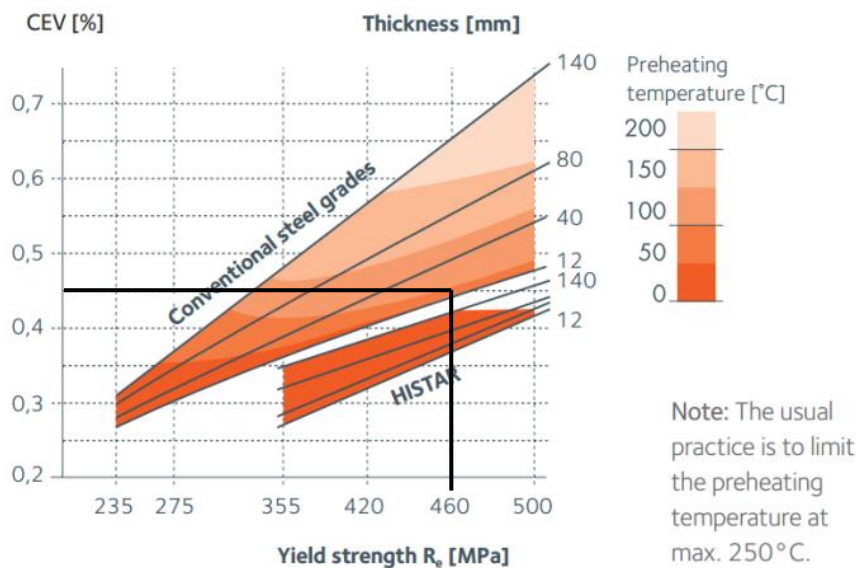
Tabel met aanwezige percentages van de elementen voor de productanalyse. Bron: Tabel 2 NEN-EN 10025-4

Aanduiding		C % max.	Si % max.	Mn % max.	P % max. a	S % max. a b	Nb % max.	V % max.	Al % min. c	Ti % max.	Cr % max.	Ni % max.	Mo % max.	Cu % max. d	N % max.
Volgens EN 10027-1 en CR 10260	Volgens EN 10027-2														
S275M	1.8818	0,15 e	0,55	1,60	0,035	0,030	0,06	0,10	0,015	0,06	0,35	0,35	0,13	0,60	0,017
S275ML	1.8819				0,030	0,025									
S355M	1.8823	0,16 e	0,55	1,70	0,035	0,030	0,06	0,12	0,015	0,06	0,35	0,55	0,13	0,60	0,017
S355ML	1.8834				0,030	0,025									
S420M	1.8825	0,18 f	0,55	1,80	0,035	0,030	0,06	0,14	0,015	0,06	0,35	0,85	0,23	0,60	0,027
S420ML	1.8836				0,030	0,025									
S460M	1.8827	0,18 f	0,65	1,80	0,035	0,030	0,06	0,14	0,015	0,06	0,35	0,85	0,23	0,60	0,027
S460ML	1.8838				0,030	0,025									

Na het invoeren van de maximale percentages uit de bovenstaande tabel in de CEV formule wordt een percentage verkregen van 0,72%. Het koolstofpercentage alleen is al 0,18 (mag niet meer bedragen dan 0,12). Dit betekend dat met de fabrikant afspraken moeten worden gemaakt om te voldoen aan de gestelde eisen. Zodoende moet geprobeerd worden onder het CEV-gehalte van 0,41 procent te blijven.

Staalkeuze

Wanneer het koolstof equivalent onder de 0,41 procent wordt gehouden is het niet nodig om het materiaal voor te verwarmen om de losse elementen aan elkaar worden gelast. Wanneer het te koud is of de materialen hebben een grote dikte is het wel nodig het materiaal voor te verwarmen. Zit het percentage boven de 0,41, dan moet het materiaal worden voorverwarmd. Wanneer de eis van RWS niet gehaald wordt en lassen moeten worden uitgevoerd bij een percentage van 0,72, dan is de vraag hoeveel warmtetoevoer nodig is. Voor de benadering wordt gekeken naar figuur 2 van het Histar staal voor de benodigde warmte bij een CEV van 0,45%. Op de onderstaande afbeelding is weergegeven dat een warmtetoevoer van circa 50 graden Celsius nodig is.



Figuur 2 met daarin aangegeven wat de benodigde warmtetoevoer moet zijn voor S460M bij een CEV van 0,65 procent.
Bron: ArcelorMittal / Histar

In hoofdstuk 3.1 over Histar staal werden eisen gesteld dat het waterstofpercentage in de las een belangrijke rol speelt. Naast de hoeveelheid waterstof hebben ook de plaatdikte en de lasnaadvorm invloed op het warmte behandlingsproces. De laatste twee hebben voornamelijk invloed op de koelsnelheden in de overgangszone van de las. De afkoeling moet gecontroleerd plaatsvinden. Wanneer het materiaal te snel afkoelt door een ongecontroleerde warmtebehandeling zullen er scheuren optreden doordat de materialen te snel krimpen. Dit fenomeen wordt koudscheuren genoemd. De volgende scheurfactor (P_c) formule houdt rekening met de drie variabelen naast de aanwezigheid van de percentages van de verschillende elementen:

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

Hierin:

t = plaatdikte in mm
H = hoeveelheid waterstof in het lasmateriaal in ml/100 gr

Het waterstofpercentage is afhankelijk van de elektroden die wordt gebruikt. Voor basische elektroden van FILARC mag 8 ml/110 gr worden aangehouden. Als de elektroden vacuüm zijn verpakt en voor gebruik op 350 graden twee uur lang worden gedroogd, mag 4,0 ml worden gehanteerd. Voor metaalpoeder gevulde draden mag een 2,0 ml worden aangehouden.

Staalkeuze

Afhankelijk van 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 is 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.

3.3 Genormaliseerd staal

De laatste staalsoort die wordt bekeken is het genormaliseerde gewalst staal. Voor deze analyse is gekeken naar de informatie die wordt verschaft in de NEN-EN 10025-3 (Technische leveringsvoorwaarden voor normaalgegleide/normaliserende gewalst lasbaar fijnkorrelig constructiestaal).

Deel 3 is een aanvulling op deel 1 (algemeen geldende leveringsvoorwaarden), voor platte en lange producten in warmgewalst lasbaar fijnkorrelig constructiestaal van verschillende sterkteklassen. S460 bevindt zich hiertussen voor diktes kleiner of gelijk dan 200 mm. De staalsoorten in dit document zijn bestemd voor zwaar belaste delen van gelaste constructies voor o.a. bruggen bij omgevingstemperaturen en lage temperaturen.

Normaliserend walsen is een walsproces, waarbij de laatste vervorming in een bepaald temperatuurgebied wordt uitgevoerd waardoor een materiaaltoestand wordt verkregen gelijkwaardig aan de toestand na normaalgleien zodat aan de gespecificeerde waarden van de mechanische eigenschappen wordt voldaan zelfs na normaalgleien.

Normaalgleien is een warmtebehandeling van staal, waarmee beoogd wordt te komen tot een fijnkorrelige structuur bestaande uit ferriet (korrelgrootte ≥ 6) en perliet. De behandeling bestaat uit verhitten op de daartoe geschikte temperatuur, gevolgd door rustig afkoelen. Bij het normaliseren walsen is het normaal gleien als het ware in het walsproces geïntegreerd.

Voor alle sterkteklassen in deel 3 geldt:

- Met gespecificeerde minimumwaarden van de kerfslagarbeid bij temperaturen niet lager dan -20°C , aangeduid als N
- Met gespecificeerde minimumwaarden van de kerfslagarbeid bij temperaturen niet lager dan -50°C , aangeduid als NL

Kerfslagproef: een proef die dient om inzicht te krijgen in de neiging van een staalkwaliteit om bros te breken. Bij deze beproeving wordt gebruik gemaakt van een gekerfd proefstuk die bij een vastgestelde temperatuur met één slag gebroken wordt. Voor het breken van de proefstaaf wordt meestal de slingerhamer van Charpy gebruikt, waarbij een om een horizontale as geslingerde hamer een proefstuk die tegen twee aanslagen rust, in het midden raakt. De energie die nodig is om het proefstuk te breken is een maat voor de brosheid. Door proeven te doen bij diverse temperaturen kan een idee verkregen worden omtrent de weerstand tegen brosen breuk van een bepaalde staalkwaliteit bij afnemende temperatuur.

Kerfslagwaarde: deze waarde wordt bepaald met de kerfslagproef en is de slagkracht die nodig is om de proefstaaf te breken. Bij de bepaling van de kerfslagwaarde spelen onder andere de vorm van de proefstaaf en de temperatuur een belangrijke rol. Daarom zijn deze invloedsfactoren in de normen opgenomen.

Staalkeuze

Net als voor thermo-mechanisch gewalst staal heeft RWS ook voor genormaliseerd gewalst staal aanvullende regels. Voor S460N mag het CEV percentage niet meer bedragen dan 0,45 en het koolstofpercentage niet meer dan 0,20. Verder worden voor het gebruik van S460N minder eisen gesteld dan voor S460M (zie aanvullende eisen in de bijlage van dit rapport). Aan de hand van de onderstaande percentages kan de warmtebehandeling weer worden berekend.

Tabel met aanwezige percentages van de elementen voor de productanalyse. Bron: Tabel 3 NEN-EN 10025-3

Aanduiding		C % max.	Si % max.	Mn %	P % max. a	S % max. a b ,	Nb % max.	V % max.	Al _{totaal} % min. c	Ti % max.	Cr % max.	Ni % max.	Mo % max.	Cu % max. d	N % max.
Volgens EN 10027-1 en CR 10260	Volgens EN 10027-2														
S275N	1.0490	0,20	0,45	0,45 – 1,60	0,035	0,030	0,06	0,07	0,015	0,06	0,35	0,35	0,13	0,60	0,017
S275NL	1.0491	0,18			0,030	0,025									
S355N	1.0545	0,22	0,55	0,85 – 1,75	0,035	0,030	0,06	0,14	0,015	0,06	0,35	0,55	0,13	0,60	0,017
S355NL	1.0546	0,20			0,030	0,025									
S420N	1.8902	0,22	0,65	0,95 – 1,80	0,035	0,030	0,06	0,22	0,015	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S420NL	1.8912				0,030	0,025									
S460N ^e	1.8901 ^e	0,22	0,65	0,95 – 1,80	0,035	0,030	0,06	0,22	0,015	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S460NL ^e	1.8903 ^e				0,030	0,025									

^a Voor lange producten kan het gehalte aan fosfor en zwavel 0,005 % hoger zijn.

^b Voor spoorwegtoepassingen kan bij de bestelling een maximumgehalte aan zwavel van 0,012 % worden overeengekomen.

Zie optie 32.

^c Indien voldoende andere stikstofbindende elementen aanwezig zijn geldt het totale minimumgehalte aan aluminium niet.

^d Een kopergehalte boven 0,45 % kan warmscheuren tijdens warmvervormen veroorzaken.

^e $V + Nb + Ti \leq 0,26 \%$ en $Mo + Cr \leq 0,38 \%$.

Uit de berekening van het CEV-gehalte komt een waarde van 0,615% (bij een laag percentage van Mn). Deze waarde is lager dan die S460M. Door afspraken te maken met de fabrikant kan makkelijker toegestane waarde worden verkregen die RWS voorschrijft. Ook hier geldt weer dat moet worden voorverwarmd en dat het warmteproces gecontroleerd dient te worden.



Staalkeuze

4 OVERWEGING KEUZE STAALSOORT/ CONCLUSIE

Omdat het aannemelijker is dat de grens voor standaard constructiestaal (S355) eerder één sterkteklas omhoog gaat dan twee, wordt S460 gehanteerd boven een nog hogere staalkwaliteit. Daarnaast geldt dat voor S460 dezelfde Eurocodes van toepassing zijn als die van S355. De staalsoorten die overblijven na deze benadering zijn:

- S460 N/NL
- S460 M/ML
- S460 Histar

Het verschil zit in het productieproces. N/NL worden verkregen door nagloeien of normaliserend walsen en M/ML en Histar worden gemaakt door middel van thermomechanisch walsen (NEN-EN 10025-3 en de 10025-4). Na gesproken te hebben met inkoopafdeling blijkt dat, vaak in samenhang met de ROK, geen thermo-mechanisch gewalst staal wordt ingekocht voor de bruggen die VSF realiseert. Door de vloeigrens op te schroeven van S355 naar S460 is er één uitzondering op de ROK. Wanneer er ook wordt gekozen voor thermo-mechanisch gewalst staal, dan zijn er twee uitzonderingen. Na overleg van welke staalsoort gekozen moet worden voor het afstudeeronderzoek is besloten om verder te gaan met S460N.

Het grote voordeel van thermo-mechanisch gewalst staal ten opzichte van normaliserend gewalst staal is dat bij het lassen van de onderdelen minder of zelfs niet te hoeft te worden voorverwarmd, zoals dat bij Histar staal het geval is. Het lassen zal iets bewerkelijker zijn bij normaliserend gewalst staal omdat eerder een goede regulatie van de warmtebeheersing van kracht is.



AANNULLENDE EISEN RWS (ROK) S460



Aanvullende eisen S460

17-12-2014

1. Aanvullende eisen aan toepassing van S460

In aanvulling op EN 1090 en in afwijking van de ROK versie 1.2 geldt voor de toepassing van S460 het volgende:

1. Staalkwaliteit van het type S460 N of NL dient te voldoen aan NEN-EN10025-3, waarbij:

- a) De Re/Rm-verhouding, gerelateerd aan de attest-waarden, kleiner dient te zijn dan 0,85;
- b) Het koolstof-percentage (productanalyse) mag niet meer bedragen dan 0,20%;
- c) Het koolstof-equivalent (CEV, productanalyse) mag niet meer bedragen dan 0,45;
- d) De fabricerende partij moet over geschikte lasprocedures beschikken en aantoonbaar ervaring hebben met het vakkundig verwerken van S460 N / NL

2. Staalkwaliteit van het type S460 M of ML dient te voldoen aan NEN-EN10025-4, waarbij:

- a) De Re/Rm-verhouding, gerelateerd aan de attest-waarden, kleiner dient te zijn dan 0,85;
- b) Het koolstof-percentage (productanalyse) mag niet meer bedragen dan 0,12%;
- c) Het koolstof-equivalent (CEV, productanalyse) mag niet meer bedragen dan 0,41;
- d) De fabricerende partij moet over geschikte lasprocedures beschikken en aantoonbaar ervaring hebben met het vakkundig verwerken van S460 M / ML;
- e) Voorafgaand aan de verwerking van het staal S460 M/ML in de constructie dient er een drievoudige lijnvormige thermische richttest bij minimaal 750 °C uitgevoerd te worden. De test dient plaats te vinden op een minimaal 400 °C voorverwarmd proefstuk van dezelfde smelt met een representatieve dikte, welke met een brander tot minimaal 750 °C oppervlaktetemperatuur lijnvorming wordt verwarmd (metingen met een geijkte infrarood meter). Na uitvoering van deze test dienen zowel de minimale rekgrens (Re) en de treksterkte (Rm) te voldoen aan de in de norm NEN-EN10025 gestelde eisen. Tevens moet de gemeten Re/Rm verhouding maximaal 0,85 bedragen. Deze meetwaarden na uitvoering van de richttest moeten worden bepaald aan de proefstaafjes waarvan de kern 10 tot 12 mm onder het staaloppervlak van het verwarmde proefstuk ligt.
- f) De testmethode voor het thermisch richten volgens L3 750 (zie bijlage bij dit document voor toelichting procedure) dient voorafgaand aan het daadwerkelijk uitvoeren gevalideerd te zijn door de opdrachtgever.
- g) De proefomvang van de richttest omvat representatieve materiaaldiktes (minimale en maximale dikte) van elke smelt. Opdrachtgever dient van de resultaten en de uitvoeringsplanning van alle richttesten op de hoogte gehouden te worden;
- h) Er dient een richtprocedure voor de constructie te worden opgesteld met een maximale richttemperatuur 650 °C welke gevalideerd moet worden door de opdrachtgever. Een nauwkeurige meting van maximale temperatuur, zoals een infrarood meting of gelijkwaardig, dient daarbij te worden uitgevoerd;
- i) Het is niet toegestaan warm te vervormen.

3. Op alle werkplaatstekeningen dient eenduidig en consistent per onderdeel de materiaalsoort worden aangegeven.

4. In het beheer- en onderhoudsplan moet een overzichtstekening worden opgenomen waaruit eenduidig blijkt welke materiaalsoort (incl. specs) waar in de constructie is verwerkt en moeten, t.b.v. reparaties en calamiteiten, procedures zijn opgenomen voor herstelwerkzaamheden op locatie aan onderdelen vervaardigd uit S460.

5. Identificatie: Hard markeren mag alleen worden toegepast in de gebieden die zijn aangegeven op de tekeningen. Tot en met staal klasse S460 mag gebruik worden gemaakt van geponste of geboorde markeringen. Er mag gebruik worden gemaakt van zachte- of lage spannings-markering.

6. Behandeling en opslag: De Opdrachtnemer dient een werkplan aan te leveren, waarin staat aangegeven hoe onderdelen worden gehandled, ondersteund en getransporteerd in de werkplaats en naar de bouwplaats op een manier waarbij overbelasting van de permanente constructiedelen wordt voorkomen. Dit plan dient ter acceptatie te worden ingediend bij de Opdrachtgever. Stalen onderdelen van de kokerligger dienen tijdens transport op een juiste manier te worden ondersteund, vastgezet en gestabiliseerd om schade tijdens transport te voorkomen. Gedurende de opslag dienen de elementen op een zodanige wijze te worden ondersteund dat plasvorming op horizontale vlakken voorkomen wordt. Aanvullende voorzorgsmaatregelen moeten worden genomen tijdens (zee) transport.

Bijlage: Richtprocedure L3 750

Het uitvoeren van drievoudig uitgevoerde lijn gerichte richtproef waarbij het basis materiaal de temperatuur van 750 graden heeft bereikt.

De beschrijving van de procedure is als volgt:

Op het basismateriaal (van 400° C) wordt een lijn gedefinieerd waar middels een gasbrander warmte wordt ingebracht waarbij het oppervlak van het basismateriaal de temperatuur van 750° C bereikt. De breedte van de te verwarmen lijn bedraagt ongeveer 50mm. De snelheid van de gasbrander dient overeen te komen met een door de opdrachtnemer voorgestelde richtprocedure methode beschrijving. De afstand van de brander tot het basis materiaal dient minimaal 50 mm te bedragen. Nadat het materiaal voor de eerste keer is gericht (opgewarmd tot 750° C) en afgekoeld is tot 300-400° C, de richtprocedure voor de 1e maal herhalen, vervolgens weer afkoelen tot 300-400° C en de richtprocedure voor de 2e maal herhalen en het materiaal laten afkoelen. Het afkoelen van het materiaal dient in rustige lucht plaats te vinden en de temperatuur van het materiaal tijdens het richten moet gemeten worden direct na het wegnemen van de gasbrander.

Ter indicatie van de oppervlaktetemperatuur, heeft het materiaaloppervlak de kleur:

700 graden C -> donkerrood

800 graden C -> rood / beginnend licht rood



Analyse Kruiswaterbrug

Afstudeeronderzoek HSS



Document : Analyse Kruiswaterbrug
Revisie : 0
Datum : 23-2-2016
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	23-2-2016	
Gecontroleerd			23-2-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Analyse project Kruiswaterbrug

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 INLEIDING	4
1 ANALYSE KRUISWATERBRUG	5
1.1 Doelstelling	6
1.2 Voorbereiding	6
1.3 Keuze aandrijving en fundatie	7
1.4 Planning	7
1.5 Geluid	8
2 TEKENINGEN ONTWERP	10
3 ONTWERPCRITERIA	13
3.1 Gehanteerde normen en documenten	13
3.2 Gevolgklassen en ontwerplevensduur	13
3.3 Belastingsfactoren en combinatieregels	14
4 SPECIFICATIE RIJDEK	15
4.1 Indeling van de rijweg, afmetingen en grootheden	15
5 ALGEMENE CORRECTIEFACTOREN	16
6 VERKEERSBELASTINGEN (UGT)	17
6.1 Belastingmodel 1 (LM1 of BM1)	17
6.1.1 Twee geconcentreerde aslasten	17
6.1.2 Gelijkmatic verdeelde belasting per oppervlakte (q) (ULD)	18
6.2 Belastingmodel 2 (LM2 of BM2)	18
6.3 Belastingen op het inspectiepad	19
6.4 Rem- en versnellingskrachten	20
7 WINDBELASTING	21
8 TEMPERATUURBELASTING	22
9 BIJZONDRE BELASTINGEN	22
9.1 Aanrijdbelastingen	22
9.2 Aanrijdbelastingen op voertuigkeringen	23
9.3 Controle bezwijklast leuningen	24
9.4 Belastingen t.g.v. verkeersongeval op brugdek	24
9.5 Aanvaring val	24
10 BELASTINGSCOMBINATIES (OVERBELASTEN COMPLEET MODEL)	25
11 PERMANENTE BELASTINGEN	26
11.1 Gewicht lastoever van het brugdek	26
11.2 Gewicht van andere brugonderdelen	26
11.3 Opleggingen	28
12 SIMULATIES	29
12.1 Hoofdliggers, dwarsdragers en troggen (groep 1a)	29
12.2 Groep 1b	31
12.3 Groep 2	32
12.4 Groep wind 1	32
12.5 Groep temperatuur 1	32
12.6 Groep aanrijdingen	32
13 CONTROLE DOORBUIGING	34
14 BEREKENINGEN	34



Analyse project Kruiswaterbrug

14.1	Toetsing sterkte	34
14.2	Stabiliteit lijfplaten hoofdliggers	35
14.2.1	Naast het hoofddraaipunt	35
14.2.2	Boven het hoofddraaipunt	36
15	VERMOEIING	38
15.1	Uitgangspunten	38
16	LASSEN, MODELLEN EN CONTROLES	41
16.1	Lasdetails	41
16.2	Meches uit ANSYS	42
16.3	Vermoeiingsberekening	43
17	CONCLUSIE	45



Analyse project Kruiswaterbrug

0 INLEIDING

Voor het afstudeeronderwerp over het gebruik van HSS wordt een vergelijking gemaakt tussen een bestaand en een nieuw ontwerp. Uit de vergelijking moet blijken wat de voordelen/nadelen zijn wanneer er een hogere staalkwaliteit wordt toegepast en hoeveel er kan worden bespaard op het gebruik van staal en reductie van het eigen gewicht. Tevens zal de belasting op de fundering naar verwachting lager uitvallen.

Het project dat dient als leidraad voor veel ontwerpregels, belastingen en in zekere mate de afmetingen (overspanning en breedtes van de brug staan vast) is de Kruiswaterbrug. Het betreft een basculebrug die o.a. door VSF is gerenoveerd voor de opdrachtgever Rijkswaterstaat.

Voordat er een nieuw ontwerp gemaakt wordt is er een analyse gemaakt die de gerenoveerde Kruiswaterbrug in beeld brengt. In dit rapport worden alle aspecten die van toepassing zijn voor het brugdek uitvoerig behandeld.

Wanneer de ontwerpstappen bekend zijn moet voor het nieuwe ontwerp worden gekeken waar staal te winnen valt door de kwaliteit te verhogen naar S460. Een ruwe schets zal de basis vormen. Samen met de normen en voorschriften moeten de berekeningen worden nagelopen die voor de Kruiswaterbrug van toepassing waren. Alle uitzonderingen worden doorgevoerd in de ontwerpstappen en aan het eind moet blijken of het ontwerp met HSS mogelijk is (controles moeten voldoen aan de gestelde eisen).

De volgende stap is de handberekening en het voorlopig ontwerp te optimaliseren. Waar staal kan worden gewonnen zal dit worden gedaan. Het kan ook zijn dat er op sommige plaatsen te weinig staal aanwezig is en de berekening niet voldoet. In dat geval zal eerst gekeken worden of het ontwerp geoptimaliseerd kan worden. Wanneer dit niet mogelijk is kan altijd nog meer staal worden toegepast.

Analyse project Kruiswaterbrug

1 ANALYSE KRUISWATERBRUG

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. Het brugdek overspant een lengte van ca. 7,90 m en heeft een doorvaarhoogte van ca. 2,90 meter. De brug heeft twee verschillende brugdekken. De Noordbrug, rijrichting Afsluitdijk, heeft een houten brugdek en de Zuidbrug, rijrichting Sneek heeft een stalen brugdek (zie fig.1 en 2).

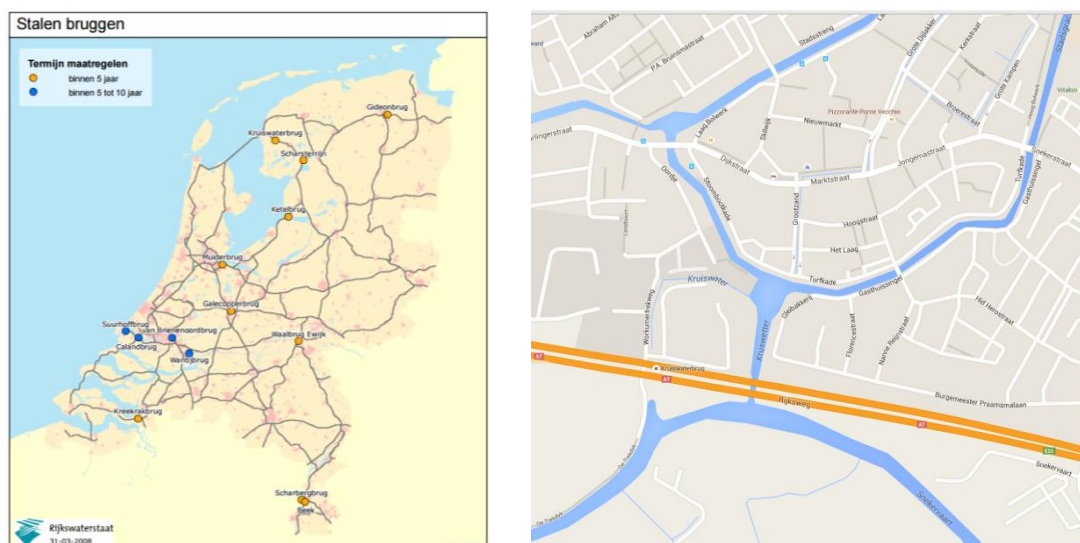


Figuur 1: De te renoveren Kruiswaterbrug (Zuidbrug), foto en Google Street View

Op 31 maart 2008 heeft Rijkswaterstaat (RWS) bepaald dat er een aantal bruggen in Nederland binnen 5 of 10 jaar vervangen moeten worden. De Kruiswaterbrug is één van de bruggen die op de planning voor renovatie stond (zie Figuur.2).

Volgens Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, tevens de opdrachtgever, waren de volgende redenen doorslaggevend voor renovatie:

- Vermoeiingsproblemen van het stalen brugdek (Zuidbrug);
- Veiligheid voor zowel de bediening als de besturing;
- Klachten over geluidsoverlast aan de oostzijde door toedoen van passeren van zwaar verkeer en de bediening van de brug zelf.



Figuur 2: locatie de te vervangen Kruiswaterbrug (Zuidbrug) in Bolsward



Analyse project Kruiswaterbrug

1.1 Doelstelling

De renovatie werd uitbesteed aan de bedrijven Van Hattum en Blankevoort, Volker Staal en Funderingen en Volker Rail (bedrijven van VolkerWessels). Verder was Vialis erbij betrokken voor het elektrotechnische deel. Volgens het Design en Construct contract is met RWS het volgende afgesproken:

- Vervanging van het brugdek van de Zuidbrug, inclusief de vervanging van de mechanische uitrusting en het uitvoeren de bijbehorende aanpassingen aan de civiele constructie;
- Integraal vervangen van het brugbesturing- en bedieningsinstallaties en alle andere elektronische installaties;
- Vervanging van de aandrijving van de Noordbrug;
- Borgen van de veiligheid tijdens de renovatie en het gebruik voor alle betrokken partijen;
- Aanbrengen van een hemelwaterafvoersysteem voor de afvoer van het hemelwater in de basculekelder van de Zuidbrug;
- Verzorgen van onderhoud tijdens de werkzaamheden.

Voor de Noordbrug bestaan de werkzaamheden alleen uit het verbeteren van de aandrijving (elektromotor en rem), besturing en veiligheidseisen. De rest wordt in stand gehouden. De Zuidbrug wordt in zijn geheel vervangen met uitzondering van de basculekelder. Deze moet samen met de fundering worden aangepast.

1.2 Voorbereiding

Om te komen tot een optimale oplossing voor de renovatie van de Kruiswaterbrug is er aandacht besteed aan de bestaande situatie in combinatie met de gemaakte afspraken. Met het oog op de toekomst (levensduur) is de gewijzigde regelgeving in kaart gebracht. Ook is gekeken naar de belastingen en de frequente belastingswisselingen door het verkeersaanbod. Om aan de gestelde levensduur te voldoen bleek het noodzakelijk dat het nieuwe ontwerp zwaarder zou worden uitgevoerd. De grootste gewichtstoename zat voornamelijk in het uitvoeren van een dikkere plaat voor het rijdek. Door de toevoeging van passeerpaden voor het bedieningspersoneel, werd het totale gewicht van de brug nog iets hoger. De passeerpaden komen aan beide kanten van de brug achter de vangrail om een veilige route te creëren.

Het zwaardere ontwerp heeft tot gevolg dat er hogere belastingen ontstaan op de draaipunten van de brug die in de basculekelder moeten worden afgevoerd. Het toevoegen van twee passeerpaden heeft tot gevolg dat het windoppervlak groter wordt. Naast een toename voor de verticale belasting is er dan ook sprake van een toename van de horizontale belasting componenten op de draaipunten.

De bestaande basculekelder werd tijdens de renovatie niet vervangen. Wanneer de brug aan de ene kant zwaarder wordt moet er aan de andere kant meer contragewicht komen om de brug te openen. Omdat de kelder hetzelfde bleef, was het niet mogelijk extra contragewicht toe te voegen. Er is rekening mee gehouden dat de brug er ongeveer even lang over doet bij het openen en sluiten. Om dit te realiseren is er een toename van vermogen van de aandrijving nodig.

Aan de hand van berekeningen is aangetoond dat de betonnen consoles, waarop de hoofddraaipunten steunen zwaarder worden belast. De aanpassing van de consoles was noodzakelijk om de krachten af te voeren. De toename van de belastingen die hierboven zijn beschreven zorgen aan het eind voor een toename op de fundatie.

Analyse project Kruiswaterbrug

1.3 Keuze aandrijving en fundatie

Na een uitgebreide analyse van verschillende aandrijvingsystemen is er uiteindelijk gekozen voor de variant Panamawiel. De capaciteit van de aandrijving en de beschikbare ruimte in de basculekelder waren doorslaggevend voor deze keuze. De wens was met zo min mogelijk ingrijpende maatregelen de renovatie binnen het tijdsbestek uit te voeren. Het grote voordeel van het panamawiel is dat minimale aanpassingen aan de basculekelder zijn vereist. De wijze waarop de belastingen door de constructie worden geleid blijft door deze aandrijving/situatie onveranderd. Hierdoor hoeven geen aanpassingen te worden gedaan aan de fundatie, zo is gebleken uit gedane controles.

1.4 Planning

In een 9 daagse planning wordt de renovatie in januari 2014 op locatie uitgevoerd. Om inzicht te krijgen in de werkzaamheden volgt hierna een korte beschrijving van de fases. In Figuur 3 is de planning weergegeven ter illustratie. In 2012 wordt gestart met voorbereidingen van het project. In het najaar van 2013 wordt gestart met de werkzaamheden op locatie (graafwerkzaamheden en renovatie van de Noordbrug). Aan het eind van 2013 komt het nieuwe brugdek gereed. Dit is gerealiseerd in de constructiewerkplaats van VSF en zou getransporteerd worden naar projectlocatie om daar vervolgens gemonteerd te worden.

Op locatie wordt het huidige brugdek losgekoppeld van de draaipunten tussen het brugdek en het contragewicht in de basculekelder. Na het verwijderen van het brugdek worden werkzaamheden verricht aan de installaties, de basculekeer met contragewicht en de consoles. Wanneer het mogelijk is, zal het nieuwe brugdek geplaatst en aan het contragewicht vast gelast worden. Wanneer dit gerealiseerd en gecontroleerd is wordt de werking van de brug getest. Ten slotte vindt het afwerken van de installaties en montage van de losse onderdelen plaats.



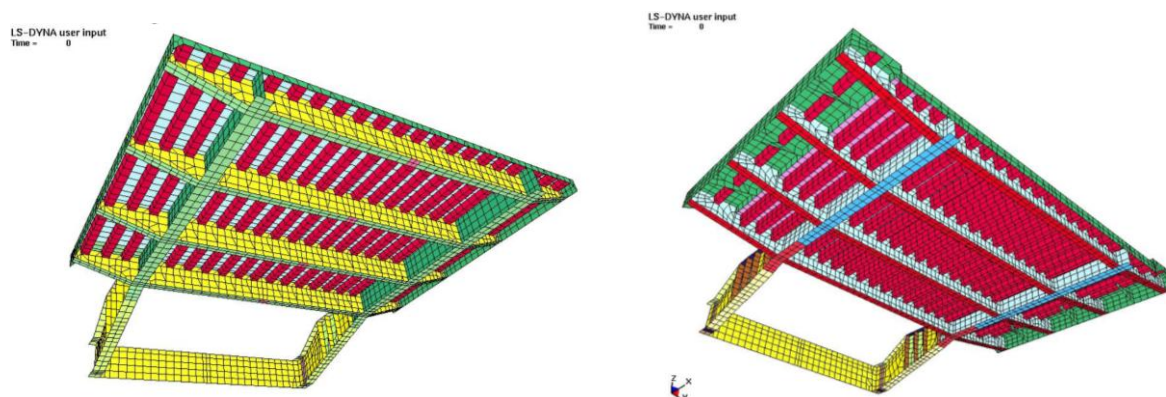
Figuur 3: Negen daagse montageplanning renovatie Kruiswaterbrug

Analyse project Kruiswaterbrug

1.5 Geluid

Na het VO heeft VSF Movares gevraagd om de geluidsafstraling te berekenen met eindige elementen (FEM) en randelementen (BEM). In Figuur 4 is het nieuwe en oude ontwerp ingevoerd. Met eindige elementen werden de trillingen in het brugval bepaald. De randelementen leiden tot een geluidsbelasting in de omgeving afkomstig van de trillingen in het brugdek. Deze manier van aantonen was een gestelde eis vanuit RWS. Het VO voldeed in eerste instantie niet aan de gestelde eisen met betrekking tot de geluidsafstraling, ondanks dat het brugdek volgens de Eurocode 10 mm dikker werd (wat zeer gunstig was voor de afstralingreductie). Voornamelijk door de nieuwe passeerpaden, die lichter waren ontworpen dan de rijbanen, was een afstraling van 10 dB te veel aanwezig. Door enkele wijzigingen in het ontwerp toe te passen, kon de afstraling gereduceerd worden:

- Het plaatwerk op de passeerpaden vervangen door roosters
- Een extra dwarsdrager toepassen



Figuur 4: Oude en nieuwe ontwerp van de Kruiswaterbrug dat zwaarder is uitgevoerd met passeerpaden aan weerszijde.

Vanwege het feit dat het brugdek dikker werd, waren er ook andere onderdelen, zoals de flensen van de hoofd- en dwarsdragers die zwaarder moesten worden uitgevoerd. In Tabel 1 worden de afmetingen van de nieuwe en oude situatie tegenover elkaar gezet.

Tabel 1: Afmetingen van de brugonderdelen van de huidige Kruiswaterbrug en die van het nieuwe voorlopige ontwerp.

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



Analyse project Kruiswaterbrug

De wijzigingen bestaande uit een extra dwarsdrager en roosters i.p.v. een stalen dekplaat voor de passeerpaden, die door Movares gecontroleerd werden op geluidsafstraling voldeden net niet aan de gestelde eis (zie Figuur 5). Van de 10 dB die gereduceerd moesten worden, werden er 8 dB gereduceerd. Desondanks keurde RWS het ontwerp goed.

Voordat Movares de roosters controleerde waren destijds meerdere alternatieven aan RWS voorgelegd. Het toepassen van aluminium en kunststof dekken voor de passeerpaden zou niet alleen de constructie lichter maken, maar ook de geluidsafstraling reduceren. Op basis van technische gronden en/of twijfel betreft de aantoning van de te behalen levensduur heeft RWS deze alternatieven afgewezen.

Voor het ontwerp van de Kruiswaterbrug in HSS dient naar aanleiding van bovenstaande beschrijving rekening gehouden te worden met geluidsafstraling. Het is waarschijnlijk niet mogelijk om overal dunnere dekplaten toe te passen en te voldoen aan de gestelde eis van RWS voor reductie van de geluidsafstraling.



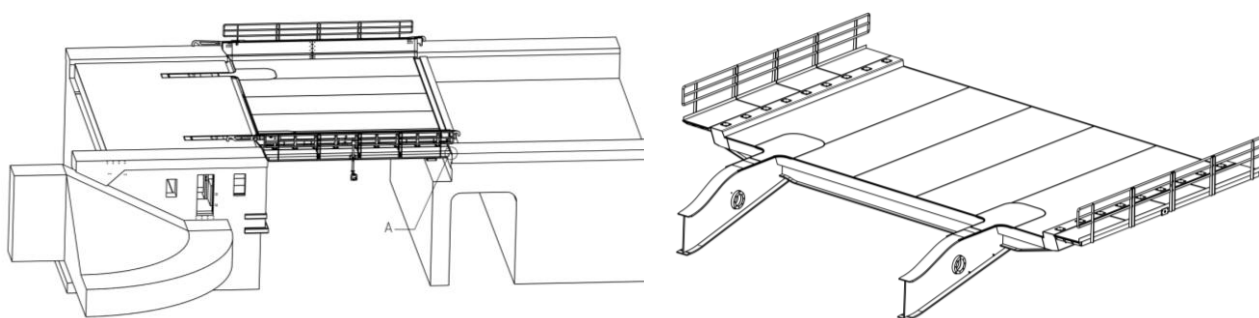
Figuur 5: De nieuwe Kruiswaterbrug met roosters bij de passeerpaden en een extra dwarsdrager.

Analyse project Kruiswaterbrug

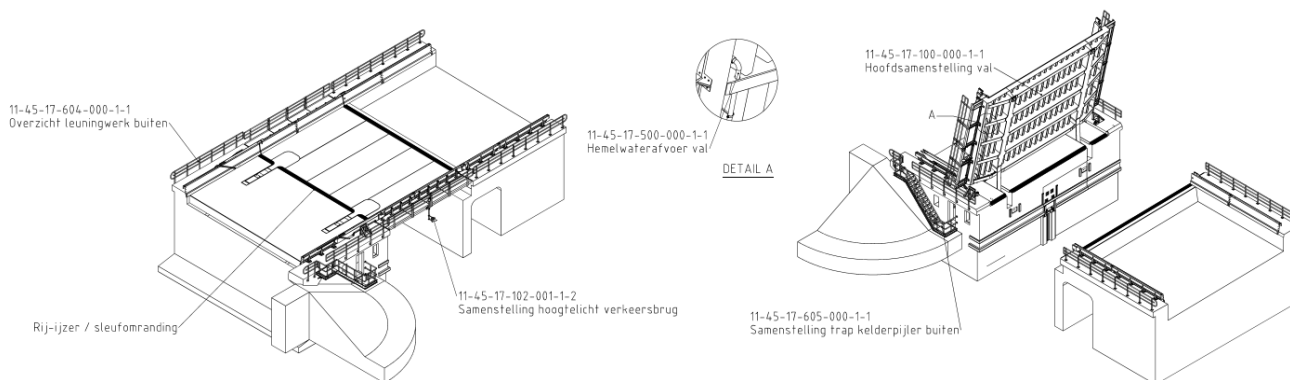
2 TEKENINGEN ONTWERP

Om een goede indicatie te geven van het ontwerp van de Kruiswaterbrug worden in dit hoofdstuk verschillende tekeningen getoond en kort toegelicht. Eerder in dit rapport zijn al foto's en modelleringmodellen getoond. Hierbij wordt opgemerkt dat de modellen zijn gebaseerd op het VO. De tekeningen die nu worden behandeld zijn gebaseerd op het DO.

De eerste 3D tekeningen zijn overzichtstekeningen die een impressie geven van hoe de brug er in zijn geheel uit ziet.



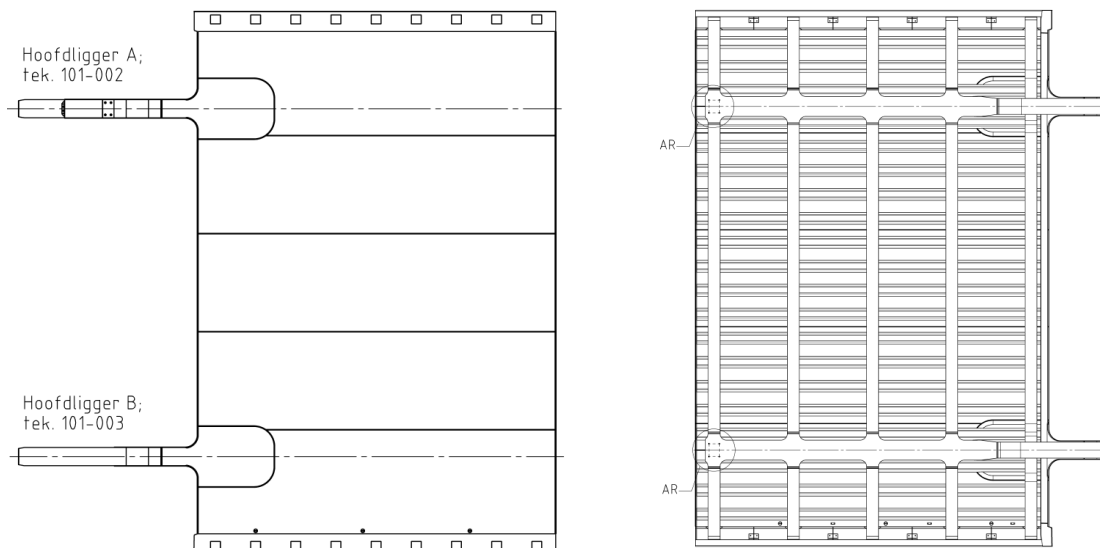
Links het brugdek bevestigd aan de bestaande basculekelder. Rechts het brugdek los zoals het in de constructiewerkplaats van VSF is gerealiseerd.



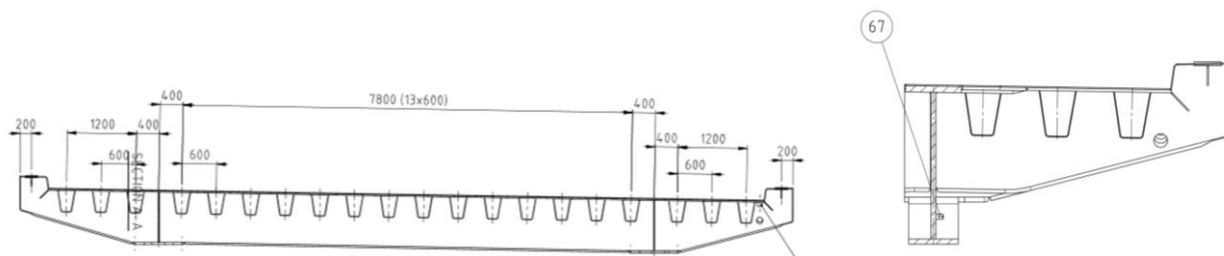
De Kruiswaterbrug in open en dichte toestand. Bij de rechter afbeelding zijn de troggen, langs- en dwarsdragers te zien. Op de volgende bladzijde worden deze nader toegelicht.

Analyse project Kruiswaterbrug

In de volgende tekeningen is meer ingezoomd op het brugdek en de bijhorende details.



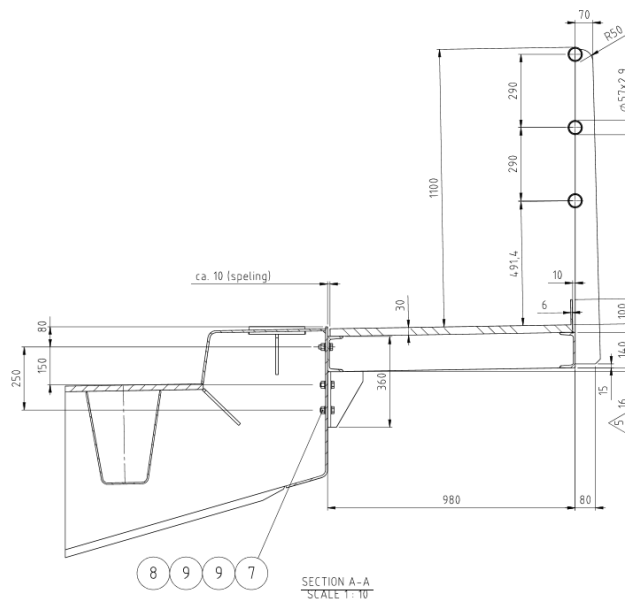
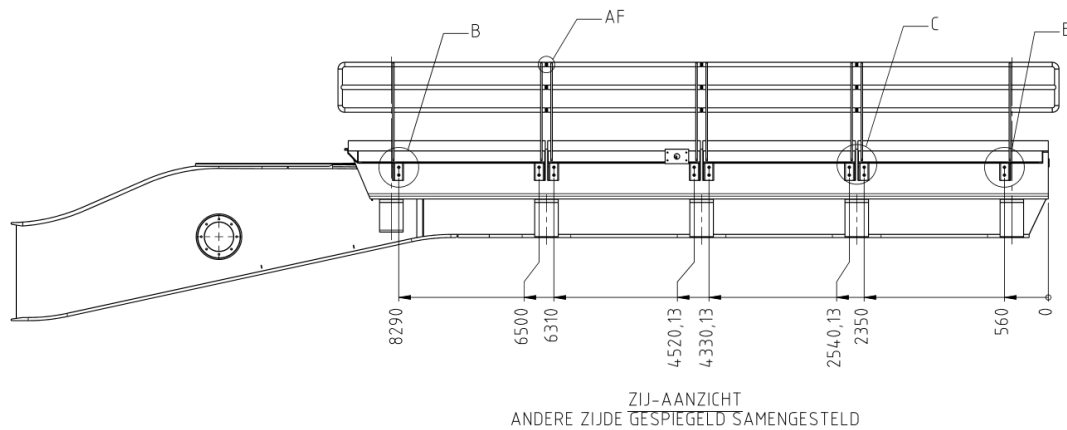
Hierboven zijn het bovenaanzicht en het onderaanzicht afgebeeld. Op de rechter afbeelding is goed te zien hoe de langliggers en dwarsdragers zijn verdeeld. In eerste instantie waren er vier dwarsdragers berekend in het VO, maar om de geluidsoverlast te reduceren werd een extra dwarsdrager toegepast.



Hierboven is de dwarsdoorsnede te zien met de verdeling van de troggen. Alleen de passeerpaden zitten hier nog niet aan vast. Deze zijn op de volgende bladzijde te vinden. De dekplaat is bijna overal 22 mm dik behalve aan de bovenkant bij de hoofdliggers. Op deze locaties is de plaat iets dikker, namelijk 50 mm.

Analyse project Kruiswaterbrug

Op het zijaanzicht hieronder is de leuning aan het passeerpad bevestigd. Door lichtere profielen in het verlengde van de dwarsdragers en U-profielen zijn deze aan elkaar verbonden. Aan de kant van de brug wordt het profiel ondersteund door een schot. Aan dezelfde kant wordt het passeerpad door middel van bouten bevestigd aan brugdek. Aan de andere kant wordt de leuning vast gelast aan het buitenste U-profiel. Tot slot worden er roosters gebruikt in plaats van stalen dekplaten.



Analyse project Kruiswaterbrug

3 ONTWERPCRITERIA

In het document van de Kruiswaterbrug gemaakt door het ingenieursbureau ITBB worden sterkte- en vermoeiingsberekeningen gedaan om aan te tonen of het gemaakte ontwerp voldoet. Voordat de berekeningen kunnen worden uitgevoerd moeten de belastingen en ontwerpcriteria in beeld worden gebracht. De berekeningen zullen door het invoeren van HSS anders zijn maar de belastingen, gevolgklasse, correctiefactoren enz. zullen niet veranderen. Het doorlopen van de stappen geeft in een latere fase van de afstudeeropdracht een goed beeld van de berekeningen indien de brug wordt ontworpen met HSS.

3.1 Gehanteerde normen en documenten

Toegepaste normen door ITBB voor het ontwerp van de Kruiswaterbrug:

- Richtlijn Ontwerp Kunstwerken (ROK)
- EC0, Grondslagen het constructief ontwerpen, NEN-EN 1990 + NB.
- EC1, Windbelastingen, NEN-EN 1991-1-4 + NB
- EC1, Temperatuursbelastingen, NEN-EN 1991-1-5 + NB
- EC1, Verkeersbelastingen op bruggen, NEN-EN 1991-1-2 + NB
- EC3, Vermoeiing, NEN-EN 1993-1-9 + NB
- EC3, Stalen bruggen, NEN-EN 1993-2 + NB

3.2 Gevolgklassen en ontwerplevensduur

De gevolgklasse (CC) bevindt zich in **CC3** omdat de brug deel uitmaakt van een hoofdweg binnen Nederland, namelijk de A7. Zie Tabel 2. De betrouwbaarheidsklasse is dan gelijk aan **RC3**.

Tabel 2: Voorbeelden van toepassingen gevolgklassen (NEN-EN 1990 Tabel NB.21 - B1)

Gevolg klasse	Voorbeelden van toepassingen voor gebouwen alsmede andere bouwwerken geen bruggen zijnde	Voorbeelden van toepassingen voor bruggen
CC3	Hoge gebouwen, die reiken tot meer dan 70 meter boven het aangrenzende maaiveld. Bouwwerken, waarvan de overspanning van de constructie in een draagrichting groter is dan 50 meter en waarbij in geval van bezwijken van die overspanning meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen (zoals bij grote tentoonstellings- en stationshallen). Bouwwerken met de bestemming publieksfunctie (bijv. onderwijsgebouwen stadions, concerthallen, tribunes), waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen. Gebouwen met verminderd zelfredzame personen zoals ziekenhuizen, celgebouwen, verpleegtehuizen met 4 of meer bouwlagen.²⁾ Gebouwen waar zeer vitale processen worden bestuurd, bijv. verkeersstoren Schiphol, verkeersleidingsgebouw. Industriegebouwen voor gevaarlijke stoffen en/of processen waarvoor een omgevingsvergunning voor het milieu noodzakelijk is.	Bruggen in en over hoofdwegen, hoofdvaarwegen en landelijke spoorwegen. Dit betreft bruggen: — in en over de hoofdinfrastructuur of over hoofdvaarwegen met intensieve industriële (zee)vaart of — waarbij het instorten maatschappij ontwrichtende gevolgen heeft; — met extreem risico op grote maatschappelijke of letselschade.
	Voor zover niet opgenomen in CC1 of CC3:	

Analyse project Kruiswaterbrug

Aan de hand van de CC3 kan de levensduur van de Kruiswaterbrug worden bepaald volgens Tabel 3. De levensduur zal vooral van belang zijn voor de vermoeiingscontrole van de lassen. De ontwerplevensduur voor de Kruiswaterbrug bedraagt **100 jaar**.

Tabel 3: Ontwerplevensduur bruggen – minimumwaarden (NEN-EN 1990 Tabel NB.8 – 2.1)

Ontwerplevensduur		Bruggen in gevolgklasse ^c
Klasse ^a	Jaren ^b	
3	50	CC1
3	50	CC2
4	100	CC3

^a De aangegeven ontwerplevensduurklasse heeft betrekking op de constructieve en dragende onderdelen van de brug.

^b De ontwerplevensduur is gedefinieerd in 1.5.2.8.
De referentieperiode is gedefinieerd in 1.5.3.15.
Voor aanpassing van de karakteristieke waarde, zie 4.1.2(7).

^c De gevolgklasse is gedefinieerd in tabel NB.20 – B1 en tabel NB.21 – B1.

3.3 Belastingsfactoren en combinatieregels

De belastingsfactoren voor blijvende en tijdelijke ontwerpsituaties staan in Tabel 4. De factoren zijn van toepassing op vergelijking 6.10b incl. ζ .

Tabel 4: Belastingsfactoren voor bruggen (NEN-EN 1990 Tabel NB.13 – A2.4(B))

Gevolgklasse	β	G			Verkeer (met $\psi = 1$)	Overig veranderlijk (met $\psi = 1$)
		$\gamma_{S,j,sup}$		$\gamma_{S,j,inf}$		
		6.10a	6.10b (incl. ξ)	6.10a en 6.10b		
CC1	3,3	1,20	1,10	0,9	1,20	1,35
CC2	3,8	1,30	1,20	0,9	1,35	1,5
CC3	4,3	1,40	1,25	0,9	1,5	1,65

De belastingscombinatie b.10b voor blijvende (eigen gewicht) en tijdelijke (normaal verkeer) belastingen luidt als volgt:

$$E_d = E \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

Omdat er voor de sterkte- en vermoeiingsberekeningen geen voorspanning van toepassing is, betekent dit dat 6.10b iets korter wordt:

$$E_d = E \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Laatstgenoemde fundamentele belastingscombinatie is van toepassing voor de sterkteberekeningen van het brugdek.

Tot slot is er nog een belastingscombinatie voor buitengewone ontwerpsituaties kijkend naar het eigen gewicht, veranderlijke belastingen en aanrijdingen:

$$E_d = E \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Analyse project Kruiswaterbrug

4 SPECIFICATIE RIJDEK

De Kruiswaterbrug is een verkeersbrug bestaande uit meerdere rijstroken en aan weerszijde een passeerpad. Specificaties rijdek conform NEN-EN 1991-2 + NB art 4.2.3.

4.1 Indeling van de rijweg, afmetingen en grootheden

Geometrie brugdek:

Totale breedte van het val:	B	=	15,4	[m]
Breedte beschikbaar voor verkeer:	B _{eff}	=	15,4	[m]
Lengte rijbaan:	L	=	8,82	[m]
Lengte van de overspanning:	L _o	=	10,12	[m]

Aantal en breedte theoretische rijstroken:

De breedte van de rijweg:	w	=	12,4	[m]
Oppervlakte van de rijweg:	A _w	=	109,37	[m ²]
Breedte theoretische rijstrook:	w _{th;l}	=	3,0	[m]
Oppervlakte theoretische rijstrook:	A _{wth;l}	=	26,46	[m ²]
Aantal theoretische rijstroken:	n _{th;l}	=	4	[-]
Breedte van het resterende oppervlakte:	B _{rest}	=	0,4	[m]
Resterend oppervlakte (L x B _{rest})	A _{B_{rest}}	=	3,528	[m ²]

Breedte passeerpaden en barriër:

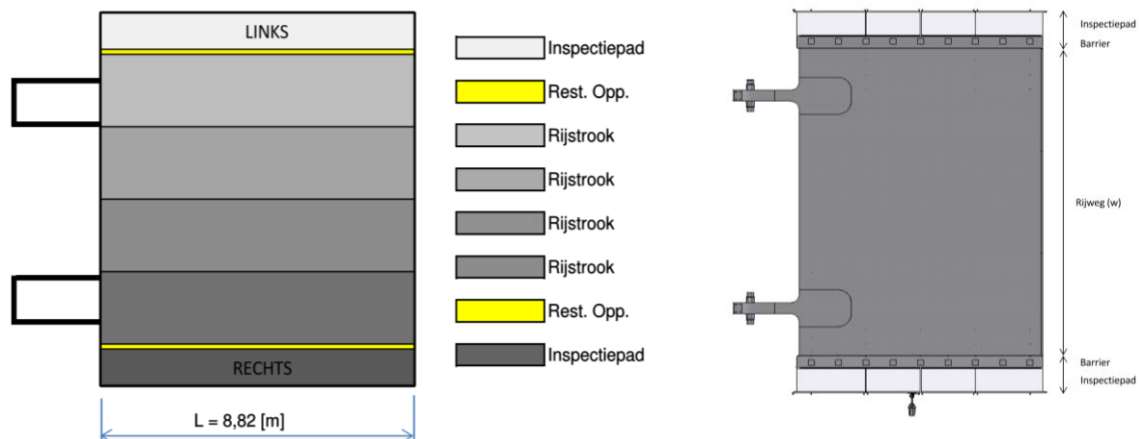
Totale breedte passeerpaden:	B _{vf}	=	3,0	[m]
Breedte passeerpad en barriër links:	B _{vf;li}	=	1,5	[m]
Breedte passeerpad en barriër rechts:	B _{vf;re}	=	1,5	[m]

Afbeeldingen van de beschreven afmetingen zijn te vinden op de volgende bladzijde in Figuur 6. De waarden zijn bepaald aan de hand van Tabel 5.

Tabel 5: Aantal en breedte van de theoretische rijstrook (NEN-EN 1991-2 Tabel 4.1)

Breedte van de rijweg w	Aantal theoretische rijstroken	Breedte van een theoretische rijstrook w _l	Breedte van het resterende oppervlak
w < 5,4 m	n _l = 1	3 m	w - 3 m
5,4 m ≤ w < 6 m	n _l = 2	$\frac{w}{2}$	0
6 m ≤ w	$n_l = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	w - 3 × n _l
OPMERKING Bijvoorbeeld geldt voor een breedte van de rijweg gelijk aan 11 m, dat: $n_l = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3^*)$ en dat de breedte van het resterende oppervlakte gelijk is aan: 11 - 3×3 = 2m.			

Analyse project Kruiswaterbrug



Figuur 6: De nieuwe Kruiswaterbrug met roosters bij de passeerpaden en een extra dwarsdrager.

5 ALGEMENE CORRECTIEFACTOREN

Correctiefactoren $\alpha; Q_i$ en $\alpha; q_i$ zijn afhankelijk van het te verwachten verkeer. Opdrachtgever RWS heeft in de ROK aangegeven dat 2.500.000 vrachtwagens per rijstrook per jaar van toepassing is. Eerder was gegeven dat de levensduur is aangenomen voor 100 jaar en dat de overspanning van de brug 10,12 meter bedraagt.

In de 1991-2 NB art 4.3.2 wordt het volgende gesteld:

- Bij doelgroep rijstroken voor vrachtwagens geldt $\alpha; q_i = 1,15$; de doelgroep rijstrook voor vrachtwagens is gelijk aan rijstrook nummer 1.
- Bij een rijweg met drie of meer theoretische rijstroken en $N_{obs} > 2.000.000$ per jaar geldt $\alpha; q_1 = 1,15$ en voor $i > 1$ geldt $\alpha; q_i = 1,40$.

Aan de hand van de twee bovenstaande punten en Tabel 6 zijn de volgende correctiefactoren van toepassing:

- Tandemstelsel (TS) rijstrook 1: $\alpha; Q_1 = 1,00 [-]$
- Tandemstelsel (TS) rijstrook $i \geq 2$: $\alpha; Q_i = 1,00 [-]$
- Gelijkmatic verdelde belasting rijstrook 1: $\alpha; q_1 = 1,15 [-]$
- Gelijkmatic verdelde belasting rijstrook $i \geq 2$: $\alpha; q_i = 1,40 [-]$
- Gelijkmatic verdelde belasting resterend oppervlak: $\alpha; q_r = 1,00 [-]$

Tabel 6: correctiefactoren (NEN-EN 1991-2 Tabel NB.1)

Aantal vrachtwagens per jaar per rijstrook voor zwaar verkeer N_{obs}^a	α_{Q1} en α_{q1}				α_{qr}
	Lengte van de overspanning of invloedslengte (L)				
	20 m	50 m	100 m	≥ 200 m	
$\geq 2\,000\,000$	1,0	1,0	1,0	1,0	
200 000	0,97	0,97	0,95	0,95	0,90
20 000	0,95	0,94	0,89	0,88	0,80
2 000	0,91	0,91	0,82	0,81	0,70
200	0,88	0,87	0,75	0,74	0,60

^a Tussengelegen waarden mogen worden geïnterpoleerd.

^a Tussengelegen waarden mogen worden geïnterpoleerd.

Analyse project Kruiswaterbrug

6 VERKEERSBELASTINGEN (UGT)

In de NEN-EN 1991-2 art 4.3 en 4.4 worden de karakteristieke belastingen (incl. correctiefactoren) die gelden voor de uiterste grenstoestand wordt in dit hoofdstuk onderverdeeld in vier delen:

Verticale belastingen

- Belastingmodel 1 (LM1 of BM1)
- Belastingmodel 2 (LM2 of BM2)
- Belasting op het passeerpad

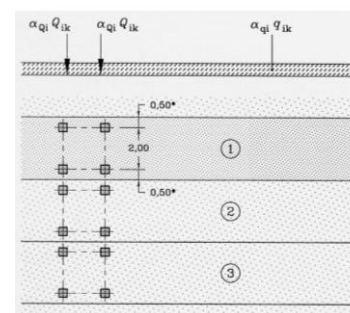
Horizontale belastingen

- Rem en versnellingskrachten

6.1 Belastingmodel 1 (LM1 of BM1)

BM 1, bedoeld voor de toetsing van de globale en lokale belastingeffecten, bestaat uit twee deelsystemen:

- Twee geconcentreerde aslasten (tandemstelsel TS)
- Gelijkmatige verdeelde belasting per oppervlakte (q) (UDL)



6.1.1 Twee geconcentreerde aslasten

In de onderstaande Tabel 7 worden de basiswaarden gegeven voor de geconcentreerde aslasten van vrachtwagens en de bijbehorende gelijkmatige verdeelde belastingen. In hoofdstuk 5 waren de bijbehorende correctiefactoren bepaald voor α_Q1 en α_Q1 , die beide gelijk waren aan 1,00 [-].

Tabel 7: BM1 (NEN-EN 1991-2 Tabel 4.2)

Positie	Tandemstelsel TS	Gelijkmatig verdeelde belasting (GVB)
	Aslast Q_{ik} (kN)	q_{ik} (of q_{rk}) (kN/m ²)
Rijstrook nummer 1	300	9
Rijstrook nummer 2	200	2,5
Rijstrook nummer 3	100	2,5
Overige rijstroken	0	2,5
Resterende oppervlakte (q_{rk})	0	2,5

De belastingen voor twee geconcentreerde aslasten (incl. correctiefactoren) komen er dan als volgt uit te zien:

positie	Belastingen met tandenstelsel [kN]	Belasting per wiel [kN]
Rijstrook 1 (i=1)	$Q1 = 300$	$Fw1;k = 150$
Rijstrook 1 (i=2)	$Q2 = 200$	$Fw2;k = 100$
Rijstrook 1 (i=3)	$Q3 = 100$	$Fw3;k = 50$
Rijstrook 1 (i>3)	$Q0 = 0$	$Fw0;k = 0$
Resterend oppervlak	$Qr = 0$	$Fwr;k = 0$

Analyse project Kruiswaterbrug

6.1.2 Gelijkmatic verdeebe beasting per oppervlakte (q) (ULD)

De correctiefactoren uit hoofdstuk 5 voor de gelijkmatic verdeebe beastingen waren gelijk aan:

- $\alpha; q_1 = 1,15 [-]$
- $\alpha; q_i = 1,40 [-]$
- $\alpha; q_r = 1,00 [-]$

Na het doorvoeren van de correctie in de basiswaarden die gegeven zijn in Tabel 7, worden de karakteristieke waarden als volgt:

Positie	$q_i; k$ en $q_r; k$ [kN/m ²]
Rijstrook 1 (i=1)	$q_1 = 10,4$
Rijstrook i (i > 1)	$q_2 = 3,5$
Resterend oppervlak	$q_r = 2,5$

6.2 Belastingmodel 2 (LM2 of BM2)

BM2 bestaat uit één enkele aslast, bedoeld voor de toetsing van de dynamische invloeden van het gewone verkeer, zie Figuur 7. De karakteristieke waarde wordt bepaald aan de hand van de volgende formule:

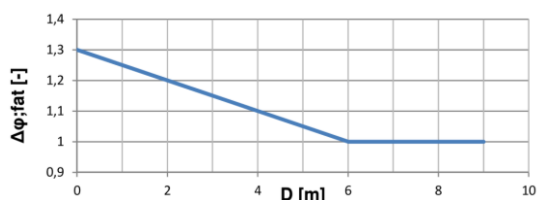
$$Q; k = Q; ak * \beta; Q * \Delta\phi; fat$$

Voor BM2 is er net als BM1 een correctiefactor van toepassing. Volgens de NEN-EN 1991-2 NB. art 4.3.3 wordt gesteld dat $\alpha; Q_1 = \beta; Q$.

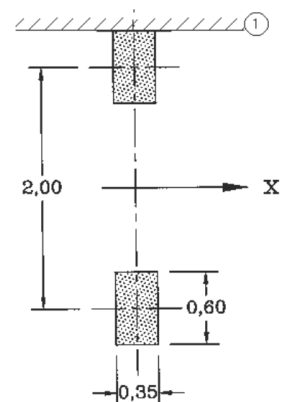
$$\begin{aligned} \beta; Q &= 1,00 [-] \\ Q; ak &= 400 [kN] \end{aligned}$$

$\Delta\phi; fat$ is de correctiefactor (Grafiek 1) die van toepassing is dicht bij de voegovergangen, gedefinieerd in 4.6.1 (6):

$$\Delta\phi; fat = 1,30 * \left(1 - \frac{D}{6}\right) ; \Delta\phi; fat \geq 1,0$$



Grafiek 1: $\Delta\phi; fat$ voor BM2



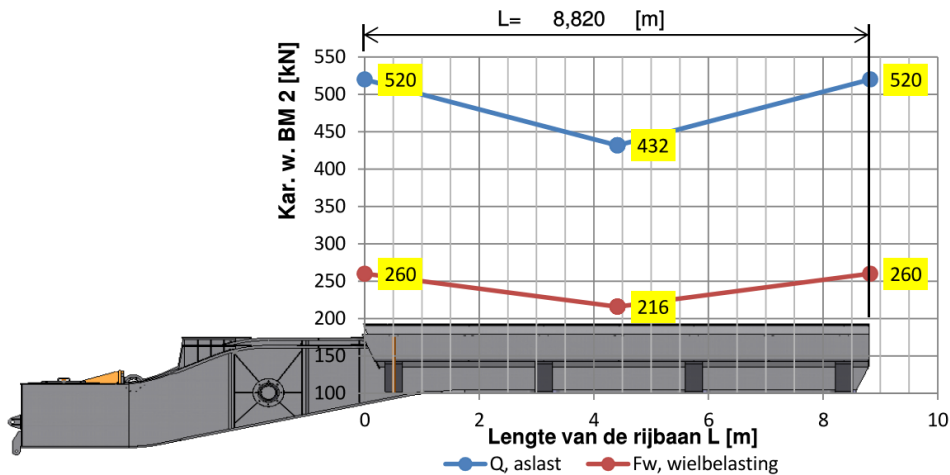
Verklaring

X Lengterichting van de brug
1 Stootrand

Figuur 7: Enkele aslast BM2

Analyse project Kruiswaterbrug

Door de aanwezigheid van de correctiefactor $\Delta\phi$ fat zijn de karakteristieke waarden van de aslasten variabel. In onderstaande afbeelding is te zien dat de minimale Q_k 432 kN en de maximale Q_k 520 kN bedraagt.



6.3 Belastingen op het inspectiepad

Aan de hand van de leuningbelasting en de gelijkmatige verdeelde belasting op de passeerpaden kunnen de belastingen worden bepaald die door het dek moeten worden geleid.

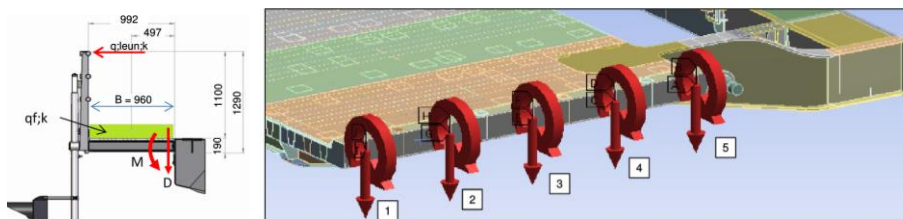
Gelijkmatige verdeelde belasting

De gelijkmatige belasting moet volgens NEN-EN 1991-2 ART 5.3.2.1 en NB. een q_{fk} van **5,0 kN/m²** worden aangehouden voor overspanningen ≤ 10 meter.

Belasting op de leuningen

Belastingen van leuningen, die gezien moeten worden als veranderlijke belastingen voor de bepaling van de karakteristieke waarde, is volgens de NEN-EN 1991-2/NB. art 4.8 gelijk aan **0,8 kN/m**.

Met behulp van ANSYS berekent ITBB de belastingen op de vijf plaatsen waar de passeerpaden met het brugdek verbonden worden. Omdat de focus op het brugdek ligt worden de waarden van ITBB betreffende het leuningwerk en de passeerpaden direct overgenomen voor het nieuwe ontwerp.



Voor posities 1 en 5:	M	=	3,77	[kNm]
	D	=	6,17	[kN]
Voor posities 2,3 en 4:	M	=	7,54	[kNm]

Analyse project Kruiswaterbrug

$$D = 12,35 \text{ [kN]}$$

6.4 Rem- en versnellingskrachten

In 4.4.1 van de NEN-EN 1991-2 +NB. worden de karakteristieke horizontaalkrachten bepaald volgens BM1 gelimiteerd tot 800 kN. Met de volgende formule wordt de rem;k berekend:

$$Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{1k}) + 0,10\alpha_{q1}q_{1k}w_lL, \text{ waarin:}$$

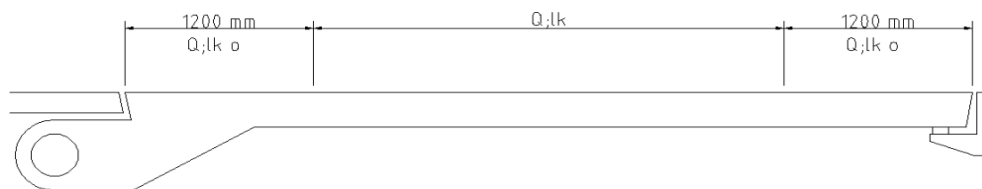
- $\alpha_{Q1} = 1,00$ [-]
- $Q_{1k} = 300$ [kN]
- $\alpha_{q1} = 1,15$ [-]
- $q_{1k} = 9,0$ [kN/m²]
- $w_l = 3,0$ [m]
- $L = 8,82$ [m]

De karakteristieke waarde is dan gelijk aan **387 kN** en per wiel **97 kN**.

De waarde voor Q_{lk} op de brug voor een enkele as nabij de voegovergangen wordt als volgt berekend:

$$Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}Q_{1k}$$

Op deze plaatsen is de remkracht gelijk aan **180 kN** ($Q_{lk,o}$).

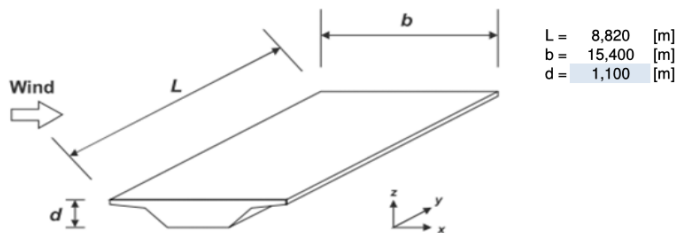


De versnellingskrachten hebben dezelfde waarden als de remkrachten, alleen is hun richting tegengesteld aan die van de remkrachten. Omdat het zeer onaannemelijk is dat er geremd dient te worden in de dwarsrichting, worden horizontale dwarskrachten buiten beschouwing gelaten.

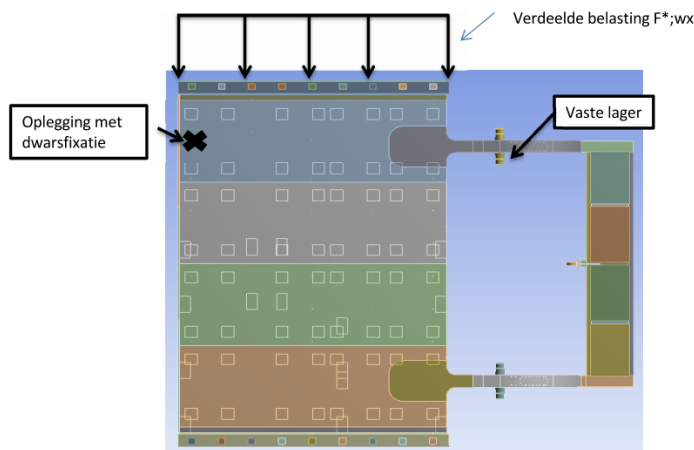
Analyse project Kruiswaterbrug

7 WINDBELASTING

Omdat het afstudeeronderzoek zich richt op het herontwerpen van de Kruiswaterbrug met een hogere staalkwaliteit, zal er op het gebied van windbelasting niets veranderen. De brug komt op dezelfde locatie met min of meer dezelfde afmetingen, zeker wanneer blijkt dat doorbuiging maatgevend zal zijn. De belastingen van de Kruiswaterbrug uit het verslag van ITBB zullen net als de verticale belastingen van het passeerpad (hoofdstuk 6.3) worden overgenomen.



ITBB rekent met een F^*_w (windbelasting in de x-richting in combinatie met verkeer). De waarde die ze daarbij berekend hebben is $0,62 \text{ kN/m}^2$. In dichte toestand wordt de windbelasting die aan de zijkant van de brug aangrijpt, opgenomen door de vaste lager aan de ene kant en aan de andere kant door de oplegging met dwarsfixatie. Zie Figuur 8.



Figuur 8: schematische weergaven van de windbelasting

Hieronder de karakteristieke waarden van de horizontale belastingen t.g.v. de windbelasting op de zijkant van de brug die berekend waren in rapport van ITBB:

	$R_h \cdot w$ (i.c.m. verkeer) [kN]	$R_h \cdot w$ (zonder verkeer) [kN]
Vaste lager	8,6	12
oplegging	11,2	15,6

Omdat de oplegging en de vaste lager hetzelfde zullen blijven, (scope richt zich meer op het orthotrope brugdek) zullen de windbelastingen buiten beschouwing worden gelaten. De belasting zelf wordt door de oplegging en de vaste lager afgevoerd hetgeen los staat van de sterkteberekeningen van het brugdek zelf.

Analyse project Kruiswaterbrug

8 TEMPERATUURBELASTING

ITBB heeft conform de NEN 6786 en de NEN-EN 1991-1-5 rekening gehouden met temperatuursverschillen tussen verschillende onderdelen van de Kruiswaterbrug. Daarbij zijn ze uitgegaan van een temperatuurverschil van 30 °C.

De volgende situaties zijn gecontroleerd met behulp van ANSYS:

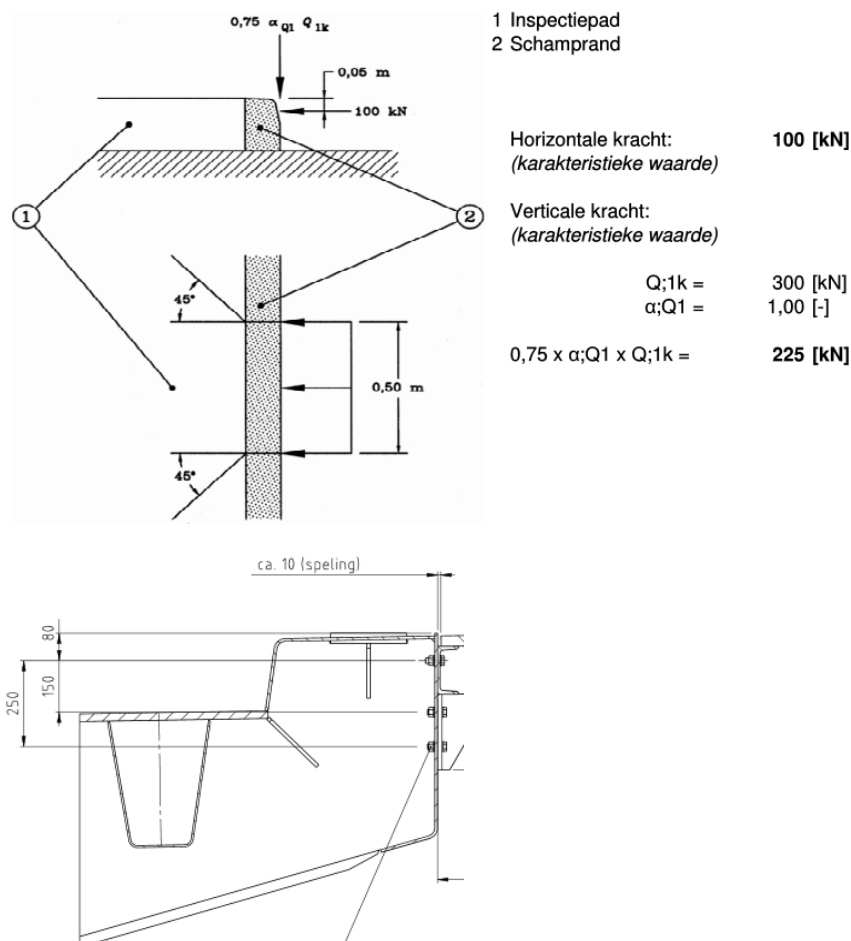
- Wanneer de bovenzijde warmer is dan de onderzijde (voor de statische berekening)
- Voor de berekening van de vervorming is er gerekend met een afgekoeld dek
- Situatie waarin de onderzijde van het brugdek warmer is dan het dek. Deze situatie is niet maatgevend voor de staalconstructie, maar eerder voor de vervorming

Voor het herontwerp kunnen bovenstaande situaties worden doorgevoerd in SCIA.

9 BIJZONDRE BELASTINGEN

9.1 Aanrijdbelastingen

De aanrijdbelasting wordt gerekend als een horizontale kracht van 100 kN die op 0,05 meter onder de bovenkant van de voertuigkering op een lijn van 0,5 meter werkt. Waar relevant dient een verticale kracht van $0,75 \cdot \alpha; Q_1 \cdot Q_{1k}$ aangebracht worden.



Analyse project Kruiswaterbrug

9.2 Aanrijdbelastingen op voertuigkeringen

De ondersteuningsconstructie van de barrier is ontworpen en berekend om lokaal een buitengewone belasting te dragen. De Buitengewone belasting komt overeen met 1,75 maal de karakteristieke lokale weerstand van de barrier. In Figuur 9 is te zien dat de kering tegen de barrier wordt geplaatst tegen verschillende stijlen die op de barrier worden bevestigd.



Figuur 9: De voertuigkering die met stijlen op de barrier tegen de barrier wordt gemonteerd op locatie.

Als karakteristieke lokale weerstand van de barrier wordt per stijl aangehouden:

$$M_{\text{bar}} = 24 \text{ [kNm]} \quad (\text{uit de ROK par. 5.8 art. 4.7.3.3 (2)})$$

De buitengewone belasting die geldt voor de controle van de ondersteuningsconstructie bedraagt (merk op dat deze belasting niet te gecombineerd hoeft te worden met andere veranderlijke belastingen):

$$\begin{aligned} Q_{\text{k}} &= 1,75 * M_{\text{bar}} \\ Q_{\text{k}} &= \mathbf{42 \text{ [kNm]} \text{ per stijl}} \end{aligned}$$

De voertuigkering is een standaard type. De afmetingen, staalsoort en h.o.h. van de stijlen worden bij het herontwerpen van de brug met HSS hetzelfde gehouden. Hooguit het effect van een aanrijding op een dunnere barrier kan/moet gecontroleerd worden met SCIA.

De barrier wordt bij de leverancier als één geheel gekocht en door VSF aan het brugdek gelast. Die van de Kruiswaterbrug heeft een dikte van 8,0 mm en is eenvoudig te maken en te bestellen. Wanneer de barrier in HSS besteld wordt, gaat het slechts over een kleine hoeveelheid staal die ook nog eens heel bewerkelijk is. Om deze reden wordt er afgezien van HSS voor dit onderdeel. Dit betekent dat er qua ontwerp en qua controle met EEM geen verschillen zullen zijn.



Analyse project Kruiswaterbrug

9.3 Controle bezwijklast leuningen

Net als de barrier en de voertuigkeringen zullen ook de leuningen hetzelfde blijven. De onderdelen van de Kruiswaterbrug zijn uitgevoerd in S355 en de leuning in S235J2. Wanneer de leuningen één op één worden overgenomen hoeven geen controles worden uitgevoerd.

9.4 Belastingen t.g.v. verkeersongeval op brugdek

In par. 5.8 art. 4.7.1 van de ROK staat geschreven dat ongeacht de aanwezigheid van een geleideconstructie de buitenste wielen van het zwaarste tandemstelsel gepositioneerd dienen te worden op de rand van het brugdek. Omdat de buitenste delen van de brug bestaan uit passeerpaden met roosters, is in overleg met RWS besloten om deze eis te laten vervallen en wel om de volgende redenen:

- De kans is klein dat een wagen door de barrier heengaat door een ongeval, omdat er sprake is van een kleine overspanning.
- Het is duidelijk dat de roosters maar beperkt belastbaar kunnen worden. Verbreden van de brug/rijweg zal niet worden gedaan.

9.5 Aanvaring val

Gezien de ligging van de brug en het feit dat de brug voornamelijk gebruikt zal worden voor pleziervaart is er geen rekening gehouden met aanvaarbelastingen.

Analyse project Kruiswaterbrug

10 BELASTINGSCOMBINATIES (OVERBELASTEN COMPLEET MODEL)

De beschouwde combinaties zijn bepaald volgens Tabel NB. 16 van de NEN-EN 1990, zie Tabel x

Tabel 8: Ψ -waarden voor belastingscombinaties bruggen (STR) Tabel NB.16 NEN-EN 1990.

Belasting	Belastingscombinaties											
	gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	W ^b		T ^b		S	A1 ^{a,b}
TS	1	0	0,8	0	0	0,8	0,8	0,64	0,8	0,64	0	0,8
UDL	1	0	0,8	0	0	0,8	0,8	0,64	0,8	0,64	0	0,8
Enkele as	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Horizontale belasting	0,8	0	1	0	0	0,8	0,64	0,8	0,64	0,8	0	0,64
Voetpaden	0,4	0	0,4	1	1	0	0,32	0,32	0,32	0,32	0	0,32
Mensenmenigte	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Bijzondere voertuigen	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Wind ^c F_{wk}	0,3	0	0,3	0	0	0,3	1	1	0,3	0,3	0	0
F_w	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Temperatuur	0,3	0	0,3	0	0,3	0,3	0,3	1	1	0	0	0
Sneeuw	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Impact op of onder de brug	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Aardbevingsbelasting	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

^a A1 = aanrijding op of onder de brug en aanvaring.
^b Bij deze combinaties is in eerste kolom gr1a $\times \Psi_0$ en de tweede kolom gr2 $\times \Psi_0$. Voor de definitie van de groep verkeersbelasting gr1a en gr2 zie NEN-EN 1991-2+C1.
^c Waar verkeersbelasting op (delen van) de brug aanwezig is, mag zijn gerekend met F_w in plaats van F_{wk} .

Gr3, gr4 en gr5 zijn niet van toepassing voor de sterkteberekening van het brugdek. De karakteristieke waarden die zijn bepaald in de vorige hoofdstukken kunnen in de verschillende combinaties worden ingevoerd. ITBB heeft dit direct gedaan in ANSYS. Voor dit onderzoek zal dat geschieden in SCIA. De volgende combinaties zijn van toepassing:

Fundamentele combinaties

- gr1a: belastingsmodel 1 dominant
- gr2a: belastingsmodel 2 dominant
- gr2: remkracht dominant
- W1: windbelasting dominant met BM1 als tweede veranderlijke belasting
- T1: temperatuursbelasting dominant met BM1 als tweede veranderlijke belasting

Bijzondere belastingscombinaties

- A1: aanrijdbelasting op schamprand
- A2: aanrijdingbelastingen op voertuigkeringen
- A3: belastingen t.g.v. verkeersongevallen op het brugdek

Analyse project Kruiswaterbrug

11 PERMANENTE BELASTINGEN

In het rapport van ITBB zijn de permanente belastingen nauwkeurig bepaald m.b.v. ANSYS en waar deze aangrijpen voor de verschillende onderdelen.

11.1 Gewicht lastoever van het brugdek

Voor het gewicht van de lussen wordt er 3,0 % van het totale gewicht van het brugdek genomen. Met ANSYS is bepaald dat het brugdek 59370 kg weegt. Dit betekent dat er 1781,1 kg (3,0 %) aan lastoeslag van toepassing is.

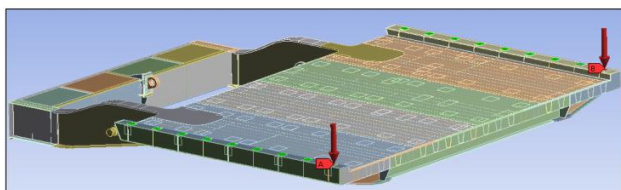
Dikkere platen moeten worden voorzien van een grotere las dan dunnere platen. Wanneer HSS wordt toegepast, wordt er verwacht dat de platen en zodoende ook de lussen een kleiner volume zullen hebben. Er zal aan de hand van de verschillende lussen moeten worden gekeken of het percentage nog op de 3,0 % ligt of daaronder (beredeneren en schatten).

11.2 Gewicht van andere brugonderdelen

Op de brug worden nog verschillende onderdelen geplaatst om het kunstwerk op locatie af te ronden. Het plaatsen van de geleiderail werd al eerder genoemd. Andere onderdelen die bijdragen aan het permanente gewicht van het brugdek zijn: inspectiepaden met leuningen, de slijtlaag, de sleufopbouw en het contragewicht.

Gewicht barrier

Omdat de barrier in het nieuwe ontwerp hetzelfde wordt gehouden, zijn de belastingen onveranderlijk. De massa van één barrier is 1154 kg. Deze belasting wordt op het brugdek verdeeld over negen locaties (Figuur 10) waar de barrier met stijlen bevestigd is. Per montagevlak is een belasting van 1258 N aanwezig.



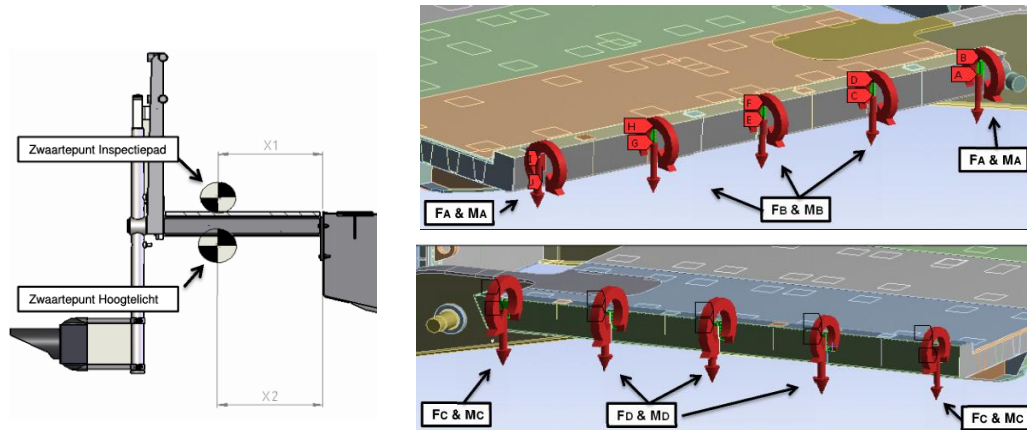
Figuur 10: De montageplekken (9 stuks per zijde) waar de belastingen op het brugdek aangrijpen.

Gewicht inspectiepad met leuningen

Ook de belastingen van de leuningen en paden blijven ongewijzigd. Hier is tevens een lastoeslag van 3,0 % toegepast. Omdat er op deze gedeeltes geen HSS wordt toegepast, blijft de hoeveelheid lastoeslag ongewijzigd. De passeerpaden zijn niet helemaal identiek. Aan één zijde bevindt zich een hoogtelicht voor de boten. Dat is de reden dat de ene kant iets zwaarder belast wordt dan de andere kant. De volgende waarden zijn van toepassing (Figuur 11):

-	Fa	=	1165	[N]	-	Fc	=	1277	[N]
-	Ma	=	775	[N/m]	-	Mc	=	828	[N/m]
-	Fb	=	2329	[N]	-	Fd	=	2555	[N]
-	Mb	=	1509	[N/m]	-	Md	=	1657	[N/m]

Analyse project Kruiswaterbrug



Figuur 11: De belastingen van de passeerpaden en leuningen op het brugdek.

Gewicht slijtlaag

Op het stalen dek komt een slijtlaag met een soortelijk gewicht van $21,9 \text{ kg/m}^2$. Voor het nieuwe ontwerp wordt dezelfde slijtlaag gebruikt voor het oppervlak van $1,1 \cdot 10^8 \text{ mm}^2$. De totale gewicht is dan gelijk aan 2409 kg.

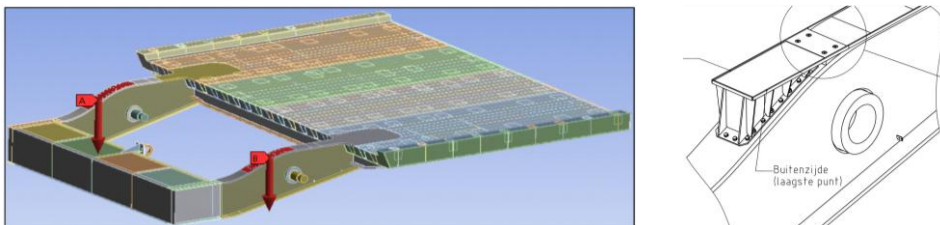
Gewicht extra ballast

Doordat de brug zwaarder zal worden door de nieuwe Eurocodes en de geluidseis van RWS, zal er naast meer vermogen van de aandrijving ook wat extra gewicht worden toegevoegd aan het contragewicht. Het bestaande ballastgewicht heeft een gewicht van 401337 N. Extra gewicht wordt toegevoegd aan de onderkant (7901 kg), aan de achterzijde (21070 kg) en aan de zijkanten (1698 kg per kant). In totaal komt er dan nog 32298 kg bij.

Wanneer de brug in HSS lichter wordt, zal er een reductie optreden aan de achterkant waardoor er minder extra contragewicht nodig is. Ook is het misschien mogelijk een andere aandrijving te gebruiken.

Gewicht sleufopbouw

Omdat bij de sterkteberekening de sleufopbouw (Figuur 12) niet is meegenomen in het rekenmodel is hierbij het eigen gewicht als verdeelde belasting op de bovenflens van het val aangebracht.



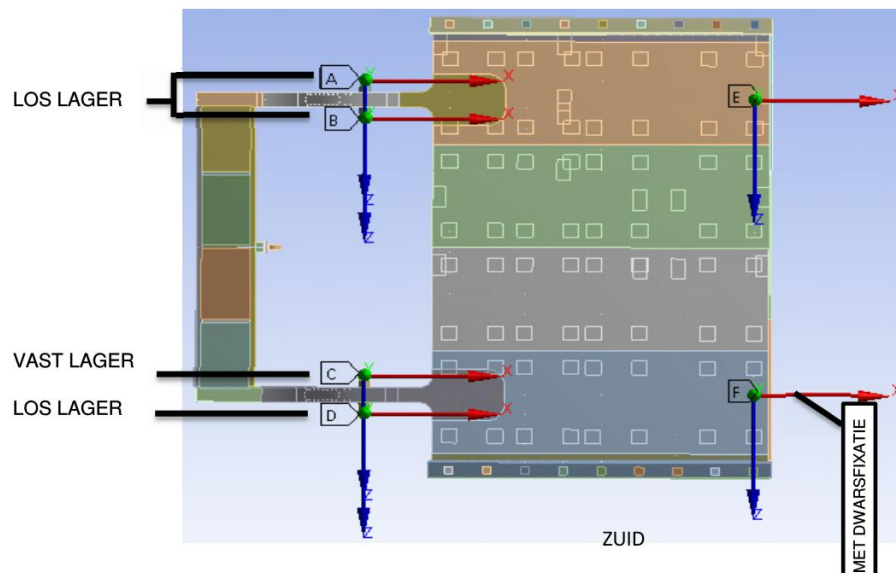
Figuur 12: De sleufopbouw omgezet naar verdeelde belasting op de bovenflens.

Het gewicht van een sleuf bedraagt 216 kg inclusief lastoeslagen.

Analyse project Kruiswaterbrug

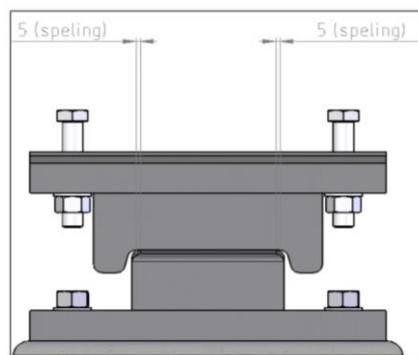
11.3 Opleggingen

De opleggingen bevinden zich in de draaipunten van de stalen liggers en op de opleggingen aan het uiteinde van de brug. Op onderstaande afbeelding is aangegeven dat de opleggingen aan de zuidkant vast zitten en aan de noordkant niet.



Oplegging E (vrije oplegging)

Translatie X	vrij
Translatie Y	vast
Translatie Z	vrij
Rotaties	vrij



Oplegging F (met dwarsfixatie)

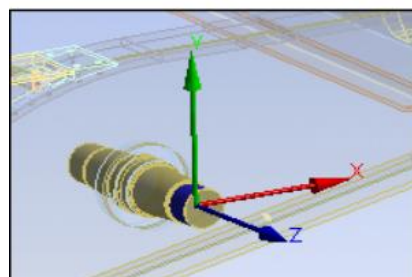
Translatie X	vrij
Translatie Y	vast
Translatie Z	vast
Rotaties	vrij

Losse lager

Translatie X	Vast
Translatie Y	Vast
Translatie Z	Vrij
Rotaties	Vrij

Vaste lager

Translatie X	vast
Translatie Y	vast
Translatie Z	vast
Rotaties	vrij



Analyse project Kruiswaterbrug

12 SIMULATIES

Het eigen gewicht en de veranderlijke belastingen kunnen nu worden ingevoerd in de verschillende belastingscombinaties. Naast de verschillende groepen waarbij een bepaalde veranderlijke belasting maximaal wordt genomen is het ook van belang te kijken naar de positioneringen van de vrachtwagens op de rijbanen.

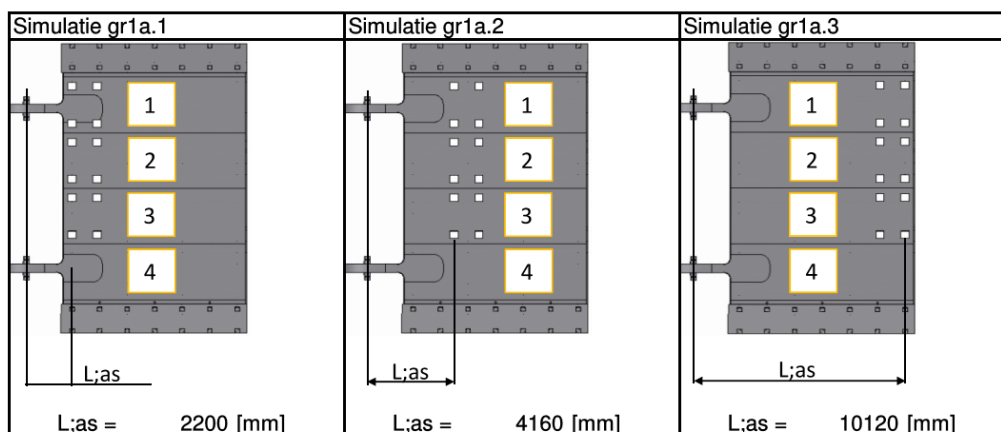
12.1 Hoofdliggers, dwarsdragers en troggen (groep 1a)

In hoofdstuk 10 is vermeld dat er volgens Tabel NB.16 verschillende Ψ -waarden van toepassing zijn per groep. Die van groep 1a worden gebruikt om de hoofdliggers, dwarsdragers en troggen te toetsen. De Ψ -waarden die van toepassing zijn voor deze groep 1a zijn:

Belastingscombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep 1a	1,0	BM1 (TS en UDL)
	0,8	Horizontale belasting
	0,4	Voetpaden
	1,0	Wind inclusief verkeer
	0,3	Temperatuur

hoofdligger

Voor de toetsing van de hoofdligger zijn de volgende simulaties van toepassing:



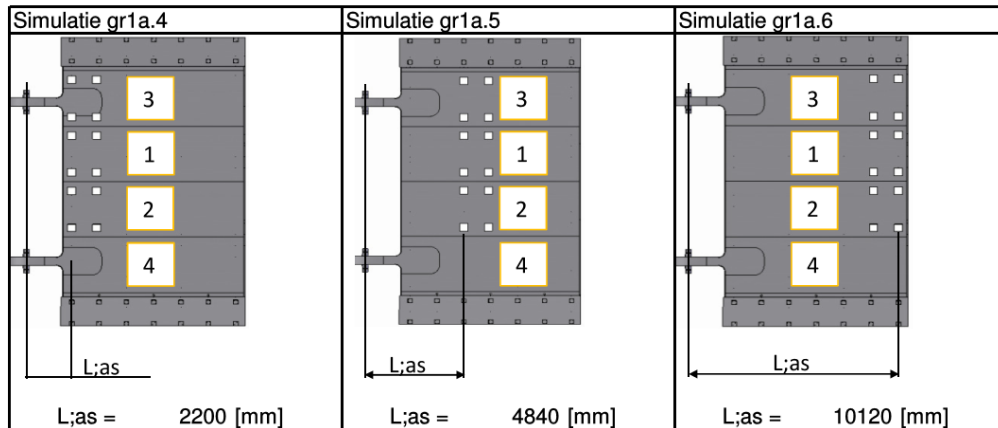
- Groep 1a,1: Eerste as TS boven de eind dwarsdrager (achterhar) gepositioneerd
- Groep 1a,2: TS is $\frac{3}{4}$ uit het midden gepositioneerd (voor het maatgevende moment)
- Groep 1a,3: De tweede as van het TS is boven de voorhar gepositioneerd

De posities en afstanden kunnen indien de voor- en achterhar in het nieuwe ontwerp op dezelfde posities komen, hetzelfde worden gehouden. De belastingen voor de assen zijn voor nummer 1 naar 4 de volgende: 300 kN, 200 kN, 100 kN en 0 kN.

Analyse project Kruiswaterbrug

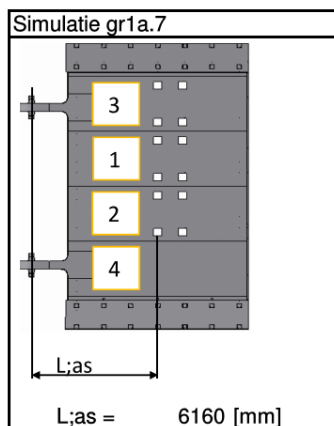
Dwarsdrager

Voor de dwarsdragers zijn de volgende posities en afstanden van toepassing. Merk op dat de zwaarste aslast nu op één van de middelste rijbanen wordt gezet.



- Groep 1a,4: Eerste as TS boven de einddwarsdrager (achterhar) gepositioneerd
- Groep 1a,5: Eeste as van het TS boven de middelste dwarsdrager gepositioneerd
- Groep 1a,6: De tweede as van het TS is boven de voorhar gepositioneerd

Troggen



- Groep 1a,7: De eerste as van het TS is tussen de middendwarsdragers gepositioneerd.

Aan de hand van de posities en de belastingscombinaties worden er met ANSYS allerlei spanningen berekend. Wanneer de waarden die te zien zijn in 3D tekeningen onder de vloiegrens blijven, voldoet het gemaakte ontwerp van het brugdek.

Analyse project Kruiswaterbrug

12.2 Groep 1b

Belastingscombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep 1b	1,0	BM2 één enkele aslast

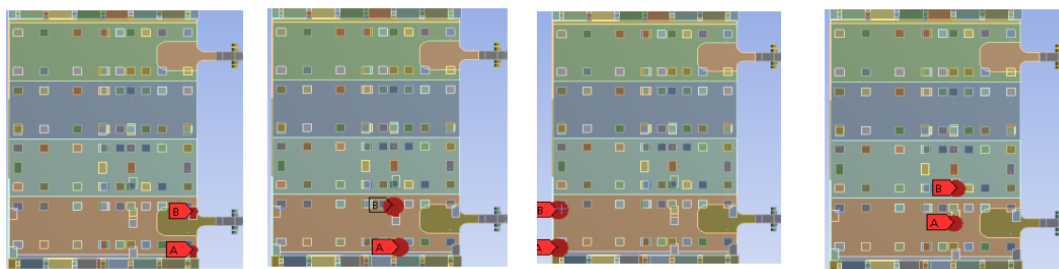
Volgens BM2 wordt nu voor een aantal posities het brugdek getoetst met behulp van één aslast.

Schamprand

- Groep 1b,1 = Enkele aslast tegen de shamprand begin rijbaan
- Groep 1b,2 = Enkele aslast tegen de shamprand op de helft van de overspanning
- Groep 1b,3 = Enkele aslast tegen de shamprand eind rijbaan

Hoofdligger

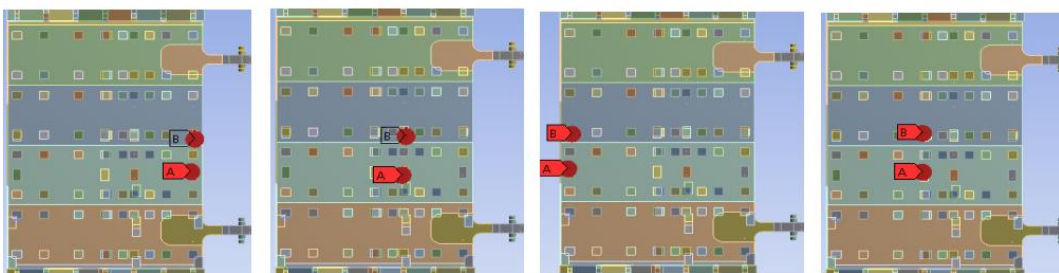
- Groep 1b,4 = wiel boven hoofdligger op de helft van de overspanning (10,12 m)



Figuur 13: positioneringen groep 1b,1 t/m 1b,4 (van links naar rechts).

Dwarsdrager

- Groep 1b,5 = Enkele aslast boven achterhar, $\frac{3}{4}$ uit het midden
- Groep 1b,6 = Enkele aslast boven middendwarsdrager, $\frac{3}{4}$ uit het midden
- Groep 1b,7 = Enkele aslast boven voorhar, $\frac{3}{4}$ uit het midden
- Groep 1b,8 = Enkele tussen middendwarsdragers (veld), wielast boven hart trog



Figuur 14: positioneringen groep 1b,5 t/m 1b,8 (van links naar rechts).

Analyse project Kruiswaterbrug

12.3 Groep 2

Belastingscombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep 2	0,8	BM1 (TS en UDL)
	1,0	Horizontale belasting
	0,4	Voetpaden
	1,0	Wind inclusief verkeer
	0,3	Temperatuur

Voor deze groep wordt weer gebruik gemaakt van de verschillende posities van het TS. Dezelfde posities als bij groep 1a zijn van toepassing.

12.4 Groep wind 1

Belastingscombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep wind 1	0,8	BM1 (TS en UDL)
	0,64	Horizontale belasting
	0,32	Voetpaden
	1,0	Wind inclusief verkeer
	0,3	Temperatuur

Voor deze groep wordt weer gebruik gemaakt van de verschillende posities van het TS. Dezelfde posities als bij groep 1a zijn van toepassing.

12.5 Groep temperatuur 1

Belastingscombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep temperatuur 1	0,8	BM1 (TS en UDL)
	0,64	Horizontale belasting
	0,32	Voetpaden
	0,3	Wind inclusief verkeer
	1,0	Temperatuur

Voor deze groep wordt weer gebruik gemaakt van de verschillende posities van het TS. Dezelfde posities als bij groep 1a zijn van toepassing.

12.6 Groep aanrijdingen

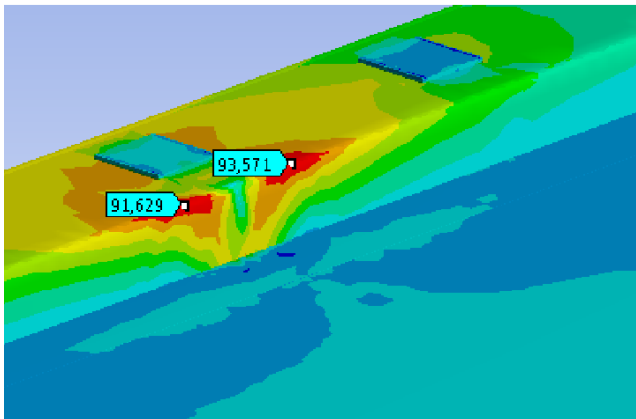
Belastingscombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep aanrijdingen A1	1,0	Op schamprand
Belastingscombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep aanrijdingen A2	1,0	Op voertuigkeringen
Belastingscombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep aanrijdingen A3	1,0	Controle bezwijklast leuningen

Voor A1 t/m A3 zijn andere simulaties van toepassing. Deze worden weergegeven op de volgende bladzijde.

Analyse project Kruiswaterbrug

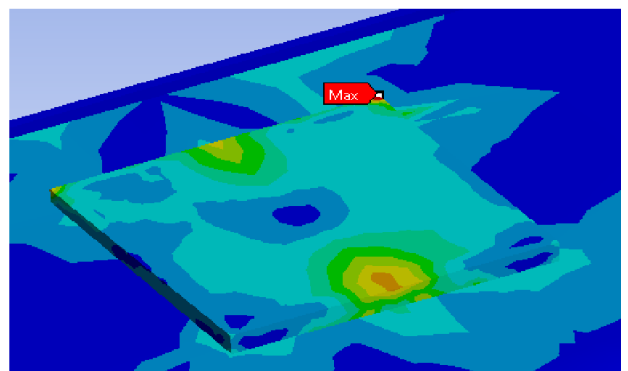
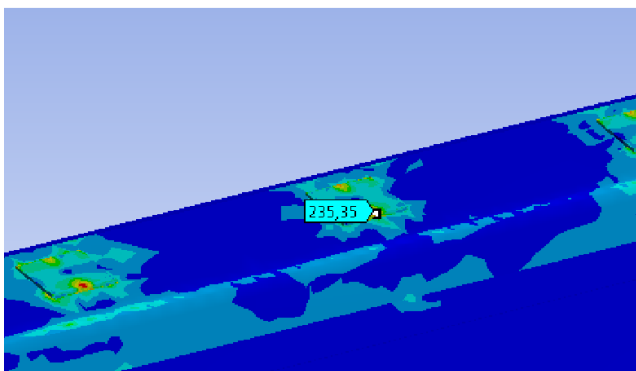
Simulatie A1: schamprand

De aanrijdbelasting wordt na het toepassen van de belastingscombinatie op de schamprand geplaatst. Op onderstaande afbeelding is te zien wat ITBB als resultaat uit ANSYS heeft afgelezen.



Simulatie A2: voertuigkering

Wanneer een vrachtwagen de voertuigkering raakt wordt de stootkracht via de stijlen naar de koppelplaat geleid op de barrier waar de stijlen aan bevestigd zijn. Hieronder is te zien hoe dat er in de ANSYS simulatie uitziet.



Simulatie A3: controle bewijslast leuningen

Uit ANSYS blijkt volgens ITBB dat het bezwijken van het leuningwerk geen ontoelaatbare spanningen veroorzaakt voor het brugdek zelf. Er zullen dus geen maatgevende spanningen door simulatie A3 van toepassing zijn.

Omdat de schamprand, het passeerpad met leuningwerk en de voertuigkeringen hetzelfde zullen zijn in het ontwerp met HSS, hoeven ze niet opnieuw gecontroleerd te worden. De optredende spanningen op de schamprand en de barrier geven in het rapport van ITBB een unity check van 0,27 en 0,68.

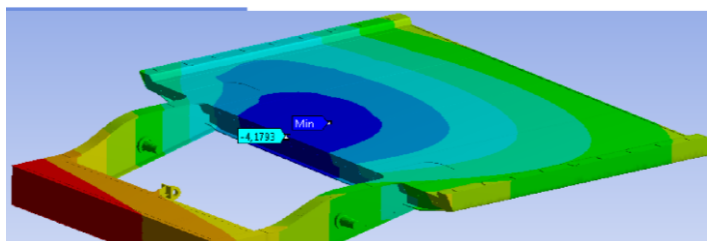
Analyse project Kruiswaterbrug

13 CONTROLE DOORBUIGING

Een gestelde eis was dat geen enkele dwarsdrager ter plaatse van het einde van de brug meer dan 5,0 mm mocht doorbuigen onder frequente belastingen. Dit komt overeen conform de NEN-EN 1993-2 art. 7.8.1. Aan de hand van belastingcombinatie groep 1 met een TS en de temperatuur bij een afgekoeld dek wordt de doorbuiging gecontroleerd in de BGT.

Belastingcombinatie	Ψ	Karakteristieke belasting
Groep 1a	0,8	BM1 (TS en UDL)
	0,3	Temperatuur afgekoeld dek

Omdat de temperatuur invloed heeft op de doorbuiging, afhankelijk van de positie van het TS, zal deze combinatie alleen worden gedaan met behulp van SCIA.



Figuur 15: doorbuiging bij de achterhar van 4,1793 mm

14 BEREKENINGEN

ITBB beschrijft nog een aantal controles om aan te tonen dat het gemaakte ontwerp voldoet. De verkeersbrug is getoetst op sterkte en stabiliteit. Wanneer de UC lager dan 1,0 is wordt er voldaan aan de voorschriften van de NEN-EN 1993-1-1 + NB.

14.1 Toetsing sterkte

Uit het ANSYS model worden alle spanningen gehaald die nodig zijn voor de controle op sterkte. In hoofdstuk 12.6 zijn controles van de schamprand en de barriers beschreven. Door te kijken naar de meest ongunstige positie van een TS of een enkele aslast in combinatie met de verschillende belastingcombinaties worden er meerdere spanningen gevonden. De kritieke spanningen worden per onderdeel gebruikt voor de sterktecontrole. De volgende onderdelen zijn voor de Kruiswaterbrug getoetst:

- Lijfplaat hoofdligger
- Onderflens hoofdligger
- Onderflens dwarsdrager
- Lijfplaat dwarsdrager (voor/achterhar)
- Onderflens voorhar
- Lijfplaat dwarsdrager buigen hoofdligger
- Troggen

Merk op dat ITBB hier een rekenwaarde ($f_{y,d}$) van 345 heeft gebruikt voor de bovenstaande controles in plaats van de vloeigrens van 355.

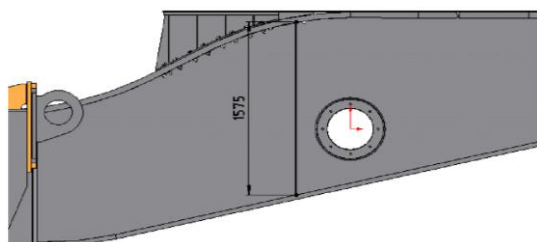
Analyse project Kruiswaterbrug

14.2 Stabiliteit lijfplaten hoofdliggers

Lijfplaten van de hoofdliggers zijn, afhankelijk van de doorsnedeklasse, gevoelig voor plooi en /of knik. Waar het lijf groter is zal deze alleen maar gevoeliger worden. In het nieuwe ontwerp van de Kruiswaterbrug is het lijf het langst nabij de prop van het hoofddraaipunt. De stabiliteit wordt gecontroleerd wanneer het lijf het langst is (naast het hoofddraaipunt) en boven het hoofddraaipunt.

14.2.1 Naast het hoofddraaipunt

Met Tabel 5.2 uit de NEN-EN 1993-1-1 (zie Tabel 9) kan de doorsnedeklasse van het samengestelde profiel met een lijfhoogte van 1575 mm worden bepaald. De verhouding tussen de lengte en dikte (40 mm) van het lijf in combinatie met de rek die hoort bij het gekozen staalsoort, bepaalt de doorsnedeklasse. Voor de Kruiswaterbrug is S355 toegepast met een rek van 0,81. Deze gegevens zorgen ervoor dat het profiel zich volgens Tabel 5.2 in klasse 3 bevindt. Doordat de lijfplaat van het samengestelde profiel binnen klasse 3 valt, is het op deze positie niet gevoelig voor plooi. Normaal gesproken moet het lijf dan wel gecontroleerd worden op knik maar omdat de kracht niet door het lijf naast het hoofddraaipunt wordt geleid, is het niet nodig het profiel hier op knik te toetsen.



Figuur 16: het samengestelde profiel naast en rondom het hoofddraaipunt

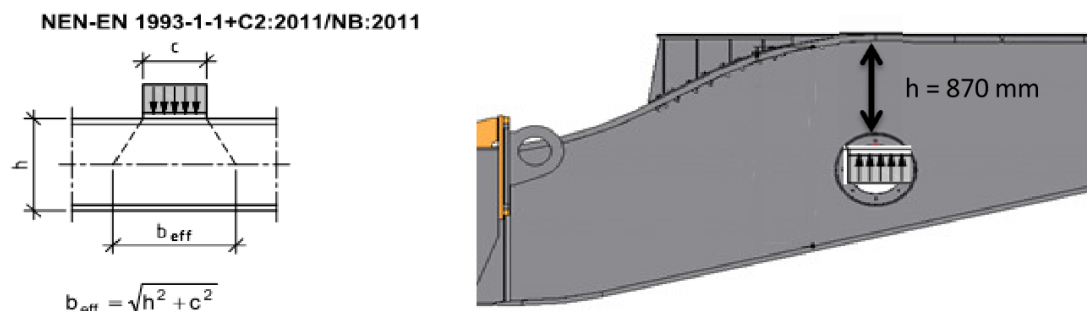
Tabel 9: bepaling voor doorsnedeklasse Tabel 5.2 uit de NEN-EN 1993-1-1

Inwendige op druk belaste onderdelen						
					Buigingsas	
					Buigingsas	
Klasse	Onderdeel belast op buiging	Onderdeel belast op druk	Onderdeel belast op druk en buiging			
Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	Indien $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ Indien $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	Indien $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ Indien $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	Indien $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ Indien $\psi > -1$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)/(-\psi)$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Analyse project Kruiswaterbrug

14.2.2 Boven het hoofddraaipunt

Ter plaatse van het lijf boven het hoofddraaipunt wordt de kritische knikspanning aan de hand van de optredende normaalspanning getoetst (globaal plooiën). De kniklengte is afhankelijk van de stand van de brug. Voor dit onderzoek wordt gekeken naar de kniklengte voor een gesloten toestand. De toetsing van de kritische knikspanning worden gedaan conform de NEN-EN 1993-1-1 /NB. par. 6.5.3.4. zie Figuur 17



Figuur 17: knikcontrole in het lijf boven het hoofddraaipunt.

De lijfplaat voldoet wanneer de vloeigrens van het staal onder de toelaatbare spanning blijft. Volgens de norm zijn de volgende punten van toepassing:

- Nikcurve C
- $L_{cr} = h$, $h = 870 \text{ mm}$

Toegepaste formules

De toelaatbare spanning: $\sigma; toel = \frac{\chi * f_y}{\gamma_{M1}}$

Relatieve slankheid: $\lambda' = L_{cr} / (i_y * \lambda_1)$ met $\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Naast bovenstaande formules wordt in de norm nog een rekenmethode gegeven voor de reductiefactor knik χ , rekening houdend met de slankheid en imperfecties.

De knikcontrole wordt gedaan aan de hand van enkel de verticale belastingen veroorzaakt door het eigen gewicht en de veranderlijke belastingen. Horizontale belastingen (wind en wrijving) worden voor deze controle buiten beschouwing gelaten. Wel worden ze meegenomen voor de toetsing van de vloeigrens (sterktecontrole). De ingevoerde belastingen zijn:

	Belastingsfactor γ	Momentaanfactor Ψ
Eigen gewicht	1,25	1,0
Verkeer BM1 TS en UDL (gepositioneerd bij achterhar en boven hoofdligger)	1,5	1,0
Remkrachten	1,5	0,8
Voetpaden	1,65	0,4
Wind	1,65	1,0
temperatuur	1,65	0,3

Analyse project Kruiswaterbrug

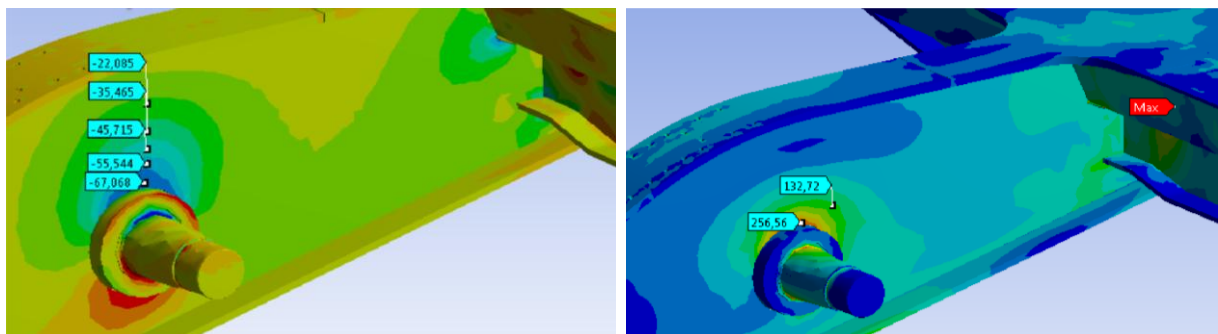
Knikcontrole in combinatie met temperatuursbelasting

Door gebruik te maken van ANSYS is de knikcontrole, zoals beschreven op de vorige pagina, te combineren met de temperatuursinvloeden. Met de volgende formule is de verplaatsing van de losse lager te berekenen die de knikcontrole negatief zal beïnvloeden:

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

ΔL	=	de verplaatsing of uitzetting ten gevolge van het aanwezige temperatuursverschil
α	=	$12 \cdot 10^{-6}$
L	=	8600 mm (h.o.h. hoofdliggers)
ΔT	=	30 [K]

ITBB heeft in ANSYS 4,0 mm aangehouden voor de verplaatsing van de losse lager. Uiteindelijk zorgde dit voor twee UC die opmerkelijk van elkaar verschilde. Zie Figuur 18



Figuur 18: optredende spanningen met en zonder temperatuursbelasting net boven het hoofddraaipunt.

De UC bij de controle zonder temperatuursbelasting ging van 0,28 naar 0,74. Dit is een opmerkelijk verschil waar tijdens het herontwerpen van de brug rekening mee moet worden gehouden.

Analyse project Kruiswaterbrug

15 VERMOEIING

In dit hoofdstuk worden de verschillende lasen van de Kruiswaterbrug op vermoeiing gecontroleerd. De lasen van de brug zijn belangrijk voor het behalen van de gestelde levensduur. Aan de hand van het aantal wisselingen, het soort las(detail), dikte en de spanning die aanwezig is, kan worden aangetoond of de toegepaste las voldoet. De spanningen zijn afhankelijk van de aslasten en van de plaats waar deze op het brugdek gepositioneerd worden.

ITBB haalt de spanningen uit een EEM genaamd ANSYS. Op een soortgelijke manier zullen er in het afstudeeronderzoek ook lasen worden gecontroleerd wanneer de brug in HSS is gerealiseerd. Voor het EEM programma zal alleen SCIA in plaat van ANSYS worden gebruikt.

In dit hoofdstuk wordt er maar kort gekeken naar hoe de vermoeiingsberekening eruit ziet. Er zal voornamelijk aandacht worden besteed aan de verschillende lasen en de uitgangspunten. Zodoende wordt voor het schetsontwerp duidelijk hoe de losse onderdelen aan elkaar dienen te worden bevestigd.

15.1 Uitgangspunten

Voor de Kruiswaterbrug is vermoeiingsmodel 4 van toepassing (NEN-EN 1991-2 + NB). Eerder in hoofdstuk 6.2 was bepaald dat er een vergrotingsfactor $\Delta\phi$ van 1,15 van toepassing is voor de vermoeiingscontrole. De lasen zullen gecontroleerd worden volgens de methodiek van de NEN-EN 1993-1-9 bijlage A.

Verkeerscategorie per rijstrook

De verkeerscategorie voor de Kruiswaterbrug luidt als volgt:

- Het aantal "slow-lanes". Voor de vermoeiingscontrole moeten alle rijstroken als "slow-lanes" worden beschouwd.
- Het aantal N_{obs} (Tabel 10) van zware voertuigen. Door RWS was vastgesteld dat er 2.500.000 vrachtwagens per jaar over de Kruiswaterbrug zullen rijden.

Tabel 10: Verkeerscategorie volgens Tabel NB.5 van de NEN-EN 1993-2

Verkeerscategorie	$N_{obs,a,i}$ per jaar en per rijstrook voor zwaar verkeer
1 Autosnelwegen (A-wegen) en wegen met twee of meer rijstroken per rijrichting en met intensief vrachtverkeer	$2,0 \times 10^6$
2 (Auto)wegen met gemiddeld vrachtverkeer (zoals N-wegen)	$0,5 \times 10^6$
3 Wegen met weinig vrachtverkeer	$0,125 \times 10^6$
4 Wegen met weinig vrachtverkeer en bovendien uitsluitend bestemmingsverkeer	$0,05 \times 10^6$
OPMERKING De aantallen zware voertuigen per jaar en per rijstrook voor zwaar verkeer $N_{obs,a,i}$ zijn inclusief trend.	

Rijstrooknummer (i)	1	2	3	4
verkeerscategorie	1	4	4	4
Vrachtwagens (n)	2.500.000	0	0	0

Voor de vermoeiingscontrole hoeft er slechts rekening gehouden te worden met één vrachtwagen op dezelfde rijbaan omdat de brug niet langer is dan 60 meter. Hieronder staan de te positioneren vrachtwagens volgens BM4 en de verschillende wieltypen.

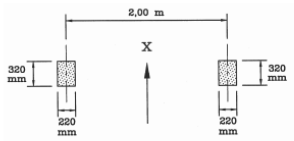
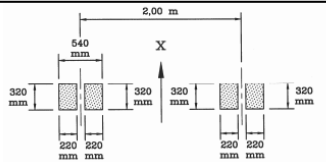
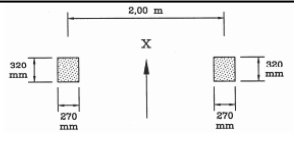
Analyse project Kruiswaterbrug

Tabel 11: Vrachtwagens volgens BM4: Tabel NB.8 NEN-EN 1991-2

Afbeelding van de vrachtwagen	Type voertuig		Verkeerstype			Wiel-type
	Afstand tussen de assen m	Gelijkwaardige aslast kN	Lange afstand % ^a	Middellange afstand % ^a	Lokaal verkeer % ^a	
	4,5	70 130	20,0	50,0	80,0	A B
	4,20 1,30	70 120 120	5,0	5,0	5,0	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90 90	40,0	20,0	5,0	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	25,0	15,0	5,0	A B C C
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10,0	10,0	5,0	A B C C C

^a Percentage vrachtwagens.

Tabel 12: Wieltypen van vrachtwagens volgens Tabel 4.8 NEN-EN 1991-2

WIEL-/ASTYPE	OMSCHRIJVING VAN DE GEOMETRIE
A	
B	
C	

Analyse project Kruiswaterbrug

Aan de hand van de verschillende voertuigen en de categorieën waarin de rijbanen zich bevinden, kan het percentage worden bepaald van de aanwezigheid van de voertuigen. In Tabel 13 is tevens de vergrotingsfactor meegenomen voor de bepaling van de belastingen per as.

Tabel 13: Aslasten inclusief de vergrotingsfactor

Rijstrook 1 [%]	Rijstrook 2 [%]	Rijstrook 3 [%]	Rijstrook 4 [%]	as afstand [m]	gelijkwaardige aslast [kN]	Voor de hele brug aslast [kN]	Dichtbij overgangen aslast [kN]
20	80	80	80	4,5	70	81	NVT
					130	150	NVT
5	5	5	5	4,2	70	81	NVT
				1,3	120	138	NVT
					120	138	NVT
40	5	5	5	3,2	70	81	NVT
				5,2	150	173	NVT
				1,3	90	104	NVT
				1,3	90	104	NVT
					90	104	NVT
25	5	5	5	3,4	70	81	NVT
				6	140	161	NVT
				1,8	90	104	NVT
					90	104	NVT
10	5	5	5	4,8	70	81	NVT
				3,6	130	150	NVT
				4,4	90	104	NVT
				1,3	80	92	NVT
					80	92	NVT

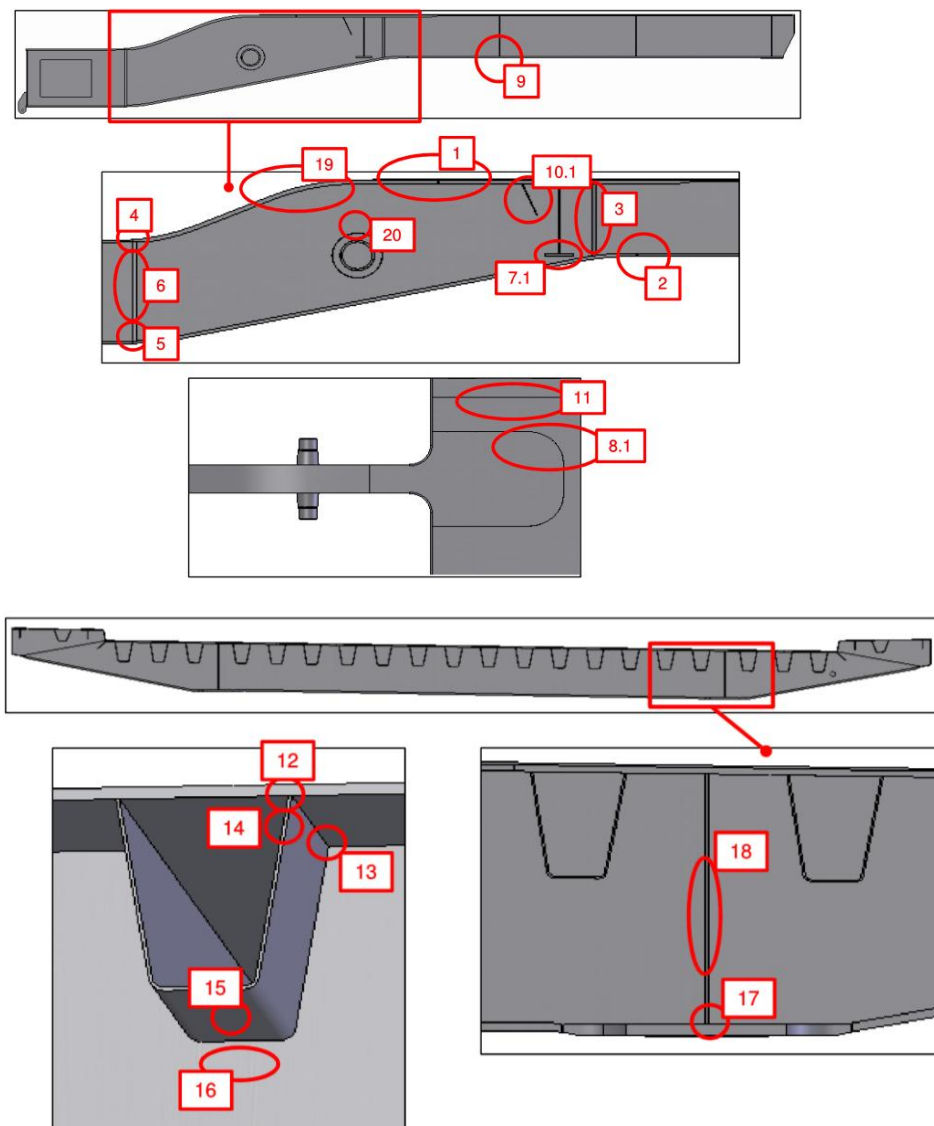
Analyse project Kruiswaterbrug

16 LASSEN, MODELLEN EN CONTROLES

Voor de lasdetails zal de focus voornamelijk liggen op de lasen die onderhevig zijn aan de spanningswisselingen ten gevolge van het verkeer. Er wordt niet gekeken naar de wisselingen veroorzaakt door het openen en sluiten van de brug. In dit hoofdstuk wordt er ingegaan op de gebruikte lasdetails van de Kruiswaterbrug, de gemaakte meshes en de opzet van een vermoeiingsberekening.

16.1 Lasdetails

Hieronder zijn van verschillende aanzichten en doorsneden van de locaties van de toegepaste lasen afgebeeld. In Tabel 14 op de volgende bladzijde worden de lasen kort beschreven.



Analyse project Kruiswaterbrug

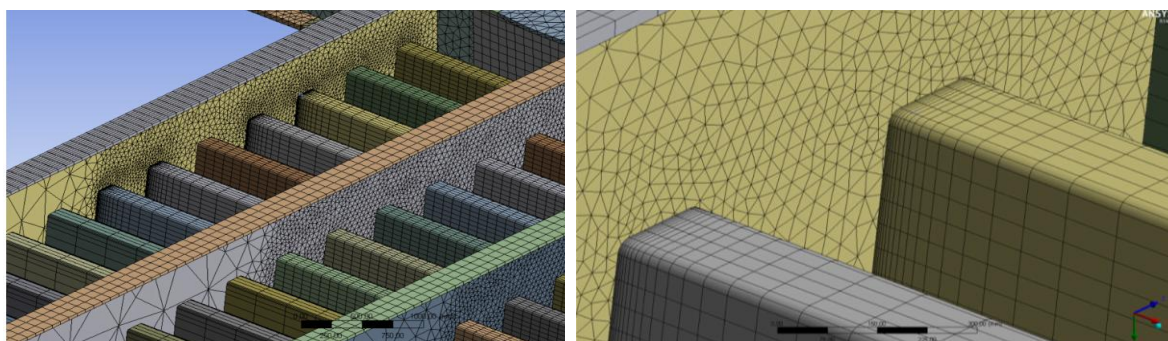
Tabel 14: Lassen die van toepassing zijn voor de Kruiswaterbrug

Nummer	Omschrijving
1	Las bovenflens hoofdligger
2	Las onderflens hoofdligger
3	Las lijfplaat hoofdligger
4	Las bovenflens hoofdligger – ballastkist
5	Las onderflens hoofdligger – ballastkist
6	Las lijfplaat hoofdligger - ballastkist
7.1	Las onderflens achterhar – lijfplaat hoofdligger, spanningen in lijf hoofdligger
7.2	Las onderflens achterhar – lijfplaat hoofdligger, spanningen in onderflens dwarsdrager
8.1	Las hamerkopplaat – dekplaat, normaalspanning in las
8.2	Las hamerkopplaat – dekplaat, schuifspanning in las
9	Las onderflens hoofdligger met onderflens dwarsdrager
10.1	Las ondersteuningsplaat rijdek met lijf, spanning in het lijf hoofdligger
10.2	Las ondersteuningsplaat rijdek met lijf, spanning in de ondersteuningsplaat
11	Las dekplaat
12	Scheur in dekplaat op locatie tussen de dwarsdragers
13	Dekplaat boven kruising tussen de verstijverbenen en de dwarsdrager
14	Las tussen de verstijverbenen en de dekplaat op een locatie tussen de dwarsdragers
15	Verbinding tussen de verstijver aan de dwarsdrager bij doorgestoken verstijvers zonder uitsparing
16	Verbinding van de verstijver aan de dwarsdrager
17	Las lijf met onderflens hoofdligger
18	Las lijf hoofdligger met lijf dwarsdrager
19	Bevestiging sleufopbouw op bovenflens hoofdligger
20	Las naaf draaipunt – lijf hoofdligger

De beschreven details zijn terug te vinden in de NEN-EN 1993-1-9 en de 1993-2 voor de controle van de vermoeiing.

16.2 Meches uit ANSYS

Uit de modellen van de Kruiswaterbrug worden de elementgroottes ter plaatse van de aansluitingen verfijnd. Zodoende kan een nauwkeurige uitspraak worden gemaakt over de optredende spanning in en rondom de lassen. Hiermee dient rekening gehouden te worden wanneer de aangepaste brug wordt ontworpen met SCIA.

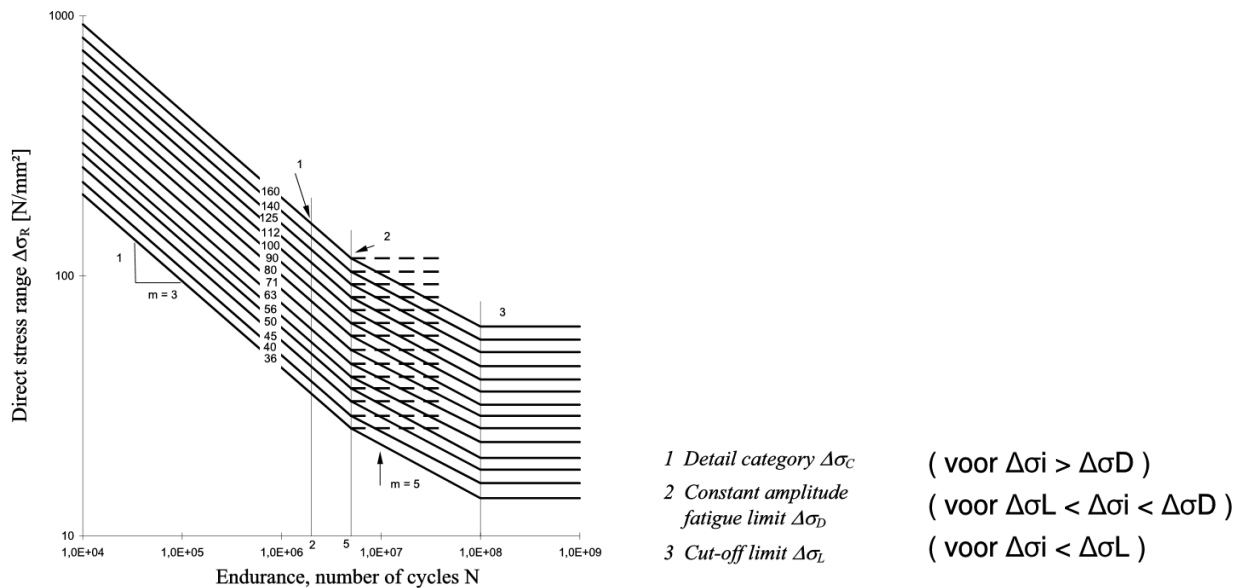


Figuur 19: Onderkant van het brugdek met een verfijnde mesh bij de gelaste verbindingen.

Analyse project Kruiswaterbrug

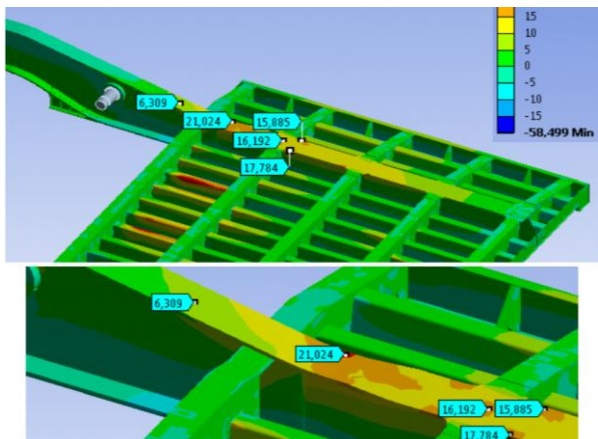
16.3 Vermoeingsberekening

Alle beschreven lassen uit Tabel 14 dienen door middel van de berekeningsmethode van de NEN-EN 1993-1-9 gecontroleerd te worden op schade. De methode berust op een spanning-wisselingen curve (σ -N curve) waarvan de spanningen uit een EEM programma worden gehaald en de wisselingen berusten op het passerende verkeer. Zie hieronder de betreffende σ -N curve (SN- curve).



De NEN-EN 1993-1-9 en de NEN-EN 1993-2 geven voor de verschillende lasdetails een detailcategorie aan ($\Delta\sigma_C$) die terug te vinden is in bovenstaande SN- curve, beginnende bij 2.000.000 wisselingen. Afhankelijk van de optredende spanning kan bepaald worden welke helling van toepassing is. Na het berekenen van het aantal toelaatbare en optredende wisselingen kan berekend worden of er schade optreedt. De som van de schades van de verschillende simulaties moet onder de 1,0 blijven om te voldoen aan de gestelde levensduur.

Ter verduidelijking wordt las 17 (las lijf met onderflens hoofdligger) uitgewerkt t.g.v. het verkeer. Uit ANSYS zijn de spanningen t.g.v. wagen 3 getoond in Figuur 20.



Figuur 20: Onderkant van het brugdek met de optredende spanningen ($\Delta\sigma$) op de onderflens van de hoofdligger t.g.v. wagen 3.

Analyse project Kruiswaterbrug

Aan de hand van de beschrijvingen en de gestelde eisen uit de normen wordt onderstaand detailcategorie toegepast voor de vermoeiingscontrole van de verbinding. Uit het rapport van ITBB is een print screen weergegeven.

10.17.1 Vermoeiingsberekening Las lijf met onderflens hoofdligger

Detail categorie:

$\Delta\sigma_C = 100,0$ [N/mm²]
 $\Delta\sigma_D = 73,7$ [N/mm²] $(2/5)^{1/3} \cdot \Delta\sigma_C$
 $\Delta\sigma_L = 40,5$ [N/mm²] $(5/100)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D$

Helling S-N curve

$m = 3$ [-] (voor $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$)
 $m = 5$ [-] (voor $\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$)
 $m = \infty$ [-] (voor $\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$)

Wisselingen t.g.v. brugopeningen

$n/\text{jaar} = 3000$ [openingen / jaar] (zie H. 1.2)
 $L = 100$ [jaar] (zie H. 1.2)
 $n = 300000$ [openingen]

Wisselingen t.g.v. verkeer

$N_{\text{obs}} = 2500000$ [vrachtw. / jaar] (zie H. 3)
 $n = 2,5E+08$ [vrachtw.]

Factoren:

$C_{\text{tril}} = 1$ [-] Trillingsfactor;
 $\gamma_{\text{Mf}} = 1,35$ [-] Partiele factor (Veilige levensduur)
 $k_s = (25/t)^{0,2}$ Grootte factor (dikte-effect)
 $t = \text{n.v.t.}$ [mm]
 $k_s = 1,00$ [-] $k_{s,\text{max}} = 1$ [-]

Toelaatbaar aantal wisselingen:

$$N_i = \left[\frac{\Delta\sigma_k}{\Delta\sigma_i \cdot \gamma_{\text{Mf}}} \right]^m \times N_k$$

Vermoeiingssterkte:

$\Delta\sigma_k$: index C: Toel. spanning bij NC aant. wiss. 2,00E+06 [wisselingen]
index D: Toel. spanning bij ND aant. wiss. 5,00E+06 [wisselingen]
index L: Toel. spanning bij NL aant. wiss. ∞ [wisselingen]

Optredende spanning:

$\Delta\sigma_i$
 $\Delta\sigma_i;d$ met inbegrip de partiele factor en het dikte effect.
 $\Delta\sigma_i;os$ Spanning t.g.v. openen en sluiten en grootste spanningswisseling t.g.v. verkeersbelasting, conform NEN1993-2 par. 9.1.4.

~	$\Delta\sigma_i$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_i;d$ [N/mm ²]	Aandeel [%]	optredend	toelaatbaar	schade
				n [wiss]	N ₀ [wiss]	D ₀ [-]
openen/sluiten	64	86,2	100	300000	3120173	0,10
wagen 1	21,0	28,4	20	50000000	∞	0,00
wagen 2	21,0	28,4	5	12500000	∞	0,00
wagen 3	21,0	28,4	40	100000000	∞	0,00
wagen 4	21,0	28,4	25	62500000	∞	0,00
wagen 5	21,0	28,4	10	25000000	∞	0,00

Totale schade 0,10

Conclusie ; D = 0,10 [-] Voldoet



Analyse project Kruiswaterbrug

17 CONCLUSIE

Na het rapport van ITBB over de berekeningen van de Kruiswaterbrug te hebben nagelopen is er veel duidelijkheid verkregen over wat er voor de berekening van een brug moet gebeuren en welke veranderingen hoogst waarschijnlijk toegepast dienen te worden indien HSS wordt toegepast alsmede wat de belangrijkste punten zijn waar rekening mee gehouden moet worden.

Het ontwerp van VSF valt onder de ROK van RWS. Om zoveel mogelijk in de buurt te blijven van dit ontwerp wordt er alleen afgezien van de begrenzing van de vloeigrens tot max. 355 N/mm^2 . Zodoende kunnen de ontwerpen aan het eind van de afstudeerperiode beter met elkaar kunnen worden vergeleken.

De passeerpaden met leuning, barriers geleiderails, belastingen, simulaties en de afmetingen van het dek (bovenkant van de brug) zullen in nieuwe ontwerp ongewijzigd blijven. Door de strenge eis van de geluidsafstraling zal het niet mogelijk zijn een dünnere dekplaat toe te passen. Deze zal ondanks de verhoogde vloeigrens toch in/ of rond de 20 mm moeten worden uitgevoerd. De vraag is dan of er met HSS, kijkend naar de dekplaat, financiële voordelen kunnen worden bereikt. HSS zal dus voornamelijk moeten worden toegepast in de draagconstructie van het val (hoofdliggers, dwarsdragers en troggen).

Door het toepassen van HSS is het doel om minder staal toe te passen dan dat is gebruikt in het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug. De vloeigrens geeft in het verslag van ITBB een aantal punten die het verschil zullen maken.

- Klassenbepaling van het samengestelde profiel door de aanwezigheid van een andere rekgrens
- Sterkteberekeningen (NEN-EN 1993-1-1 + NB.)
- Stabiliteitsbetekeningen (NEN-EN 1993-1-1 + NB.)
- Vermoeiingscontrole (NEN-EN 1993-1-9 en NEN-EN 1993-2)





Afstudeeronderzoek HSS in Brugdekken

Staaleigenschappen



Document : Staaleigenschappen
Revisie : 0
Datum : 24-2-2016
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	24-2-2016	
Gecontroleerd			24-2-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Staaieigenschappen

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 INLEIDING	3
1 MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN	4
1.1 Elasticiteit	4
1.2 Treksterkte en vloeigrens	4
1.3 Bros- en taaiheid	5
1.4 Druksterkte	5
1.5 Buigsterkte	5
1.6 Kruip	5
1.7 Hardheid	5
1.8 Soortelijk gewicht	5
2 CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN	6
2.1 Corrosiebestendigheid	6
2.2 Legeringselementen	6
3 OVERIGE EIGENSCHAPPEN	7
3.1 Ferromagnetisme	7
3.2 Ruwheid	7
3.3 Thermische geleidbaarheid	7
3.4 Uitzettingscoëfficiënt	7
4 SPANNING- REKDIAGRAM	8
4.1 Fase A: Elastisch gedrag	9
4.2 Fase B: Vloeien	9
4.3 Fase C: Versteving	9
4.4 Fase D: Insnoering (bezwijken)	10
4.5 Variabelen in het spanning- rekdiagram	11
5 HSS	12
5.1 Voorbeelden	12
5.2 Eigenschappen	13
5.3 Voordelen HSS	14
5.4 Nadelen HSS	15
6 CONCLUSIE	15



Staaleigenschappen

0 INLEIDING

Voordat er gebruik kan worden gemaakt van HSS voor de optimalisatie van de Kruiswaterbrug, is het goed om de eigenschappen van het staal te bestuderen. Zodoende kunnen de gemaakte keuzes in de loop van het onderzoek worden onderbouwd. Om het gedrag van staal te kunnen verklaren zal gekeken worden naar:

- De mechanische chemische eigenschappen
- De chemische eigenschappen
- Een paar eigenschappen die niet vallen onder de bovengenoemde punten
- Het spanning- rekdiagram
- Het materiaal HSS

Voor het onderzoek naar de bovenstaande punten is voornamelijk gebruik gemaakt van de informatie die wordt verschaft door Tosec, een bedrijf gespecialiseerd in plaatbewerkingen, lassen en frezen.



De Kruiswaterbrug

Staaleigenschappen

1 MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN

Van materialen is bekend dat ieder materiaal zijn unieke eigenschappen heeft. Bekende materialen in de Civiele wereld zijn staal, beton en hout. De mechanische eigenschappen zijn het meest interessant voor constructeurs. Eigenschappen die naar voren kunnen komen voor de controle van een constructie zijn:

1. Elasticiteit
2. Treksterkte en vloeigrens
3. Bros- en taaiheid
4. Druksterkte
5. Buigsterkte
6. Kruip
7. Hardheid
8. Soortelijk gewicht

1.1 Elasticiteit

Wanneer een materiaal op spanning wordt gezet, zal het uitrekken. Elasticiteit is de mate waarin het materiaal, bij het wegnemen van de aangebrachte spanning, in staat is om terug te keren naar zijn oorspronkelijke staat. Er zijn slappe en stijve materialen, waarbij slappe materialen sneller uit zullen rekken dan stijve materialen.

De termen elastisch en plastisch komen regelmatig voorbij in de civiele sector. Bij elastisch is er sprake van een tijdelijke vervorming. Na het uitrekken van een materiaal keert het door zijn elasticiteit weer terug naar zijn oorspronkelijk staat. Bij plastisch is de opgetreden vervorming permanent. Het materiaal zal in zijn vervormde toestand blijven wanneer de spanning wordt gereduceerd. Materialen hebben een elasticiteitsmodule die een belangrijke grens aangeeft en bepaalt of een materiaal slap of juist stijf is. Staal heeft een hoge stijfheid met een elasticiteitsmodule van $2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.

1.2 Treksterkte en vloeigrens

Voor de toepassing van staal zijn de treksterkte en de vloeigrens de belangrijkste mechanische eigenschappen. Uit het spanning- rekdiagram (σ - ϵ diagram), behandeld in hoofdstuk 4.1, zal blijken hoe belangrijk ze zijn. De vloeigrens is het punt waarop het materiaal begint te vloeien. Dit punt is belangrijk, omdat het gelijk staat aan de minimale kracht die nodig is het materiaal plastisch te vervormen. Zodoende kan door de constructeur de maximale belasting worden bepaald in een constructie voordat er ongewenste vervormingen optreden.

Het hoogste punt in het σ - ϵ diagram is de treksterkte (ultimate tensile strength). De treksterkte is de maximale spanning die het materiaal bereikt tijdens het plastisch vervormen. Tijdens de controle van een constructie moet voorkomen worden dat dit punt bereikt wordt. Hoe sterker het materiaal, des te meer spanning het kan weerstaan voordat het staal insnoert (dunner wordt) en breekt. Om plastische vervormingen te voorkomen blijft men onder de vloeigrens van het materiaal. De treksterkte is niet zoals de vloeigrens eenduidig en bevindt zich volgens tabel 1 tussen de volgende waarden:

Tabel 1: Eigenschappen vloeigrens en treksterkte. Bron: Tabel 3.1 NEN-EN 1993-1-1

staalsoort	Vloeigrens [N/mm^2]	Max. treksterkte [N/mm^2]
S235	235	310 - 510
S275	275	370 - 530
S355	355	470 - 630



Staaleigenschappen

1.3 Bros- en taaheid

De bros- en taaheid geven informatie over de wijze waarop een materiaal breekt nadat de maximale treksterkte is bereikt. Een bros materiaal zal na het bereiken van de maximale treksterkte snel breken. Taaie materialen daarentegen zullen eerder dunner worden (insnoeren) voordat ze breken. Hoe hoger de taaheid, des te groter is de weerstand tegen doorgroeien, kerven en scheuren wat een gewenste eigenschap is voor HSS.

1.4 Druksterkte

Druksterkte is de mate waarin het materiaal bestand is tegen een drukbelasting (tegenovergestelde van een trekbelasting). De druksterkte van staal ligt vrij hoog, waardoor het praktisch gezien van gering belang is. Bij het materiaal beton is de druksterkte wel van belang.

1.5 Buigsterkte

De buigsterkte is een combinatie van een krachtenkoppel van druk aan de concave zijde en trek aan de convexe zijde. Wanneer het krachtenkoppel niet in evenwicht is, treedt er buiging op, wat betekent dat er een buigend moment aanwezig is. Aan de concave zijde wordt het materiaal samengedrukt en aan de convexe zijde rekt het uit.

1.6 Kruip

Kruip is het verschijnsel van een extra vervorming wanneer het materiaal gedurende lange tijd aan een belasting onderhevig is. De vervormingen trek, druk en buiging nemen dus na verloop van tijd toe. Deze materiaaleigenschap heeft een ongewenst effect op de materialen hout en beton. Het materiaal raakt als het ware vermoeid waardoor het bovenop de optredende doorbuiging nog eens extra doorbuigt. Om de voorgeschreven levensduur van een object te halen, moet er rekening worden gehouden met kruip. Bij staal wordt kruip verwaarloosd door de aanwezigheid van een zeer hoge elasticiteitsmodulus.

1.7 Hardheid

De hardheid is de mate waarin het materiaal bestand is tegen krassen en slijtage. Door middel van hardheidsmetingen (Brinell, Vickers en Rockwell) kan de weerstand van een materiaal tegen een permanente mechanische vervorming worden bepaald.

1.8 Soortelijk gewicht

Het soortelijk gewicht is de massa van een kubieke meter uitgedrukt in kilogram (kg/m^3). Deze zijn per materiaal anders. Per materiaal kunnen er variaties in de samenstellingen worden gecreëerd, waardoor verschillen in het soortelijk gewicht ontstaan. Zo heeft staal een soortelijk gewicht van 7850 kg/m^3 en roestvrij staal (RVS) 7930 kg/m^3 .



Staaleigenschappen

2 CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN

Om te begrijpen hoe een materiaal aan zijn mechanische eigenschappen komt, moet gekeken worden naar de samenstelling van het materiaal zelf. De chemische samenstelling (legering) is zodoende van groot belang voor de eigenschappen waar in de civiele sector mee gerekend kan worden. De chemische eigenschappen zijn:

1. Corrosiebestendigheid
2. Vochtbestendigheid
3. Geur, kleur en smaak
4. Chemische stabiliteit (reactiviteit)
5. Zuurbestendigheid
6. Brandbaarheid
7. Giftigheid
8. Stroomgeleidendheid

Van deze eigenschappen wordt alleen corrosiebestendigheid toegelicht, omdat dit van toepassing is voor het conserveren van materialen.

2.1 Corrosiebestendigheid

Corrosie is het aantasten/roesten van het materiaal door zuurstof en water door toedoen van een elektrochemische reactie. Corrosiebestendigheid is een belangrijke eigenschap in de staalbewerking en de realisatie van constructies. RVS heeft een hogere weerstand dan staal en is geschikt voor gebruik in vochtige klimaten en in combinatie met zout water. Wanneer het materiaal niet uit zichzelf corrosiebestendig is, moet het door middel van een conservering corrosiebestendig worden gemaakt. Toegepaste conserveringsmethoden zijn:

- Thermisch verzinken
- Poedercoating
- Verchromen
- Natlakken
- Oppervlakte behandelingen

2.2 Legeringselementen

Metallurgen hebben door de jaren heen veel aandacht besteed aan het zoeken naar de juiste samenstellingen van metalen. Naast de bekende staalsoorten hebben zijn ook HSS, RVS en slijtvaste staalsoorten ontwikkeld. De verschillende legeringselementen, met ieder unieke kenmerken, worden gebruikt om de metaaleigenschappen te beïnvloeden. Staal bestaat uit het hoofdelement ijzer (Fe) met toevoeging van unieke legeringselementen. Door hierin te variëren kunnen verschillende staalsoorten gecreëerd worden met verschillende mechanische eigenschappen. Zo kan door meer Molybdeen toe te voegen een hogere slijtvastheid worden verkregen. Meer Chroom betekent een hogere corrosieweerstand en Silicium zorgt voor een grotere sterkte.

Verder wordt niet dieper ingegaan op de samenstellingen van HSS in dit rapport.



Staaleigenschappen

3 OVERIGE EIGENSCHAPPEN

Naast de mechanische en chemische eigenschappen zijn er nog vier eigenschappen die van belang zijn voor het materiaal staal. De eigenschappen zijn meer van toepassing wanneer het gaat over de bewerking van het staal (lassen en bewerken van staal wordt door VSF gedaan in eigen constructiewerkplaats):

1. Ferromagnetisme
2. Ruwheid
3. Thermische geleidbaarheid
4. Uitzettingscoëfficiënt

3.1 Ferromagnetisme

Ferromagnetisme is een eigenschap van o.a. de metalen Fe en Ni. Deze metalen hebben een permanent veld rondom zich. Door de metalen te bewerken (lassen, boren, slijpen, zagen, schuren) kunnen ze magnetisch worden. Afhankelijk van de legering is het magnetisme blijvend. Dit wordt aangeduid als remanent magnetisme. Wanneer een metaal tijdens bewerken remanent wordt, kunnen de volgende vervelende en kostbare gevolgen van toepassing zijn:

- Een ruw oppervlak na galvaniseren;
- Lasnaden die eenzijdig vastzitten;
- Hoge slijtage bij lagers en spanen die blijven kleven;
- Twee aan elkaar geplakte plaatjes in een matrijs.

Ter oplossing van de bovenstaande punten moet het staal worden gedemagnetiseerd.

3.2 Ruwheid

De ruwheid van het oppervlak is per materiaal verschillend. Een voorbeeld van een ruw oppervlak zijn montagevlekken. Deze oppervlaktes hebben een hogere ruwheidtolerantie waar nog werkzaamheden aan kunnen worden verricht. Door de plekken te verspanen, ruimen, slijpen ect. kan de ruwheid van het oppervlak worden verlaagd.

3.3 Thermische geleidbaarheid

Deze eigenschap geeft aan hoe goed de warmte door het materiaal wordt geleid. De thermische geleidbaarheid wordt ook wel de warmtecoëfficiënt genoemd.

3.4 Uitzettingscoëfficiënt

Materialen zetten uit bij een stijging van de temperatuur en krimpen weer bij een daling. De mate waarin dit gebeurt wordt de uitzettingscoëfficiënt genoemd. Moleculen die onderling beter met elkaar verbonden zijn (sterkere verbinding), zullen minder uitzetten. Voor metaalbewerkingen is de uitzettingscoëfficiënt van groot belang. Bij het lassen wordt veel ruimte aangebracht (vooropeningen). Het materiaal zal eerst uitzetten en krimpen bij afkoeling. Hierdoor is het mogelijk dat er scheurvorming optreedt.

Staaieigenschappen

4 SPANNING- REKDIAGRAM

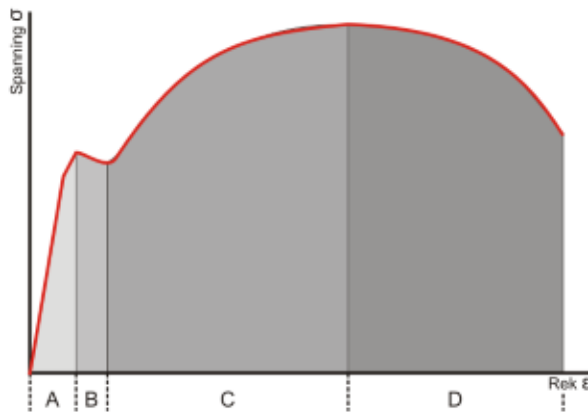
Na het behandelen van de mechanische eigenschappen worden nu de belangrijkste van staal herhaald samen met het bijbehorende spanning- rekdiagram (σ - ϵ diagram). In het diagram kunnen de statische belastbaarheden van de materialen worden afgelezen en wordt duidelijk hoe het materiaal zich gedraagt wanneer het wordt belast. Op de horizontale as is af te leiden hoeveel het materiaal uitrekt bij een bepaalde spanning die staat weergegeven op de verticale as.

Het σ - ϵ diagram is opgesteld aan de hand van de trekproef. Één proef zou te onnauwkeurig zijn, daarom is het diagram gebaseerd op een gemiddelde van meerdere proeven. Tijdens de proeven is rekening gehouden met een aantal aspecten die de resultaten kunnen beïnvloeden:

- Variabelen van de metaalsamenstelling
- Onvolkomenheden
- Fabricagemethoden
- Productiemethoden
- Mate van belastingen
- Temperatuursverschillen

In figuur 1 is te zien wat het resultaat is van de gemiddelden. In het σ - ϵ diagram zijn vier fasen te onderscheiden:

- A. Elastisch gedrag
- B. Vloeien
- C. Verstevinging
- D. Insnoering (bezwijken)



Figuur 1: σ - ϵ diagram opgedeeld in 4 fasen. Bron: www.Tosec.nl

Staaieigenschappen

4.1 Fase A: Elastisch gedrag

Eerder werd er al toegelicht dat, wanneer sprake is van een elastische vervorming, de opgetreden vervorming tijdelijk is. Wanneer de spanning wordt gereduceerd of weggenomen, zal het staal terugkeren naar zijn oorspronkelijke lengte. Fase A kan weer onderverdeeld worden in twee fasen:

1. Het "lineair elastische gebied" of "de evenredige vervorming". Het betreft het eerste gedeelte waarbij de lijn in een rechte lijn stijgt. Dit betekent dat de rek evenredig is aan de aanwezige spanning. Dit geschiedt tot een bepaalde grens, ook wel bekend als de "proportionaliteitsgrens" of de "evenredigheidsgrens". Tot aan dit punt is de wet van Hooke van toepassing.
2. Na het passeren van de evenredigheidsgrens verandert het verloop van de grafiek. De lijn heeft geen lineair verloop meer. Ondanks dat gedraagt het materiaal zich nog wel elastisch. Bij een toenemende spanning neemt de rek van het materiaal nu relatief sterker toe dan ten opzichte van het eerste gedeelte van de grafiek.

Met de wet van Hooke kunnen constructieve berekeningen worden gedaan waarbij de elasticiteitsmodulus een belangrijke rol speelt.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad \text{met} \quad \varepsilon = \Delta l / l_0$$

σ	=	trekspanning
ε	=	rek
l_0	=	oorspronkelijke lengte
Δl	=	opgelegde verlenging
E	=	Elasticiteitsmodulus

4.2 Fase B: Vloeien

Na het overschrijden van de elasticiteitsgrens gaat het materiaal zich plastisch gedragen. Het staal begint dan te vloeien en de vervormingen die vanaf dit punt optreden zijn dan blijvend. Het punt net boven de elasticiteitsgrens staat bekend als de vloeipunt of vloeispanning. Het gebied van fase B bestaat uit een bovenste en een onderste vloeigrens. Van het ene naar het andere punt neemt de kwaliteit van het materiaal af. Vanaf de bovenste vloeigrens is er minder spanning nodig om het staal verder uit te rekken. Dit is van toepassing totdat de onderste vloeigrens wordt bereikt. Merk op dat het materiaal bij het bereiken van het bovenste vloeipunt gaat vloeien en rekken, ongeacht of de spanning wel of niet verder wordt opgevoerd. Na het vloeien komt de grafiek aan bij de derde fase.

Het is niet altijd duidelijk wanneer materialen precies beginnen met vloeien. Daarom wordt een 0,2% offsetmethode of 0,2% rekgrens aangehouden. De lijn die vervolgens kan worden getrokken, recht evenredig aan de E-modulus van Hooke bepaalt vervolgens de spanning.

4.3 Fase C: Verstevinging

Wanneer de belasting verder toeneemt in het σ - ε diagram en het vloeigebied achter zich laat, zal het materiaal verder vervormen. Het punt na het vloeigebied wordt de verstevinging genoemd. Er is nog steeds sprake van een plastische vervorming. Bij het wegvallen van de aanwezige spanning zal de rek blijven tot waar deze was gekomen. De grafiek blijft stijgen totdat het de maximale treksterkte heeft bereikt (het hoogste punt in het σ - ε diagram).

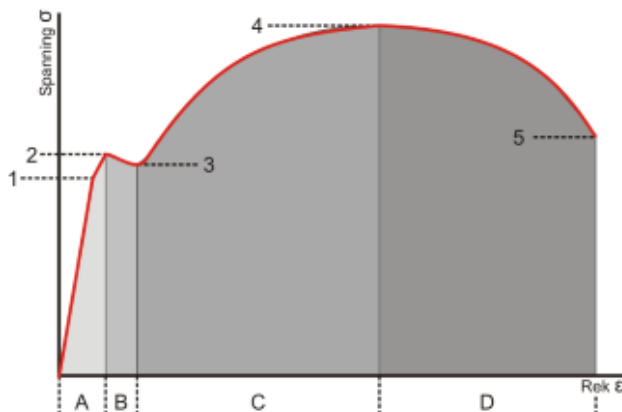
Staaleigenschappen

4.4 Fase D: Insnoering (bezwijken)

De laatste fase van de plastische vervorming is de insnoering. Na het bereiken van de maximale treksterkte begint het oppervlakte van het staal op één plek dunner te worden (insnoering). Doordat het materiaal zwakker wordt, zal het verder uitrekken en uiteindelijk breken. De spanning op het moment van het breken (breekpunt) wordt de breukspanning genoemd.

De grenzen die uiteindelijk horen bij de hierboven beschreven fasen (zie ook figuur 2):

1. Proportionaliteitsgrens
2. Elasticiteitsgrens
3. Vloeigrens
4. Treksterkte
5. Breukspanning

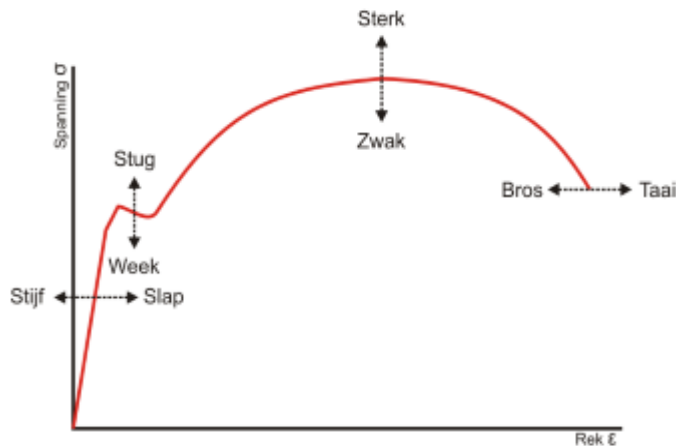


Figuur 2: σ - ϵ diagram opgedeeld in 4 fasen met de overgangen. Bron: www.Tosec.nl

Staaleigenschappen

4.5 Variabelen in het spanning- rekdiagram

In Figuur 3 zijn de variabelen uitgebeeld tussen de mechanische eigenschappen van staal. Door de chemische samenstelling van het materiaal te veranderen, kunnen de verhoudingen van de variabelen anders komen te liggen. Dit is o.a. bij HSS het geval.



Figuur 3: σ - ϵ diagram met de variabelen van de mechanische eigenschappen. Bron: www.Tosec.nl

Stijf en slap:

Wanneer er weinig rek plaatsvindt in het elastische gedeelte van het σ - ϵ diagram, betekent dit dat het materiaal stijf is. Het verloop van de Elasticiteitsmodulus loopt dan ook stijf omhoog bij staal. Stijve materialen kunnen beter grote belastingen opnemen dan slappe materialen die sneller zullen uitrekken.

Stug en week:

Staal is een stug materiaal. Er is veel belasting voor nodig om het plastisch te vervormen omdat de vloeigrens relatief hoog ligt. Een week materiaal zal juist sneller vervormen.

Sterk en zwak:

Zwakke materialen bieden weinig weerstand tegen hogere spanningen en zullen sneller breken of scheuren dan sterke materialen. Bij zwakke materialen zullen tevens de insnoeringen eerder merkbaar worden.

Bros en taai:

Taaie materialen hebben de eigenschap dat ze na het bereiken van de maximale treksterkte nog lang weerstand bieden voordat ze zullen breken. HSS is een taai materiaal en zal veel rekken en insnoeren wanneer de belasting toeneemt. Het voordeel van het vele rekken is dat de plastische vervorming waarneembaar is. Brosse materialen zullen na het passeren van de maximale treksterkte minder vervormingen en eerder breken.



Staaieigenschappen

5 HSS

Door andere legeringselementen aan het ijzer toe te voegen kunnen er andere samenstellingen en eigenschappen worden gecreëerd. Door minder koolstof toe te voegen wordt een hogere sterkte bereikt dan S235 en S355. Hierdoor wordt het materiaal sterker en krijgt het een vloeigrens boven de 355 MPa.

5.1 Voorbeelden

HSS wordt vooral toegepast wanneer er sprake is van hoge belastingen en wanneer de waarde van het eigen gewicht belangrijk is. Tot nu toe wordt HSS toegepast in de volgende sectoren:

- Offshore
- Kranenbouw
- Infrastructuur



Offshore constructies. Bron: www.iesve.com



Kranenbouw. Bron: www.hilco-welding.com



Grevenmacher bridge. Bron: www.industry.arcelormittal.com



Moerdijkbrug. Bron: <http://www.jevo-fotografie.nl>



Vakwerkbrug. Bron: www.steel-trussbridge.com

Staaieigenschappen

In het hoofdrapport worden ook een paar bruggen genoemd waarin HSS is verwerkt. Kijkend naar de genoemde voorbeelden valt het op dat HSS veel gebruikt wordt voor vakwerken. Het voordeel van werken met vakwerkliggers is dat de diagonalen op trek en druk worden belast. Dit zorgt ervoor dat voordeel kan worden behaald door de aanwezigheid van de hoge vloeigrens van HSS. Verder valt op dat de overspanningen van de bruggen groter zijn dan die van de Kruiswaterbrug. Wanneer geen gebruik wordt gemaakt van vakwerkliggers zijn vaak boogconstructies gebruikt. Hierbij zijn grote bogen met dikkere platen in HSS aanwezig. Het wegdek wordt dan met staalkabels aan de boogconstructie bevestigd waardoor duidelijk te zien is hoe de belastingafdracht werkt.

Het brugdek van de Kruiswaterbrug is ten opzichte van bovenstaande voorbeelden niet alleen kleiner maar ook anders opgebouwd. De Kruiswaterbrug bestaat alleen uit een brugdek opgebouwd uit samengestelde buigliggers. Over de combinatie van brugdekken en HSS is slechts beperkte informatie te vinden. In veel gevallen wordt de staalkwaliteit voor de bogen/pylonen gegeven. Wanneer bekend is wat staalkwaliteit is van het brugdek, is dit meestal S355.

5.2 Eigenschappen

Van HSS is bekend dat het een hogere vloeigrens en treksterkte heeft. Hierdoor is het mogelijk de spanningen in de constructie hoger op te laten lopen dan wanneer er gewerkt wordt met bijvoorbeeld S355. Het is mogelijk vloeigrenzen te bereiken die kunnen oplopen tot 1300 MPa. Wanneer er minder staal wordt toegepast, is een kleiner oppervlak aanwezig om de aanwezige belastingen op te nemen. Dit betekent dat per mm² een hogere spanning aanwezig is dan wanneer meer staal wordt toegepast. Voor het verschil van minder staal en een hogere spanning biedt HSS de perfecte oplossing. In hoofdstuk 5.3 zullen de voordelen worden behandeld die verbonden zijn aan het toepassen van HSS tegenover S355.

Aan de hand van de onderstaande formules wordt duidelijk dat de spanning hoger wordt bij de toepassing van HSS:

$$\begin{array}{lcl} \sigma & = & F/A \\ \sigma & = & M/W \end{array} \quad \text{waarin:} \quad W = (1/6) bh^2$$

De belastingen op de constructie veranderen niet (op het eigen gewicht na). Door het oppervlak te verkleinen zal een hogere spanning worden verkregen. In de tweede formule kan het weerstandsmoment voor een doorsnede kleiner worden door minder staal toe te passen (liever de breedte dan de hoogte omdat deze tot de macht twee aanwezig is). Wanneer optimaal wordt ontworpen, zal uit de berekeningen blijken dat S355 niet meer in staat is om weerstand te bieden tegen de verhoogde spanning. Door HSS toe te passen kan de spanning wel worden opgevangen. Naast dat de constructie nu voldoet aan de spanningscontrole is er ook bespaard op de toegepaste hoeveelheid staal.

Voor de sterkteberekening verandert alleen de vloeigrens. De elasticiteitsmodule verandert niet. Deze blijft gelijk aan 2,1.10⁵ N/mm². Wat wel verandert bij HSS is de hardheid. Deze ligt hoger dan bij lagere staalkwaliteiten. Verder wordt het materiaal homogener doordat het koolstofpercentage wordt gereduceerd. Hierdoor is met zekerheid te zeggen dat de stalen platen of profielen nog meer hetzelfde zijn qua eigenschappen.

Staaleigenschappen

5.3 Voordelen HSS

HSS heeft veel voordelen ten opzichte van LSS:

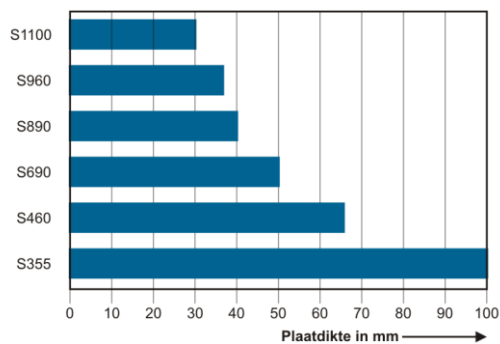
Met HSS kunnen hogere belastingen worden opgenomen door de aanwezigheid van een hogere vloeigrens. De opneembare belasting per mm^2 is veel hoger.

Er kan lichter en esthetischer geconstrueerd worden. De aanwezige plaatdiktes kunnen gereduceerd worden.

HSS is taai en zal niet snel breken. Door de aanwezigheid van een hoge rekgrens wordt het materiaal alleen maar betrouwbaarder.

Er is minder energie nodig bij verschillende handelingen (openen van bruggen en hijsen).

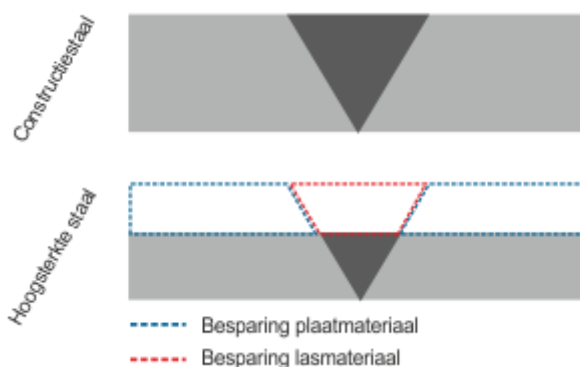
De hoeveelheid materiaal die men bespaart wanneer een hogere kwaliteit wordt toegepast is 35% voor S460 en 50% voor S690 ten opzichte van S355. Zie figuur 4.



Figuur 4: Verhouding tussen plaatdiktes en sterkte van verschillende staalsoorten. Bron: www.Tosec.nl

Naast de gewichtsbesparing zijn nog andere economische voordelen. Bij een optimaal ontwerp kan de totaalprijs een stuk lager uitvallen. De belasting op de fundering wordt minder en de constructie wordt gemakkelijker te transporteren.

Wanneer de platen dunner worden, wordt het lasvolume kleiner. Er is dan minder lasmateriaal nodig, de lastijden worden korter en kan bespaard worden op de productiekosten. Zie figuur 5.



Figuur 5: Minder staal en lasmateriaal bij gebruik van HSS. Bron: www.Tosec.nl



Staaleigenschappen

5.4 Nadelen HSS

Er zijn ook nadelen bij het gebruik van HSS:

Het is minder goed lastbaar dan de staalsoorten S235 en S355. Er moeten extra handelingen, zoals voorverwarmen, worden verricht om een goede verbinding te creëren.

De ervaring van staalleveranciers en bedrijven is in de civiele sector voor bruggen meer gericht op S355. Meer kennis is nodig op het gebied van HSS voor een goede uitvoering.

RWS stelt in de ROK vast dat het niet is toegestaan bruggen uit te voeren hoger dan S355. Wanneer geen ROK aanbesteding aanwezig is, komt het vaak voor dat bedrijven alsnog werken met S355 (gebrek aan kennis en ervaring).

De verhouding tussen de variabele en permanente belastingen nemen toe bij een brugdek uitgevoerd in HSS. Hierdoor nemen ook de grootte van de spanningswisselingen toe. Het is van belang om rekening te houden met de vermoeiing in de lassen om de voorgeschreven levensduur te kunnen bereiken. Aan de vermoeiing moet extra aandacht worden besteed, omdat de vermoeiingsweerstand niet op dezelfde manier toeneemt als de maximale treksterkte van het HSS. Om dit te compenseren moet meer aandacht worden besteed aan de verbindingen.

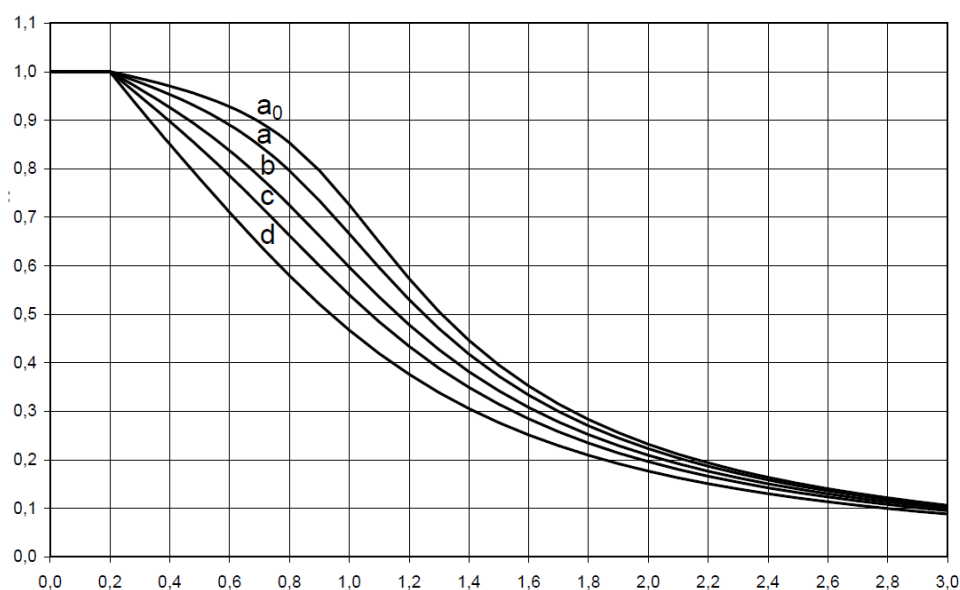
6 CONCLUSIE

Aan de hand van de informatie uit dit rapport wordt de relatie tussen de chemische en mechanische eigenschappen van staal duidelijk alsmede het verschil tussen een lage en hogere staalkwaliteit. Voor het afstudeeronderzoek moeten de voordelen van HSS worden benut om het brugdek van de Kruiswaterbrug te kunnen optimaliseren. Door minder staal toe te passen wordt getracht hogere spanningen te creëren die S355 niet meer kan opnemen.



Afstudeeronderzoek HSS in brugdekken

Constructieve controles



Document : Constructieve controles
Revisie : 0
Datum : 4-2-2016
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	4-2-2016	
Gecontroleerd			4-2-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Constructieve controles

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 INLEIDING	3
1 STIJFHEID	4
2 DOORSNEDEKLASSIFICATIE	5
3 SPANNINGSCONTROLE	6
3.1 Buigspanning	6
3.2 Schuifspanning	7
3.3 Vergelijkspanning	7
4 KNIK	8
5 PLOOI	10
6 CONCLUSIE	11

Constructieve controles

0 INLEIDING

Tijdens het afstudeeronderzoek wordt aandacht besteed aan meerdere onderdelen die van toepassing zijn om HSS te kunnen verwerken voor de optimalisatie van de Kruiswaterbrug. Naast het lassen, de uitvoering en het soort staal richt het onderzoek zich voornamelijk op de constructieve mogelijkheden. Van HSS is bekend dat het een hogere vloeigrens heeft en het meer spanning kan opnemen dan de staalsoorten S355 en lager. In dit rapport wordt gekeken naar de normen van de EC3 om te kijken wat het veranderen van de staalsoort voor gevolgen heeft en waar rekening mee moet worden gehouden. Omdat de Kruiswaterbrug is opgebouwd uit buiglijger wordt rekening gehouden met de doorbuiging van de constructie. De volgende onderdelen worden in dit rapport behandeld:

- Stijfheid
- Doorsnede classificatie (klassebepaling van de doorsnede van samengestelde profielen)
- Spanningscontrole
- Knik
- Plooi

Tabel met de nominale waarde van de vloeigrenzen en de treksterktes. Bron: Tabel 3.1 NEN-EN 1993-1-1

Norm en staalsoort	Nominale dikte van het element t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f _y [N/mm ²]	f _t [N/mm ²]	f _y [N/mm ²]	f _t [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360

Om zoveel mogelijk binnen de eisen van RWS en de ROK te blijven die van toepassing waren voor de renovatie van de Kruiswaterbrug, wordt de verhoging van de vloeigrens als enige uitzondering gehanteerd. Dit betekent dat de stalen onderdelen dan volgens de EN 10025-3 zullen worden geleverd. Merk op dat bovenstaande tabel afwijkt van de waarden die worden gegeven in tabel 5.2 van de NEN-EN 10025-3. Hierin gaat de reductie van de vloeigrens dikker dan 16 mm eerst over in 440 N/mm² en groter dan 40 mm dik pas in 430 N/mm² voor staalsoort S460. De staalsoorten die in bovenstaande tabel worden gegeven, moeten worden gecontroleerd volgens de rekenregels die de NEN-EN 1993-1-1 voorschrijft.

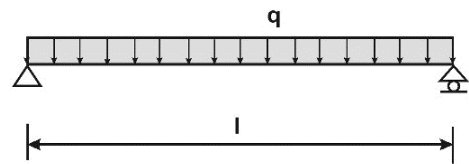
Constructieve controles

1 STIJFHEID

De toegestane vervormingen van de Kruiswaterbrug blijven hetzelfde wanneer het model wordt geoptimaliseerd. Op een paar vervormingseisen na worden geen methoden beschreven om de vervormingen te controleren. Deze zijn afhankelijk van het soort constructie en de overspanningen. Voor de controle wordt ter verduidelijking gebruik gemaakt van een vergeetgenietje. Hieronder wordt het vergeetgenietje voor een ligger op twee steunpunten met een q-last gegeven.

$$\delta = (5ql^4) / (384 EI) \quad \text{waarin:}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \text{doorbuiging in mm} \\ q &= \text{verdeelde belasting in kN/m} \\ L &= \text{overspanning in mm} \\ E &= \text{Elasticiteitsmodulus in N/mm}^2 \\ I &= \text{Traagheidsmoment in mm}^4 \end{aligned}$$



De maximaal toelaatbare doorbuiging:

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

Per onderdeel moet uiteindelijk de berekende $\delta \leq \delta_{\max}$ om te voldoen aan de vervormingseisen.

HSS heeft veel voordelen ten opzichte van S355, maar bij de doorbuigingscontrole worden geen voordelen verkregen door een hogere kwaliteit omdat de elasticiteitsmodulus van het staal hetzelfde blijft, namelijk $2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$. Wanneer het doel is om staal te reduceren voor een gewichtsbesparing, moet tijdens de aanpassingen van het staal rekening worden gehouden met het traagheidsmoment in combinatie met de toegestane doordringingen:

$$I = (1/12)bh^3$$

Een hoger traagheidsmoment zorgt voor minder doorbuiging. Door smart te construeren kan in de breedte staal worden gewonnen. Wanneer de hoogte (wanneer het mogelijk is) iets wordt verhoogd, zal het traagheidsmoment met de macht drie toenemen. Zodoende zal gekeken worden of het versmallen van onderdelen in combinatie met HSS mogelijk is.

Constructieve controles

2 DOORSNEDECLASSIFICATIE

In de NEN-EN 1993-1-1 worden in tabellen 5.2 grenzen gesteld voor maximale breedte-dikteverhoudingen voor onderdelen die op druk worden belast. Afhankelijk van de klasse waarbinnen het profiel valt, wordt door de norm de juiste rekenmethode voorgeschreven. Het betreft een plastisch (klasse 1 en 2) of elastische (klasse 3) controle. Wanneer het profiel bestaat uit een zeer dun lijf kan het voorkomen dat het profiel valt binnen klasse 4. De klassebepaling wordt gedaan aan de hand van een aantal gegevens die tevens zijn terug te vinden in de onderstaande tabellen:

t = dikte van het staal (lijf of flens)
 c = lengte van het lijf of flens min de zijden van de las(sen)
 ϵ = rek van het staal

Bij het laatste punt heeft de toepassing van een hogere staalkwaliteit direct invloed op de klassebepaling van de doorsnede. De ϵ die invloed uitoefent voor de bepaling wordt als volgt bepaald:

$$\epsilon = \sqrt{(235 / f_y)}$$

Voor S355 geldt een ϵ van 0,81 en voor S460 is 0,71 van toepassing.

Tabellen met de maximale breedte-dikteverhoudingen voor op druk belaste onderdelen. Bron: tabel 5.2 NEN-EN 1993-1-1

Inwendige op druk belaste onderdelen				Uitragende flenzen			
Bulgingsas				Bulgingsas			
Bulgingsas				Bulgingsas			
Klasse	Onderdeel belast op buiging	Onderdeel belast op druk	Onderdeel belast op druk en buiging	Klasse	Onderdeel belast op druk	Onderdeel belast op druk en buiging	Onderdeel belast op trek
Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)				Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)			
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	Indien $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ Indien $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$	2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	Indien $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ Indien $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$	3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Voor k_σ zie EN 1993-1-5	
Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)				Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)			
3	$c/t \leq 124\epsilon$	$c/t \leq 42\epsilon$	Indien $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ Indien $\psi > -1$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{1 - \psi}$	4	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Voor k_σ zie EN 1993-1-5	
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	

^{*)} $\psi \leq -1$ is van toepassing indien ofwel de drukspanning $\sigma \leq f_y$ of indien de rek in de meest op trek belaste vezel $\epsilon_y > f_y/E$.

Wanneer aan de vervormingseisen moet worden voldaan door het aanwezige traagheidsmoment zorgt zowel een grotere hoogte van het lijf (c), een dunnere plaat en de lagere waarde van de ϵ van HSS ervoor dat de klassebepaling kritischer wordt. Voor de optimalisatie is het beter om de doorsneden zoveel mogelijk in klasse 3 of lager te houden. Wanneer staalplaten dusdanig dun worden en vallen in klasse 4 worden ze gevoelig voor plooi.

Constructieve controles

3 SPANNINGSCONTROLE

Voor de controle van de spanning is het goed om te weten hoe de brug gecontroleerd moet worden. Omdat de brug bestaat uit buigliggers die op buiging belast worden, is het niet nodig te kijken naar de controles die gelden voor onderdelen die belast worden op trek en druk. Deze controles zijn eerder van toepassing wanneer vakwerkconstructies van toepassing zijn. De formules die in de norm worden genoemd voor de controles ondervinden een positief effect van de verhoging van de vloeigrens, maar omdat ze niet van toepassing zijn, zullen deze verder niet behandeld worden in dit rapport.

3.1 Buigspanning

Het buigend moment moet volgens de norm voldoen aan de volgende unity check:

$$M_{Ed} / M_{c,Rd} \leq 1,0$$

Afhankelijk van de klassebeplating

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = (W_{pl} * f_y) / \gamma_{M0} \quad \text{Voor klasse 1 of 2}$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = (W_{el,min} * f_y) / \gamma_{M0} \quad \text{Voor klasse 3}$$

$$M_{c,Rd} = (W_{eff,min} * f_y) / \gamma_{M0} \quad \text{Voor klasse 4}$$

Omdat de vloeigrens f_y boven de deelstreep staat, zal de verhoging van de staalkwaliteit voor alle vier de klassen gunstiger uitvallen in de unity check. Voor γ_{M0} geldt voor alle staalsoorten die genoemd worden in de NEN-EN 1993-1-1 een waarde van 1,0. Voor $W_{eff,min}$ en $W_{el,min}$ moet de grootste spanning in de uiterste vezel worden genomen.

Constructieve controles

3.2 Schuifspanning

Voor de dwarskracht zijn er net als voor het buigend moment formules bepaald voor de controle van de doorsnede. De volgende unity check is van kracht:

$$V_{Ed} / V_{c,Rd} \leq 1,0$$

Wanneer na het bepalen van de doorsnedeklasse blijkt dat het profiel plastisch mag worden berekend geldt dat $V_{c,Rd} = V_{c,pl}$

$$V_{c,pl} = (A_v * (f_y / \sqrt{3})) / \gamma_{M0}$$

Hierin is A_v het schuifoppervlak dat wordt bepaald aan de hand van de afmetingen van het samengetelde profiel. Wanneer de weerstand tegen de dwarskracht wordt gecontroleerd in doorsnedeklasse 3 geldt dat $V_{c,Rd}$ moet worden gecontroleerd aan de hand van de twee onderstaande formules:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0 \quad \text{met:} \quad \tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t} \quad \text{waarin:}$$

τ_{Ed}	=	schuifspanning in N/mm ²
V_{Ed}	=	aanwezige dwarskracht in kN
S	=	statisch moment in een beschouwd punt
I	=	Traagheidsmoment
t	=	dikte van het staal in mm in het beschouwde punt

3.3 Vergelijkspanning

Voor de sterktecontrole waar spanningen in verschillende richting moeten worden gecombineerd volgens onderstaande formule is te zien dat een hogere vloeigrens voor elke spanning zorgt dat de controle gunstiger wordt.

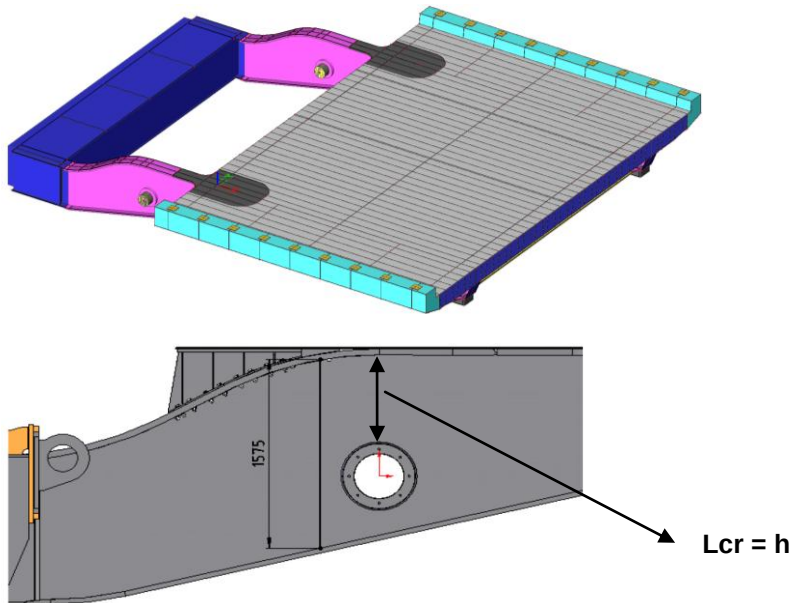
$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1$$

Voor alle drie de controles heeft het toepassen van een hogere staalkwaliteit en daarmee een hogere vloeigrens een gunstig effect op de uitkomst van de controles.

Constructieve controles

4 KNIK

In het rapport van ITBB wordt de krachtsinleiding van de belastingen naar de opleggingen nabij de draaipunten een knikberekening gemaakt. De kniklengte (L_{cr}) die wordt gecontroleerd is de hoogte van het stuk lijf boven het draaipunt. In dit hoofdstuk wordt gekeken wat er veranderd in de knikcontrole wanneer er HSS wordt toegepast in plaats van S355. Hieronder is de locatie van de knikcontrole weergegeven in het model van de Kruiswaterbrug.



Model van de Kruiswaterbrug met het lijf boven het draaipunt dat wordt gecontroleerd op knik.
Bron: SCIA en rapport ITBB.

Voor de knikcontrole zijn een aantal gegevens nodig. Door gebruik te maken van tabel 6.2 uit de NEN-EN 1993-1-1 kan de knikkromme bepaald worden voor het samengestelde profiel. De kromme is afhankelijk van de geometrie van het profiel, de as waarvoor de knik gecontroleerd zal worden en de staalkwaliteit. In de ondertsaaende tabel is de bepaling van de knikkromme weergegeven.

Tabel voor de keuze knikkromme voor doorsneden. Bron: Tabel 6.2 NEN-EN 1993-1-1+C2:2011

Doorsnede		Begrenzingsen		Knik om de as	Knikkromme	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Gewalste profielen		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	a	a ₀
				z-z	b	a ₀
		$h/b \leq 1,2$	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	a
				z-z	c	a
Gelaste profielen		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	a
				z-z	c	a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	d	c
				z-z	d	c
Gelaste profielen		$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y-y	b	b
				z-z	c	c
Gelaste profielen		$t_f > 40 \text{ mm}$		y-y	c	c
				z-z	d	d

Constructieve controles

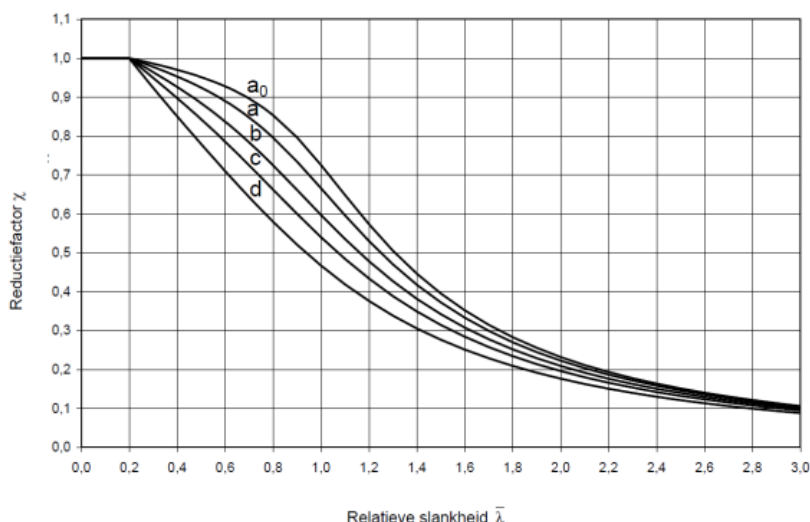
De knikcontrole wordt uitgevoerd aan de hand van een toelaatbare knikspanning. Deze toelaatbare spanning wordt berekend door de aanwezige vloeigrens te reduceren met een reductiefactor χ . Deze is op twee manieren te bepalen:

1. Door gebruik te maken van figuur 6.4 uit de NEN-EN 1993-1-1
2. Door middel van een exacte berekening beschreven in de NEN-EN 1993-1-1

Manier 1:

Voor de eerste manier moet de relatieve slankheid ($\bar{\lambda}$) worden berekend. Aan de hand van de aanwezige knikkromme is dan in figuur 6.4 af te lezen wat de waarde is die hoort bij de reductiefactor.

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \pi \sqrt{E / f_y} = 93,9\epsilon \\ i_y &= \sqrt{(1/12) * t_w^2} \\ \bar{\lambda} &= L_{cr} / (i_y * \lambda_1)\end{aligned}$$



Grafiek voor de bepaling van de reductiefactor χ : Bron: Figuur 6.4 NEN-EN 1993-1-1+C2:2011

Voor de knikcontrole moet de toelaatbare knikspanning worden berekend. Vervolgens moet de toelaatbare spanning groter of gelijk zijn dan de optredende spanning in het lijf dat gecontroleerd wordt.

$$\begin{aligned}\sigma_{toel} &= \chi * f_y / \gamma_{M1} \\ UC &= \sigma_{optredend} / \sigma_{toel} \leq 1,0\end{aligned}$$

Manier 2:

Naast het aflezen van de waarde waarmee gereduceerd moet worden, kan de factor ook exact berekend worden. Na het berekenen van de relatieve slankheid moet gebruik worden gemaakt van een imperfectiefactor α . Deze wordt gekozen aan de hand van de bijbehorende knikkromme. In de onderstaande tabel staan de mogelijke imperfectiefactoren gegeven.

Tabel voor de imperfectiefactoren voor de knikkrommen. Bron: Tabel 6.1 NEN-EN 1993-1-1+C2:2011

Knikkromme	a_0	a	b	c	d
Imperfectiefactor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Constructieve controles

Voor de controle om de as die gevoelig is voor knik (z-z) is hieronder de formule voor de bepaling van de reductiefactor:

$$\Phi = 0,5(1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2)$$

De reductiefactor wordt vervolgens exact bepaald:

$$\chi = 1 / (\Phi + \sqrt{(\Phi^2 - \bar{\lambda}_z^2)})$$

Voor de knikcontrole moet wederom de toelaatbare knikspanning worden berekend. Vervolgens moet de toelaatbare spanning groter of gelijk zijn dan de optredende spanning in het lijf dat gecontroleerd wordt.

$$\sigma_{\text{toel}} = \chi * f_y / \gamma_{M1}$$

$$UC = \sigma_{\text{optredend}} / \sigma_{\text{toel}} \leq 1,0$$

Het grootste voordeel van het toepassen van HSS is zichtbaar in de formule van de toelaatbare spanning. In plaats van 355 N/mm² wordt nu 460 N/mm² gebruikt. Afhankelijk van de situatie (dikte van het staal in combinatie met de λ_1 waarde is een andere relatieve slankheid van toepassing.

5 PLOOI

Voor de plooi controle zijn de volgende factoren van toepassing die invloed kunnen uitoefenen:

- De geometrie van de plaat (breedte-dikteverhouding)
- De verhoudingen tussen de spanningen in de plaat
- De grootte van de hoeveelheid schuifspanning die aanwezig is
- Dikte van de plaat
- De staalkwaliteit die wordt toegepast

Wanneer de doorsnede van het profiel valt in klasse 4, moet een controle op plooï worden gedaan. Net als bij knik wordt er een toegestane (plooi)spanning berekend die groter of gelijk moet zijn dan de grootste optredende spanning in de plaat. Afhankelijk van de relatieve plaatslankheid worden een relatieve plooi spanning en reductiefactor bepaald. Door deze factor te vermenigvuldigen met de vloeigrens van het staal wordt de toegestane plooi spanning verkregen.

Voor de plooi controle zal in dit afstudeeronderzoek gebruik worden gemaakt van de spanning reductie methode.

Constructieve controles

6 CONCLUSIE

Wanneer wordt gekeken naar de constructieve controles zijn er een aantal punten waar rekening mee moet worden gehouden. Zo worden voor het gebruik van HSS strengere eisen gesteld om de doorsnede te behouden in dezelfde klasse omdat de ϵ van S460 lager is dan die van S355. Voor het ontwerp van de Kruiswaterbrug moet rekening worden gehouden dat de breedte-dikteverhoudingen zoveel mogelijk binnen profielklasse 3 blijven.

In de formules van de sterktecontroles komt duidelijk naar voren dat een hogere f_y van HSS voordeel biedt ten opzichte van S355. Doordat de unity check lager zullen worden, is het mogelijk om de spanningen meer toe te laten nemen door staaloppervlak te reduceren. Tijdens de reductie van het staaloppervlak moet ten alle tijden rekening worden gehouden met de vervormingseisen die van toepassing zijn voor de Kruiswaterbrug.

Voor de controles van knik en plooi wordt gebruik gemaakt van reductiemethoden. Hierbij wordt de vloeigrens, die wordt verhoogd van 355 N/mm^2 naar 460 N/mm^2 , gereduceerd. De gereduceerde vloeigrens moet aan het eind van de controle een hogere waarde hebben dan de grootst optredende spanning in de plaat waar de controle van toepassing is. Door een hogere waarde te reduceren zal een hogere waarde overblijven waardoor er meer mogelijk is tijdens de optimalisatie van de Kruiswaterbrug dan bij spanningen met een lagere staalkwaliteit.





Afstudeeronderzoek HSS in brugdekken

Lassen uitvoeringstechnisch

Document : Lassen uitvoeringstechnisch
Revisie : 0
Datum : 24-2-2016
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	24-2-2016	
Gecontroleerd			24-2-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Lassen uitvoeringstechnisch

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 INLEIDING	3
1 NEN-EN 1993-1-8	4
1.1 Algemeen	4
1.2 Lastoevoegmateriaal	4
1.3 Type lassen	4
1.4 Rekenwaarde van de weerstand van een hoeklas	5
1.5 Rekenwaarde van de weerstand van stompe lassen	7
1.6 Verdeling van krachten	7
2 NEN-EN 1090-2	8
2.1 Kwalificeren van lasmethoden	8
2.2 Voorbewerken en uitvoeren van lassen	10
3 EXECUTIEKLASSE VOOR DE KRUISWATERBRUG	13



Lassen uitvoeringstechnisch

0 INLEIDING

De onderdelen waaruit een stalen brugdek bestaat, worden door middel van lassen aan elkaar bevestigd. Om meer inzicht te krijgen wordt er gekeken naar de NEN-EN 1993-1-8 hoofdstuk 4 gelaste verbindingen. In deze norm wordt gekeken naar de verschillende lassen (hoeklassen en stompe lassen), hun toleranties, afmetingen en de bepaling van de bijbehorende rekenwaarden. Verder wordt ook gekeken naar de directe uitzonderingen wanneer er de staalsoort S460N wordt gebruikt in plaats van S355.

Een andere belangrijke norm is de uitvoeringsnorm NEN-EN 1090-2 hoofdstuk 7 lassen. Voor de uitvoering wordt er veel onderscheidt gemaakt in kwaliteit afhankelijk van de executieklasse waarin de lassen van de Kruiswaterbrug zich bevinden. Aan de hand van de NEN-EN 1990 + NB. en de bijlage B van de NEN-EN 1090 zal de bijbehorende executieklasse worden bepaald.



Lassen uitvoeringstechnisch

1 NEN-EN 1993-1-8

Hoofdstuk 4 over gelaste verbindingen zal worden nagelopen om te kijken naar algemene voorschriften en eisen die specifiek gelden voor HSS.

1.1 Algemeen

De constructiestaalsoorten die samengaan met de bepalingen in deze norm staan vermeld in de NEN-EN 1993-1-1. Het is daarbij van belang dat de materiaaldikte dikker is dan 4,0 mm. De staalsoort S460N bevindt zich hiertussen. De bepalingen zijn eveneens van toepassing op verbindingen waarvan de mechanische eigenschappen van het lastoevoegmateriaal verenigbaar zijn met die van het moedermateriaal.

Verder wordt vermeld dat de lassen aan het eind op vermoeiing moeten worden getoetst volgens de NEN-EN 1993-1-9 en dat de kwaliteit van de lassen moet worden met behulp van de NEN-EN 1090-2.

1.2 Lastoevoegmateriaal

Alle lastoevoegmaterialen moeten voldoen aan de in 1.2.5 vermelde verwijzingsnormen (groep 5). Daarnaast staat beschreven dat de eigenschappen van het lastoevoegmateriaal beter of gelijk hoort te zijn dan het toegepaste moedermateriaal. Omdat het staal toeneemt van S355 naar S460 moet de kwaliteit van het lastoevoegmateriaal minimaal gelijk zijn aan die van S460. Het betreft de voorgeschreven vloeigrens, treksterkte, verlengingen bij breuk en de minimale Charpy V kerfslagwaarde.

1.3 Type lassen

Voor het lassen van de brugonderdelen zijn voornamelijk hoeklassen en stompe lassen van toepassing. Wanneer de hoek van een verbinding zich tussen 60° en 120° bevindt, is het een hoeklas. Lassen kleiner dan 60° moeten worden beschouwd als een stompe las. Wanneer de hoek groter is dan 120° moet door middel van proeven de weerstand van de las worden aangetoond volgens bijlage D van de NEN-EN 1990.

Lassen die eindigen op een onderdeel behoren te worden voortgezet. De voorgeschreven voortzettinglengte is minimaal twee maal de breedte van de las, tenzij de toegang of lasvorm dit onpraktisch maakt.

Bij stompe lassen wordt er onderscheidt gemaakt tussen stompe lassen met spleet en zonder spleet. Met spleet is er sprake van een gedeeltelijke doorlassing die kleiner is dan de volledige dikte van het moedermateriaal. Zonder spleet sluiten het lasmateriaal van de verbindingen en het moedermateriaal over de gehele dikte goed op elkaar aan.

Onderbroken hoek- en stompe lassen zijn niet van toepassing voor bruggen, omdat ze niet zijn toegestaan in corrosieve omstandigheden. Sleuflassen, proplassen, waaierlassen en lassen met vulplaten zijn voor dit onderzoek niet van toepassing. Daarnaast moeten de lassen voor constructies gevoelig voor vermoeiing zoveel mogelijk gebruik worden gemaakt van volledige doorlassingen (full penetration). Dit is in de tekeningen van VSF opgenomen doordat er overal vooropeningen te zien zijn.

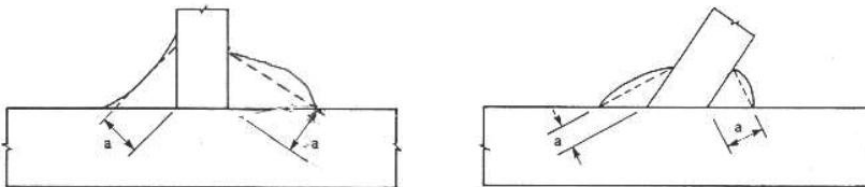
Lassen uitvoeringstechnisch

1.4 Rekenwaarde van de weerstand van een hoeklas

Voor de effectieve lengte van een hoeklas (l_{eff}) behoort de lengte te zijn genomen waarover de hoeklas de volledige dikte vertoont. De lengte mag gelijk worden gehouden aan de volledige lengte min 2 maal de effectiever keeldoorsnede a . Wanneer de las over de volledige lengte de volledige lasdikte heeft, is het niet nodig de lengte te reduceren.

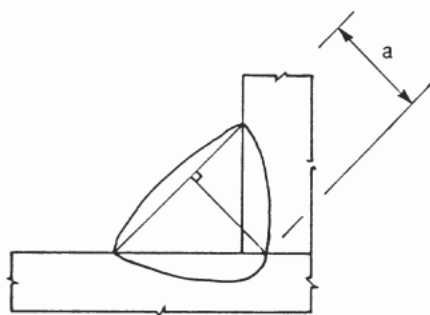
Een hoeklas met een effectieven lengte kleiner dan de grootste waarde van 30 mm of 6 maal de keeldoorsnede behoren niet te worden gebruikt om belastingen op te nemen.

De effectieve keeldoorsnede a van een hoeklas behoort de hoogte van de grootste ingeschreven driehoek tussen de hechtvlakken en het oppervlak van de las te zijn aangenomen, gemeten loodrecht op de zijde van de driehoek die correspondeert met de buitenkant van de las. Voor het rekenen mag volgens de NB. de lasdikte met de kleinste waarde van 20% of 2,0 mm worden vergroot wanneer er gebruik wordt gemaakt van automatisch onderpoederbooglassen.



De effectieve keeldoorsnede van een hoeklas mag niet kleiner worden genomen dan 3,0 mm. Ondanks dat de brug met het gebruik van HSS naar verwachting met dunnere platen en minder lasmateriaal kan worden gerealiseerd, zijn er een aantal grenzen. Ook bij het gebruik van HSS moeten de platen minimaal 4,0 mm zijn en de keeldoorsneden 3,0 mm.

Bij de bepaling van de rekenwaarde van de weerstand, mag bij een diepe inbranding een extra lasdikte in rekening worden gebracht. Met proeven moet dan wel worden aangetoond wat de inbrandingsdiepte is met uitzondering van OP-lassen.



In de NEN-EN 1993-1-8 worden twee methodes beschreven voor de rekenwaarde van de weerstand voor hoeklassen. VSF gebruikt meer de gecombineerde spanningsmethode dan de vereenvoudigde methode. In de gecombineerde spanningsmethode worden de krachten in de las ontbonden in componenten evenwijdig aan en loodrecht op de lengte-as van de las en componenten in en loodrecht op het vlak van de keeldoorsnede van de las. De rekenwaarde van het oppervlak van de keeldoorsnede wordt als volgt bepaald:

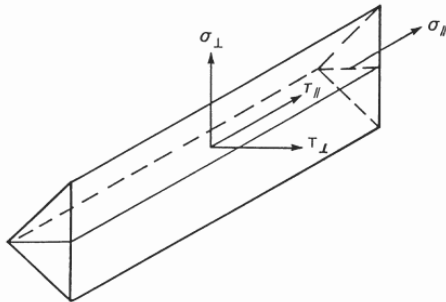
$$A_w = \sum a * l_{eff}$$

Lassen uitvoeringstechnisch

Er moet worden aangenomen dat de plaats van de rekenwaarde van het oppervlakte van de keeldoorsnede geconcentreerd is in ter plaatse van de laswortel.

De spanningsverdeling in de keeldoorsnede van de las is gelijkmatig verdeeld:

- $\sigma_{\perp}$ = normaalspanning loodrecht op het vlak van de keeldoorsnede
- $\sigma_{\parallel}$ = normaalspanning evenwijdig aan de lengte-as van de las (n.v.t.)
- $\tau_{\perp}$ = schuifspanning loodrecht op de lengte-as van de las
- $\tau_{\parallel}$ = schuifspanning evenwijdig aan de lengte-as van de las



De rekenwaarde van de weerstand van een las voldoet wanneer er aan de volgende twee bepalingen wordt voldaan:

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

- f_u is de nominale trekspanning van het zwakst verbonden onderdeel
- β_w is de correlatiefactor

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. 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. Eerder werd gesteld dat het lasmateriaal hoger of gelijk moet zijn dan het moedermateriaal. Wanneer deze twee staalsoorten aan elkaar worden gelast is er dus minimaal 460 nodig om aan deze eis te voldoen.

Lassen uitvoeringstechnisch

1.5 Rekenwaarde van de weerstand van stompe lassen

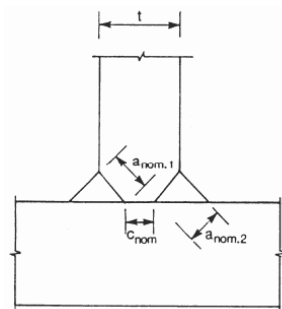
Bij een stompe las zonder spleet behoort de weerstand gelijk te zijn aan de rekenwaarde van de weerstand van het zwakst verbonden deel, mits het moedermateriaal dezelfde of hogere eigenschappen heeft dan het moedermateriaal.

Bij stompe lassen met spleet moet de rekenwaarde worden bepaald volgens de methode voor een hoeklas met diepe inbranding. De keeldoorsnede van een stompe las met spleet behoort niet groter te zijn dan de doorlassing (inbranddiepte) die stelselmatig kan worden bereikt. Ook hier mag weer een extra lasdikte worden gehanteerd, mits dit door middel van proeven kan worden aangetoond of er gebruikt is gemaakt van OP-lassen.

T-verbinding met stompe lassen met spleet

Wanneer een T-verbinding met stompe lassen met spleet wordt versterkt met hoeklassen, mag de rekenwaarde van de weerstand worden bepaald zoals bij een stompe las zonder spleet. Daarbij moet er aan de volgende criteria worden voldaan:

- De totale min. Keeldoorsnede, zonder niet gelaste spleet, mag niet kleiner zijn dan de dikte t van het lijf van het T-stuk
- De niet gelaste spleet mag niet groter zijn dan de kleinste waarde van $(t/5)$ of 3 mm.



$$a_{\text{nom},1} + a_{\text{nom},2} \geq t$$

c_{nom} behoort gelijk te zijn aan de kleinste waarde van $t/5$ en 3 mm

Wanneer de bovenstaande criteria niet overeenkomen, moet de rekenwaarde van de weerstand bepaald worden via de methode voor een hoeklas of via de methode met een diepe inbranding. De keeldoorsnede behoort te zijn bepaald zoals die bij de hoeklassen wordt bepaald. Dit kan dus voor normale hoeklassen of voor die met een inbranding en de eisen die daarbij worden gesteld.

1.6 Verdeling van krachten

De verdeling van krachten in een gelaste knoop mogen zowel plastisch als elastisch worden beschouwd. De norm geeft aan dat het aanvaardbaar is om een vereenvoudigde belastingsverdeling tussen de lassen onderling aan te nemen.

Met $\sigma_{\parallel}$ hoeft in de las geen rekening mee te worden gehouden tijdens de belastingsoverdracht.

Lassen uitvoeringstechnisch

2 NEN-EN 1090-2

Van de NEN-EN 1090-2 wordt er gekeken naar hoofdstuk 7 over de uitvoeringseisen van lassen. In deze norm wordt er naast de voorschriften verwezen naar verschillende normen en voornamelijk ISO normen. De EN ISO 3834 is van toepassing voor EXC3 en EXC4. Wanneer deze norm en de NEN-EN 1990+NB. worden gebruikt, zal blijken dat de lassen van de brug in HSS zich bevinden in EXC4. In hoofdstuk 3 wordt duidelijk hoe aan de EXC4 is gekomen.

In de EN ISO 3834 wordt gesteld dat een lasplan (onderdeel van het productieplan) moet worden opgesteld. Hierin staat de lasmethodebeschrijving (WPS) met daarnaast informatie over het lastoevoegmateriaal, eisen betreft voorverwarming, de tussenlaagtemperatuur en de warmtebehandelingen van de lassen. In het lasplan moet duidelijkheid te zien zijn wat de verschillen zijn tussen LSS lassen en HSS lassen. In de norm worden er punten gegeven die moeten worden opgenomen in het lasplan.

2.1 Kwalificeren van lasmethoden

Afhankelijk van de situatie, de staalsoort, de kennis en het gereedschap kan er gekozen worden voor een bepaalde lasmethode. Bij een bepaald lasproces hoort een kwalificatie (EN ISO...) die meer vertelt over de bijbehorende eisen die moeten worden opgenomen in het WPS.

Processen 111, 114, 12, 13 en 14

De kwalificatie van de lasmethode hangt af van de uitvoeringsklasse, het moedermateriaal en de graad van de mechanisatie. Wanneer de bovenstaande lasprocessen van toepassing zijn, moeten de EN ISO 15614-2 en de 15613 worden geraadpleegd. Voor deze twee normen geldt:

- Indien kerfslagproeven zijn gespecificeerd moeten ze worden uitgevoerd bij de laagste temperatuur. S460N wordt getest bij -20° en S460NL bij -50°.

Methode van kwalificeren		EXC2	EXC3	EXC4
Lasmethodebeproeving	EN ISO 15614-1	X	X	X
Lasproef voor aanvang van de productie	EN ISO 15613	X	X	X
Standaardlasmethode	EN ISO 15612	X ^a	–	–
Opgedane laservaring	EN ISO 15611	X ^b	–	–
Beproefde lastoevoegmaterialen	EN ISO 15610			
X Toegelaten				
– Niet toegelaten				
^a Alleen voor materialen ≤ S355 en alleen voor handlassen of gedeeltelijk gemechaniseerd lassen.				
^b Alleen voor materialen ≤ S275 en alleen voor handlassen of gedeeltelijk gemechaniseerd lassen.				

Lassen uitvoeringstechnisch

Kwalificeren van andere lasmethoden

Voor de processen 21, 22, 23, 24, 42, 52, 783 en 784, weergegeven in de tabel hieronder, wordt verwezen naar de volgende ISO normen.

Lasproces (volgens EN ISO 4063)		Lasmethode- beschrijving (WPS)	Kwalificeren van de lasmethode
Referentienummer	Benaming		
21	Puntlassen	EN ISO 15609-5	EN ISO 15612
22	Rolnaadlassen		
23	Projectielassen		
24	Afbrandstuiklassen	EN ISO 15609-5	EN ISO 15614-13
42	Wrijvingslassen	EN ISO 15620	EN ISO 15620
52	Laserlassen	EN ISO 15609-4	EN ISO 15614-11
783	Stiftlassen door middel van getrokken boog en met keramische ring of met beschermgas	EN ISO 14555	EN ISO 14555 ^a
784	Stiftlassen door middel van booglassen met korte cyclustijd		

^a Bij EXC2 is lasmethodekwalificatie gebaseerd op opgedane laservaring toegelaten. Bij EXC3 en EXC4 moet lasmethodekwalificatie worden uitgevoerd door een lasmethodebeproeving of lasproef voor aanvang van de productie.

Geldigheid van lasmethodekwalificaties

Voor de geldigheid worden er in de 1090-2 het volgende gezegd over HSS:

- Voor een periode tussen één en drie jaar moet een geschikte productieslagproef worden uitgevoerd voor staalsoorten hoger dan S355.
- Voor een periode van meer dan drie jaar moeten nieuwe procedureproeven worden uitgevoerd, afhankelijk van wat de toepassing is.

Lassers en bedieners van machines

In de EN 287-1 staan de kwalificaties die de lassers moeten hebben. Voor de bedieners van lasmachines staan deze beschreven in de EN1418.

Lassen uitvoeringstechnisch

Lascoördinatie

Het lascoördinatiepersoneel moet tijdens de werkzaamheden toezicht houden dat de lassen volgens de juiste kwalificaties worden gelegd, beschreven in de EN ISO 14731. In de onderstaande tabel staat de 'C' voor uitgebreide kennis.

EXC	Staal (Staalgroep)	Normatieve verwijzing	Dikte (mm)		
			$t \leq 25^a$	$25 < t \leq 50^b$	$t > 50$
EXC2	S235 t.m. S355 (1.1, 1.2, 1.4)	EN 10025-2, EN 10025-3, EN 10025-4, EN 10025-5, EN 10149-2, EN 10149-3, EN 10210-1, EN 10219-1	B	S	C ^c
	S420 t.m. S700 (1.3, 2, 3)	EN 10025-3, EN 10025-4, EN 10025-6, EN 10149-2, EN 10149-3 EN 10210-1, EN 10219-1	S	C ^d	C
EXC3	S235 t.m. S355 (1.1, 1.2, 1.4)	EN 10025-2, EN 10025-3, EN 10025-4, EN 10025-5, EN 10149-2, EN 10149-3, EN 10210-1, EN 10219-1	S	C	C
	S420 t.m. S700 (1.3, 2, 3)	EN 10025-3, EN 10025-4, EN 10025-6, EN 10149-2, EN 10149-3 EN 10210-1, EN 10219-1	C	C	C
EXC4	Alle	Alle	C	C	C

^a Kolomvoetplaten en kopplaten ≤ 50 mm.
^b Kolomvoetplaten en kopplaten ≤ 75 mm.
^c Voor staal tot en met S275 is niveau S voldoende.
^d Voor staal N, NL, M en ML is niveau S voldoende.

2.2 Voorbewerken en uitvoeren van lassen

Lasnaadvoorbewerking

Lasnaadvoorbewerkingen moeten geschikt zijn voor het lasproces zelf en de bijbehorende kwalificaties. Wanneer de EN ISO 15614-1 of EN ISO 15613 is gebruikt voor de kwalificatie van het lasproces, moeten de lasnaadvoorbewerking overeenkomen met het type voorbewerking gebruikt bij de lasmethodebeproevingen. De toleranties, voorbewerkingen en de uitlijning moeten worden opgenomen in het WPS.

In de EN-ISO 9692-1 en 2 staan details voor lasvoorbewerkingen en in de NEN-EN 1993-2, bijlage C staan lasnaadvoorbewerkingen speciaal voor bruggen.

Na de lasnaadvoorbewerking moeten de naden vrij zijn van zichtbare scheuren. Wanneer er gelast wordt, moeten de openingen droog zijn en vrij van materiaal om de kwaliteit van de las niet negatief te beïnvloeden. Grondverven (shopprimers) mogen niet aanwezig zijn op de laskanten bij EXC4, tenzij met proeven is aangetoond dat het geen negatieve invloeden geeft.

Lassen uitvoeringstechnisch

Opslag en behandeling lastoevoegmaterialen

Voor het opslaan, behandelen en gebruiken van het lasmateriaal geschiedt in eerste instantie onder de aanbevelingen van de fabrikant. Wanneer deze ontbreken is de onderstaande tabel van toepassing:

	Temperatuurniveau (T)	Tijd (t)
Drogen ^a	$300\text{ °C} < T \leq 400\text{ °C}$	$2\text{ h} < t < 4\text{ h}$
Opslaan ^a	$\geq 150\text{ °C}$	Voorafgaand aan het lassen
Opslaan ^b	$\geq 100\text{ °C}$	Tijdens het lassen
^a Vast opgestelde oven		
^b Draagbare elektrodekoker		

Voor toevoegmaterialen betreft HSS worden verder geen uitzonderingen gemaakt.

Weersinvloeden en temperatuur

Een groot voordeel van VSF is dat er veel lassen worden gedaan in de constructiewerkplaats. Van de Kruiswaterbrug is alles binnen gedaan, waardoor er geen rekening hoeft te worden gehouden met weersinvloeden. Voor staalsoorten hoger dan S355 wordt voorgeschreven dat de temperatuur van het materiaal niet lager mag zijn dan 5°C. Wanneer dit wel zo is moet het materiaal op een geschikte manier worden voorverwarmd.

In de EN ISO 13916 en EN 1011-2 wordt het voorverwarmen behandeld. Het voorverwarmen moet worden toegepast tijdens het lassen, tijdens het leggen van hechtlassen en tijdelijke voorzieningen.

Hechtlassen

De minimum lengte van de hechtlas moet de kleinste waarde hebben van viermaal de dikte van het dikste deel of 50 mm, tenzij anders aangetoond door een beproeving.

Hoeklassen

In de NEN-EN 1993-1-8 is er al het een en ander behandeld over hoeklassen. De 1090-2 vult daarop aan dat de afmetingen van de gelegde hoeklas niet kleiner mogen zijn dan de gespecificeerde afmetingen van de keeldoorsnede en/of beenlengtes (minimaal 3,0 mm). En dat:

- De volledige keeldoorsnede, aangetoond als haalbaar, gebruikmakend van WPS's voor lasprocessen met diepe of gedeeltelijke inbranding.
- Indien de opening h de onvolkomenheidsgrens overschrijdt, deze mag worden gecompenseerd door gebruik te maken van een grotere keeldoorsnede $a = a_{nom} + 0,7h$.
- Voor bruggen gelden andere eisen voor de keeldoorsnede van hoeklassen. De norm verwijst naar 7.5.18 en D.2.16.

In de laatste verwijzing voor hoeklassen van bruggen staat beschreven dat de productieproeven moeten worden uitgevoerd rekening houdend met:

- Controle bij een diepe inbranding en dat dit gedocumenteerd wordt
- Verbinding verstijving en dekplaat voor iedere 120 meter
- Verstijvingen met koppelplaat.

De productieproeven zijn niet vereist voor verstijving-dekplaatverbindingen buiten de rijbaan (stootranden) die niet door het voertuig worden belast. Voor bepaalde details (doorlopende verstijvingen door de dwarsdrager) kan een bepaalde lasvolgorde worden voorgeschreven.

Lassen uitvoeringstechnisch

Aanvaardingscriteria

Voor bruggen in EXC4 zijn er in de norm aanvullende kwaliteitseisen gesteld volgens niveau B+. In de onderstaande tabel is weergegeven waar nog rekening mee gehouden moet worden:

Onvolkomenheidsaanduiding		Grenswaarden voor onvolkomenheden ^a
Doorlopende inkarteling, onderbroken inkarteling (5011, 5012)		Niet toegelaten
Poreusheid (2011 t.m. 2014)	Stompe lassen	$d \leq 0,1 s$, maar max. 2 mm
	Hoeklassen	$d \leq 0,1 a$, maar max. 2 mm
Vast insluitel (300)	Stompe lassen	$h \leq 0,1 s$, maar max. 1 mm $l \leq s$, maar max. 10 mm
	Hoeklassen	$h \leq 0,1 a$, maar max. 1 mm $l \leq a$, maar max. 10 mm
Uitlijnigheid (507)		$h \leq 0,05 t$, maar max. 2 mm
Holle doorlassing (515)		Niet toegelaten
Aanvullende eisen voor brugdekken ^{a b}		
Poreusheid en gasporiën (2011, 2012 en 2014)		Alleen enkele kleine poriën toegelaten
Nestvormige poreusheid (2013)		Maximumsom van poriën: 2 %
Gaskanaal, wormvormige gaskanalen (2015 en 2016)		Geen lange poriën
Onjuiste vooropening bij hoeklassen (617)		Lassen die loodrecht op hun lengterichting worden belast moeten in hun geheel worden gekeurd, kleine afwijkingen van de vooropening alleen plaatselijk aanvaardbaar $h \leq 0,3 \text{ mm} + 0,1 a$, maar max. 1 mm
Doorlopende inkarteling (5011)		a) Stompe lassen: alleen plaatselijk aanvaardbaar $h \leq 0,5 \text{ mm}$ b) Hoeklassen: niet aanvaardbaar wanneer loodrecht op richting van de belasting, doorlopende inkarteling moet door slijpen worden verwijderd
Meerdere onvolkomenheden in een dwarsdoorsnede (nr. 4.1)		Niet toegelaten
Vaste insluitels (300)		Niet toegelaten
^a Symbolen zijn gedefinieerd in EN ISO 5817. ^b Deze eisen zijn aanvullend op B+.		

Lassen uitvoeringstechnisch

3 EXECUTIEKLASSE VOOR DE KRUISWATERBRUG

In de NEN-EN 1990 +NB. en de NEN-EN 1090-2 (bijlage B) wordt de executieklasse voor de Kruiswaterbrug bepaald in HSS bepaald. De executieklasse is van belang voor de bepaling van verschillende kwaliteiten voor tijdens het lassen. Aan de hand van de volgende drie punten kan de executieklasse bepaald worden:

- Relatie met de gevolgsklasse (bijlage B NEN-EN 1990+NB.)
- Productiecategorie
- Gebruikerscategorie

Volgens onderstaande tabel NB.21 uit de NEN-EN 1990 valt de Kruiswaterbrug onder gevolgsklasse 3 omdat de brug zich bevindt op een hoofdweg, namelijk de A7.

Tabel NB.21 – B1 — Voorbeelden van toepassingen gevolgsklassen

Gevolgsklasse	Voorbeelden van toepassingen voor gebouwen alsmede andere bouwwerken geen bruggen zijnde	Voorbeelden van toepassingen voor bruggen
CC3	Hoge gebouwen, die reiken tot meer dan 70 meter boven het aangrenzende maaiveld.	Bruggen in en over hoofdwegen, hoofdvaarwegen en landelijke spoorwegen. Dit betreft bruggen: — in en over de hoofdinfrastructuur of over hoofdvaarwegen met intensieve industriële (zee)vaart of
	Bouwwerken, waarvan de overspanning van de constructie in een draagrichting groter is dan 50 meter en waarbij in geval van bezwijken van die overspanning meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen (zoals bij grote tentoonstellings- en stationshallen). Bouwwerken met de bestemming publieksfunctie (bijv. onderwijsgebouwen stadions, concerthallen, tribunes), waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen. Gebouwen met verminderd zelfredzame personen zoals ziekenhuizen, celgebouwen, verpleegtehuizen met 4 of meer bouwlagen. ²⁾ Gebouwen waar zeer vitale processen worden bestuurd, bijv. verkeerstoren Schiphol, verkeersleidingsgebouw. Industriegebouwen voor gevaarlijke stoffen en/of processen waarvoor een omgevingsvergunning voor het milieu noodzakelijk is.	

Lassen uitvoeringstechnisch

In bijlage tabel B1 en B2 van de NEN-EN 1090-2 worden de service category (gebruikerscategorie) en de production category (productiecategorie) bepaald.

Categorieën	Criteria
SC1	— Constructies en onderdelen ontworpen en berekend voor quasistatische belasting (voorbeeld: gebouwen) — Constructies en onderdelen waarvan de verbindingen zijn ontworpen en berekend voor aardbevingsbelastingen in gebieden met lage aardbevingsactiviteit en in DCL* — Constructies en onderdelen ontworpen en berekend voor vermoeiingsbelastingen door kranen (klasse S₀)**
SC2	— Constructies en onderdelen ontworpen en berekend voor vermoeiingsbelastingen volgens EN 1993 (voorbeelden: wegverkeers- en spoorwegbruggen, kranen (klasse S₁ tot en met S₉)**, constructies gevoelig voor door wind, publiek of draaiende machines veroorzaakte trillingen) — Constructies en onderdelen waarvan de verbindingen zijn ontworpen en berekend voor aardbevingsbelastingen in gebieden met gemiddelde of hoge aardbevingsactiviteit en in DCM* en DCH*
* DCL, DCM, DCH: ductiliteitsklasse volgens EN 1998-1.	
** Voor indeling van vermoeiingsbelasting door kranen, zie EN 1991-3 en EN 13001-1.	

Categorieën	Criteria
PC1	— Niet-gelaste onderdelen gefabriceerd van producten van alle staalsoorten — Gelaste onderdelen gefabriceerd van producten van staalsoorten onder S355
PC2	— Gelaste onderdelen gefabriceerd van producten van staalsoorten S355 en hoger — Onderdelen die fundamenteel zijn voor de constructieve samenhang en op de bouwplaats door middel van lassen zijn samengesteld — Onderdelen die met behulp van warmtebehandeling worden gefabriceerd of een warmtebehandeling ondergaan tijdens de fabricage — Onderdelen of vakwerkliggers uit ronde buizen die een profilering aan de uiteinden vereisen

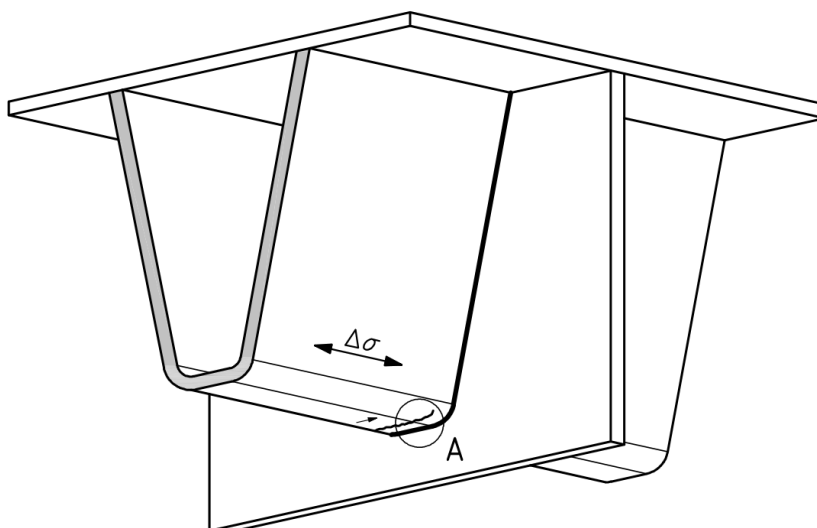
Aan de hand van de drie verkregen punten kan in de onderstaande tabel de bijbehorende executieklasse worden gekozen

Gevolgklasse		CC1		CC2		CC3	
Gebruikerscategorieën		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Productie-categorieën	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^a	EXC3 ^a
	PC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^a	EXC4
^a EXC4 behoort van toepassing te zijn bij speciale constructies of constructies met extreme gevolgen bij constructief bezwijken zoals vereist in nationale regelgeving.							



Afstudeeronderzoek HSS in brugdekken

Vermoeiing



Document : Vermoeiing
Revisie : 0
Datum : 25-2-2016
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	25-2-2016	
Gecontroleerd			25-2-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Vermoeiing

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 INLEIDING	3
1 NEN-EN 1991-2: BELASTINGSMODELLEN VOOR VERMOEIING	4
2 VERMOEIING	5
3 NEN-EN 1993-1-9	6
3.1 Spanning- wisselingen (S-N) methode	7
4 NEN-EN 1993-2	11
5 VERMOEIING EN HSS	13
5.1 Details	14
5.2 Het verbeteren van de lasprocessen en het vakmanschap	14
5.3 Het toepassen van nabehandelingen van lassen om de vermoeiingssterkte te verhogen	15
5.3.1 Slijpen en TIG	16
5.3.2 Needle and hammer peening	18
6 CONCLUSIE	19



Vermoeiing

0 INLEIDING

Tijdens het doornemen van het sterkte- en vermoeiingsrapport van de Kruiswaterbrug (Bijlage 3) bleek dat er veel aandacht was besteed aan de vermoeiingsberekening door het ingenieursbureau ITBB? Omdat de brug 100 jaar mee moet gaan is de vermoeiing een belangrijk onderdeel van een stalen brugdek. Uit het rapport blijkt dat de lassen de zwakste onderdelen zijn. Wanneer de lassen scheuren of beschadigen kan dit leiden tot een instabiel brugdek met grote gevolgen.

In dit rapport wordt gekeken naar wat vermoeiing is, hoe het gecontroleerd wordt en hoe het zich verhoudt in combinatie met HSS. In de Eurocodes wordt meerdere malen opgemerkt dat vermoeiing los staat van de sterktecontroles en dat op vermoeiing moet worden getoetst. Deze toetsing is losstaand en is de laatste controle die gedaan moet worden in het ontwerpproces van stalen bruggen. De normen die in dit rapport naar voren komen zijn:

- De bruggennorm NEN-EN 1991-2 voor het vermoeiingsmodel
- NEN-EN 1993-1-9 met de methodiek voor de controle van de vermoeiing
- NEN-EN 1993-2 die ingaat op het berekenen van brugonderdelen

Voor het geoptimaliseerde ontwerp van de Kruiswaterbrug moet de methodiek uit de Eurocode 3 deel 9 worden gebruikt in combinatie met de andere genoemde normen en de informatie die is gevonden voor de vermoeiing van HSS. (Use and application of high performance steels HPS for steel structures – chapter 5.4 from Structural Engineering Document 8)

De methodiek wordt uitgelegd aan de hand van een voorbeeld met een detailcategorie van twee platen die plat aan elkaar worden gelast. Wanneer er wordt gekeken naar HSS zal de vermoeiing kritischer worden. Aan de hand van nabehandelingmethoden kunnen de lassen worden verbeterd om hun weerstand te verhogen tegen vermoeiing.



Vermoeiing

1 NEN-EN 1991-2: BELASTINGSMODELLEN VOOR VERMOEIING

Verkeer op bruggen veroorzaakt een spanningsspectrum dat kan leiden tot vermoeiing. Dit spanningsspectrum is onder andere afhankelijk van de volgende punten:

- Voertuigafmetingen
- Aslasten
- Ruimte tussen de voertuigen of de assen van één vrachtwagen
- Samenstelling van het verkeer en de dynamische effecten die ze teweeg brengen

In de NEN-EN 1991-2 worden voor bruggen vijf belastingsmodellen voor vermoeiing genoemd. Voor de Kruiswaterbrug is vermoeiingsbelasting model 4 (FLM4) van toepassing. Deze zal kort worden toegelicht.

FLM4 voor vermoeiing is bedoeld om de spectra van de spanningswisselingen te bepalen die worden veroorzaakt door vrachtwagens. Omdat de Kruiswaterbrug een geringe lengte heeft mag het feit dat meerdere vrachtwagens tegelijk op de brug aanwezig zijn verwaarloosd worden.

De eventuele optredende schade moet worden aangetoond volgens de vermoeiingscurven die zijn gegeven in de NEN-EN 1993-1-9. Voor de toetsing van de vermoeiing behoort de verkeerscategorie voor een brug te zijn bepaald aan de hand van het aantal aanwezige rijstroken met zwaar verkeer (slow lane) en het geschatte of gegeven aantal zware voertuigen (N_{obs}) per jaar.

Voor de Kruiswaterbrug heeft RWS gesteld dat 2.500.000 zware voertuigen per jaar over het brugdek zullen rijden.

In het bijlagerapport van de analyse van de Kruiswaterbrug worden de belastingen op de brug door het aanwezige verkeer toegelicht. Deze worden verder in dit rapport over vermoeiing buiten beschouwing gelaten. Alle belastingen worden gecombineerd met belastingscombinaties met uitzondering van vermoeiing. In de normen wordt telkens gesteld dat deze niet worden meegenomen en achteraf moet worden getoetst, mits er sprake is van spanningsspectra die de levensduur negatief kan beïnvloeden.



Vermoeiing

2 VERMOEIING

Vermoeiing is het versschijnsel waarbij een materiaal bezwijkt door de aanwezigheid van dynamische of wisselende belastingen.

In het geval van een stalen verkeersbrug zal dit plaatsvinden in de lassen die de verschillende plaalementen 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 het begeven. 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:

1. Scheurinwijding: afhankelijk van het materiaal en de mate waarin het belast wordt, ontstaan er microscopische scheurtjes in het materiaal. Deze microscopische scheuren kunnen zich uitbreiden en wanneer ze een ander 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 dichten. Door dit verschijnsel zal de scheur zich voortplanten totdat het gebied waarin de scheur zich bevindt instabiel wordt.

Om een beter beeld te krijgen over het onderwerp vermoeiing wordt er eerst gekeken naar de NEN-EN 1993-1-9. Wanneer vermoeiing van toepassing is, wordt in veel Eurocodes verwezen naar het 9^{de} deel van EC 3. Naast deze norm is ook de 1993-2 van belang. Deze norm is gericht op het berekenen van stalen bruggen. Voor het onderdeel vermoeiing worden hierin belangrijke punten genoemd. Tot slot wordt er nog gekeken naar vermoeiing gecombineerd met HSS.

Vermoeiing

3 NEN-EN 1993-1-9

In deze norm wordt de methode behandeld die van toepassing is voor de controle van vermoeiing. Aan de hand van testresultaten, rekening houdend met meetkundige en structurele imperfecties tijdens de productie en de uitvoering, zijn er allerlei vermoeiingssterkten verkregen die afhankelijk zijn van het materiaal en het soort las. Aan de hand van de testresultaten zijn er detailcategorieën verbonden aan de verschillende lassen die bepalend zijn voor de vermoeiingscontrole. Aan het begin van de norm worden er een aantal voorwaarden vermeld:

- Behandelingen na fabricage ter verbetering van de vermoeiingssterkte zijn volgens de methode in deze norm niet van toepassing.
- De berekende schade geldt alleen onder normale omstandigheden, waarbij het staal wordt behandeld tegen corrosie en er regelmatig onderhoud plaatsvindt.
- Corrosie door toedoen van zeewater is niet van toepassing. Dit geldt ook voor kleine schades bij temperaturen hoger dan 150 °C.
- De beschreven methode is alleen van toepassing voor optredende spanning door toedoen van wisselingen. Andere methoden zijn niet van toepassing.
- De methode is geschikt voor alle staalkwaliteiten (HSS, roestvrij staal en Cortenstaal), tenzij er in de tabellen van de norm anders wordt vermeld. Merk op dat de materiaaltaaiheid en de eigenschappen in de dikterichting overeen moeten komen met de NEN-EN 1993-1-10.
- Voor de toleranties van staal wordt verwezen naar de NEN-EN 1090.

Kijkend naar een constructie is onderscheid te maken hoe deze zijn vooropgestelde levensduur moet behalen. In de norm worden er twee beoordelingsmethoden genoemd:

1. Damage tolerant method
2. Safe life method

Afhankelijk van de keuze wordt een partiële factor γ_{Mf} verbonden aan de vermoeiingssterkte. Optie 1 zal van kracht zijn voor de onderdelen die betrouwbaar zijn en waarschijnlijk niet zullen bezwijken door toedoen van vermoeiing, mits de nodige controles en onderhoud worden uitgevoerd. Optie 2 geldt voor de onderdelen waar de scheur zal ontstaan, uitbreiden en kan leiden tot het bezwijken van de constructie. In onderstaande tabel zijn de voorgeschreven waarden van de partiële factor gegeven.

Assessment method	Consequence of failure	
	Low consequence	High consequence
Damage tolerant	1,00	1,15
Safe life	1,15	1,35

In het rapport van de Kruiswaterbrug is er o.a. gebruik gemaakt van de tabellen 8.1 t/m 8.10. Deze tabellen geven waarden van de vermoeiingssterkten voor de verschillende las/verbindingdetails. De gegeven waarden zijn van toepassing voor twee miljoen wisselingen. Aan de hand van nominale belastingen uit het EEM programma ANSYS wordt er vervolgens gekeken of Kruiswaterbrug voldoet aan vermoeiing.

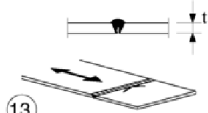
Naast de controle van het detail op vermoeiing wordt opgemerkt dat de las zelf ook moet voldoen conform de NEN-EN 1993-1-8.

Vermoeiing

3.1 Spanning- wisselingen (S-N) methode

Aan de hand van een lasdetail uit tabel 8.3 uit de Eurocode 3 van deel 9 wordt uitgelegd hoe de vermoeiingsbeoordeling in elkaar zit.

Tabel 1: Detailcategorie 13. Bron: Tabel 8.3 van de NEN-EN 1993-1-9

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
36		13) Butt welds made from one side only.	13) Without backing strip.
71		13) Butt welds made from one side only when full penetration checked by appropriate NDT.	

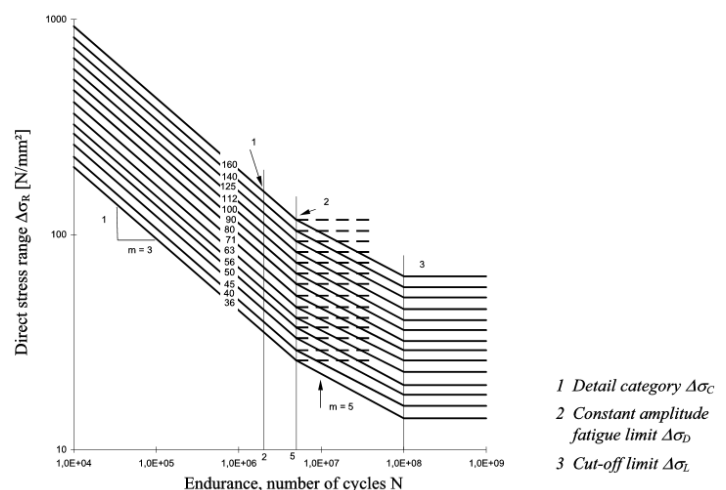
Uit de bovenstaande tabel 1 is voor de verbinding die van toepassing is een beschrijving met een afbeelding gegeven. Ook wordt daar een eis gesteld die voor ieder detail anders is. Tot slot is er een detailcategorie ($\Delta\sigma_c$) gegeven. Deze waarde wordt gebruikt om de eventuele vermoeiing vast te stellen. In grafiek 1 is het detailcategorie te vinden, in dit geval 36 N/mm² of 71 N/mm². De waarde is van toepassing bij er 2 miljoen wisselingen. De grafiek is opgedeeld in drie delen (hellingen). Afhankelijk van de designspanning, die wordt bepaald aan de hand van de optredende spanning $\Delta\sigma_i$, kan bepaald worden welk gebied van de grafiek van toepassing is voor de vermoeiingscontrole.

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

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

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

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



Designspanning:

Grafiek 1: Vermoeiingscurve (S-N curve). Tabel 7.1 NEN-EN 1993-1-9

$\Delta\sigma_{i;d}$ is voor alle details afhankelijk van de beoordelingsmethode (Assessment method). Het detailcategorie wordt vermenigvuldigd met de partiële factor γ_{Mf} . In het geval van dit detail moet ook rekening gehouden worden met het dikte-effect k_s (zie tabel 1). De formule komt er dan als volgt uit te zien:

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

Aan de hand van de onderstaande bereiken kan het gebied met de bijbehoren helling (m) worden vastgesteld:

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

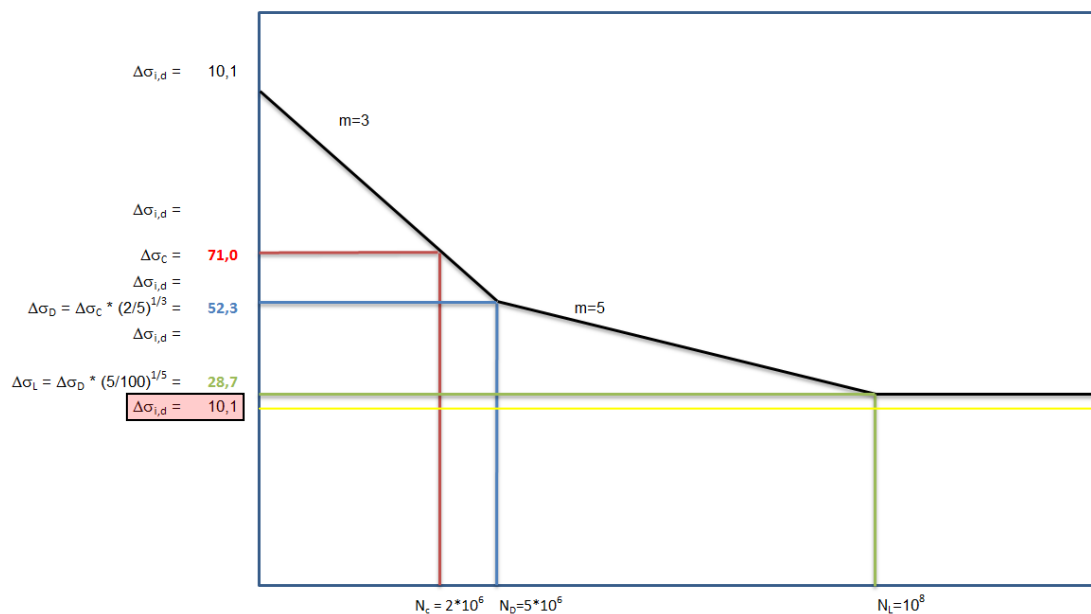
Vermoeiing

Aan de hand van onderstaande voorbeelden wordt duidelijk hoe aan de desbetreffende helling wordt gekomen. Voor de berekeningen is de volgende invoer van toepassing:

Designspanning (drie voorbeelden): 10 N/mm² 30 N/mm² 55 N/mm²
Partiële factor: 1,35 [-]
Dikte van de paalt: 40 mm
Wisselingen per jaar: 2 miljoen
Percentage aanwezige wisselingen: 5,0 %

De las is volledig doorgelast en NDT gecontroleerd (zie tabel 1).

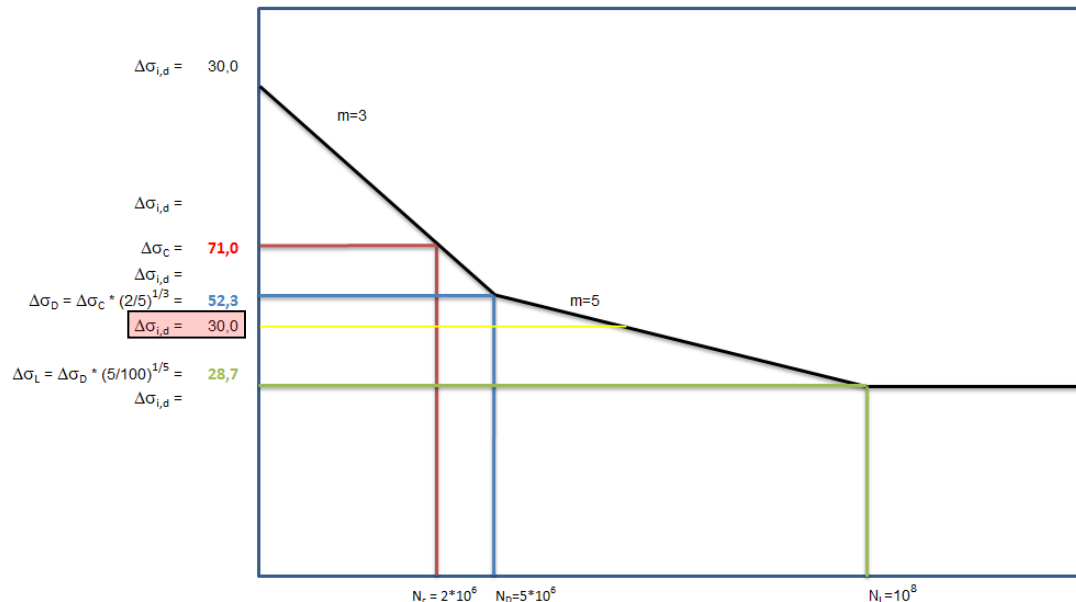
Voorbeeld 1



Bij een designspanning van 10 N/mm² bevindt de gele lijn zich onder het berekende cut-off limit. Hierdoor is $m = \infty$ en treedt er geen schade op.

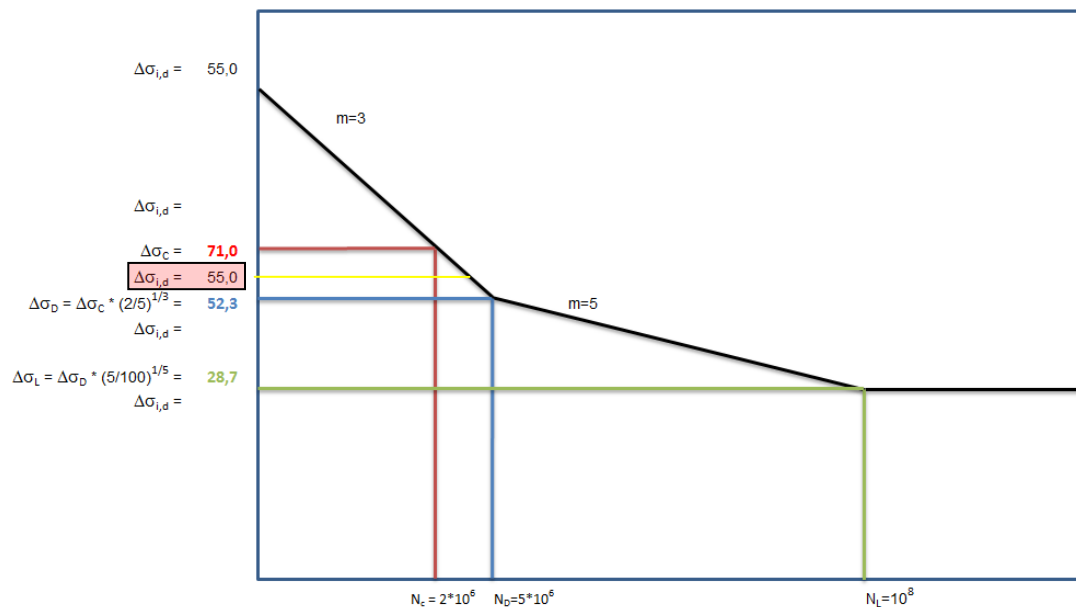
Vermoeiing

Voorbeeld 2:



Door de aanwezigheid van een hogere designspanning bevindt de gele lijn zich nu op de helling $m = 5$. Dit betekent dat er nu wel schade optreedt. Op de volgende bladzijde wordt hier verder op ingegaan.

Voorbeeld 3:



Wanneer de designspanning groter wordt, is de kans groter dat de helling toeneemt. In geval van voorbeeld drie is dat het geval. Voor de berekening van de schade moet $m = 3$ worden toegepast.

Vermoeiing

Berekenen schade door vermoeiing

Wanneer m gelijk is aan 3 of 5 moet berekend worden hoeveel de optredende schade is. Aan de hand van het aantal wisselingen per jaar, het percentage dat de wisselingen voorkomen en de te halen levensduur, is te berekenen hoeveel wisselingen er optreden. Aan de hand van de helling m kunnen de toelaatbare aantal wisselingen worden berekend. Wanneer de optredende aantal wisselingen worden gedeeld door de toelaatbare, zal uit de unity check blijken wat de optredende schade is.

Optredende wisselingen:

$$\text{Levensduur} * (\text{wisselingen/jaar}) * \% = 100 \text{ jaar} * 2 \text{ miljoen} * 0,05 = 10 \text{ miljoen wisselingen}$$

Toelaatbare aantal wisselingen:

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

In de bovenstaande formule is $\Delta\sigma_k$ de vermoeiingssterkte die afhankelijk is van de designspanning. De vermoeiingssterkte is de bovenliggende waarde ten opzichte van de designspanning. Bij voorbeeld 1 is dat 28,7 N/mm², bij voorbeeld 2 is dat 52,3 N/mm² en bij voorbeeld drie is 71 N/mm² van toepassing. Wanneer de designspanning zich boven de 71 N/mm² bevindt, moet deze waarde worden genomen voor de vermoeiingscontrole maar als dit van toepassing is treedt er altijd te veel schade op.

Berekening schade voorbeeld 2:

$$\begin{aligned} N_i &= (52,3 / 20,229 * 1,35)^5 * 5.000.000 = 128969639 \text{ wisselingen} \\ D\sigma &= 10 \text{ miljoen} / 128969639 = 0,08 [-] \\ 0,08 &< 1,0 && \text{De controle voldoet} \end{aligned}$$

Berekening schade voorbeeld 3:

$$\begin{aligned} N_i &= (71 / 37,1 * 1,35)^3 * 2.000.000 = 5705309 \text{ wisselingen} \\ D\sigma &= 10 \text{ miljoen} / 5705309 = 1,75 [-] \\ 1,75 &> 1,0 && \text{De controle voldoet niet aan vermoeiing} \end{aligned}$$

Het enige waar tijdens het controleren van de vermoeiing nog rekening mee moet worden gehouden is dat de totale vermoeiing van de verschillende simulaties uit het EEM nog bij elkaar moeten worden opgeteld. De som van alle schades moet kleiner of gelijk zijn aan 1,0.

In het rapport van de analyse van de Kruiswaterbrug (Bijlage 3) worden vrachtwagens op verschillende posities op het brugdek geplaatst. Deze simulaties zorgen telkens voor een andere spanning ten opzichte van het detail dat gecontroleerd wordt op vermoeiing. Alle spanningen moeten volgens bovenstaande methode worden nagelopen. Uit de som van alle spanningen moet dan blijken of het onderdeel voldoet aan vermoeiing.

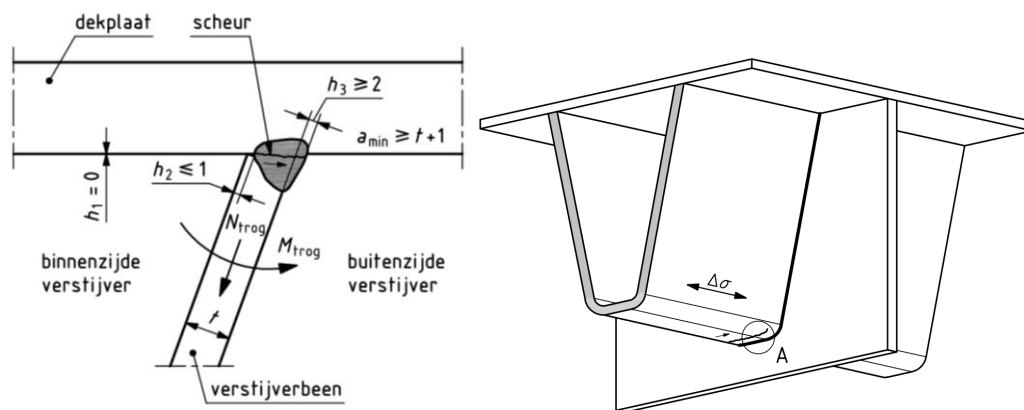
Vermoeiing

4 NEN-EN 1993-2

De NEN-EN 1993-2 + NB geeft een algemene basis voor het constructief ontwerpen van stalen bruggen of losse onderdelen daarvan. In 9.1.3 (2) wordt gesteld dat voor bruggen, die zijn opgebouwd uit langs- en dwarsverstijvingen, controles moeten worden uitgevoerd voor de volgende onderdelen:

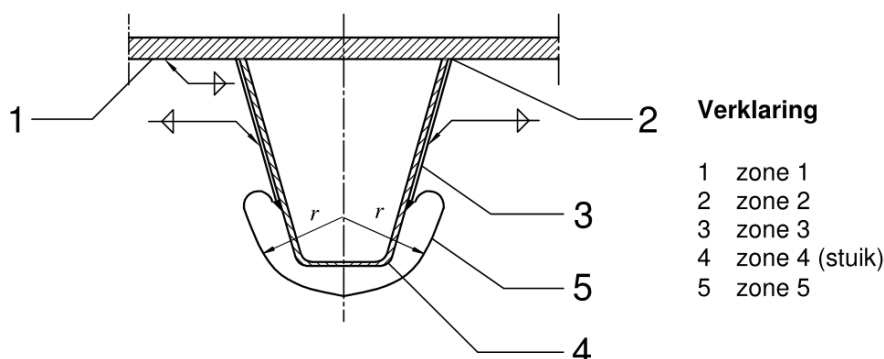
- Dekplaat
- Verstijvingen
- Dwarsdragers
- Verbinding van de verstijving aan de dwarsdrager

De norm richt zich op het orthotrope brugdek en de kritische zones. In de Nationale bijlage wordt gesteld dat verbindingen van de troggen aan de dekplaat niet mag worden gedaan met detailcategorieën uit de NEN-EN 1993-1-9. In de 1993-2 worden andere details gegeven voor de controle in de NB. tabel 7 (zie figuur 1). In tabellen wordt er per detail een detailcategorie gegeven die nodig is voor de vermoeiingscontrole. De controle verloopt net zoals de beschreven methodiek uit die van de NEN-EN 1993-1-9.



Figuur 1: Verbindingen die gaan volgens de NEN-EN 1993-2.

Naast tabel NB.7 wordt er ook aandacht besteed aan de kritische zones. In figuur 2 staan de zones waar het om gaat. In tabel 2 staan de detailcategorieën die van toepassing zijn voor de vermoeiingscontrole.



Figuur 2: Verbindingen van trog aan de dekplaat met de kritieke zones



Vermoeiing

Tabel 2: detailcategorieën voor de kritieke zones. Bron: Tabel NB.3 NEN-EN 1993-2

Kritieke zone	Detail	Detail volgens NEN-EN 1993-1-9	Detail-categorie
1	Dekplaat onderhevig aan langsspanningen ter plaatse van hoeklassen in de dwarsrichting, zie figuur 9.1	Tabel 8.4 detail 6	80
2	Dekplaat onderhevig aan langsspanningen ter plaatse van de gelaste verbindingen van de langsverstijvingen aan de dekplaat, zie figuur 9.1	Tabel 8.2 detail 6	100
		Tabel 8.3 detail 9	80
3	Kokervormige verstijving ter plaatse van de verbinding met de dwarsdrager, zie figuur 9.1	Tabel 8.8 detail 1	80
4	Stuiklas van de verstijvingen met stuikplaten en metalen onderlegstroken, zie figuur 9.2	Bijlage I detail 5	100
5	Vrije randen van de uitsparingen in lijven of lijven van dwarsdragers ter plaatse van de onderkanten van de verstijvingen, zie figuur 9.4	Tabel 8.8 detail 6	140

Afhankelijk van wat er in de ROK of in de eisen van de opdrachtgever staat, kan deze norm met de bijbehorende detailcategorieën gebruikt worden. Voor de overige details wordt verwezen naar de NEN-EN 1993-1-9.



Vermoeiing

5 VERMOEIING EN HSS

Over HSS is bekend dat door de aanwezigheid van een hogere vloeigrens lichter kan worden geconstrueerd maar dat betekent ook dat de verhouding tussen variabele en permanente belastingen anders wordt, wat weer leidt tot een toename van de aanwezige spanning in het materiaal. Hiernaast moet er in gelaste constructie extra aandacht worden besteed aan de balans tussen statische en vermoeiingsbelastingen omdat de weerstand tegen vermoeiing niet in dezelfde verhouding toeneemt als de sterkte van gekozen staalsoort. De kritische lasdetails van een brugdek kunnen dan waarschijnlijk niet meer hun vereiste levensduur halen zonder de schadegrens te overschrijden. Er zijn een aantal oplossingen om dit probleem tegen te gaan:

- De lasverbindingen (details) anders construeren of ze te plaatsen op plekken waar de spanningsconcentraties kleiner zijn.
- Het verbeteren van de lasprocessen en het toepassen van beter vakmanschap.
- Het toepassen van nabehandelingen van lassen om de vermoeiingssterkte te verhogen.

In dit rapport zal voornamelijk aandacht worden besteed aan het laatste punt. De andere twee punten zullen slechts kort worden behandeld.

Afhankelijk van de afmetingen, vorm en mate van belasting levert het gebruik van HSS een hogere vermoeiingssterkte op omdat de inwijdingsfase groter wordt door de aanwezigheid van een betere hardheid. Helaas is dit niet van toepassing wanneer gekeken wordt naar de verbindingen. Bij lassen is juist sprake van een vermindering van de vermoeiingssterkte doordat er minder spanningswisselingen nodig zijn om scheurinwijding te laten beginnen. De fase van de scheurinwijding is de langste fase van de levensduur van de vermoeiing in het materiaal. Wanneer de fase van de scheurvoortplanting wordt bereikt, zal het materiaal sneller zijn schadegrens bereiken dan in de inwijdingsfase. De gevolgen hiervan zijn dat de vermoeiingssterkte bij gelaste onderdelen van HSS niet verbeteren of zelfs lager zijn ten opzichte van normaal constructiestaal (LSS).

Na het bestuderen van de leveringsvoorwaarden in Bijlage 6 (NEN-EN 10025-1, NEN-EN 10025-3 en NEN-EN 10025-4) is uiteindelijk gekozen om staalsoort S460N te kiezen voor het nieuwe ontwerp van de Kruiswaterbrug volgens deel 3. Dit komt dan nog overeen met de gestelde eisen die RWS stelt in de ROK. In deel 4 wordt thermomechanisch gewalst staal behandeld. Het bijbehorende staalproductieproces zorgt ervoor dat het staal een hogere hardheid krijgt, wat ongunstiger is voor het ontstaan van scheuren en daarmee de vermoeiing van de constructie. De periode voor de vorming van scheuren wordt groter, waardoor de levensduur ook toeneemt. Doordat er minder koolstof wordt gebruikt tijdens het produceren van thermomechanisch gewalst staal is er minder warmtetoevoer benodigd dan wanneer er losse onderdelen aan elkaar worden gelast.



Vermoeiing

5.1 Details

Om een zo goed mogelijke vermoeiingssterkte te creëren met het gebruik van HSS moet er worden gekeken naar de spanningsconcentraties op de plekken waar de losse elementen aan elkaar worden gelast. De spanningsconcentraties zijn afhankelijk van de vorm van het component en het productieproces. Vaak komen de hoge spanningsconcentraties voor in hoeken, op plaatsen waar belastingen worden overgedragen en in plotselinge overgangen of versmallingen. Met HSS kunnen het beste de onderstaande punten worden nagestreefd:

- Voorkom zoveel mogelijk verbindingen op locaties waar de spanningsconcentraties in zeer hoge mate aanwezig zijn;
- Plaats details en lassen zoveel mogelijk in de buurt van de zones van de neutrale as of waar de gemiddelde spanningen samendrukken;
- Plaats de details op de locaties waar het buigende moment minimaal is;
- Vermijd zoveel mogelijk zones waar concentraties van verschillende spanningen samen kunnen komen. Voorbeelden hiervan zijn lassen rondom openingen, spits toelopende onderdelen en aanhechtingen;
- Gebruik geen "fillet welding" of "partial penetration" voor op spanning belaste lassen, maar "full penetration welds" (volledige doorlassingen);
- Gebruik zoveel mogelijk een "backingstrip" wanneer er van één kant gelast wordt. Merk op dat deze strip dan dezelfde staalkwaliteit moet hebben als de onderdelen die aan elkaar gelast worden;
- Vermijdt het gebruik van verstijvers. Uiteindelijk zal de constructie dan beter bestand zijn tegen vermoeiing;
- Verander het lasdetail in een verbinding met bouten;
- Controleer of de verstijvers (troggen) zijn geplaatst op de ondersteuningsassen.

5.2 Het verbeteren van de lasprocessen en het vakmanschap

De strengere eisen die worden gesteld aan de fabrikant, de lassers en de toezichthouders moeten ervoor zorgen dat er een betere vermoeiingssterkte wordt gecreëerd. Helaas is dit niet altijd voldoende. Handmatig booglassen behoort niet meer te zijn toegepast voor langere lassen. Het heeft de voorkeur om hiervoor automatische lasmachines te gebruiken. De reden hiervoor is dat het staal fijnkorrelig is en daarom goed lasbaar, maar er moet rekening gehouden worden met het voor- en naverwarmen van het staal om een goede verbinding te creëren (beschreven in de EN 1011-2). Door de tijd heen zijn de procedures en de bekwaamheden van de lassers erop vooruitgegaan. Desalniettemin worden er voor het lassen van HSS nog hogere vaardigheden vereist. Eerder werd al het gebruik van een onderlegstrip aangekaart.

Het is van belang dat wanneer er gelast wordt aan HSS, meteen een goede kwaliteit wordt geleverd. Het ongewenst om achteraf aan het onderdeel te lassen of reparaties uit te voeren. Voor reparaties worden voornamelijk booglassen toe gepast. Eerder werd al vermeld dat booglassen moeten worden vermeden wanneer er gewerkt wordt met HSS. De reden hiervoor is dat de vermoeiingssterkte omlaag wordt gehaald door de fouten die gemaakt kunnen worden bij de start en stopposities. Kortom, de kwaliteit van de las gaat achteruit omdat het booglassen niet nauwkeurig genoeg is als de eerst gelegde kwaliteitslas van het automatisch lassen. Er zijn echter wel een paar methoden om de lassen te verbeteren die worden behandeld in het volgende hoofdstuk 5.3.

Vermoeiing

5.3 Het toepassen van nabehandelingen van lassen om de vermoeiingssterkte te verhogen

Aan de hand van studies, gegevens en testen van verschillende nabehandelingen van lassen bij HSS zijn er vier methoden die in dit rapport behandeld zullen worden die een positief effect hebben op de vermoeiingssterkte. De vier nabehandelingsmethoden zijn:

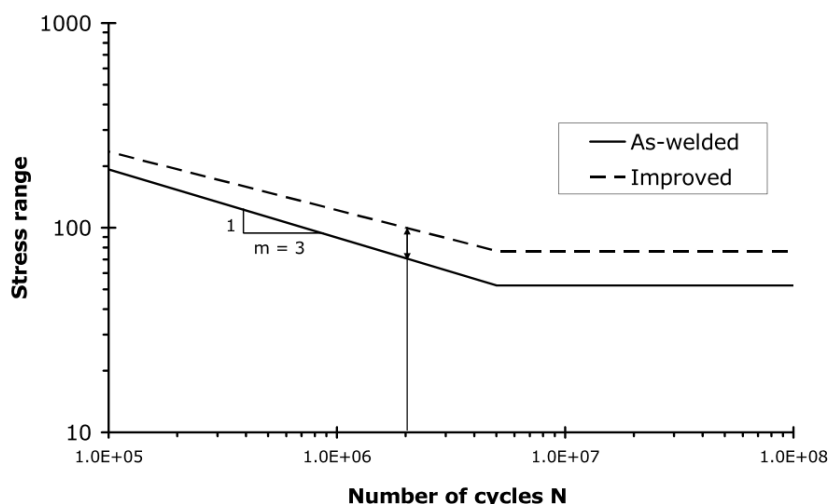
1. Slijpen
2. De buitenkant van de las bekleden met een Wolfram gas (TIG)
3. Needle peening
4. Hammer peening

De bovenstaande nabehandelingen hebben de volgende positieve invloeden om de vermoeiingssterkte te verhogen:

- Verlagen van de plaatselijke spanningsconcentraties
- Creëren van een (langere) scheurinwijdingsfase
- Wijzigen van de overgebleven spanningsvelden op het lasoppervlak

De beschreven methoden kunnen aan de hand van hun invloed worden verdeeld in twee groepen. De eerste twee punten richten zich op het gladder maken van de verbinding en het wegwerken van de oneffenheden. De andere twee methoden zetten de overgebleven rekspanningen om in drukspanningen rondom de locaties waar vermoeiingsscheuren kunnen ontstaan. Dit is hun voornaamste doel, maar daarnaast helpen ze ook om de las net zo glad als de plaat te maken.

De voordelen die de methoden hebben op de vermoeiingssterkte zullen verduidelijkt worden aan de hand van het spanning- wisselingen grafiek (zie grafiek 2). Merk op dat de verbeteringen niet zomaar kunnen worden toegepast. Net als aan het leggen van lassen worden aan de beschreven methoden allerlei beperkingen opgelegd.



Grafiek 2: Vermoeiingscurve voor HSS

Alle vier de verbetermethoden hebben het nadeel dat een scheur na behandeling op een andere plek dan op het behandelde oppervlak kan ontstaan. Wanneer dat gebeurt, is er geen sprake van de genoemde voordelen. Er dient altijd rekening mee gehouden te worden dat dit kan voorkomen. Er kan pas met meer zekerheid worden gezegd dat de behandelingen goed zijn uitgevoerd wanneer de bewerker en inspecteur meer ervaring hebben opgedaan. Op dit moment zijn er in de normen geen regels opgesteld voor de verbeteringsmethoden van lassen, alleen voor slijpen.

Vermoeiing

5.3.1 Slijpen en TIG

Om de geometrie van de las te verbeteren en een langere scheurinzijding te introduceren, kan het beste gebruik worden gemaakt van de bestaande vermoeiingscategorieën. Aan de hand van verschillende testen is gebleken dat helling van de spanning- wisselingen grafiek (SN- curve) anders is dan die gegeven is in de NEN-EN 1993-1-9. De helling is nu alleen maar $m = 3$ in plaats van $m = 3$ en $m = 5$. In het Bijlage 11 wordt rekentechnisch behandeld wat de gevolgen zijn voor de vermoeiing van HSS wanneer de helling verandert. Het is lastig om voor elke verbetering een curve vast te stellen. Vandaar dat deze wordt vastgesteld vanaf de "as-welded" curve.

Slijpen

Over het slijpen van de las als nabehandeling zijn de volgende punten van toepassing die kunnen worden doorgevoerd in de vermoeiingsberekeningen van de methode die gegeven is in de NEN-EN 1993-1-9:

- Er kan alleen voordeel worden gehaald uit de bewerkingsmethode wanneer de categorie van de las gelijk of lager is dan 90.
- Wanneer de vloeispanning lager is dan 350 moet de vermoeiingssterkte worden verhoogd met een factor 1,3 [-] tot een maximaal categorie 100.
- Wanneer de vloeispanning gelijk of hoger is dan 350 moet de vermoeiingssterkte worden verhoogd met een factor 1,5 [-] tot een maximaal categorie 100.

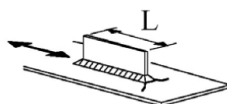
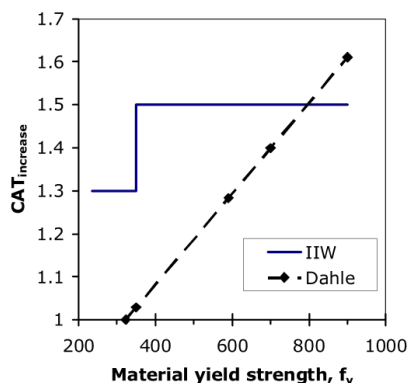
TIG

Voor de TIG nabehandeling werkt hetzelfde principe als bij slijpen:

- Er kan alleen voordeel worden gehaald uit de bewerkingsmethode wanneer de categorie van de las gelijk of lager is dan 90.
- Wanneer de vloeispanning lager is dan 350 moet de vermoeiingssterkte worden verhoogd met een factor 1,3 [-] tot een maximaal categorie 112.
- Wanneer de vloeispanning gelijk of hoger is dan 350 moet de vermoeiingssterkte worden verhoogd met een factor 1,5 [-] tot een maximaal categorie 112.

Voor de TIG methode zijn andere resultaten verkregen bij proeven met verschillende vloeigrenzen voor langwerpige hechttingsplaten. Uit de resultaten blijkt dat de factoren waar mee de detailcategorie wordt versterkt minder hoog ligt dan de hierboven beschreven 1,3 [-] en 1,5 [-]. Pas wanneer de vloeigrens van het staal boven de 700 MPa komt, wordt er niet alleen voldaan aan de factor 1,5 [-] maar wordt deze zelfs groter naarmate de vloeigrens toeneemt. De verhoudingsfactor is te bepalen aan de hand van de vloeigrens en de onderstaande formule en weergegeven in de bijbehorende grafiek 3:

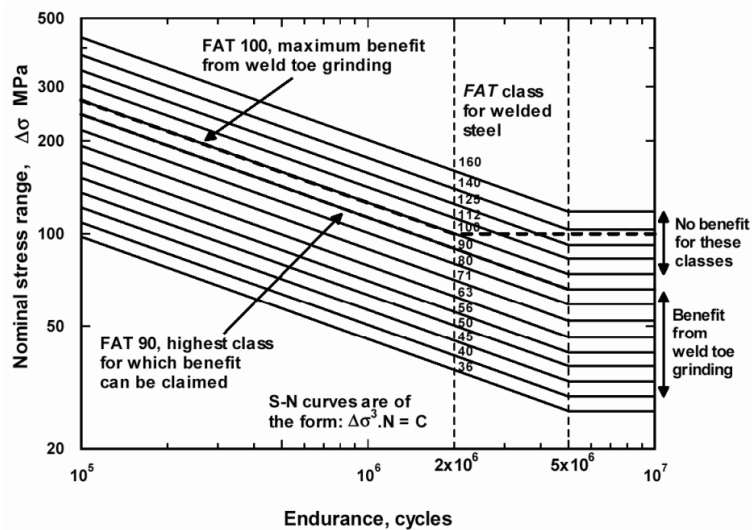
$$CAT_{\text{increase}} = (0,001056 f_y + 0,65982) * CAT$$



Grafiek 3: Verbeteringsfactor volgens verschillende beproevingen

Vermoeiing

Eerder werd al vermeld dat het de voorkeur heeft te vermijden om aanhechtingen/toevoegingen/attachments toe te passen in combinatie met HSS en spanningsconcentraties in hetzelfde gebied. Wanneer dit toch moet worden gedaan is het eerder aannemelijk om de vergrotingsfactor te halen uit grafiek 3 dan de 1,3 [-] of 1,5 [-] toe te passen. Zodoende weet men zeker dat aan de veilige kant te zitten.



Vermoeiing

5.3.2 Needle and hammer peening

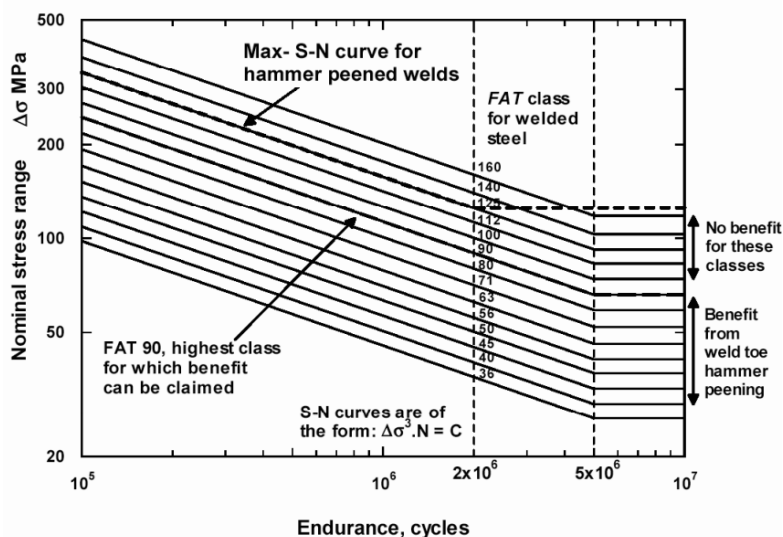
Bij TIG en slijpen is de R ratio, verhouding tussen $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ niet van belang. Wel is dit het geval voor de andere twee methoden. Hun behandelingsmethoden berusten op het concept van de toegepaste spanningsverschillen $\Delta\sigma_i$. Het probleem dat de R ratio veroorzaakt is dat dan verschillende SN- curves moeten worden toegepast voor verschillende details. Omdat de R-ratio anders is, zal de bepaling van het spanningsgebied anders zijn. De bepaling is dan als volgt:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma' &= \sigma_{\max} & R \geq 0 \\ \Delta\sigma' &= \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \Delta\sigma & R < 0\end{aligned}$$

Door de gevoeligheid van de bewerking met een hamer zijn er grenzen waartussen de spanningen moeten zitten. De maximale nominale samendrukkingspanning mag in het spectrum niet lager zijn dan $0,25 \cdot f_y$. daarnaast geldt dat de ratio R onder de 0,5 moet zitten.

Voor zowel hammer peening als needle peening zijn op de las als nabehandeling de volgende punten van toepassing die kunnen worden doorgevoerd in de vermoeiingsberekeningen van de methode die gegeven is in de NEN-EN 1993-1-9:

- Er kan alleen voordeel worden gehaald uit de bewerkingsmethode wanneer de categorie van de las gelijk of lager is dan 90.
- Wanneer de vloeispanning lager is dan 350 moet de vermoeiingssterkte worden verhoogd met een factor 1,3 [-] tot een maximaal categorie 125.
- Wanneer de vloeispanning gelijk of hoger is dan 350 moet de vermoeiingssterkte worden verhoogd met een factor 1,6 [-] tot een maximaal categorie 125.
- Voor elementen met een dikte groter dan 20 mm, gebruik een versterkingsfactor van 1,5 [-] tot een maximale categorie van 100.





Vermoeiing

6 CONCLUSIE

Wanneer HSS wordt toegepast blijft het onderstaande omtrent vermoeiing hetzelfde:

- Methodiek beschreven in NEN-EN 1993-1-9
- De kritische zones in de tabel NB.3 van de NEN-EN 1993-2
- De details en hun bijbehorende categorieën

Het materiaal wordt dunner wat het niet alleen gunstiger maakt voor de 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.

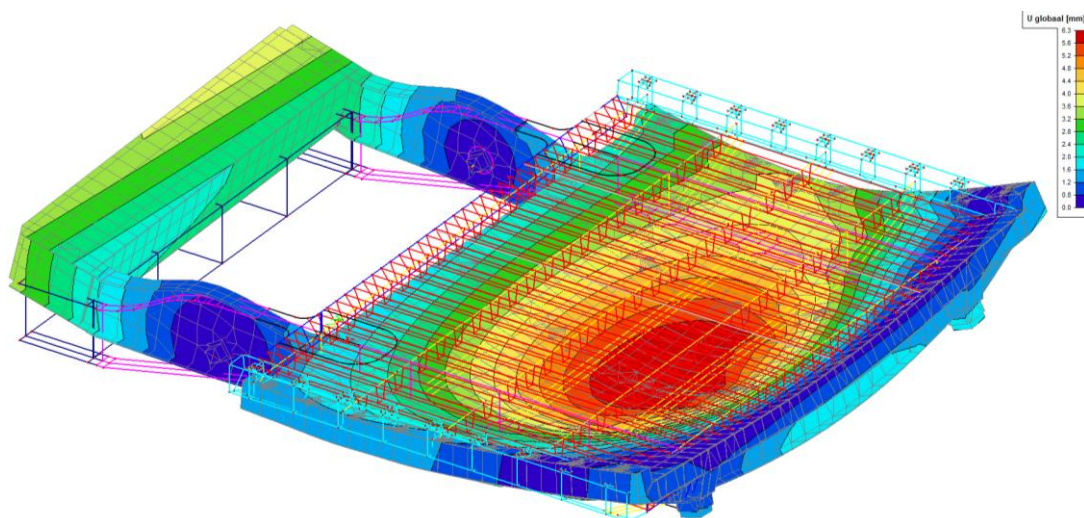
Bij HSS is de helling van $m = 5$ niet meer van toepassing, alleen $m = 3$. Dit zorgt ervoor dat het aantal toegestane wisselingen (N_i) flink zal afnemen. Wanneer dit ervoor zorgt dat teveel vermoeiingsschade optreedt, kunnen achteraf verbeteringsmethoden worden toegepast om de vermoeiingssterkte te verhogen.

Om voordeel te halen uit het verhogen van de vloeigrens zou het beter zijn wanneer er geen nabehandelingen nodig zijn om te voldoen aan de vermoeiing. Wanneer blijkt dat het noodzakelijk is, is het een ander verhaal. Voor VSF valt er naar verwachting tijd te winnen wanneer er gelast wordt met S460 i.p.v. S355. Het is dan niet de bedoeling dat ze uiteindelijk alsnog even lang of langer bezig zijn wanneer er meerdere nabehandelingen noodzakelijk zijn.



Afstudeeronderzoek HSS in brugdekken

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA



Document : Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA
Revisie : 0
Datum : 18-4-2016
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	18-4-2016	
Gecontroleerd	Dhr. Kortleve	Senior Constructeur bij VSF	18-4-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven va Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 INLEIDING	3
1 INVOER	4
1.1 Het model	4
1.1.1 Opleggingen	4
1.1.2 Contragewicht	5
1.1.3 Totaal model	5
1.2 Belastingen	6
1.2.1 Eigen gewicht	6
1.2.2 Permanent belastingen	6
1.2.3 Veranderlijke belastingen	8
1.2.4 Temperatuur	9
1.3 Verbindingscontrole	9
1.4 Combinaties	10
2 BELASTINGSGEVALLEN	11
2.1 Belastingen en bijbehorende resultante	11
2.1.1 Reactiekrachten van de aanwezige veranderlijke belastingen	11
2.1.2 Oplegreacties	12
2.1.3 Veerbuffer	13
2.1.4 Lastoeslag	14
2.1.5 Passeerpaden en belastingen op de barriers	14
2.1.6 Bestaande ballast	14
2.1.7 Eigen gewicht slijtlaag	15
2.2 Vervormingen van belastingsgevallen	16
2.2.1 Eigen gewicht	16
2.2.2 Veerbuffer	17
2.2.3 Tandemstelsels (TS)	17
2.2.4 Verdeelde belastingen	19
2.2.5 Temperatuur	20
3 MAATGEVENDE VERVORMINGEN	21
3.1 Vervorming achterhar	22
3.2 Vervorming voorhar	23
3.3 Overige vervormingen door TS	24
4 MAATGEVENDE SPANNINGEN	26
4.1 Controles Kruiswaterbrug ITBB	26
4.2 Barrier met schamprand	27
4.3 Lijfplaat Hoofdligger	28
4.4 Onderflens hoofdligger	30
4.5 Onderflens dwarsdrager	31
4.6 Lijfplaat dwarsdrager / voorhar / achterhar	32
4.7 Troggen	34
5 CONTROLE HUIDIGE KRUISWATERBRUG SCIA	34
6 CONCLUSIE	37



Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

0 INLEIDING

Na het analyseren van het rapport van de Kruiswaterbrug (Bijlage 3) van het ingenieursbureau ITBB is de huidige brug gemodelleerd. Het is niet mogelijk om direct te beginnen met het nieuwe ontwerp waarin HSS is verwerkt omdat het modelleren van een brugdek een complexe zaak is. Voordat deze stap kan worden genomen dienen concrete uitgangspunten te worden opgesteld. Wanneer de spanningen en de doorbuigingen van de huidige brug overeenkomen, staat vast dat de brug zelf met de aanwezige belastingen en combinaties goed is ingevoerd. Een goed model is een essentieel uitgangspunt voor de vervolgstappen van het onderzoek.

Binnen VSF wordt gemodelleerd met SCIA Engineer. ITBB heeft het model gemaakt met behulp van ANSYS. Het verschil tussen de twee programma's is dat SCIA werkt met 2D mesh elementen en ANSYS met 3D. Door het model zo goed mogelijk te modelleren kunnen de uitkomsten naast elkaar worden gelegd. Wanneer de resultaten overeenkomen, kan worden gekeken hoe het model geoptimaliseerd kan worden door HSS toe te passen en dat het daadwerkelijk wat oplevert. In dit rapport worden de volgende punten gecontroleerd aan de hand van de resultaten van ITBB:

- Maatgevende vervormingen
- Optredende spanningen

Alvorens bovenstaande punten worden toegelicht, wordt eerst de invoer behandeld. Afmetingen, belastingen en combinaties vallen daaronder. Daarnaast wordt de nodige aandacht besteed aan onderdelen die net iets anders zijn gemodelleerd om dichterbij de werkelijkheid te komen. Om te controleren of de invoer correct is, zullen een aantal belastingsgevallen apart worden bekeken. De oplegreacties, resulterende krachten en bepaalde doorbuigingen zullen worden toegelicht. Wanneer onverklaarbare pieken ontstaan (te grote doorbuigingen of spanningen), kan het probleem beter achterhaald worden door te kijken naar losse belastingsgevallen dan naar het complete model met verschillende combinaties.

Na het vergelijken van de resultaten van het huidige model van ITBB en het model in SCIA, wordt in de volgende fase gekeken naar de optimalisatie van het model. Het creëren van hogere spanningen door minder staal toe te passen moet ertoe leiden dat HSS nodig is om een ontwerp kloppend te maken. Ook wordt gekeken of minder dwarsdragers kunnen worden toegepast en of de dekplaat dunner kan worden uitgevoerd. Wanneer het ontwerp af is, worden de onderdelen uitgevoerd in HSS voor de vergelijking met het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug teruggezet in S355. Uit deze vergelijking moet blijken dat daadwerkelijk voordeel wordt gehaald uit het gebruik van HSS.

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

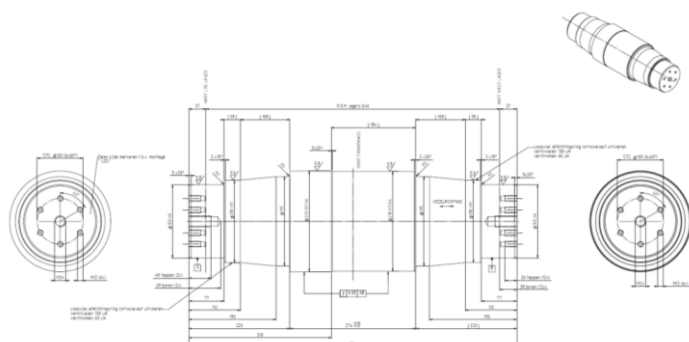
1 INVOER

1.1 Het model

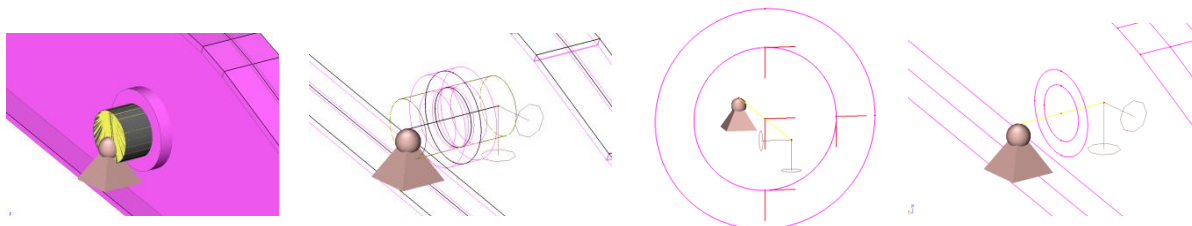
De plaatafmetingen van de Kruiswaterbrug zijn overgenomen uit de tekeningen van VSF. In eerste instantie werd alleen gekeken naar het brugdek zelf (het dek, troggen en de dragende onderdelen). Voor het onderzoek ligt de focus op het brugdek maar door de overige onderdelen te versimpelen werden niet de gewenste uitgangspunten verkregen. Daarom zijn later ook de hoofdliggers achter het draaipunt gemodelleerd zoals in de tekeningen weergegeven.

1.1.1 Opleggingen

Voor de opleggingen was het belangrijk dat de cilinder door het draaipunt niet alleen verbonden moest worden met de hoofdliggers zelf, maar ook met de opleggingen. Om dit te bereiken is zowel gebruik gemaakt van een 2D element als een 1D-staaf. Om verschillende onderdelen met elkaar te kunnen verbinden moeten knopen aanwezig zijn op de plaat- of staafgrenzen. Een 1D-staaf heeft knopen op de uiteinden om de staaf te verbinden met de opleggingen. Het 2D element kan verbonden worden met zowel de staaf als de hoofdligger, maar niet met de opleggingen. Daarom zijn beide staven toegepast om het model kloppend te maken. Men dient wel rekening te houden dat het gewicht van de cilinder dan twee keer zo hoog is, omdat de staven dubbel aanwezig zijn in elkaar.



De cilinder die door de hoofdligger gaat en de belastingen afdraagt naar de opleggingen. Bron: tekening VSF



Vier afbeeldingen van hoe de oplegging en de cilinder zijn gemodelleerd. Bron: SCIA

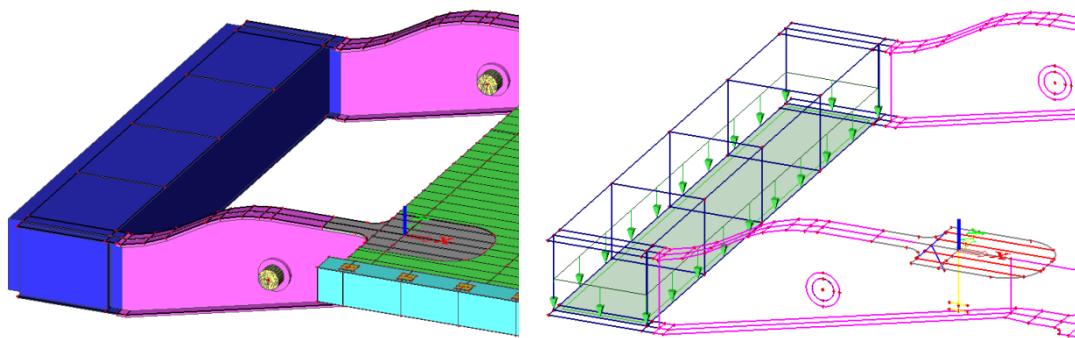
Op de linker afbeelding is te zien dat twee staven aanwezig zijn: een geel en een zwart element. Op de derde afbeelding is te zien dat het 1D element met de uiteinden aan de opleggingen wordt verbonden. De staaf zelf kan niet worden verbonden aan de paarse hoofdligger. Op de rechter afbeelding is aangegeven dat een knoop aanwezig is op het midden van de gele 1D-staaf. Dit kon alleen gedaan worden door een staaf als een 2D element extra toe te voegen.

Voor de oplegblokken aan de andere kant is eveneens een 1D en 2D element toegepast. Dit is gedaan om vervormingen en hoge spanningsconcentraties tegen te gaan in het oplegblok. Ook hier is iets meer belasting aanwezig door de aanwezigheid van dubbele elementen.

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

1.1.2 Contragewicht

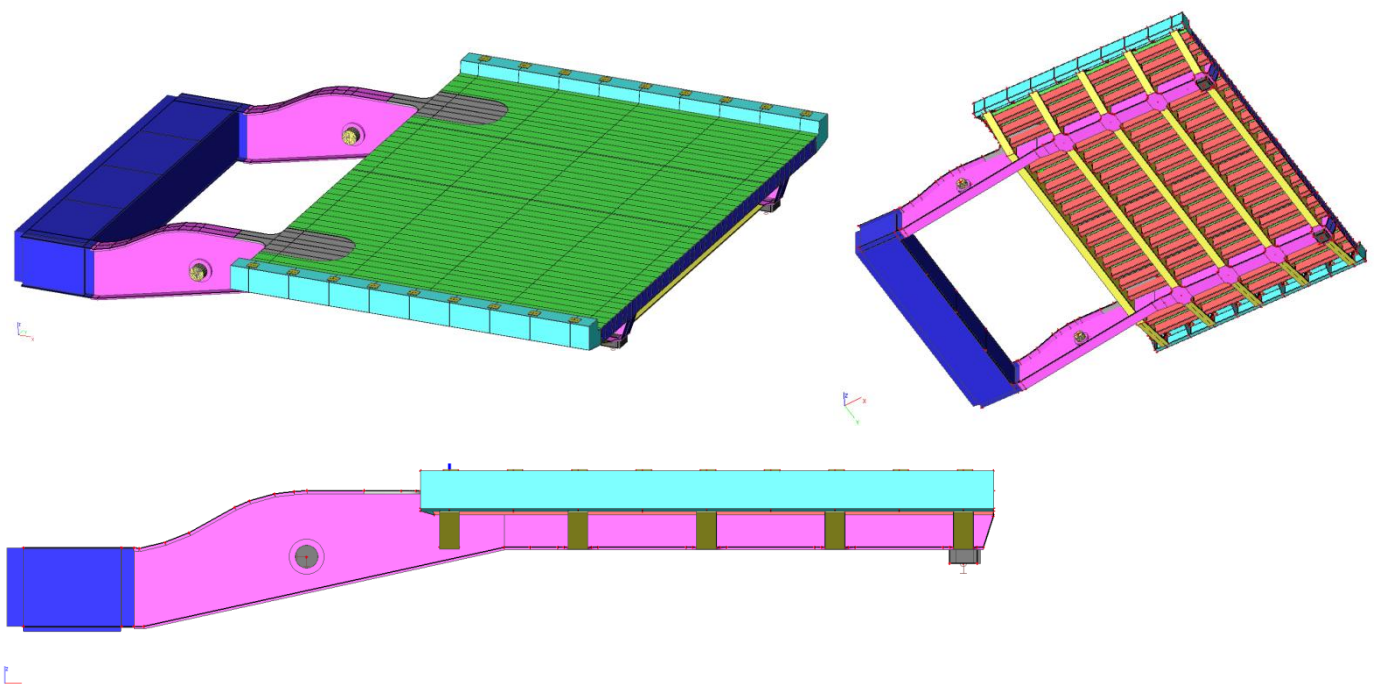
Het contragewicht van de basculebrug wordt gebruikt om de brug met minder energie te openen. Voor het onderzoek wordt uitgesloten dat hiervoor HSS zal worden toegepast. Voor de invoer is alleen het gewicht interessant voor de vervormingen en spanningen in de andere delen van het brugdek. Daarom wordt het contragewicht eenvoudig gemodelleerd. In SCIA hebben de platen van de zijkanten van het blok een bepaalde dikte gekregen die overeenkomen met het extra eigen gewicht dat nodig was doordat het brugdek zwaarder moest worden uitgevoerd vanwege de strenge eis van de geluidsafstraling en de nieuwe Eurocodes (Bijlage 3). Het gewicht van de bestaande ballast is als verdeelde belasting op de onderste plaat van de kist geplaatst. Door de platen met relatief grote diktes te modelleren, wordt het contragewicht zeer stijf, wat in de werkelijkheid ook het geval is.



*Het contragewicht met de extra belasting in de juiste diktes en de bestaande belasting als verdeelde belasting aan de onderzijde.
Bron: SCIA*

1.1.3 Totaal model

Hieronder staan een aantal illustraties uit SCIA van de huidige Kruiswaterbrug. Hier is gewerkt met verschillende layers per onderdeel. De kleuren en de onderdelen spreken voor zich.





Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

1.2 Belastingen

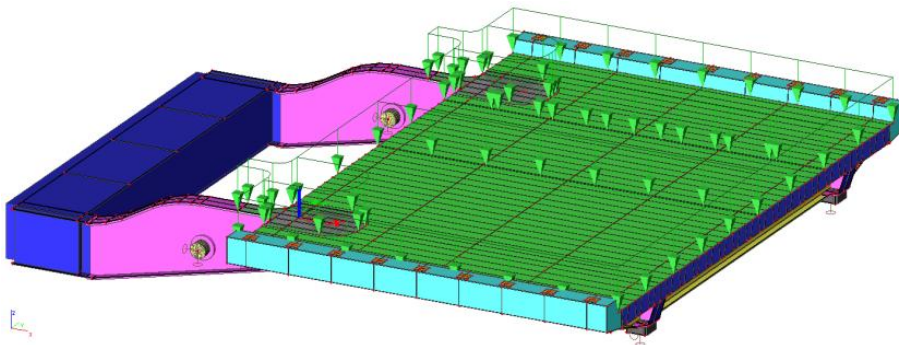
1.2.1 Eigen gewicht

Door elke plaat van diktes te voorzien zoals deze in de tekeningen zijn aangegeven, rekent SCIA voor de hele constructie de belasting uit ten gevolge van het eigen gewicht. Er is één uitzondering en dat is het gewicht van de bestaande ballast van het contragewicht. Deze bestaat niet uit staal en is daarom als verdeelde belasting aangebracht in de ballastkist. Zie hoofdstuk 1.1.2.

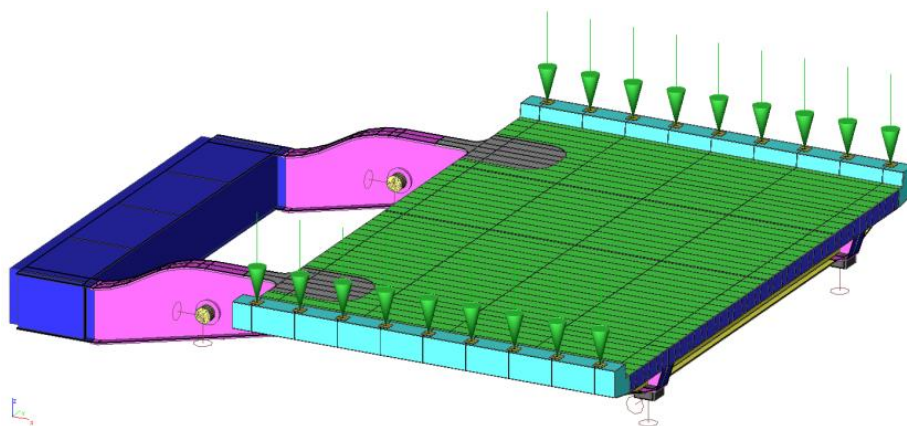
1.2.2 Permanent belastingen

De overige belastingen die permanent aanwezig zijn, zijn aangebracht door middel van puntlasten, verdeelde belastingen op 2D elementen of als moment om een bepaald punt. Het betreft de belastingen die volgen uit:

1. De slijtlaat
2. De lastoeslag
3. Het eigen gewicht van de passeerpaden inclusief leuningwerk
4. De geleiderail
5. De sleufopbouw
6. De veerbuffer



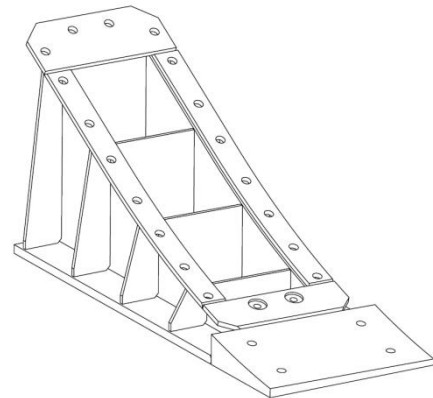
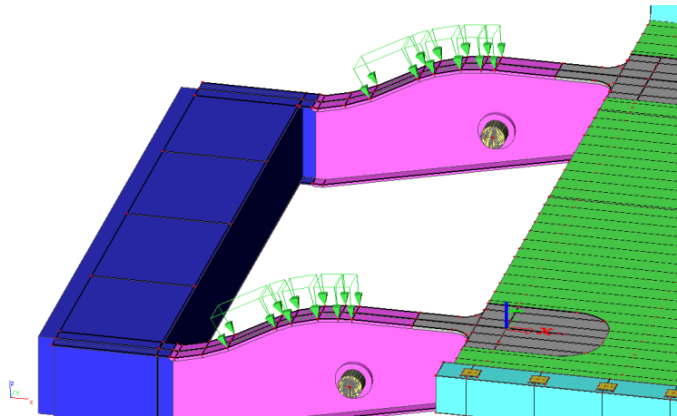
Punt 1 en 2 worden aangebracht zoals op bovenstaande afbeelding. Bron SCIA



Punt 3 en 4 worden op de barriers geplaatst. Bron SCIA

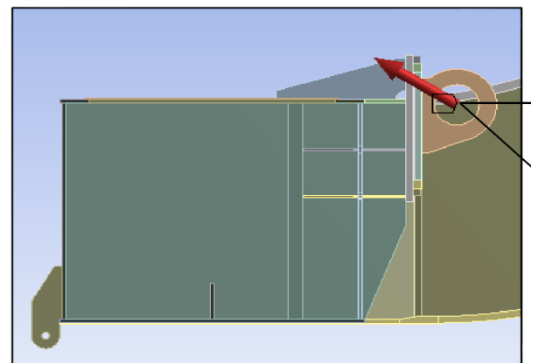
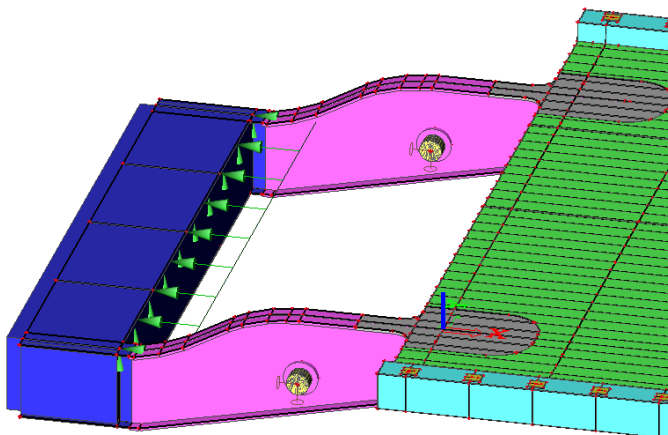
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

De sleufopbouw is niet gemodelleerd, maar wel aanwezig als verdeelde belasting op de hoofdliggers. Één sleuf heeft een totale belasting van 2,1 kN.



Punt 5: De sleufopbouw en hoe deze in het model is doorgevoerd. Bron SCIA Sleufopbouw. Bron: tekening SVF

De laatste permanente belasting die in het model is aangebracht is de veerbuffer. Deze tegenwerkende kracht zorgt ervoor dat er altijd een drukkracht aanwezig is in de oplegblokken aan het uiteinde van de brug. Hierdoor zal voorkomen worden dat de brug gaat klappen en de vrachtwagens op de achterhar gepositioneerd staan.



Punt 6: De veerbuffer ingevoerd als ontbonden krachten. Bron: SCIA.

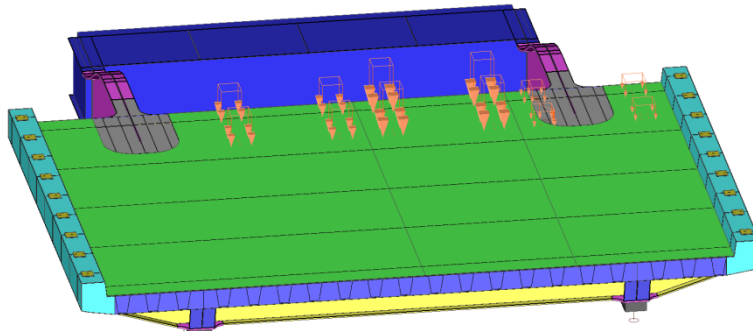
Veerbuffer onder een hoek van 40,9 graden. Bron: ITBB

De schuine kracht van 228 kN uit het rapport van ITBB is in het model ontbonden en als twee lijnlasten doorgevoerd. Door de belasting te spreiden ontstaan geen vervormingen bij de rand van de kist. Dit is zo gedaan omdat dan het aangrijpingspunt van de veerbuffer niet gemodelleerd hoefde te worden.

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

1.2.3 Veranderlijke belastingen

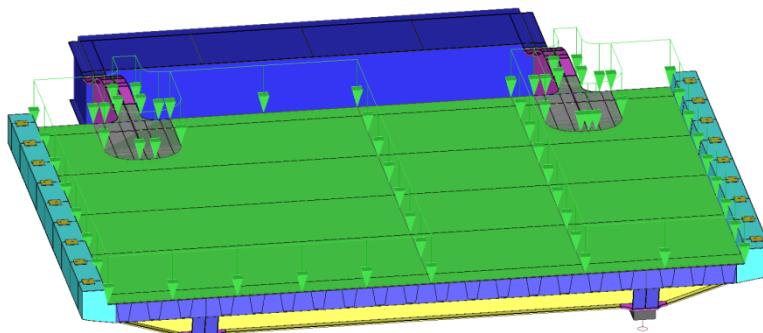
De maatgevende belastingen en vervormingen zullen worden berekend wanneer er volgens belastingsmodel 1 drie tandemstelsels (TS) worden gepositioneerd op verschillende locaties. Om een betere spreiding te krijgen van de wiellasten, worden de belastingen verdeeld over hun wieloppervlak 400x400 mm volgens de NEN-EN 1993-2 art 4.3.2. belastingsmodel 1. Hierdoor ontstaan geen hoge spanningspieken in de dekplaat.



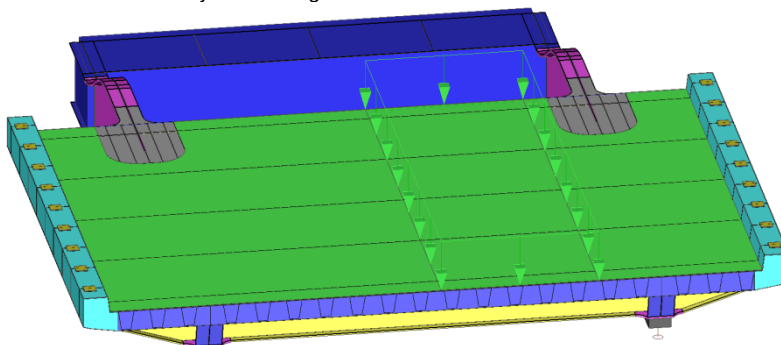
Tandemstelsel volgens belastingsmodel 1 ingevoerd als verdeelde belastingen. Bron SCIA

Op bovenstaande afbeelding zijn de TS ter controle op de achterhar geplaatst. Voor de controle van de hoofdligger op dit punt zal de zwaarste aslast op de ligger zelf staan. Voor de verschillende simulaties wordt verwezen Bijlage 3.

Afhankelijk van de locatie van de TS hoort een verdeelde veranderlijke belasting (UDL) te worden toegepast. De strook met de licht belaste rijbanen hebben een verdeelde belasting van $3,5 \text{ kN/m}^2$ en de zwaar belaste rijstrook een belasting van $10,35 \text{ kN/m}^2$.



Lichte UDL veranderlijke belasting. Bron: SCIA



Zware UDL veranderlijke belasting. Bron: SCIA

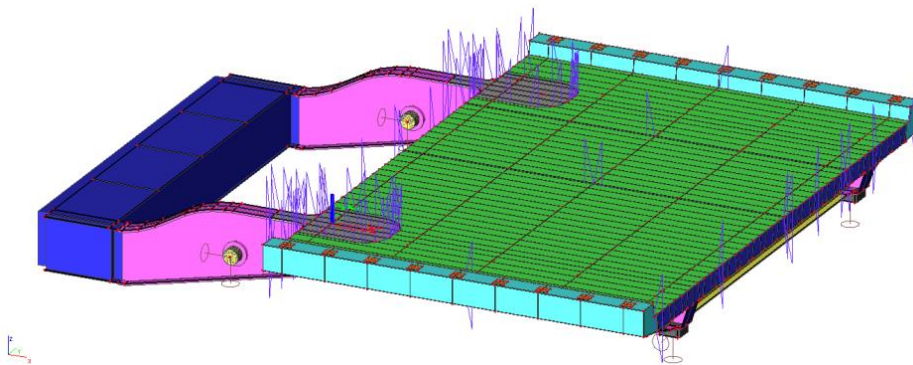
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

1.2.4 Temperatuur

De laatste belasting die moet worden gemodelleerd is de thermische belasting. Er zijn twee belastingsgevallen aanwezig:

1. Een situatie waarin het dek 30 Kelvin warmer is dan de onderzijde.
2. Een situatie 'afkoeling dek', waarin het dek en de troggen 10 Kelvin kouder zijn dan de temperatuur aan de onderzijde. In SCIA is dit als $K = -10$ ingevoerd.

Voor de controle van spanning is situatie 1 van toepassing. Voor de controle van de vervormingen wordt situatie 2 gebruikt.



De blauwe pieken geven weer dat er een temperatuursverschil aanwezig is t.o.v. 0,0 Kelvin. Bron: SCIA

1.3 Verbindingscontrole

Voordat het model berekend wordt door SCIA, wordt eerst nog gecontroleerd of alle plaatonderdelen met elkaar verbonden zijn. Wanneer een verbinding ontbreekt, zal de uitkomst van de berekening onjuist zijn. Platen die bij elkaar samenkomen in knooppunten zijn automatisch met elkaar verbonden, maar dit gaat niet op voor platen haaks op lijven (bijvoorbeeld troggen). Door de verbindingsscontrole worden deze onderdelen alsnog met elkaar verbonden. Vervolgens wordt de constructie gecontroleerd, waarna SCIA de losse knopen verwijderd.

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

1.4 Combinaties

Voordat het model kan worden gecontroleerd op vervormingen (BGT) en spanningen (UGT) moeten combinaties worden gemaakt. Aan de hand van de gegevens uit het rapport van ITBB en de NEN-EN normen 1990 en 1991-2 zijn de onderstaande combinaties met onderstaande factoren van toepassing. Voor de uitleg van de belastingsfactoren en formules wordt verwezen naar het Bijlage 3.

Tabel 1: Combinaties voor de controle van de vervormingen (BGT) met het TS op de voorhar

Belastingsgeval	Belastingsfactor
BG1: Eigen gewicht	1,0
BG2: Eigen gewicht slijtlaag	1,0
BG3: TS dwarsdrager voorhar	0,8
BG4: zware UDL dwarsdrager	0,8
BG5: lichte UDL dwarsdrager	0,8
BG6: Temp. 10	0,3
BG7: Belasting passeerpaden	0,4
BG8: Veerbuffer	1,0
BG9: Geleiderail	1,0
BG10: Eigen gewicht passeerpaden	1,0
BG11: Gewicht lastoeslag val	1,0
BG12: Eigen gewicht sleufopbouw	1,0
BG13: Gewicht bestaande ballast	1,0

Tabel 2: Combinaties voor de controle van optredende spanning (UGT) met het TS op de voorhar

Belastingsgeval	Belastingsfactor
BG1: Eigen gewicht	1,25
BG2: Eigen gewicht slijtlaag	1,25
BG3: TS dwarsdrager voorhar	1,5
BG4: zware UDL dwarsdrager	1,5
BG5: lichte UDL dwarsdrager	1,5
BG6: Temp. 10	0,495
BG7: Belasting passeerpaden	0,6
BG8: Veerbuffer	0,9
BG9: Geleiderail	0,9
BG10: Eigen gewicht passeerpaden	0,9
BG11: Gewicht lastoeslag val	1,25
BG12: Eigen gewicht sleufopbouw	0,9
BG13: Gewicht bestaande ballast	0,9

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

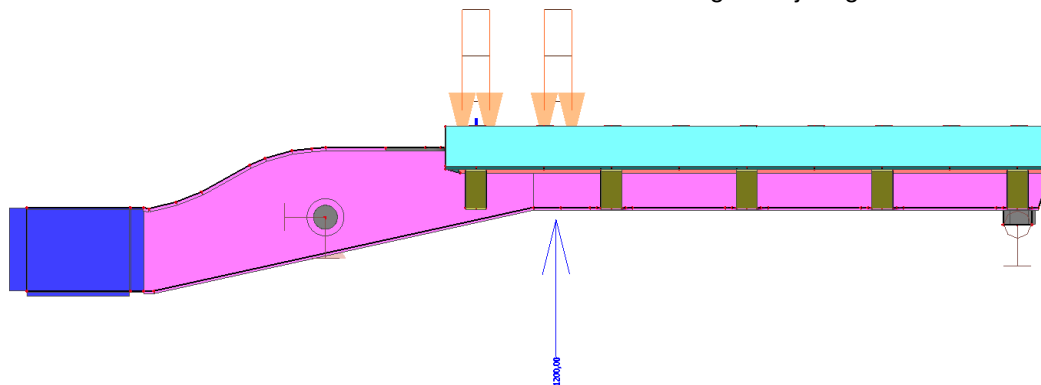
2 BELASTINGSGEVALLEN

Om een uitspraak te kunnen doen over de aanwezige vervormingen en spanningen, wordt in dit hoofdstuk gekeken naar de vervormingen van de aanwezige belastingsgevallen. Ook wordt gekeken naar de reactiekrachten en of de berekende waarden concreet zijn.

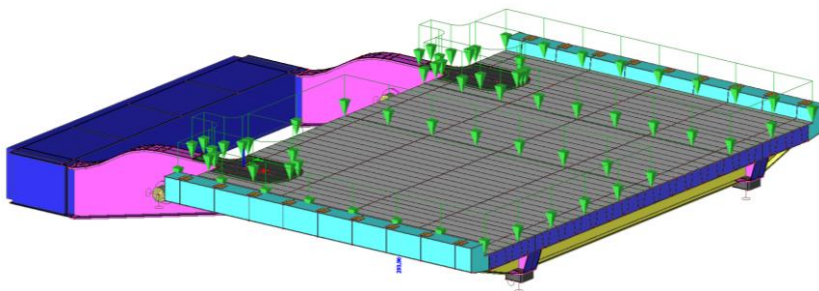
2.1 Belastingen en bijbehorende resultante

2.1.1 Reactiekrachten van de aanwezige veranderlijke belastingen

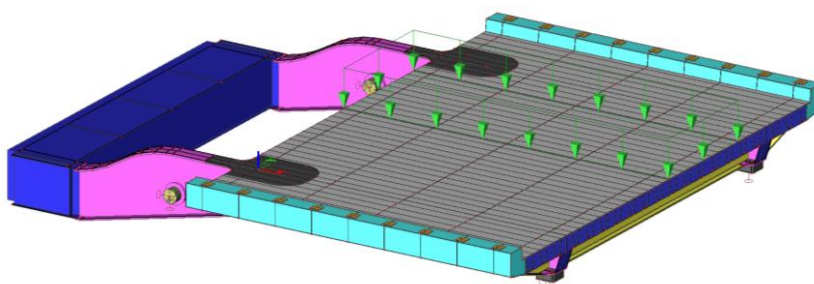
Voor de drie TS wordt voor iedere simulatie een resultante reactiekracht 1200 kN berekend.
 $4 * 150 + 4 * 100 + 4 * 50 = 1200 \text{ kN}$. Dit betekent dat de TS goed zijn ingevoerd.



Voor de lichte UDL belasting berekent SCIA een resultante van 293,96 kN. Het oppervlak van het brugdek incl. de hamerkopplaten is gelijk aan $8,825 * 12,416 = 109,57 \text{ m}^2$. Het oppervlak dat geldt voor 3 rijbanen bedraagt (lichte UDL veranderlijke belasting) $83,99 \text{ m}^2$. $83,99 * 3,5 = 293,96 \text{ kN}$.



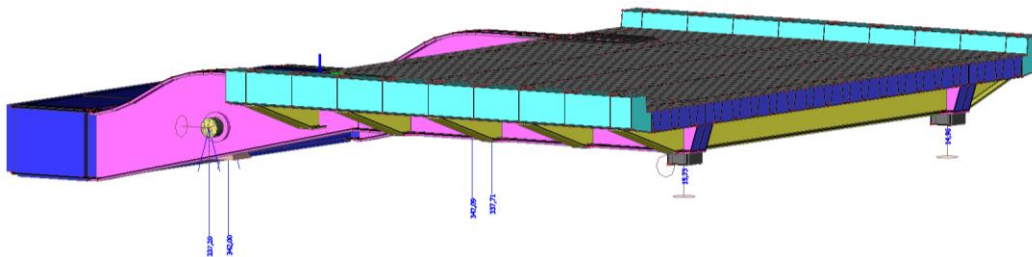
Op de rijbaan die hierboven open is gelaten komt de zware UDL veranderlijke belasting te staan. De resultante van deze belasting is volgens SCIA gelijk aan 274,02 kN. Wanneer het oppervlak van $3,0 * 8,825 * 10,35 \text{ (L * b * kN/m}^2\text{)}$ wordt nagerekend, komt de berekende waarde overeen.



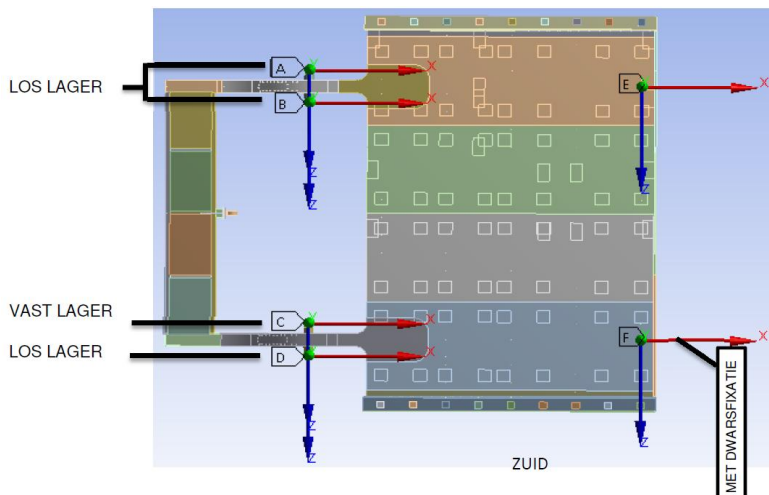
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

2.1.2 Oplegreacties

Voor de controle van de oplegreacties door toedoen van het eigen gewicht is een combinatie gemaakt met alle onderdelen die daar betrekking op hebben (zie hoofdstuk 1.2.2). Alle onderdelen hebben een factor 1,0.



De oplegreacties in de verschillende lagers en oplegblokken. Bron: SCIA



De fixatie van de opleggingen. Bron: afbeelding rapport door ITBB

Oplegreacties berekend door SCIA. De totale belasting van het eigen gewicht is gelijk aan 1389,70 kN.

- Oplegging A: 337,71 kN
- Oplegging B: 342,09 kN
- Oplegging C: 342,00 kN
- Oplegging D: 337,20 kN
- Oplegging E: 14,96 kN
- Oplegging E: 15,72 kN

De uitkomsten uit het verslag van ITBB. De totale belasting die uit de som van ITBB rolde, bedraagt: 1375,73 kN.

- Oplegging A: 339,32 kN
- Oplegging B: 345,24 kN
- Oplegging C: 343,98 kN
- Oplegging D: 339,31 kN
- Oplegging E: 3,18 kN
- Oplegging E: 4,76 kN

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

Er is duidelijk een licht verschil aanwezig. In hoofdstuk 1.1.1 is toegelicht dat er onderdelen dubbel zijn toegepast (massieve stalen blokken en staven), iets wat ITBB niet heeft gedaan. Bij de lagers A t/m D moet voor de juiste reactiekracht per oplegging 2,4 kN worden afgetrokken. Voor de overige opleggingen moet per blok 3,5 kN worden afgetrokken. Wanneer de reactiekracht dan opnieuw berekend wordt, is de totale reactiekracht gelijk aan 1377,9 kN. Een kracht die bijna overeen komt.

$$\text{Belasting staaf: } A = \pi r^2 * \rho_{\text{staal}} = \pi * 0,175^2 * 640 * 78,5 = 4,8 \text{ kN} / 2 = 2,4 \text{ kN}$$

$$\text{Belasting blok: } A = l * b * h * \rho_{\text{staal}} = 0,42 * 0,42 * 0,25 * 78,5 = 3,5 \text{ kN}$$

Omdat gekozen is om het contragewicht niet nauwkeurig te dimensioneren, kan het zijn dat de verdeling van de krachten niet helemaal optimaal is. Hierdoor zijn de verdelingen van de belastingen over de 6 opleggingen iets anders dan die van de huidige brug uit het rapport van ITBB. Het doel van het gedimensioneerde contragewicht was dat het een stijf geheel moest worden en dat de extra ballast overeen kwam met de berekeningen van ITBB. Beide doelen zijn in het SCIA model bereikt.

Een andere reden waarom de verdeling van de belastingen niet precies overeenkomt, is omdat er in het model geen afschot is toegepast. Op de tekeningen van VSF is te zien dat de brug een lichte helling heeft. Ook zijn kleine verschillen in afmetingen aanwezig. Een voorbeeld hiervan zijn de kleine verschillen in de hoofdliggers rondom de draaipunten. Om het model enigszins eenvoudig te houden zijn er twee identieke hoofdliggers toegepast.

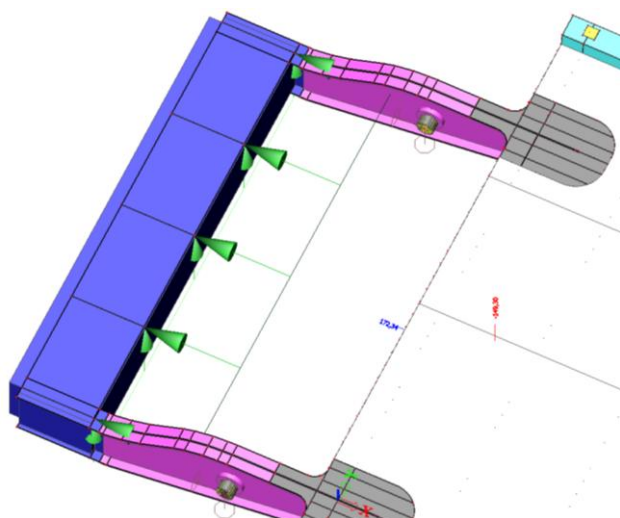
2.1.3 Veerbuffer

De veerbuffer is onder een hoek van 40,9 graden ontbonden in twee krachtcomponenten.

$$\cos(40,9) * 228 = 172,33 \text{ kN}$$

$$\cos(49,1) * 228 = 149,28 \text{ kN}$$

Deze waarden komen overeen met de resultante waarden die SCIA berekent.

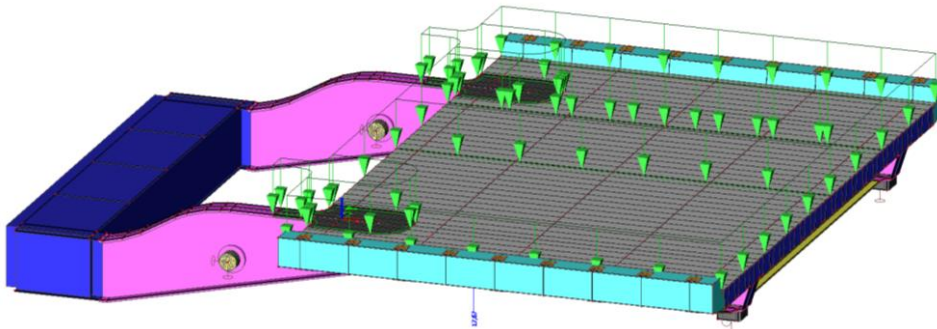


De resultante krachten ten gevolge van de ontbonden belastingen van de veerbuffer. Bron: SCIA

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

2.1.4 Lastoeslag

ITBB heeft berekend dat de belasting ten gevolge van de lastoeslag 17,8 kN is. Deze belasting is als verdeelde belasting op het dek geplaatst. Na controle van de resultante wordt een vergelijkbare waarde verkregen.



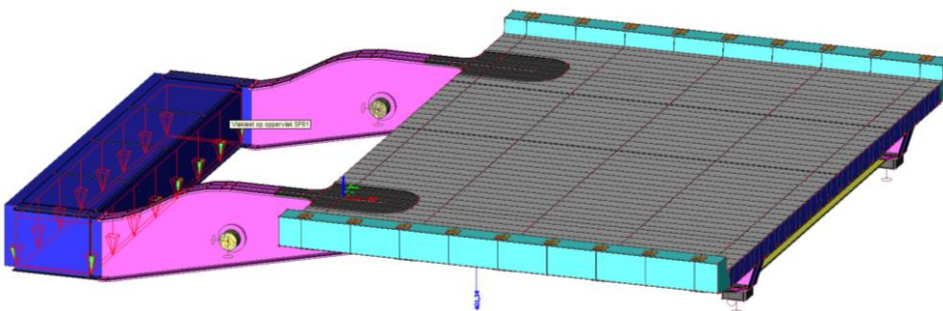
De lastoeslag gemodelleerd als verdeelde belasting over het dek. Bron: SCIA

2.1.5 Passeerpaden en belastingen op de barriers

Voor het eigen gewicht van de passeerpaden incl. leuningen, de geleiderail, de sleufopbouw en de belastingen op de passeerpaden zijn voor de controles van de resultante waarden gevonden die overeenkomen met de invoer van de belastingen.

2.1.6 Bestaande ballast

ITBB heeft voor de originele ballast een verdeelde permanente belasting geplaatst in de ballastkist op de vloer. Het gewicht van de huidige ballast bedraagt 40911 kg. De resultante berekend met SCIA is 401,34 kN. Hier is gebruik gemaakt van de valversnelling van 9,81 om de kracht te berekenen omdat SCIA dat ook doet.



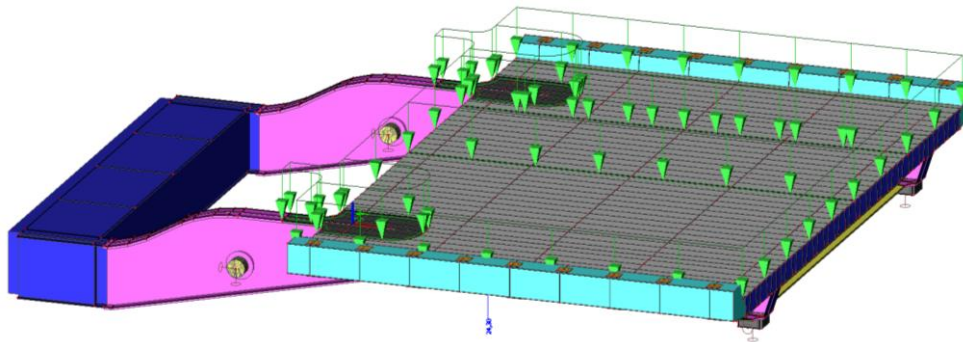
Bestaande ballast van 40911 kg gemodelleerd als verdeelde belasting. Bron: SCIA



Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

2.1.7 Eigen gewicht slijtlaag

Net als bij de lastoeslag is ook de slijtlaag verdeeld over het oppervlak van het brugdek en de hamerkopplaat. ITBB heeft een slijtlaag van 8 mm dik met een totale belasting van 24,3 kN. Deze waarde is gelijk aan de waarde die SCIA als resultante berekent.



Verdeelde permanente belasting door de aanwezige slijtlaag. Bron: SCIA

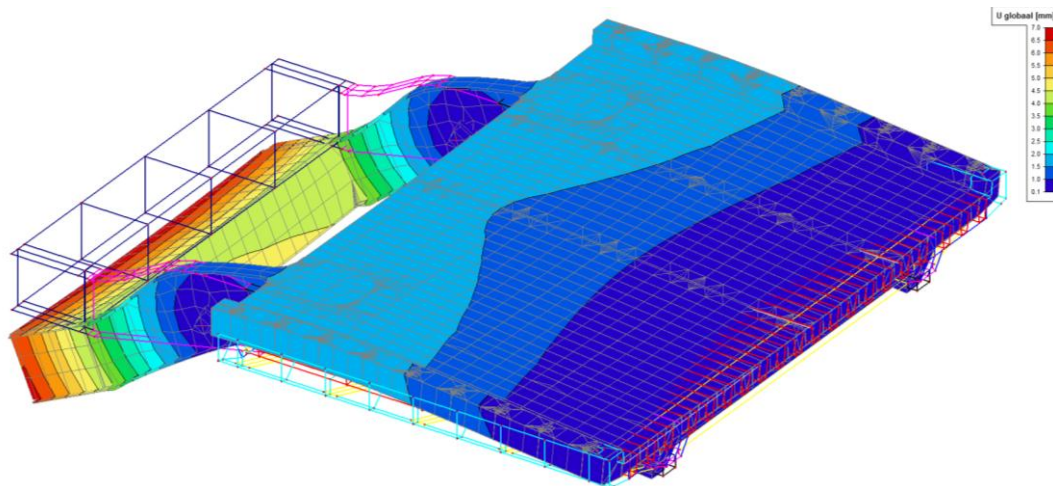
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

2.2 Vervormingen van belastingsgevallen

Voor een aantal belastingsgevallen wordt gekeken wat de bijbehorende verplaatsingen zijn. Zodoende kan per onderdeel worden beoordeeld of de verplaatsing overeenkomt met wat van een belastingsgeval wordt verwacht. Wanneer dat niet het geval is, is het duidelijk dat een fout aanwezig is.

2.2.1 Eigen gewicht

Voordat gekeken wordt naar de verplaatsingen ten gevolge van de belastingen, wordt eerst gekeken hoe het brugdek vervormd aan de hand van het eigen gewicht. Hierbij is ook de bestaande gewicht van het contragewicht meegenomen dat als een verdeelde belasting is ingevoerd. De veerbuffer is in de onderstaande afbeelding nog buiten beschouwing gelaten.



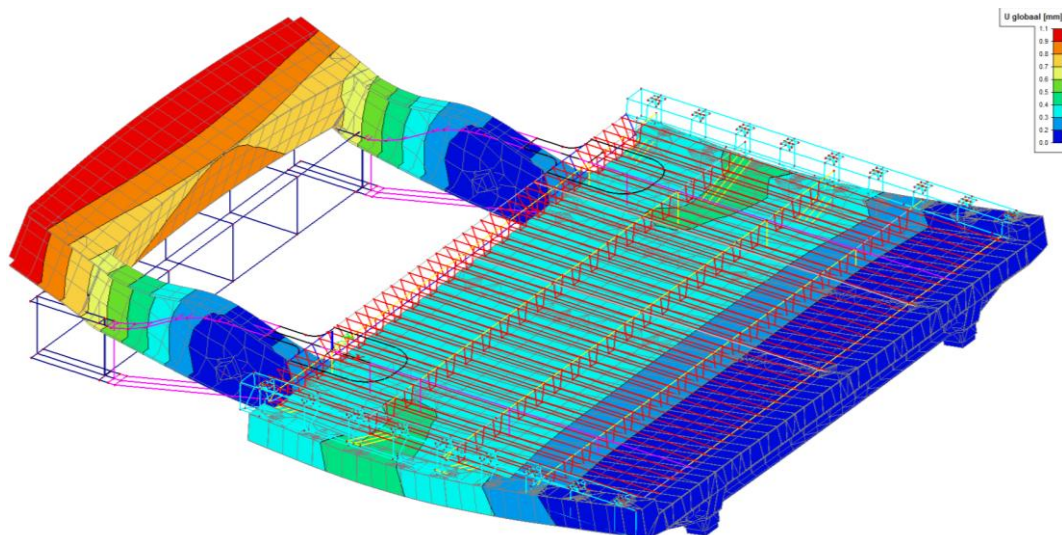
Vervormingen door het belastingsgeval van het eigen gewicht. Bron: SCIA

Aan de linkerkant (contragewicht) bevindt zich 73278 kg van de 141146 kg (brugdek = 67868 kg). Het gewicht van het brugdek is verdeeld over een groter oppervlak dan het gewicht van de ballast. Het is logisch dat het contragewicht meer doorbuigt dan het brugdek. Wanneer andere belastingsgevallen op de brug worden geplaatst, zal het brugdek meer door moeten buigen. Dit betekent dat het contragewicht een verplaatsing omhoog zal krijgen. Uiteindelijk is het de bedoeling dat evenwicht wordt gevonden.

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

2.2.2 Veerbuffer

In hoofdstuk 2.1.3 is de veerbuffer toegelicht. Wanneer alleen het belastingsgeval wordt bekeken, is de uitkomst logisch. Er ontstaat een opwaartse verplaatsing in het contragewicht die er aan de andere kant voor zorgt dat geen verplaatsingen plaatsvinden.



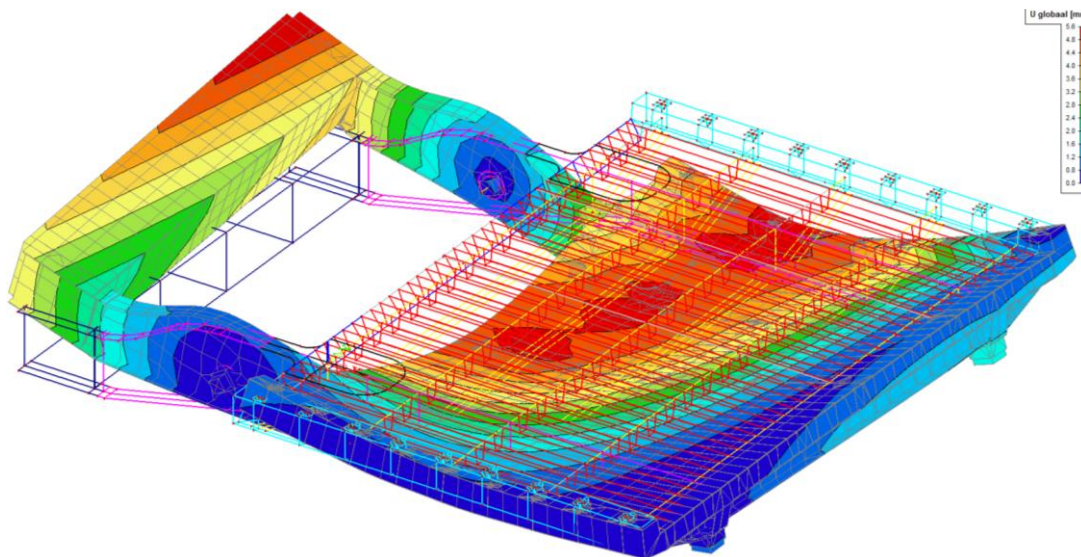
Vervormingen door het belastingsgeval van de veerbuffer. Bron: SCIA

2.2.3 Tandemstelsels (TS)

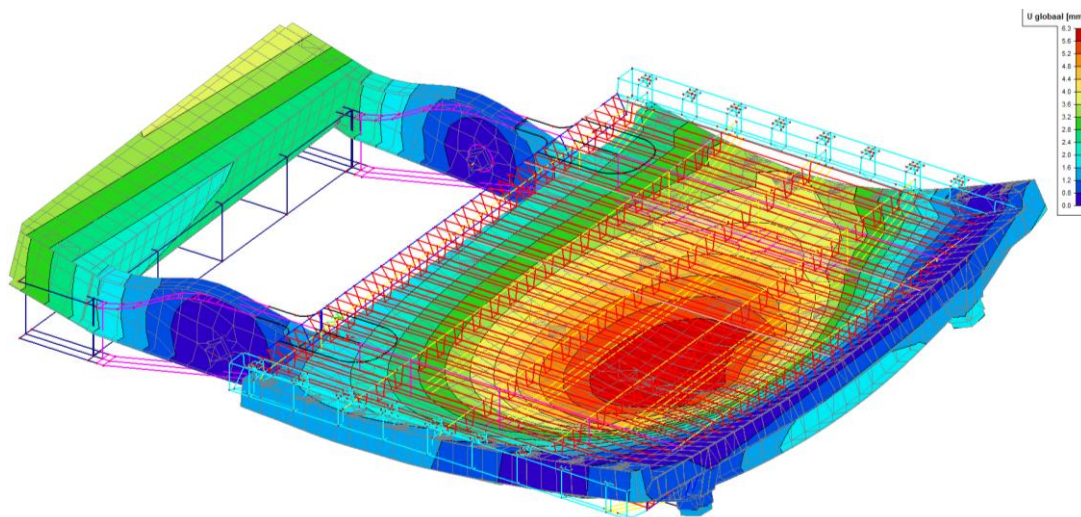
Aan de hand van de gegevens van het rapport ITBB zijn er drie locaties waar de Tandemstelsels worden geplaatst. Twee locaties zijn de uiterste dwarsdragers. De derde locatie is net buiten het midden van het brugdek. Naar verwachting zullen de grootste doorbuigingen ontstaan waar de TS aanwezig zijn.

Hoe dichter het belastingsgeval bij het hoofddraaipunt staat, des te meer het contragewicht omhoog komt. Wanneer de aslasten opschuiven richting de voorhar komt het contragewicht minder omhoog. De doorbuigingen van de dekplaat, troggen en dwarsdragers heeft voor de drie gevallen ongeveer dezelfde doorbuigingen. Merk op dat de afbeeldingen standaard zijn en een factor van 1,0 hebben. Voor de controle van de vervormingen mag een factor van 0,8 worden toegepast. Op de volgende bladzijde zijn de simulaties met bijbehorende doorbuigingen afgebeeld.

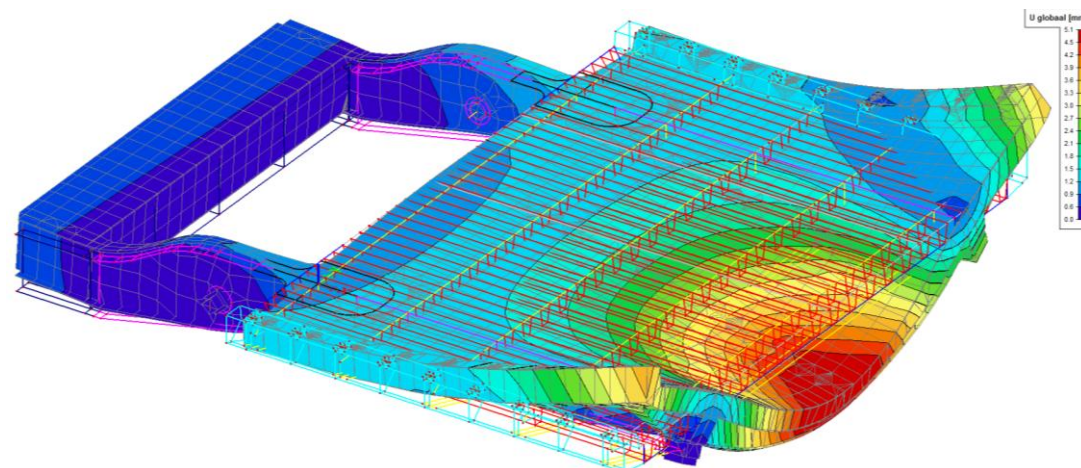
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA



TS gepositioneerd op de achterhar. Bron: SCIA



TS gepositioneerd net buiten het midden van het brugdek. Bron: SCIA

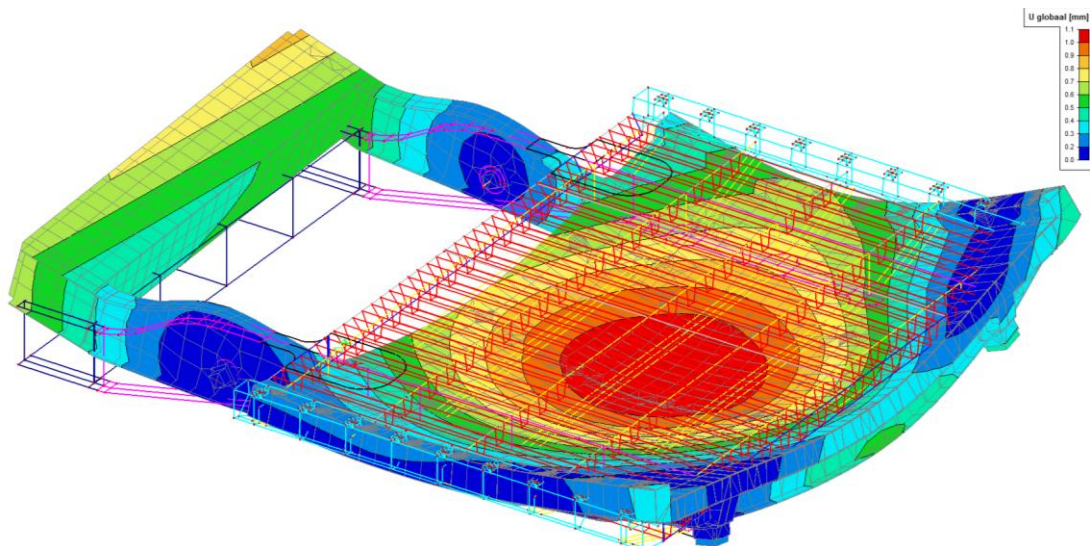


TS gepositioneerd op de voorhar. Bron: SCIA

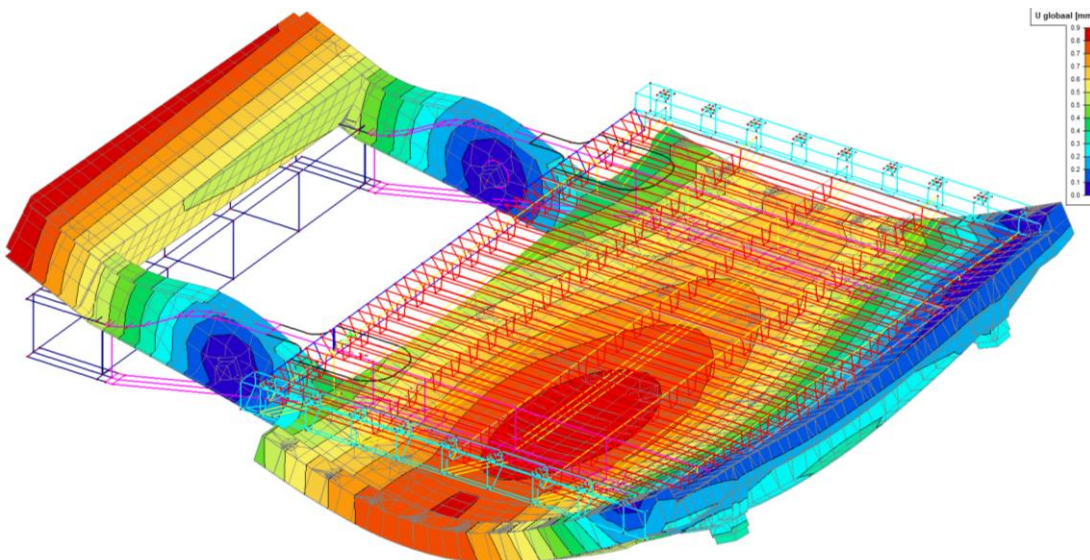
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

2.2.4 Verdeelde belastingen

Naast de drie TS moet er tegelijkertijd een verdeelde veranderlijke belasting (UDL) aanwezig zijn. De zware verdeelde belasting van $10,35 \text{ kN/m}^2$ staat op de één van de middelste rijbanen van 3,0 meter breed. Op de overige rijstroken staat de lichte UDL belasting van $3,5 \text{ kN/m}^2$.



De zware UDL belasting van $10,35 \text{ kN/m}^2$. Bron: SCIA



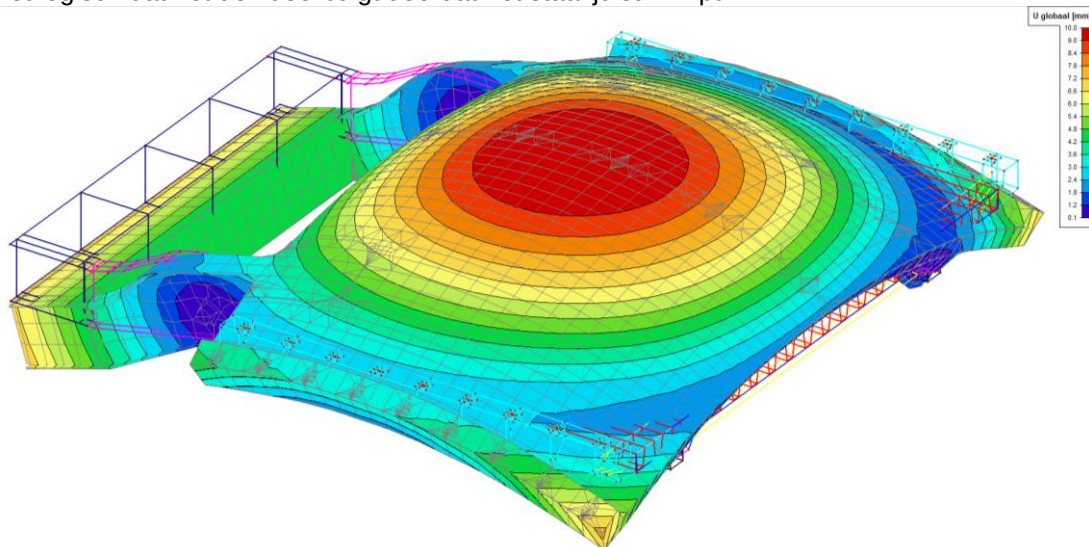
De lichte UDL belasting van $3,5 \text{ kN/m}^2$. Bron: SCIA

Ook hier zorgen de belastingen ervoor dat het contragewicht omhoog komt. Wanneer gekeken wordt naar doorbuiging ten gevolge van het eigen gewicht en de behandelde belastingsgevallen begint al enigszins evenwicht te ontstaan.

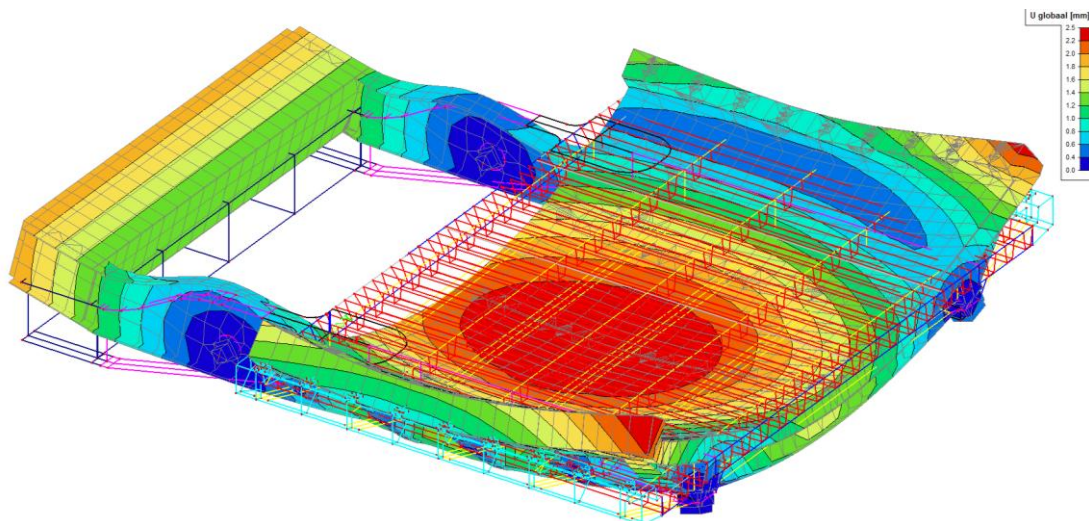
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

2.2.5 Temperatuur

In hoofdstuk 1.2.4 is de invoer van de thermische belasting behandeld. Hieronder worden de twee belastingsgevallen vertaald naar vervorming. Bij de opwarming van het dek met een temperatuursverschil van 30 graden warmer dan de onderzijde is het logisch dat het dek opbolt. Staal zet immers uit wanneer het warmer wordt. Voor de afkoeling van het dek en de troggen geldt juist het tegenovergestelde. Hier is het logisch dat het dek doorbuigt doordat het staal juist krimpt.



De vervormingen van het dek met een temperatuursverschil van 30 graden. Dit belastingsgeval zal worden toegepast voor de controle van de maximale spanningen in de UGT. Bron: SCIA



Bij de afkoeling van de troggen en de dekplaat ontstaat er een doorbuiging die van belang is voor de controle van de vervorming in de BGT. Bron: SCIA



Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

3 MAATGEVENDE VERVORMINGEN

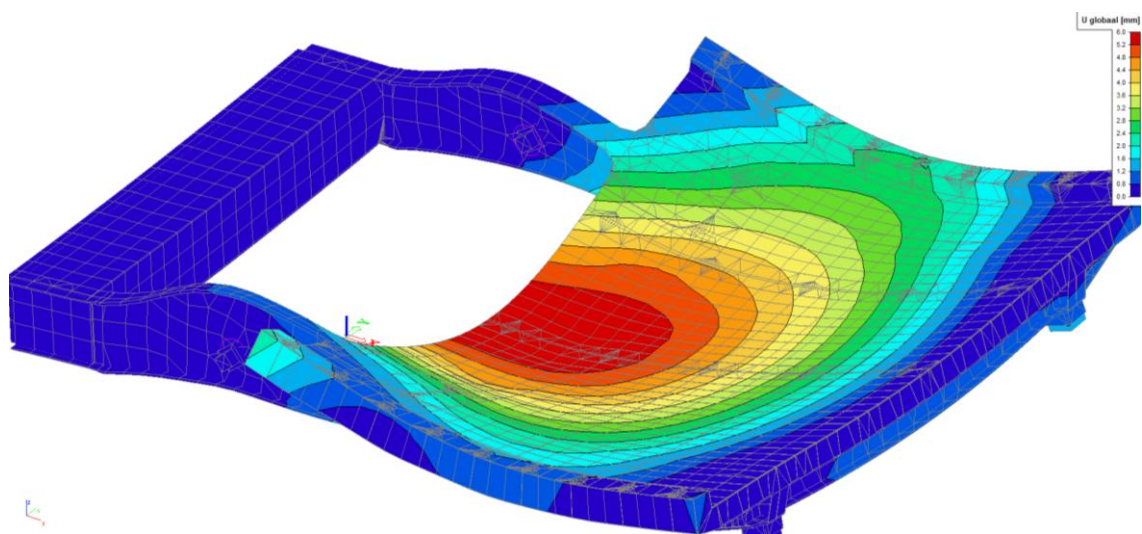
Voor de controle van de onderdelen op vervormingen zijn in de normen geen specifieke eisen opgesteld. Aan de achterste en voorste dwarsdrager (achterhar en voorhar) worden wel eisen gesteld. Om te voorkomen dat de banden van de vrachtwagens bij het passeren van de uiteinden van het brugdek een stootkracht veroorzaken tegen het landhoofd ten gevolge van de doorbuiging van het brugdek zelf, mogen de dwarsdragers op de uiteinden maximaal 5,0 mm doorbuigen. Deze eis is gegeven in de NEN-EN 1993-2 art. 7.8.2 (1). Voor de overige doorbuigingen wordt uitgegaan van $0,002 \cdot L$.

In tabel 1 van hoofdstuk 1.3 is de combinatie beschreven die van toepassing is op de doorbuiging van de voorhar. Bij de combinatie van de achterhar verplaatsen alleen de aanwezige tandemstelsels zich zodanig dat de voorste as op de achterhar staat.

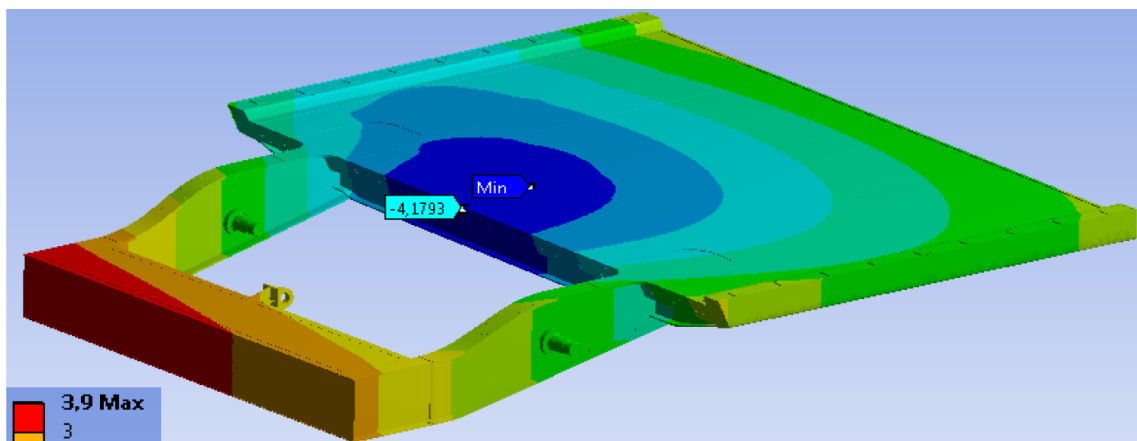
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

3.1 Vervorming achterhar

Aan de vervormingen van de voor- en achterhar is veel aandacht besteed om deze goed in het model te krijgen. Omdat de resultaten vergeleken worden met het model ITBB, dat gebruik heeft gemaakt van ANSYS, komen de resultaten niet exact overeen. De vervorming die ITBB krijgt op de achterhar is -4,1793 mm (min waarde is -4,4 mm). De grootste doorbuiging die wordt gevonden in SCIA is 6,0 mm. Net als bij het model van ANSYS gaat er ook ongeveer 0,3 mm van af wanneer er gekeken wordt naar de dwarsdrager. Kijkend naar de uitdraai van de resultaten valt op dat de vervormingslijnen overeenkomen. Het enige verschil is dat de dwarsdrager net teveel doorbuigt en dat het contragewicht net niet genoeg omhoog komt. In hoofdstuk 2.1.2 zijn enkele redenen gegeven die mogelijk de oorzaak zijn dat de modellen niet exact overeenkomen. De gevonden resultaten worden daarom als acceptabel beschouwd.



Het model uit SCIA met de maximale doorbuiging van 6,0 mm op de dekplaat en de achterhar. Bron: SCIA

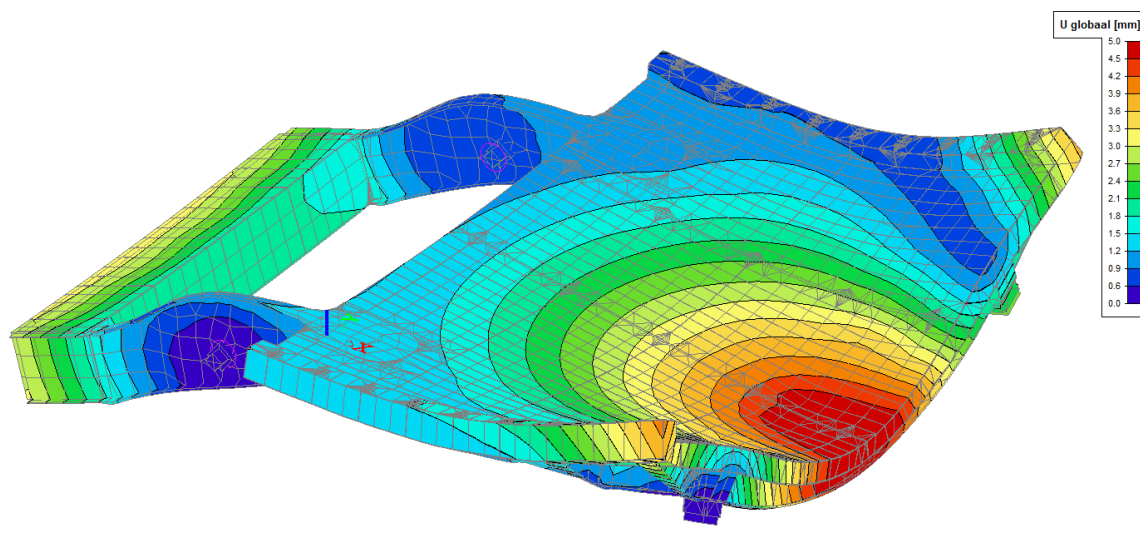


Het model uit ANSYS met de grootste doorbuiging van 4,4 mm en 4,1793 mm op de achterhar. Bron: rapport ITBB

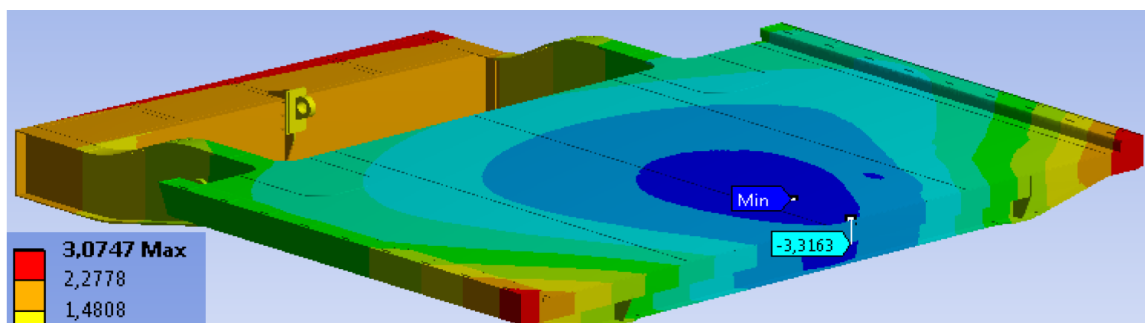
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

3.2 Vervorming voorhar

Het enige dat anders is bij de controle van de vervorming op de voorhar is dat het TS op de voorhar wordt gepositioneerd. Hieronder zijn wederom de resultaten gegeven van zowel SCIA als ANSYS. Ook hier komen de vervormingen niet exact met elkaar overeen. Het contragewicht zakt wederom iets te ver door. De doorbuiging op de voorhar is 5,0 mm in het SCIA model. ITBB komt uit op een minimale doorbuiging van 4,01 mm en 3,3163 op de voorhar.



Het model uit SCIA met de maximale doorbuiging van 5,0 mm op de dekplaat en de voorhar. Bron: SCIA

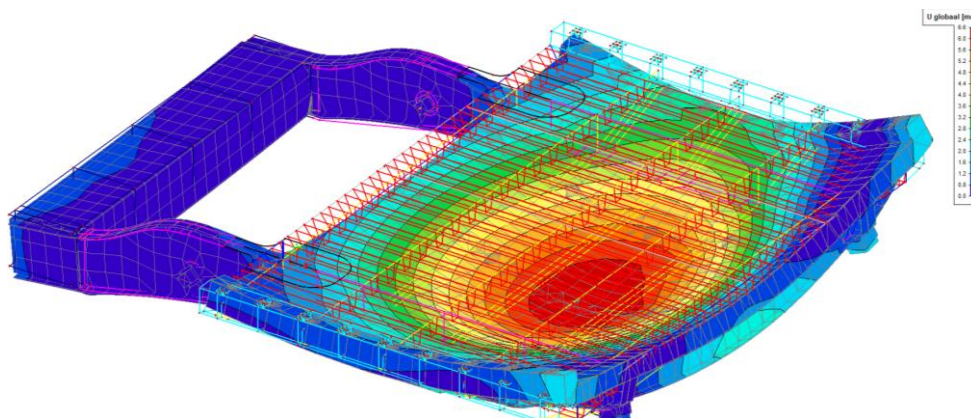


Het model uit ANSYS met de grootste doorbuiging van 4,1 mm en 3,316 mm op de voorhar. Bron: rapport ITBB

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

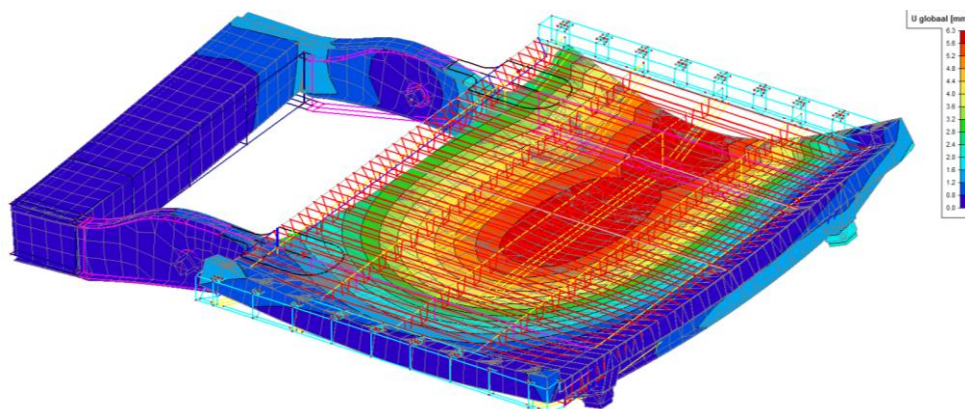
3.3 Overige vervormingen door TS

Bij de laatste positionering van het TS wordt een maximale doorbuiging gevonden van 6,6 mm. Voor deze dwarsdrager geldt niet dezelfde eis als voor de voorste en achterste dwarsdragers. Wanneer geldt dat $0,002 * 8600 = 17,2$ mm de maximale doorbuiging mag zijn, dan voldoet de doorbuiging ruim volgens onderstaande simulatie. Er zijn geen modellen van ANSYS beschikbaar om de modellen naast elkaar te kunnen leggen.



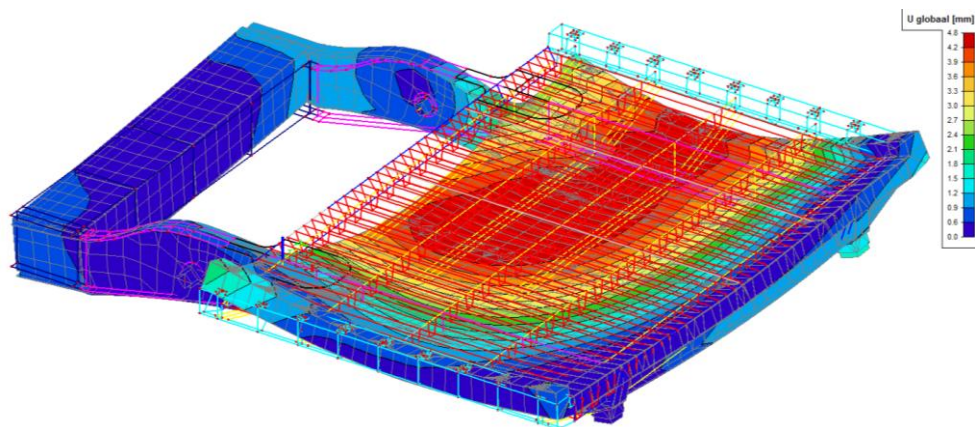
Doorbuiging met het zwaarste TS in het midden van het dek net buiten het midden gepositioneerd. Bron: SCIA

Naast de maximale doorbuigingen van de dwarsdragers, is ook gekeken naar de doorbuigingen die optreden wanneer het zwaarste tandemstelsel boven de hoofdligger wordt gepositioneerd. In de volgende drie afbeeldingen is het TS geplaatst in het midden, op de achterhar en op de voorhar.

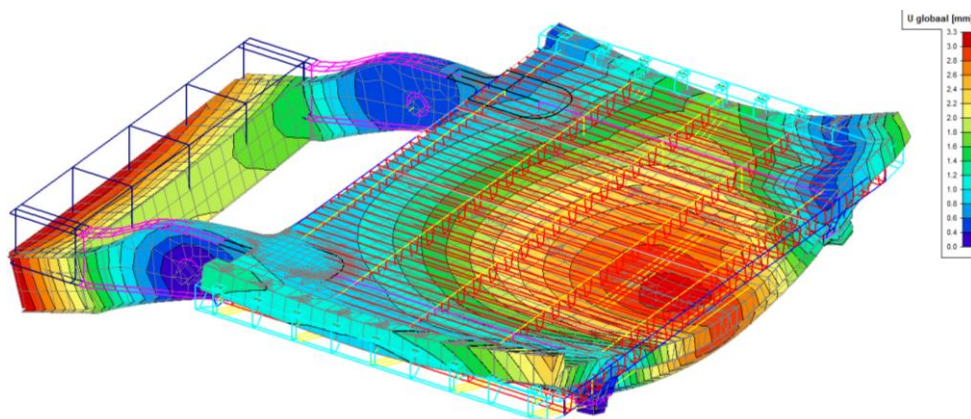


Doorbuiging met het zwaarste TS boven de hoofdligger net buiten het midden gepositioneerd. Bron: SCIA

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA



Doorbuiging met het zwaarste TS boven de hoofdligger ter plaatse van de achterhar. Bron: SCIA



Doorbuiging met het zwaarste TS boven de hoofdligger ter plaatse van de voorhar. Bron: SCIA



Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

4 MAATGEVENDE SPANNINGEN

Het tweede punt dat gecontroleerd zou worden, waren de maatgevende spanningen die optreden aan de hand van de aanwezige belastingen. De optredende spanningen uit het model van SCIA worden net als de vervormingen vergeleken met de resultaten uit het rapport van ITBB. Wanneer de spanningen overeenkomen is het model een geschikt uitgangspunt voor de volgende stap van het onderzoek.

4.1 Controles Kruiswaterbrug ITBB

De volgende spanning zijn door ITBB verkregen:

Lijfplaat hoofdligger:

Simulatie gr1a,1 (achterhar)	=	128,12 [N/mm ²]
Simulatie gr1a,2 (midden)	=	169,43 [N/mm ²]
Simulatie gr1a,3 (voorhar)	=	181,02 [N/mm ²]

Onderflens hoofdligger:

Simulatie gr1a,1	=	113,74 [N/mm ²]
Simulatie gr1a,2	=	149,45 [N/mm ²]

Onderflens dwarsdrager:

Simulatie gr1a,4	=	90,642 [N/mm ²]
Simulatie gr1a,6	=	140,37 [N/mm ²]

Lijfplaat dwarsdrager / voorhar / achterhar:

Simulatie gr1a,1,3	=	345 [N/mm ²]
--------------------	---	--------------------------

Troggen:

Simulatie gr1a,7	=	188,25 [N/mm ²]
------------------	---	-----------------------------

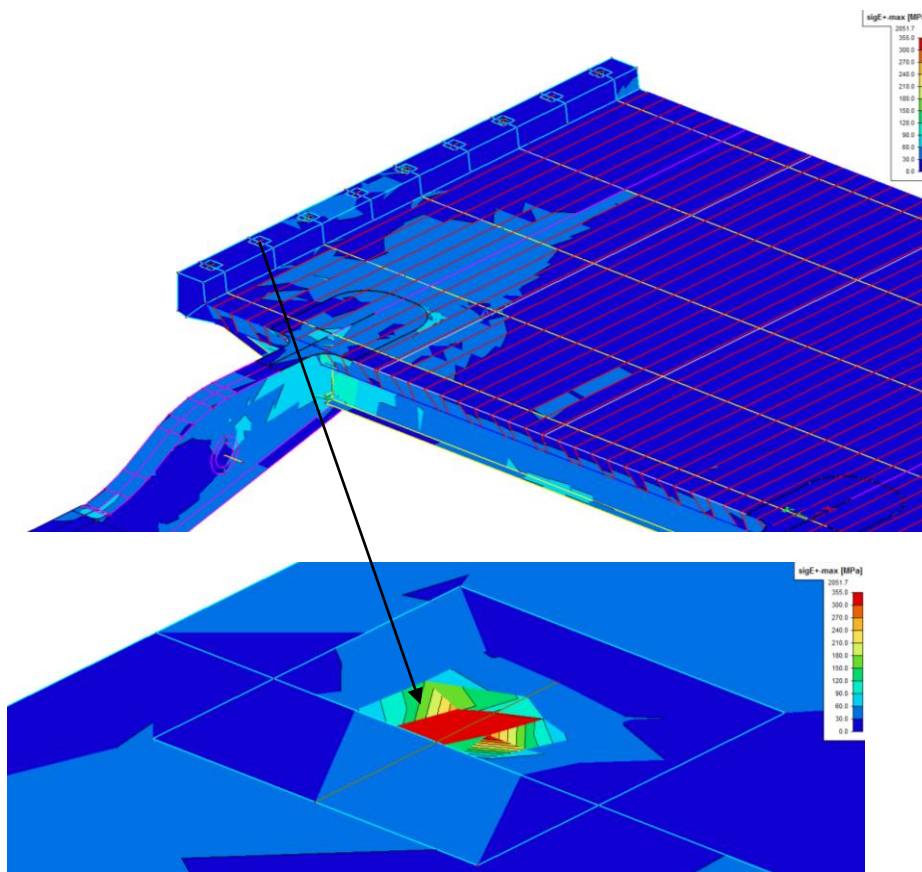
Voor de uitleg van de positioneringen van de aslasten wordt verwezen naar het Bijlage 3.

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

4.2 Barrier met schamprand

De krachten die op de schamprand en barriers werken worden buiten beschouwing gelaten. Beide onderdelen veranderen niet. Ook de belastingen en de belastingscombinaties blijven hetzelfde. Voor deze onderdelen wordt verder ook niet onderzocht of HSS van toepassing is. Vandaar dat ze één op één worden overgenomen. De onderdelen zijn gemodelleerd voor het eigen gewicht en voor de krachten van de passeerpaden en geleiderails die hierop bevestigd zijn. Zodoende kloppen de oplegreacties.

Bij het controleren van de optredende spanning blijken op deze onderdelen zeer hoge spanningsconcentraties aanwezig. Omdat de onderdelen niet veranderen, kunnen de hoge concentraties die af te lezen zijn, verwaarloosd worden. Op onderstaande afbeeldingen is een concentratie van 2051,7 N/mm² die verwaarloosbaar is. Het model in SCIA is voor de bepalingen van de spanningsconcentraties begrensd op 355 MPa.

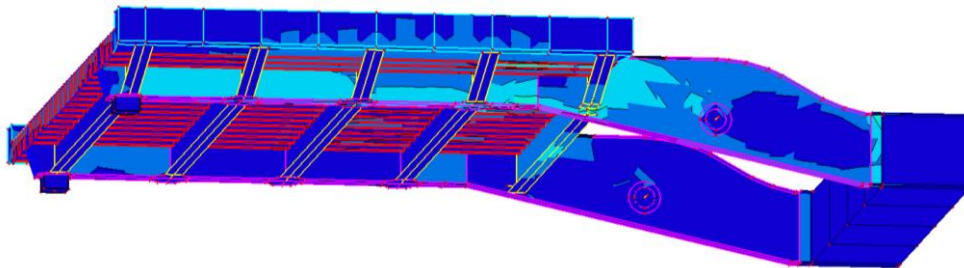


Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

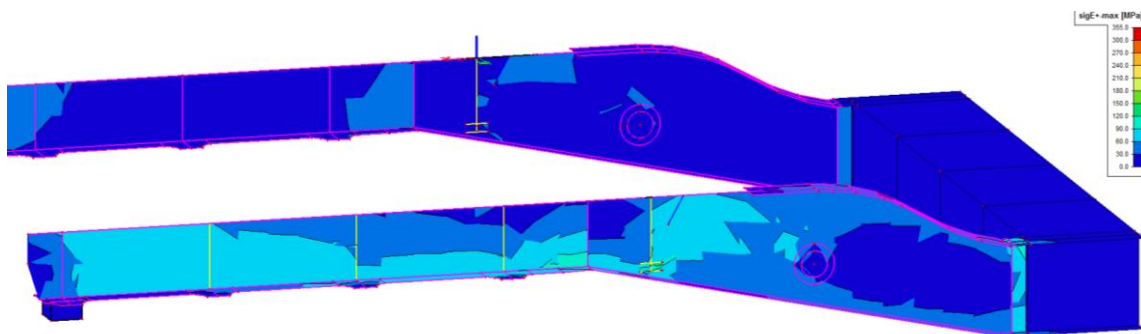
4.3 Lijfplaat Hoofdligger

Simulatie gr1a,1

In onderstaande afbeeldingen zijn de aanwezige spanningen te zien die horen bij BM1 gr1a,1. $128,12 \text{ N/mm}^2$ is de grootste waarde die ITBB verkrijgt met behulp van ANSYS. Van het SCIA model bevinden de meeste spanningsconcentraties zich tussen 90 en 120 N/mm^2 . Slechts een klein oppervlak heeft een net een iets hogere concentratie. Voor deze simulatie komen de gevonden resultaten overeen.



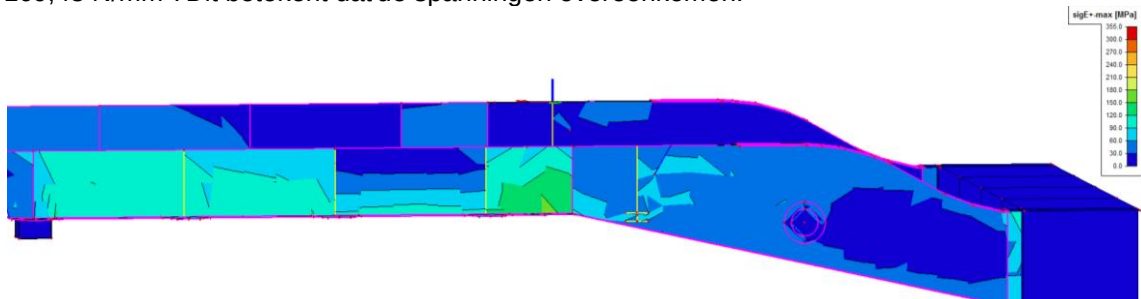
De hoofdligger waarbij de zwaarste aslast op de ligger zelf staat op de achterhar. Bron: SCIA



De hoofdligger, ingezoomd op de spanningsconcentraties. Bron: SCIA

Simulatie gr1a,2

Volgens gr1a,2, waarbij het TS meer in het midden gepositioneerd is, treden de grootste spanningen op tussen 150 en 180 N/mm^2 . In het ANSYS model van ITBB wordt een maximale spanning gegeven van $169,43 \text{ N/mm}^2$. Dit betekent dat de spanningen overeenkomen.

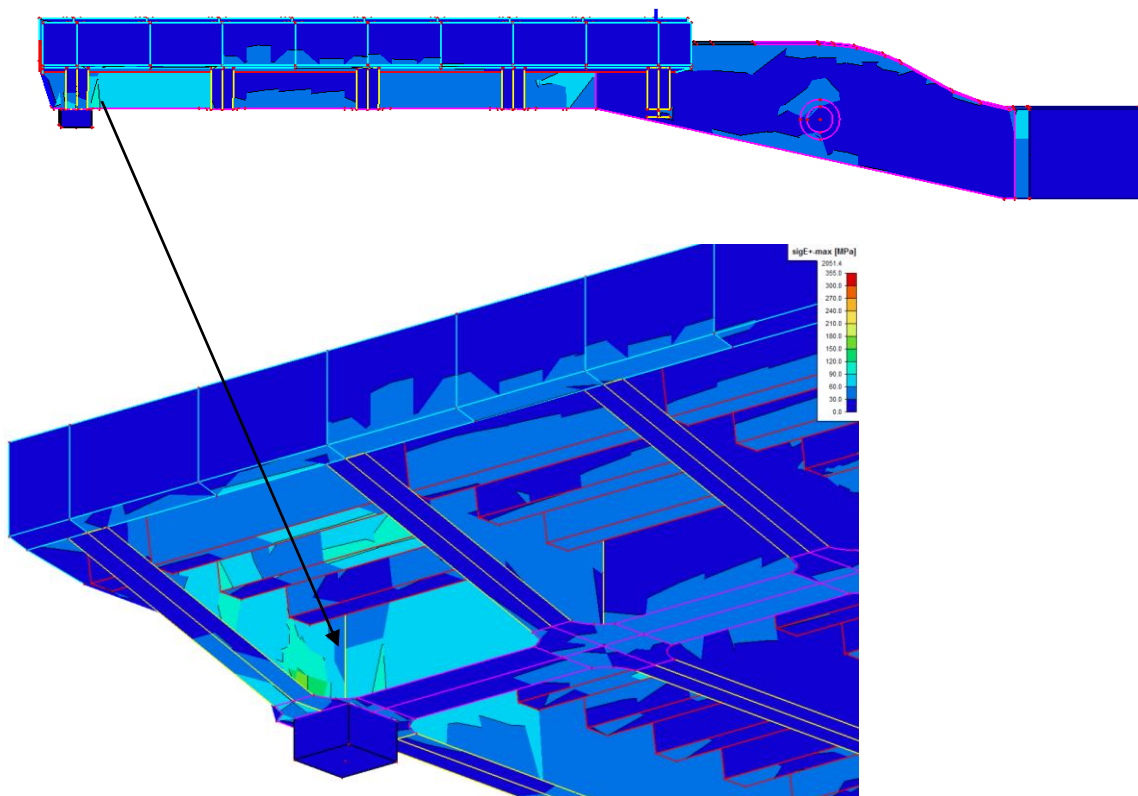


Ingezoomd op de spanningsconcentraties waarbij het zwaarste TS boven het midden van de hoofdligger staat. Bron: SCIA

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

Simulatie gr1a,3

In 4.3.1 en 4.3.2 is het TS verplaatst van de achterhar naar het midden en in deel 3 wordt het TS gepositioneerd op de voorhar. Dit zorgt ervoor dat de hoogste spanningsconcentratie zich nu aan de andere kant van de hoofdligger bevindt. Volgens ITBB moet een waarde van $181,02 \text{ N/mm}^2$ aanwezig zijn. Die is wel aanwezig in het SCIA model, alleen bevindt deze zich niet in de lijfplaat van de hoofdligger, maar in de lijfplaat van de buitenste dwarsdrager. In de lijfplaat zelf worden in SCIA spanningen gevonden tussen de 120 en 150 N/mm^2 .



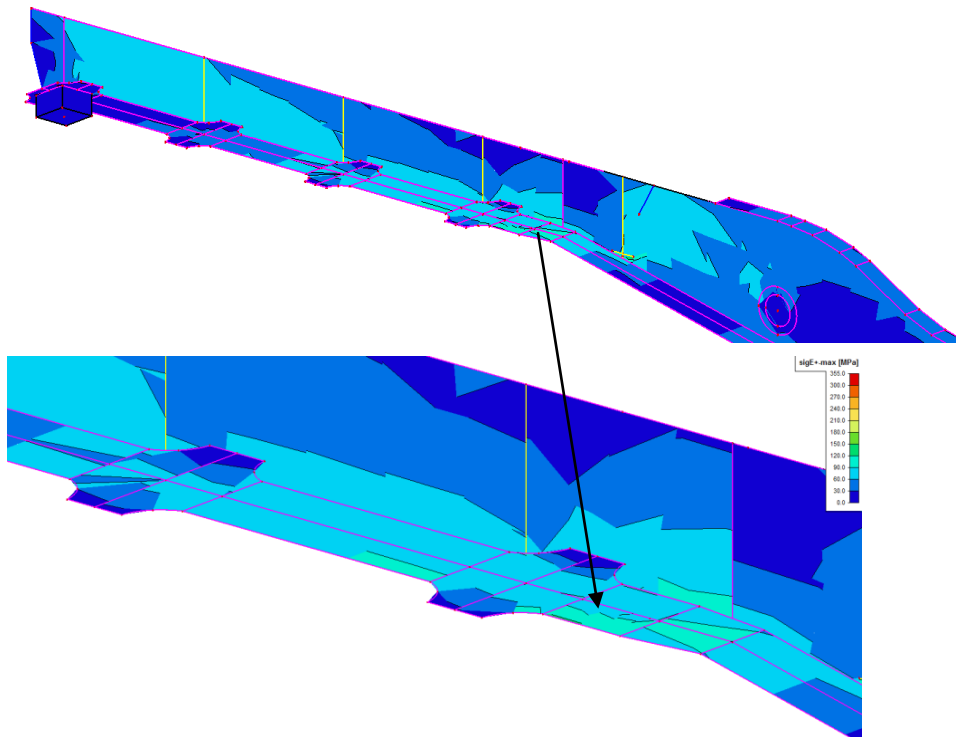
Spanningsconcentraties in de lijfplaat van de hoofdligger ter plaatse van de voorhar. Bron: SCIA

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

4.4 Onderflens hoofdligger

Simulatie gr1a,1

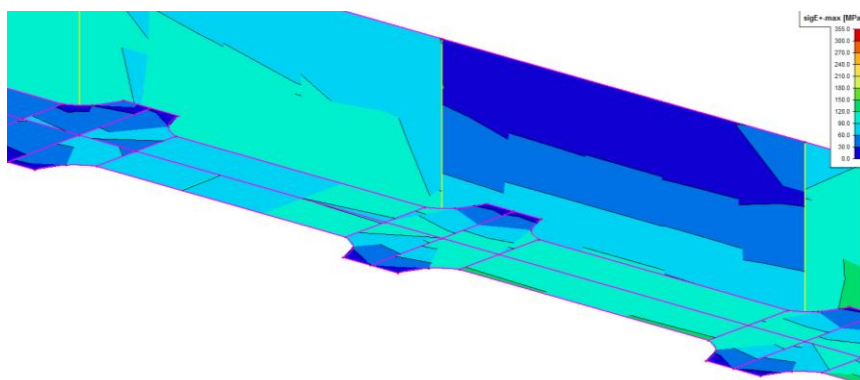
Wederom staat de belasting van het TS op de achterhar en staat het zwaarste TS en de UDL boven de hoofdligger. In de onderflens tussen de staalplaten die de onderflenzen van de dwarsdragers met elkaar verbinden worden spanningen aangetroffen van tussen de 90 en 120 N/mm². ITBB kwam uit op een waarde van 113,65 N/mm².



Spanningsconcentraties in de flens van de hoofdligger ter plaatse van de achterhar. Bron: SCIA

Simulatie gr1a,2

De rij van tandemstelsels schuift weer op naar het midden. In de onderstaande afbeelding uit SCIA worden twee plekjes spanningsconcentratie gevonden van tussen de 120 en 150 N/mm². ITBB kwam uit op 149,45 N/mm².



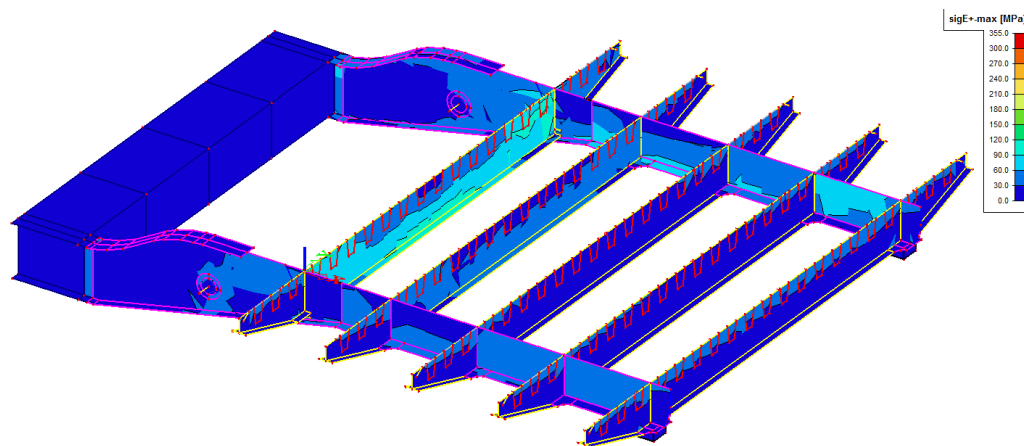
Spanningsconcentraties in de flens van de hoofdligger. Bron: SCIA

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

4.5 Onderflens dwarsdrager

Simulatie gr1a,4 achterhar

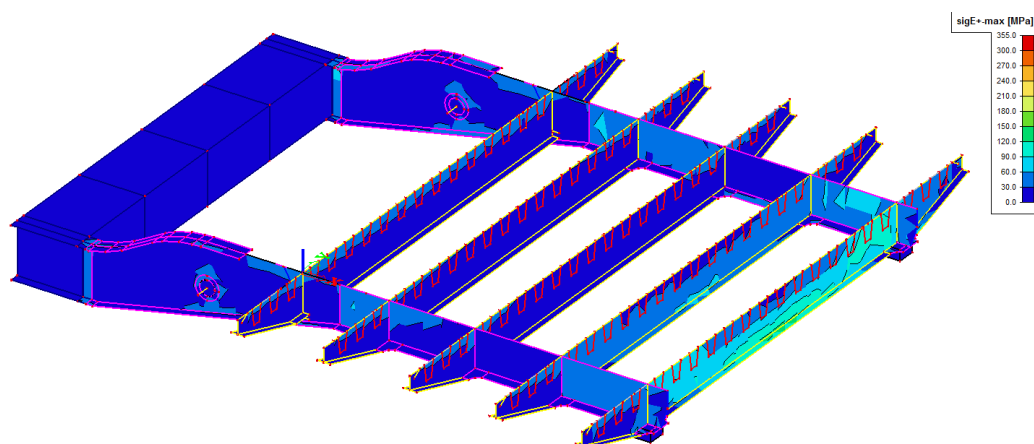
Na de controle van de spanningen in de hoofdligger wordt er nu gekeken naar de spanningen in de dwarsdragers. De zwaarste belastingen verplaatsen zich dan meer naar het midden van het brugdek. De zwaarste UDL komt in het midden te staan. Hetzelfde geldt voor de zwaarste TS. In onderstaande afbeelding uit SCIA worden de spanningen getoond. De spanning die is gevonden heeft een waarde tussen de 90 en 120 N/mm². 90,642 N/mm² was de spanning berekend in het rapport van ITBB.



Spanningsconcentraties in de flens van de achterhar. Bron: SCIA

Simulatie gr1a,6 voorhar

Wanneer de aslasten op de voorste dwarsligger worden geplaatst, neemt de spanning in de voorhar toe. Deze ligger is net iets kleiner dan die van de achterhar, wat betekent dat er een hogere spanning aanwezig moet zijn. Uit SCIA blijkt dat de spanning zich tussen de 120 en 150 N/mm² bevindt. 140,37 N/mm² is de spanning die volgens ITBB optreedt.

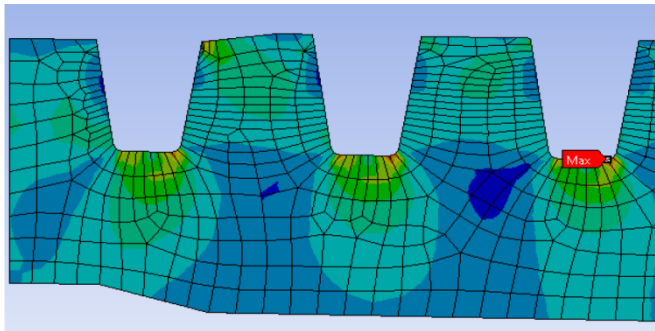


Spanningsconcentraties in de flens van de voorhar. Bron: SCIA

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

4.6 Lijfplaat dwarsdrager / voorhar / achterhar

ITBB heeft met ANSYS de spanningen in het lijf van de dwarsdragers op een andere manier berekend ten opzichte van de uiteindelijke realisatie. De spanning die op dit punt wordt bepaald zal het grootst zijn daar waar de troggen aansluiten op het lijf van de dwarsdragers. In het rapport komen ze uit op een spanning van 345 N/mm^2 . In werkelijkheid lopen de dwarsdragers door en worden de troggen aan de lijven gelast. ITBB heeft het andersom gedaan. In hun ontwerp lopen de troggen door de dwarsdrager. Zodoende ontstaan andere spanningen in het SCIA model. Om toch tot een goede benadering te komen, wordt gekeken naar de verhouding van de spanning wanneer in het SCIA model ook het staal tussen de troggen achterwege zou worden gelaten.



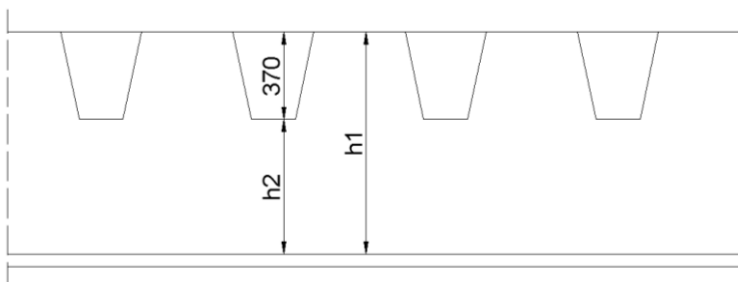
Spanningsconcentratie bij doorlopende troggen. Bron: rapport ITBB

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

$$W = \frac{1}{6} b h^2$$

$$\sigma = (h_1^2/h_2^2) * \sigma_1 \quad \text{waarin:}$$

- h_1 is de totale hoogte van de dwarsligger
- h_2 is de hoogte met een trogopening = $h_1 - 370 \text{ mm}$ (troghoogte)
- σ_1 is de spanning die in SCIA wordt afgelezen rondom de verbinding lijf dwarsdrager en trog



Schets dwarsdrager met troggen voor de verhoudingen

Voor de zekerheid wordt er gekeken naar twee situaties:

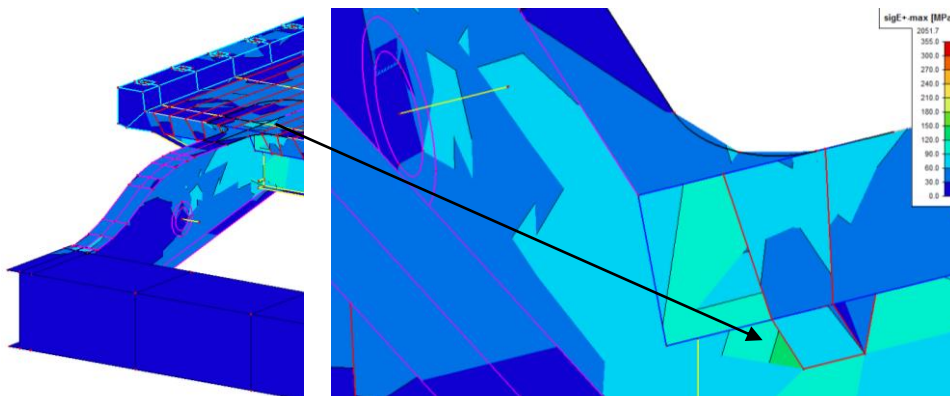
1. gr1a, 1. De hoofdligger zwaar belast ter hoogte van de achterhar
2. gr1a, 3. De hoofdligger zwaar belast ter hoogte van de voorhar

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

Simulatie gr1a, 1

De hoogte van het profiel bij de achterhar is 980 mm. De hoogte van de trog is 370 mm.
 $H_2 = 980 - 370 = 610$ mm. De spanning die hoort bij de verbinding is hieronder afgebeeld en heeft een waarde tussen de 120 en 150 N/mm². Voor de vergelijking zal het gemiddelde worden genomen

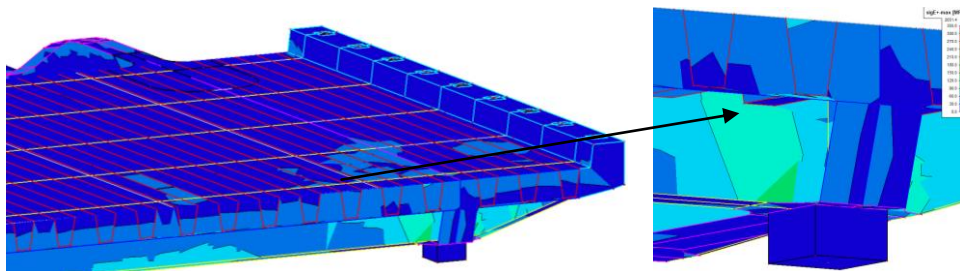
$$\sigma = \frac{(h_1^2/h_2^2) * \sigma_1}{(980^2 / 610^2)} * 135 = 348,44 \text{ N/mm}^2$$



De trog op het lijf van de achterhar met een spanning tussen de 120 en 150 N/mm². Bron: SCIA

Simulatie gr1a, 3

Op de onderstaande uitkomst uit SCIA wordt een spanning van tussen de 90 en 120 N/mm² gegeven. Net als in 4.6.1 wordt hier weer dezelfde berekening gemaakt met het gemiddelde. De hoogte van de voorhar is 869,9 mm en de hoogte van de trog is 370 mm. H_2 bedraagt dan $869,9 - 370 = 499,9$ mm.



De trog op het lijf van de voorhar met een spanning tussen de 90 en 120 N/mm². Bron: SCIA

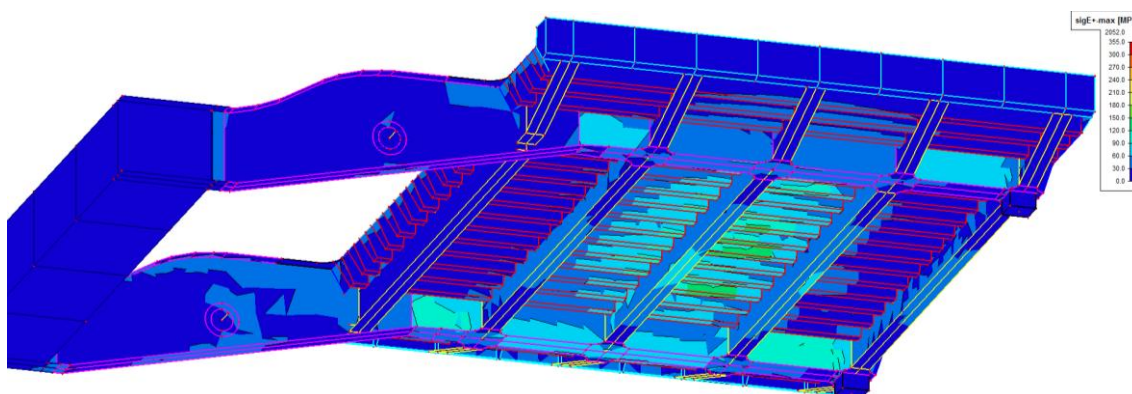
$$\sigma = \frac{(h_1^2/h_2^2) * \sigma_1}{(869,9^2 / 499,9^2)} * 105 = 317,94 \text{ N/mm}^2$$

Na de vereenvoudigde vergelijking is de spanning omgezet naar een spanning met een trog die door het lijf van de dwarsdrager loopt. Voor een indicatie komen de verkregen waarden in de buurt van de resultaten die ITBB heeft opgesteld. Aan de hand van deze controle mag worden aangenomen dat het model goed is gemodelleerd.

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

4.7 Troggen

Simulatie gr1a,7 op de troggen is de laatste spanningscontrole gedaan door ITBB. Uit hun resultaten blijkt dat de grootste optredende spanning $188,25 \text{ N/mm}^2$ is. De spanning die wordt afgelezen uit het SCIA model bevindt zich tussen de 120 en 150 N/mm^2 .

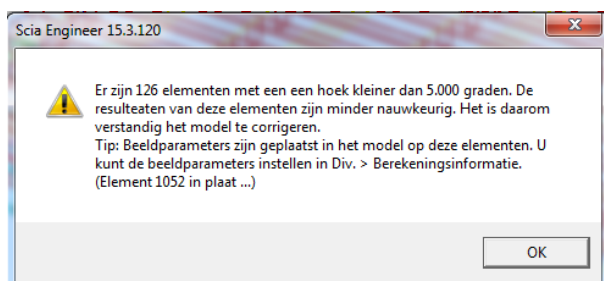


De spanningsconcentraties van de Tandemstelsels op de troggen. Bron: SCIA

5 CONTROLE HUIDIGE KRUISWATERBRUG SCIA

Na het huidige model te hebben nagelopen met Senior constructeur Dhr. Kortleve, is vastgesteld dat de huidige Kruiswaterbrug goed is gemodelleerd. Het model vertoont geen opvallende pieken qua vervorming. De aanwezigheid van pieken betekent meestal dat er iets is fout gegaan bij het invoeren van het model.

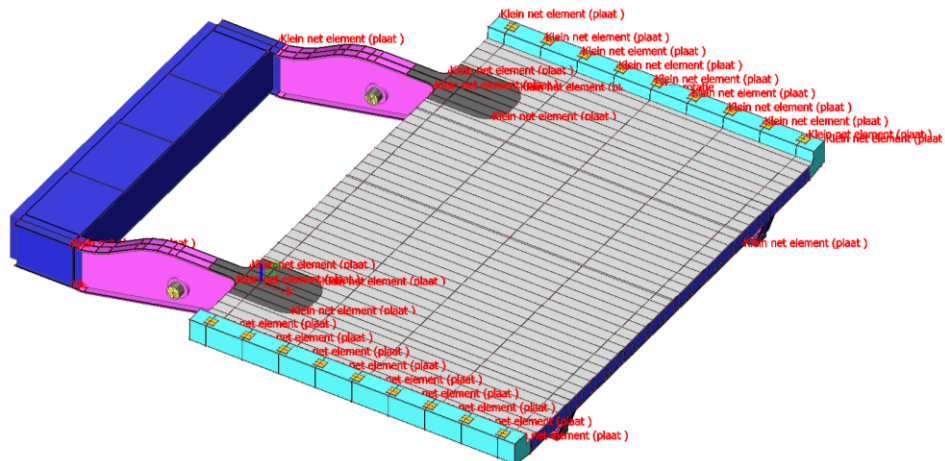
Het model kan bijna gebruikt worden als uitgangspunt voor het ontwerp waarin HSS zal worden verwerkt. Dhr. Kortleve had nog een paar aandachtspunten aan de hand van meldingen die naar voren kwamen bij de netgeneratie van het model. Er waren meerdere elementen waarbij hoeken aanwezig waren van kleiner dan 5,000 graden. Het betreft 126 elementen, zie onderstaande afbeelding, die worden veroorzaakt door hoeken van driehoekige plaelementen of boogstralen die samenkomen met een rechte plaat. Dit zorgt ervoor dat zeer smalle oppervlaktes ontstaan waar de grove netverfijningen niet kunnen komen.



Melding van SCIA na de netgeneratie. Bron: SCIA.

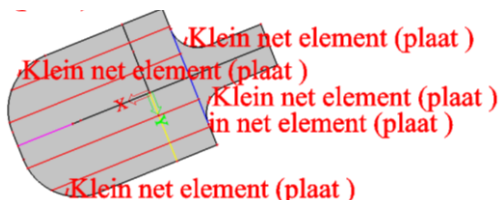
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

In SCIA is het mogelijk om deze kleine netelementen te controleren. In onderstaande afbeelding is te zien waar deze zich bevinden.

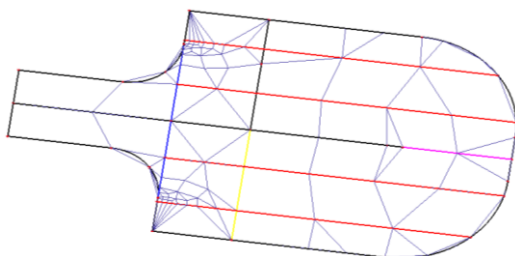


Afbeelding van de locaties waar de netelementen niet bij kunnen (berekeningsinformatie). Bron: SCIA

Na overleg met Dhr. Kortleve konden de meeste meldingen worden verklaard. De meldingen die aan de zijkanten bij de barriers worden gegeven, kunnen buiten beschouwing worden gelaten. Omdat de barriers in het nieuwe ontwerp ongewijzigd blijven, zullen de meldingen geen invloed hebben op het alternatieve ontwerp waar HSS in zal worden verwerkt. Omdat het onderzoek zich richt op het brugdek werd gesteld dat het goed is als de meldingen in de hamerkopplaat wel worden opgelost. Door de hamerkopplaat te voorzien van een fijnere netverdeling (globaal over de hele plaat en lokaal langs de randen) moeten de meldingen kunnen worden verholpen.



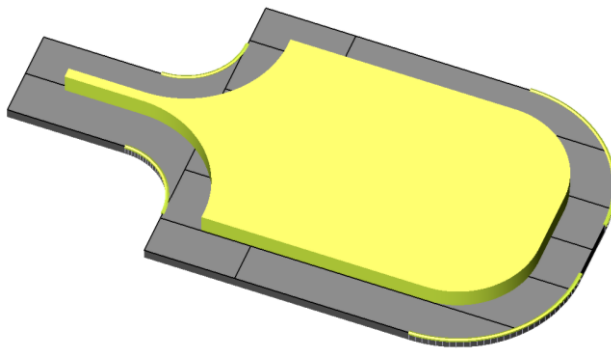
Afbeelding van de locaties waar de netelementen niet bij kunnen in de hamerkopplaat. Bron: SCIA



Afbeelding de hamerkopplaat met de te grove netverdeling waarbij meldingen werden gegeven. Bron: SCIA

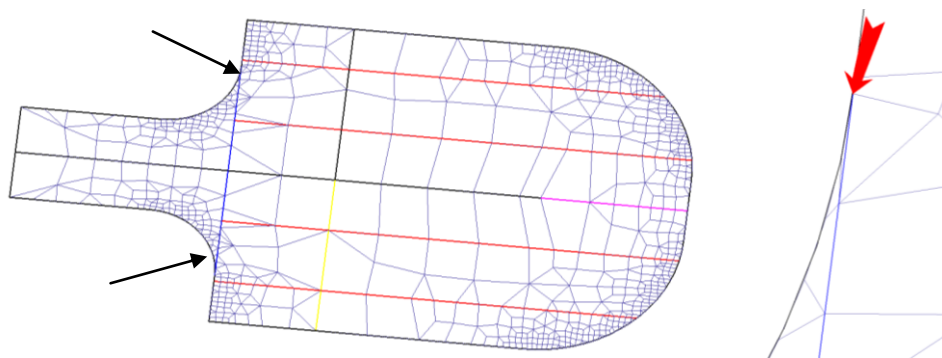
Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

Op de plekken waar op de hamerkopplaat meldingen werden gegeven zijn verfijningen toegepast. In onderstaande afbeelding is met een gele arcering te zien dat er extra aandacht is besteed aan de hamerkopplaat.



Verfijning van de netverdeling. 100 mm op de plaat zelf en 20 mm op de randen van de hamerkopplaat. Bron: SCIA

Na het aanpassen van de netten in de hamerkopplaat zijn de meeste meldingen verholpen. Per plaat blijven twee meldingen aanwezig op de aangewezen plaatsen waar de boogstralen weer recht worden. Omdat precies hieronder een plaat loopt die de troggen afsluit, wil SCIA in de kleinste hoek netten plaatsen. Omdat dit niet mogelijk is, zijn dit de enige resterende meldingen.



De zichtbare netverfijning in de hamerkopplaat met de hoeken aangegeven waar de netten niet bij kunnen komen. Bron: SCIA

Na het verhelpen van de meeste meldingen zijn de spanningen en vervormingen nogmaals nagelopen om te kijken of de aanpassing hier effect op had. De waarden die voorheen werden gevonden bleven ongewijzigd.

Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA

6 CONCLUSIE

Na het modelleren van het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug is een vergelijking gemaakt van de resultaten tussen het SCIA model en gegeven resultaten van ITBB. De resultaten die zijn vergeleken hebben betrekking op de vervormingen en de optredende spanningen in verschillende onderdelen van het orthotrope brugdek.

De brug is zo goed mogelijk gemodelleerd in SCIA. Hier en daar zijn een paar onderdelen vereenvoudigd of anders gemodelleerd. Zo is het afschot buiten beschouwing gelaten. Dit zorgde ervoor dat de hoofdliggers rondom het draaipunt verschilde qua dimensies. Deze verschillen zijn tevens buiten beschouwing gelaten. De ballastkist is zo gemodelleerd dat het gewicht klopt. De buitenste platen zijn correct uit de tekeningen overgenomen, maar verder is geen aandacht besteed aan het ontwerp van de kist. De oorspronkelijke belasting is als permanent verdeelde belasting aangebracht. De extra benodigde ballast is omgezet naar dikke platen die de kist vormen. Hierdoor wordt ook genoeg stijfheid gecreëerd. Tot slot zijn de opleggingen anders gedimensioneerd dan ITBB heeft gedaan. Door zowel een 1D-staaf als een 2D plaalement door elkaar heen te modelleren, kon de belasting van de brug worden afgedragen naar de opleggingen. Dit betekent wel dat de opleggingen zwaarder worden.

Na het naast elkaar leggen van de resultaten valt te concluderen dat het ontwerp met SCIA aardig overeenkomt, rekening houdende met het feit dat de ontwerpen met twee verschillende programmeringsprogramma's zijn gemaakt. ANSYS is in feite nauwkeuriger en dat betekent dat er zodoende kleine verschillen aanwezig zijn. Voor zowel de vervormingen als de optredende spanningen zijn vergelijkbare resultaten gevonden.

Vervorming

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

Spanningen

Voor de spanningen zijn in de onderstaande tabel de vergelijkbare waarden weergegeven. Merk op dat bij SCIA het gaat om spanningsconcentraties tussen bepaalde waarden.

Onderdeel	ITBB met ANSYS	Model in SCIA
Lijfplaat hoofdligger	128,12 N/mm ²	90 – 120 N/mm ²
	169,43 N/mm ²	150 – 180 N/mm ²
	181,02 N/mm ²	120 – 150 N/mm ²
Onderflens hoofdligger	113,74 N/mm ²	90 – 120 N/mm ²
	149,45 N/mm ²	120 – 150 N/mm ²
Onderflens dwarsdrager	90,642 N/mm ²	90 – 120 N/mm ²
	140,37 N/mm ²	120 – 150 N/mm ²
Lijfplaat dwarsdrager	345,00 N/mm ²	318 – 348 N/mm ²
Troggen	188,25 N/mm ²	120 – 150 N/mm ²

Aan de hand van deze vergelijking kan geconcludeerd worden dat de huidige brug, gemodelleerd met SCIA en gecontroleerd door Dhr. Kortleve, goed is gemodelleerd. Het model kan nu worden gebruikt als uitgangspunt / basismodel voor de volgende stappen in het afstudeeronderzoek waarbij het model zal worden geoptimaliseerd, zodat de spanningen toenemen en HSS mogelijk een oplossing biedt.

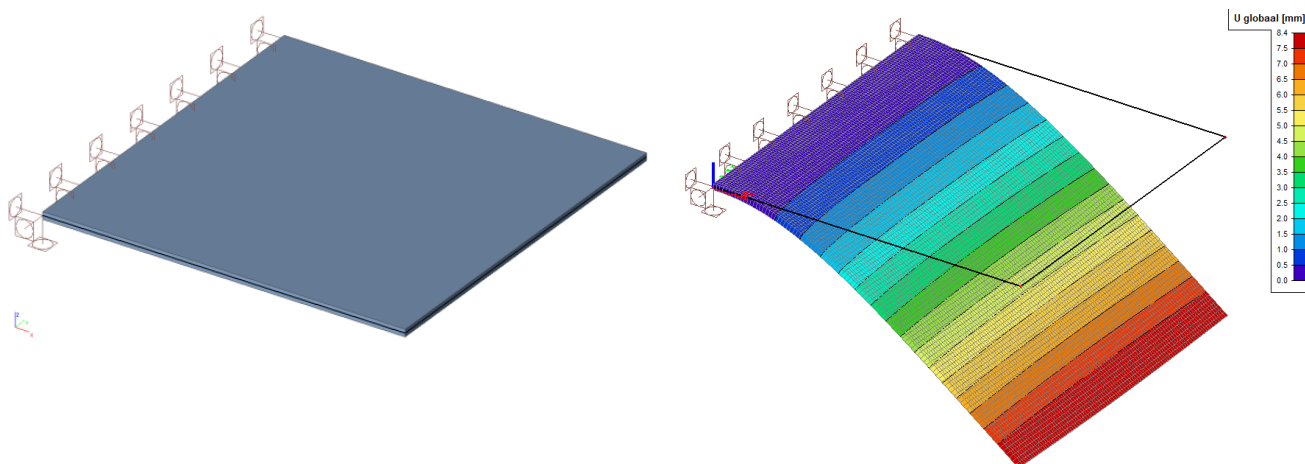


Vergelijking huidig model Kruiswaterbrug in SCIA



Afstudeeronderzoek HSS in brugdekken

Handberekening en netverfijningen



Document : Handberekening en netverfijningen
Revisie : 0
Datum : 4-2-2016
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	4-2-2016	
Gecontroleerd			4-2-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Handberekening en netverfijningen

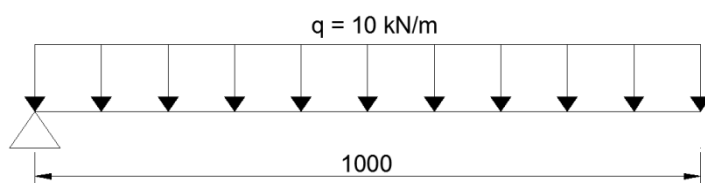
INHOUDSOPGAVE		PAG.
0	INLEIDING SCIA (BASIS)	3
1	HANDBEREKENING	3
2	SCIA MODEL	4
2.1.1	Reactiekracht en optredend moment	4
2.1.2	Dwarscontractie	4
2.1.3	SCIA model zonder netverfijning	5
2.1.4	SCIA model met een fijne netverdeling	5
2.1.5	SCIA model met een grove netverfijning	6
2.1.6	SCIA met dwarscontractie	6
2.2	Overzicht resultaten	8
3	CONCLUSIE	8

Handberekening en netverfijningen

0 INLEIDING SCIA (BASIS)

Om inzicht te krijgen in het gebruik van de modelleringsoftware SCIA wordt er een controle gedaan aan de hand van een handberekening. Op de onderstaande afbeelding is een eenvoudige schematische opstelling te zien. Door de spanningen en de doorbuiging te berekenen kunnen de resultaten vergeleken worden met die van SCIA. Voor de handberekening is het eigen gewicht van het profiel buiten beschouwing gelaten. Het profiel zelf is een plaat van 20 mm dik en 1,0 meter breed.

1 HANDBEREKENING



Schematisering voor de handberekening

Gegevens:

- Belasting: 10 kN/m (in het SCIA model is dit 10 kN/m²)
- L * b * h: 1000 * 1000 * 20 mm
- E- modules: 2,1.10⁵ N/mm²

Eigen gewicht wordt voor zowel SCIA als de handberekening buiten beschouwing gelaten.

Berekening en uitkomst

De reactiekracht	= 10 kN/m * 1,0 m	=	10	kN
Het moment (M = F * a)	= 10 kN/m * 1,0m * 0,5m	=	5,0	kNm

Weerstandsmoment:

W	= (1/6)bh ²	= (1/6) * 1000 * 20 ²	=	66666,67	mm ³
---	------------------------	----------------------------------	---	----------	-----------------

Traagheidsmoment:

I	= (1/12)bh ³	= (1/12) * 1000 * 20 ³	=	666666,67	mm ⁴
---	-------------------------	-----------------------------------	---	-----------	-----------------

Maximale optredende spanning:

σ = M/W	= 5,0.10 ⁶ / 66666,67	=	75,0	N/mm ²
---------	----------------------------------	---	------	-------------------

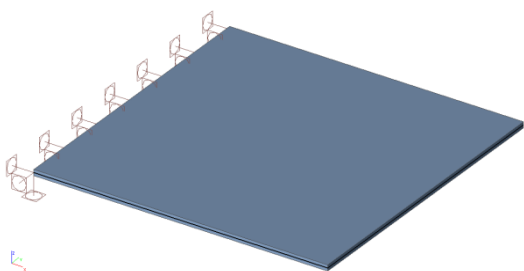
Doorbuiging:

δ = ql ⁴ / 8EI	= 10 * 1000 ⁴ / (8 * 2,1.10 ⁵ * 666666,67)	=	8,929	mm
---------------------------	--	---	-------	----

Handberekening en netverfijningen

2 SCIA MODEL

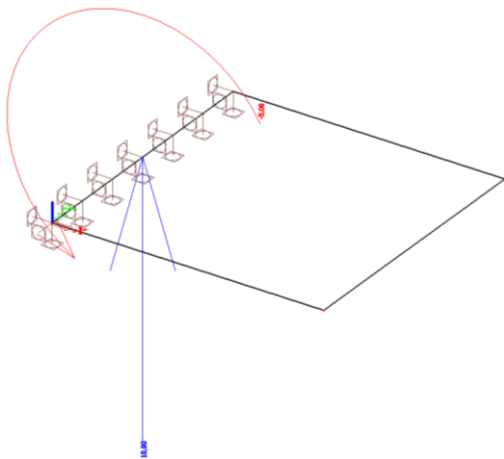
De schematisering van de handberekening is hieronder in 3D afgebeeld. De oplegging is gemodelleerd over de hele rand van 1,0 meter breed. Voor de vergelijking zullen de resulterende krachten, het moment en de doorbuiging worden behandeld. In het SCIA model zal er worden gekeken naar een model zonder netinstellingen, naar een model met grove netverfijningen en naar een model met een hele fijne netverdeling. Hoe fijner de netinstellingen staan, des te nauwkeuriger zijn de resultaten van de optredende spanningen en doorbuigingen.



3D model van de vereenvoudigde schematisering met een verdeelde belasting van 10 kN/m^2 . Bron: printscreen van SCIA

2.1.1 Reactiekracht en optredend moment

In onderstaande afbeelding is het moment en de reactiekracht weergegeven. De berekende waarden uit SCIA komen overeen met die van de handberekening.



Moment van $5,0 \text{ kNm}$ en een reactiekracht van 10 kN . Bron: printscreen van SCIA

2.1.2 Dwarscontractie

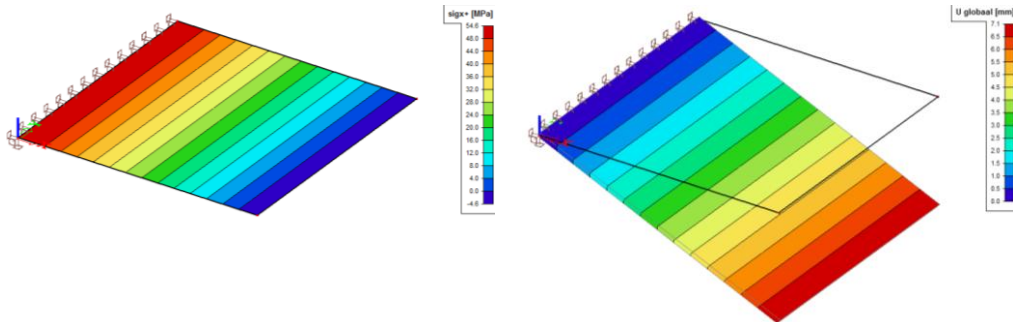
SCIA houdt er rekening mee dat niet alleen spanningen en vervormingen in één richting optreden maar in twee richtingen (x en y richting). Wanneer men hard op een gum of stuk rubber drukt zal deze zowel naar beneden als naar de zijkanten vervormen. Dit fenomeen wordt dwarscontractie genoemd. Bij het maken van handberekeningen wordt geen rekening gehouden met dwarscontractie. Daarom wordt in SCIA voor de vergelijking van de resultaten van de handberekening de poisson coëfficiënt van 0,3 gezet op 0,0001, wat de kleinst mogelijke invoer is.

Handberekening en netverfijningen

2.1.3 SCIA model zonder netverfijning

Een plaat zonder netverfijning levert in SCIA de volgende spanningen en doorbuigingen op:

- Een maximale spanning van 54,6 N/mm²
- Doorbuiging van 7,1 mm

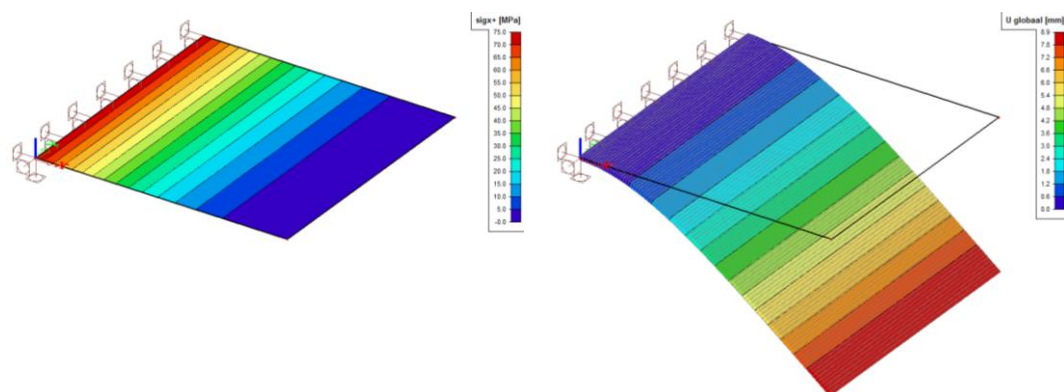


Spanningen en doorbuiging zonder netverfijning. Bron: printscreens van SCIA

2.1.4 SCIA model met een fijne netverdeling

In de afbeelding van de doorbuiging is te zien dat er allemaal kleine blokjes aanwezig zijn. Dit is de ingestelde netverdeling met netten van 10 mm, een zeer fijne verdeling. De vervorming en de verdeling van de spanningen door de constructie zien er niet alleen beter uit maar ook liggen de berekende waarden dichterbij de handberekening dan bij het model zonder netinstellingen. Een plaat met een fijne netverfijning levert in SCIA de volgende spanningen en doorbuigingen op:

- Een maximale spanning van 75,0 N/mm²
- Doorbuiging van 8,9 mm



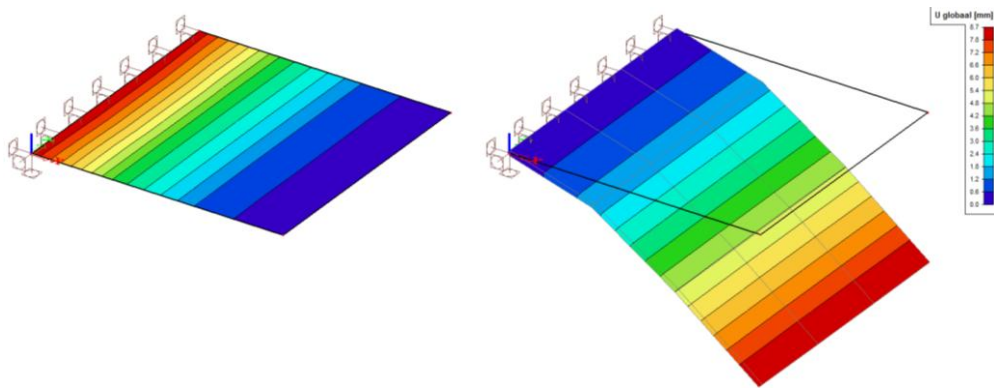
Spanningen en doorbuiging met een zeer fijne netverdeling. Bron: printscreens van SCIA

Handberekening en netverfijningen

2.1.5 SCIA model met een grove netverfijning

Tot slot is er ook nog gekeken naar een SCIA model met een grove netverfijning van 300 mm. De netten in de simulatie van de doorbuiging zijn duidelijk groter dan die bij een fijne netverdeling. Ondanks een grover net valt de doorbuiging maar 0,2 mm lager uit en is de spanning 0,5 N/mm² hoger. Een plaat met een grove netverfijning levert in SCIA de volgende spanningen en doorbuigingen op:

- Een maximale spanning van 75,5 N/mm²
- Doorbuiging van 8,7 mm

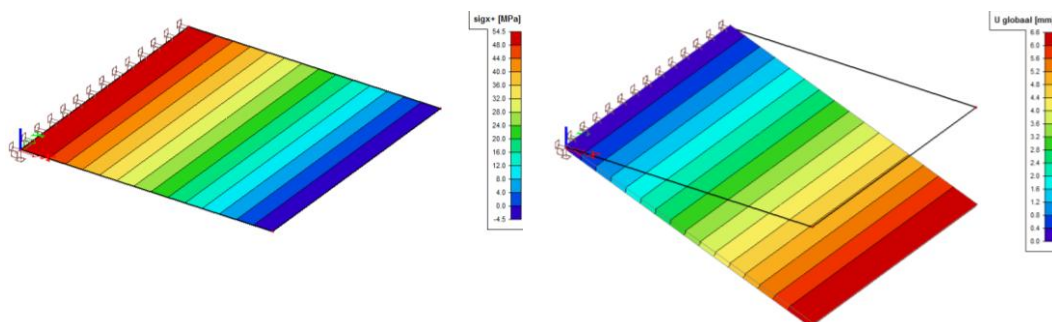


Spanningen en doorbuiging met een grove netverdeling. Bron: printscreens van SCIA

2.1.6 SCIA met dwarscontractie

Om aan te tonen wat de verschillen zijn door de invloed van dwarscontractie worden hieronder de behandelde spanningen en doorbuigingen getoond. De netverfijningen worden hetzelfde gehouden, met als enige verschil dat in de instellingen van SCIA de dwarscontractie (poisson coëfficiënt) wordt teruggezet naar 0,3. Een plaat zonder netverfijning levert in SCIA de volgende spanningen en doorbuigingen op:

- Een maximale spanning van 54,5 N/mm²
- Doorbuiging van 6,6 mm

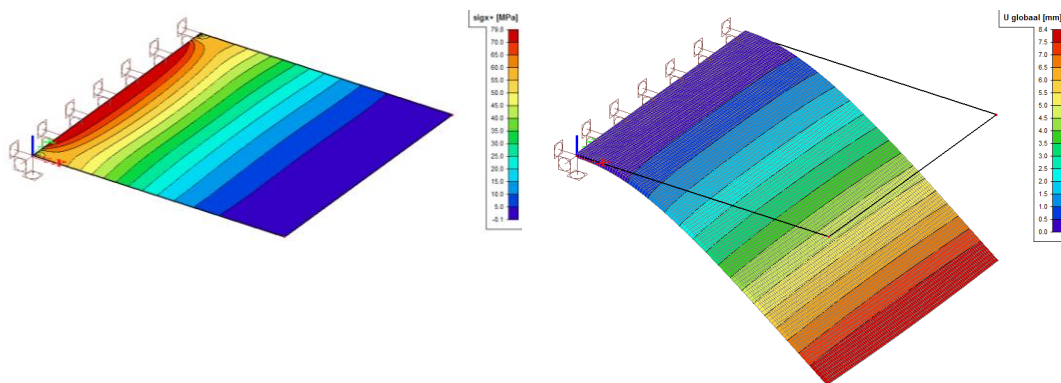


Spanningen en doorbuiging zonder netverdeling. Bron: printscreens van SCIA

Handberekening en netverfijningen

Een plaat met een fijne netverdeling van 10 mm levert in SCIA de volgende spanningen en doorbuigingen op:

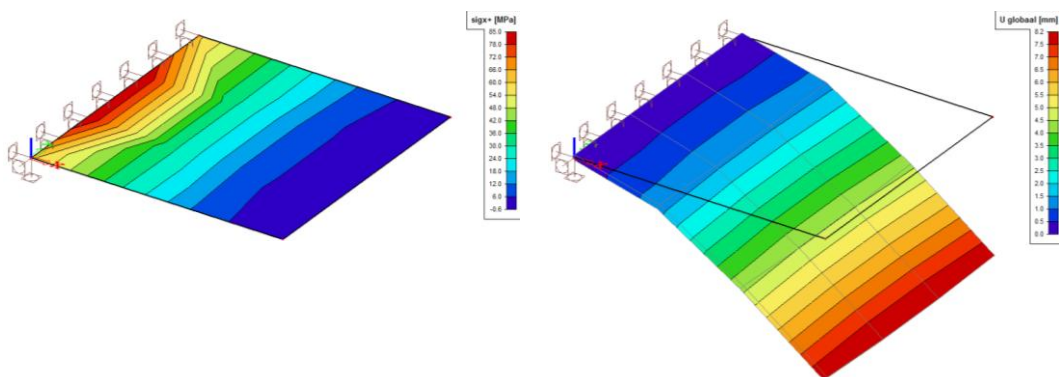
- Een maximale spanning van 79,8 N/mm²
- Doorbuiging van 8,4 mm



Spanningen en doorbuiging met een fijne netverdeling. Bron: printscreens van SCIA

Een plaat met een grove netverdeling van 300 mm levert in SCIA de volgende spanningen en doorbuigingen op:

- Een maximale spanning van 85,0 N/mm²
- Doorbuiging van 8,2 mm



Spanningen en doorbuiging met een grove netverdeling. Bron: printscreens van SCIA

Handberekening en netverfijningen

2.2 Overzicht resultaten

In de onderstaande tabel worden de doorbuigingen en spanningen overzichtelijk weergegeven voor de hierboven behandelde situaties.

Tabel: Overzicht met de resultaten van de verschillende simulaties

model	netverdeling	spanning	doorbuiging
Zonder dwarscontractie	geen	54,6 N/mm ²	7,1 mm
	Fijn 10 mm	75,0 N/mm ²	8,9 mm
	Grof 300 mm	75,5 N/mm ²	8,7 mm
Met dwarscontractie	geen	54,5 N/mm ²	8,7 mm
	Fijn 10 mm	79,8 N/mm ²	8,4 mm
	Grof 300 mm	85,0 N/mm ²	8,2 mm

De resultaten van de handberekening:

Spanning: 75,0 N/mm²
Doorbuiging: 8,929 mm

3 CONCLUSIE

Met deze eenvoudige controle is aangetoond dat SCIA zeer nauwkeurige resultaten oplevert wanneer de dwarscontractie op 0,001 wordt ingesteld. Hoe fijner de netverdeling, ook wel bekend als mesh, des te nauwkeuriger het resultaat. Wanneer er geen netinstellingen worden toegepast zullen de resultaten bepaald met SCIA niet overeenkomen met de werkelijkheid. Het toepassen van een grove netverdeling zorgt ervoor dat de resultaten enigszins dichter in de buurt komen van de werkelijkheid dan wanneer er geen netverdeling aanwezig is.

In het model van de Kruiswaterbrug zal er wel gebruik worden gemaakt van een dwarscontractie met een coëfficiënt van 0,3. Dit betekent dat niet dezelfde waarden zullen worden verkregen uit een handberekening. In het overzicht van de resultaten is te zien dat geen netverdeling geen optie is. De resultaten van de spanningen zijn dan incorrect.

Voor het huidige en het nieuwe model van de Kruiswaterbrug zal er gebruik worden gemaakt van een grove netverdeling (400 mm). Het model van de brug is vele malen groter dan de simulatie die in dit rapport behandeld is. SCIA heeft bij een nauwkeurige netverfijning veel tijd nodig om de spanningen en vervormingen te laden.

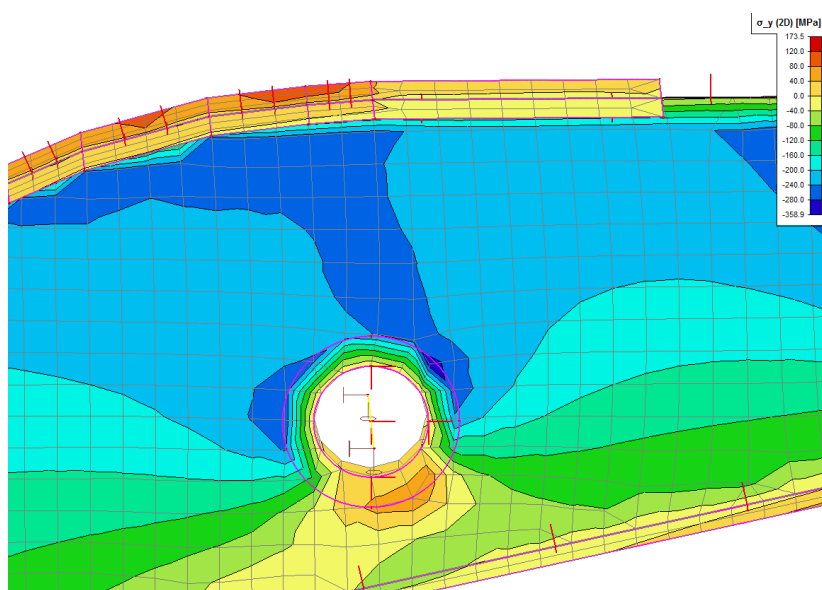
Qua doorbuigingen zullen de resultaten van de vergelijking tussen het huidige model met SCIA en die van ITBB met ANSYS aardig overeenkomen. Doordat de netverdeling grover wordt ingesteld kunnen de spanningen licht afwijken.

Het is niet bekend wat de resultaten zouden zijn wanneer het eenvoudige model zou worden gemodelleerd met ANSYS. Er wordt aangenomen dat ANSYS iets nauwkeuriger is dan SCIA. Het zijn twee verschillende programma's waarbij met SCIA alleen netverdelingen op 2D elementen kunnen worden gemodelleerd. ANSYS werkt beter met solids, wat betekent dat het zelfs met netverdelingen in de dikterichting kan rekenen (3D).



Afstudeeronderzoek HSS in brugdekken

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA



Document : Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA
Revisie : 0
Datum : 17-5-2016
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	17-5-2016	
Gecontroleerd			17-5-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

INHOUDSOPGAVE	PAG.
0 INLEIDING NIEUW ONTWERP KRUISWATERBRUG	3
1 AANGEPASTE MODEL	4
2 MIDDELSTE DWARSDRAGER	5
2.1 Klassebepaling	5
2.2 Plooi middelste dwarsdrager	7
2.3 Vervorming middelste dwarsdrager	7
2.4 Spanningen in de middelste dwarsdrager	7
3 DEKPLAAT	8
4 LIJF HOOFDLIGGER RONDOM HET DRAAIPUNT	9
4.1 Klassebepaling lijf nabij het draaipunt	9
4.2 Model	10
4.3 Knik	11
4.4 Spanning en temperatuur	13
4.4.1 Model met temperatuur	14
4.4.2 Uitkomst	15
5 HOOFDLIGGER ONDER HET BRUGDEK	16
5.1 Klassebepaling hoofdligger	16
5.2 Model en optredende spanningen	17
5.3 Controle plooi met S460	19
5.4 Controle plooi met S355	21
5.5 Vervorming van de hoofdligger	22
6 TROGGEN EN HAMERKOPPLAAT	23
6.1 Vervorming	23
6.2 Spanningen in de troggen	24
6.3 Hamerkopplaat	25
6.4 Vervormingen	26
7 VOOR- EN ACHTERHAR	28
8 OPLEGGINGEN	30
9 CONCLUSIE	32



Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

0 INLEIDING NIEUW ONTWERP KRUISWATERBRUG

De volgende stap in het onderzoek is het huidige model van de Kruiswaterbrug te optimaliseren. De brug wordt qua maten zoveel mogelijk hetzelfde gehouden. Het enige dat verandert zijn de twee dwarsdragers die er tussenuit worden gehaald. De gerealiseerde Kruiswaterbrug heeft vijf dwarsdragers. Verder worden de plaalementen smaller gemaakt. In dit rapport wordt aangetoond dat de gedane optimalisaties vallen binnen de geldende eisen en regelgevingen. Bij de aanpassingen van het basismodel waarin de uitgangspunten goed zijn opgesteld (Bijlage 8), moeten met een aantal zaken rekening worden gehouden.

Vervormingen:

- De vervormingen op de voor- en achterhar. De toegestane vervorming op de achterhar is 6,0 mm, die op de voorhar bedraagt 5,0 mm.
- Voor de overige doorbuigingen geldt $0,002 \cdot L$

De doorbuigingen die naast de voor- en achterhar worden gecontroleerd zijn die van de troggen en de hoofdligger. Voor de troggen wordt de overspanning twee keer zo groot. Mogelijk moeten deze worden aangepast om te voldoen aan de toegestane doorbuiging. De troggen zullen tevens iets meer doorbuigen doordat de dekplaat van 22 naar 18 mm gaat. Omdat de doorbuigingen van de buitenste dwarsdragers moeten kloppen, is het waarschijnlijk ook nodig deze aan te passen.

Klassebepaling:

- Voor de maximale breedte-dikteverhouding wordt er gekeken naar de onderdelen belast op buiging. Er wordt voor gezorgd dat de samengestelde profielen niet boven klasse 3 komen. Een uitzondering is het lijf van de hoofdliggers.

Plooi:

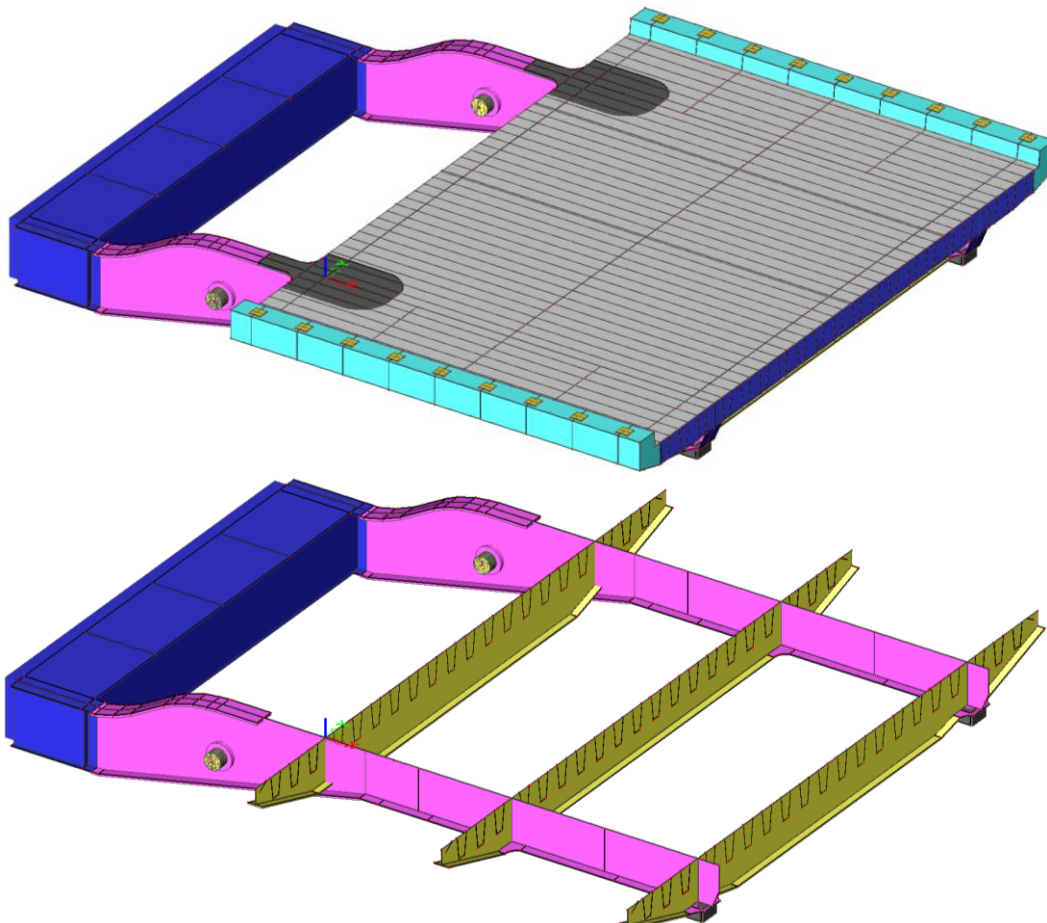
- Door de platen smaller te maken zullen ze gevoeliger worden voor plooi. Bij smallere platen zal de stabiliteit worden aangetoond wanneer het profiel in klasse vier valt.

Uit de onderdelen die tot nu toe behandeld zijn, blijkt dat het waarschijnlijk niet mogelijk is om HSS toe te passen in de voor- en achterhar. Deze liggers vereisen een hoog traagheidsmoment en daarmee een bepaalde hoeveelheid staal om te voldoen aan de toegestane vervormingen. Daarom vallen ze af voor de toepassing van HSS en de optimalisatie van het model. Er wordt in het nieuwe ontwerp alleen rekening mee gehouden dat ze voldoen qua doorbuiging. De middelste dwarsdrager zal wel worden geoptimaliseerd evenals de hoofdliggers.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

1 AANGEPASTE MODEL

Het nieuwe model van de Kruiswaterbrug zal worden uitgevoerd met drie dwarsdragers in plaats van vijf. Door de platen te verdunnen moeten de staalspanningen worden verhoogd. Tijdens de aanpassingen zal rekening gehouden worden met het feit dat het model voldoet aan de toegestane vervormingen. Hieronder is het nieuwe model zichtbaar:



Overzicht van de veranderingen van het model. Bron: SCIA

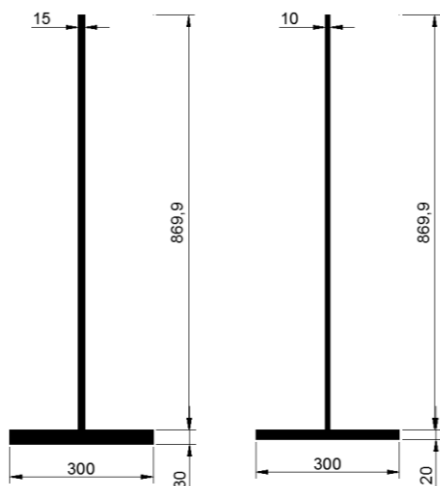
In de volgende hoofdstukken zullen de aanpassingen per onderdeel worden behandeld. De gedane optimalisaties zullen daarbij worden onderbouwd. De volgende onderdelen komen aan bod:

- Middelste dwarsdrager: aanpassingen van het lijf en de flens;
- Dekplaat: toepassen van een dunnere dekplaat;
- Lijf hoofdligger rondom het draaipunt: dunner modelleren van het lijf;
- Hoofdligger onder het brugdek: aanpassingen van de flens en het lijf;
- Troggen en hamerkopplaat: toepassen van een ander formaat trog en een dunnere kamerkopplaat;
- Voor- en achterhar: aanpassingen die nodig zijn voor de voor- en achterhar.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

2 MIDDELSTE DWARSDRAGER

Aan de middelste dwarsdrager worden twee aanpassingen gedaan. De flens zal van 30 mm worden gewijzigd naar 20 mm dik. Het lijf zal van 15 mm omgezet worden naar 10 mm. Op de onderstaande tekeningen is het verschil overzichtelijk weergegeven.



De middelste dwarsdrager van het oude en het nieuwe model

2.1 Klassebepaling

Voor zowel het lijf als de flens zal worden gekeken of het samengestelde profiel nog binnen klasse drie valt. De bepalingen berusten op de informatie van de tabellen 5.2 uit de NEN-EN 1993-1-1+C2:2011.

Voor de ϵ , die nodig is voor de bepalingen, is de onderstaande formule van toepassing. De formule is toegepast voor zowel S460 als S355.

$$\begin{aligned}\epsilon &= \sqrt{235 / f_y} \\ \epsilon &= \sqrt{235 / 460} = 0,71 [-] \\ \epsilon &= \sqrt{235 / 355} = 0,81 [-]\end{aligned}$$

Voor de bepalingen van de dwarsdrager en de andere onderdelen wordt een benadering gehanteerd die berust op een situatie waarin het onderdeel op buiging wordt belast. Voor de bepaling wordt telkens gebruik gemaakt van de 0,71 die hoort bij S460. Het spreekt voor zich dat de bepaling met S355 gunstiger uitvalt doordat er gebruik wordt gemaakt van 0,81.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

Tabellen 5.2: Maximale breedte-dikteverhoudingen voor op druk belaste onderdelen. Bron: NEN-EN 1993-1-1+C2:2011

Inwendige op druk belaste onderdelen

				Buigingsas		
				Buigingsas		
Klasse	Onderdeel belast op buiging	Onderdeel belast op druk	Onderdeel belast op druk en buiging			
Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	Indien $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ Indien $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	Indien $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ Indien $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	Indien $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ Indien $\psi > -1$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Uitragende flenzen

Gewalste profielen		Gelaste profielen				
Klasse	Onderdeel belast op druk	Onderdeel belast op druk en buiging				
		Uiterste vezel onder druk	Uiterste vezel onder trek			
Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Spanningsverdeling in de onderdelen (druk is positief)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 2 t \sqrt{k_{\sigma}}$ Voor k_{σ} zie EN 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Lijf middelste dwarsdrager:

Voor de dikte van het lijf wordt een t_w van 10 mm genomen (een reductie van 5 mm)

Om in ieder geval in klasse drie te vallen geldt de volgende formule uit tabel 5.2:

$$c/t \leq 124 \varepsilon$$

$$869,9 / 10 \leq 124 * 0,71$$

$$86,99 \leq 88,04$$

Dikte 10 voor de middelste dwarsdrager blijft net in klasse 3. Wanneer de lasdikte zou worden weggelaten, dan zit de doorsnede zeker in klasse 3.

Flens middelste dwarsdrager:

$$c/t \leq 14 \varepsilon$$

$$145 / 20 \leq 14 * 0,71$$

$$7,25 \leq 9,94$$

De flens bevindt zich net als het lijf in klasse 3.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

2.2 Plooi middelste dwarsdrager

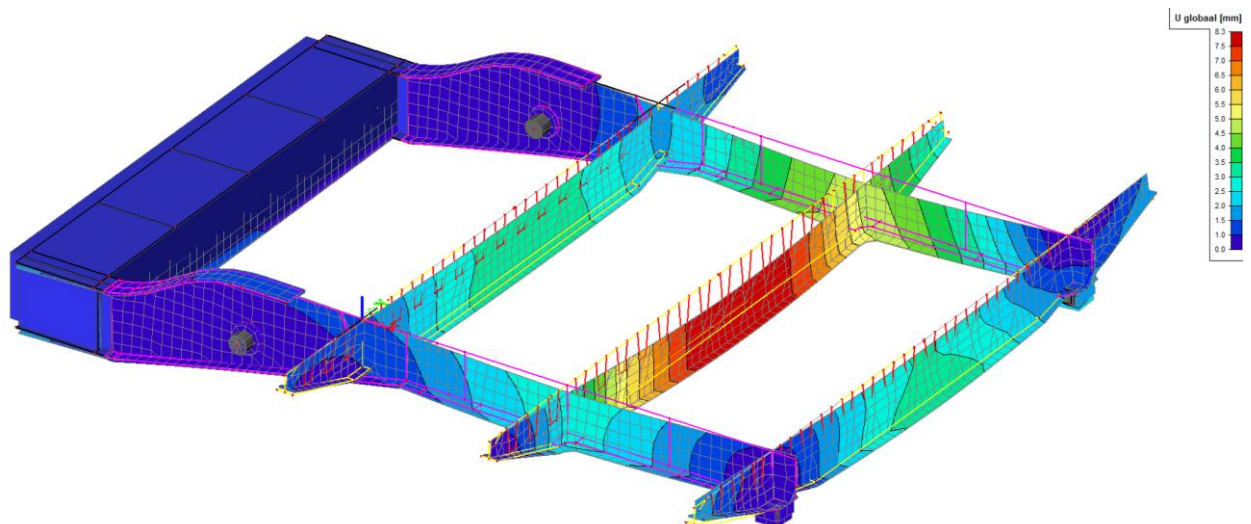
Door de aanwezigheid van de verbindingen van troggen zijn er geen grote plaatvelden waar plooi kan optreden. De plooi controle valt daarom voor dit onderdeel buiten beschouwing.

2.3 Vervorming middelste dwarsdrager

De maximale vervorming die mag plaatsvinden op de middelste dwarsdrager met een overspanningen van 8600 mm bedraagt:

$$0,002 \cdot 8600 = 17,2 \text{ mm}$$

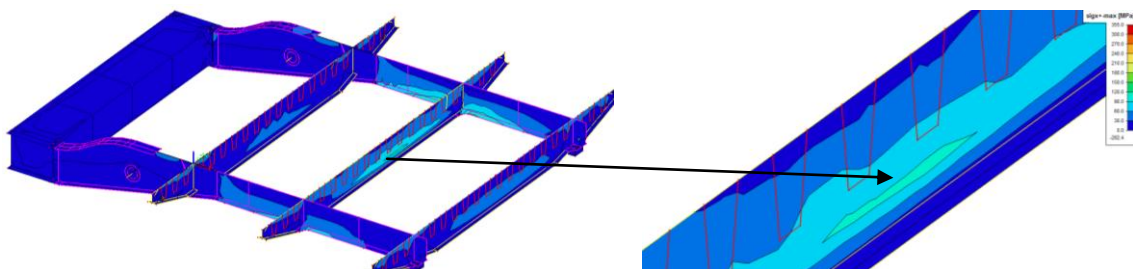
De maatgevende combinatie (BGT) met de TS op de dwarsdrager levert een doorbuiging op van 8.3 mm. Dit betekent dat de doorbuiging voor de verkleining van het profiel nog ruim voldoet. Op de onderstaande afbeelding is de doorbuiging te zien.



Doorbuiging van de middelste dwarsdrager. Bron: SCIA

2.4 Spanningen in de middelste dwarsdrager

Op de onderstaande afbeeldingen is te zien dat, ondanks de aanpassing van het profiel, een relatief lage spanning optreedt. De aanwezige spanning bevindt zich tussen de 90 en 120 N/mm². Voor de toepassing van dit onderdeel biedt S355 een prima alternatief omdat de vloeispanning laag blijft. Vanwege de doorbuiging van het geheel wordt het profiel niet verder verkleind.

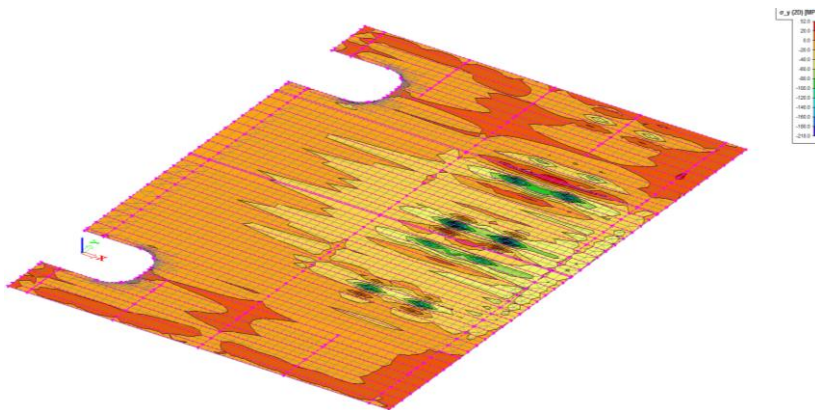


Optredende spanningen in de middelste dwarsdrager. Bron: SCIA

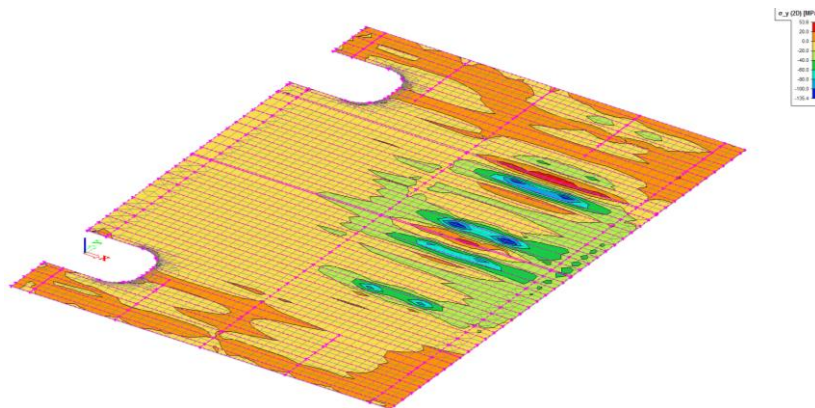
Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

3 DEKPLAAT

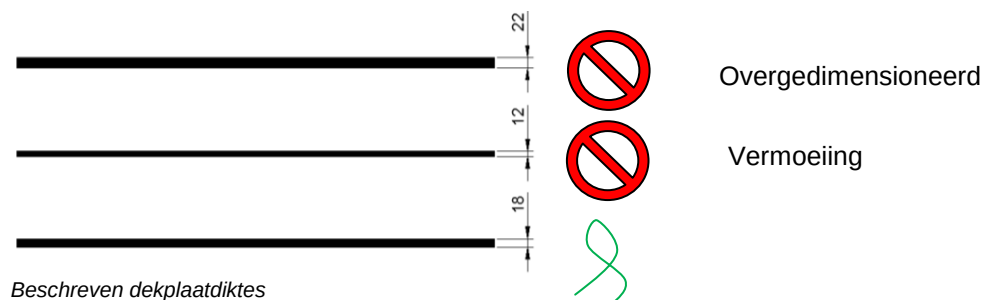
Het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug was overgedimensioneerd vanwege de geluidsafstraling. Een dikte van 22 mm was toegepast. Om spanningen boven de vloegrens van 355 N/mm^2 te krijgen, moet de plaat veel verdund worden. Wanneer de plaat met 10 mm wordt verdund naar 12 mm ontstaan er spanningen van bijna 220 N/mm^2 . Uit ervaringen met vermoeiing blijkt dat te dunne dekken geen optie zijn. De schades aan de Van Brienenoordbrug zijn daar een goed voorbeeld van. In de NEN-EN 1993-2 + NB wordt geadviseerd niet lager te gaan dan 16 mm bij een asfaltlaag van 70 mm. Voor dekken met een slijtlaag moet eerder gebruik gemaakt worden van diktes rond de 20 mm. Dit advies in overweging nemend is er gekozen een dikte van 18 mm toe te passen. Uit de vermoeiingscontrole moet blijken of dit daadwerkelijk toegepast kan worden. Op de onderstaande afbeeldingen is te zien wat de spanningen zijn bij de beschreven plaatdiktes. Het is niet mogelijk hier de spanning van 355 N/mm^2 te overschrijden.



Het dek met een plaatdikte van 12 mm en een spanning van circa 220 N/mm^2 . Bron: SCIA



Het dek met een plaatdikte van 18 mm en een spanning van circa 135 N/mm^2 . Bron: SCIA



Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

4 LIJF HOOFDLIGGER RONDOM HET DRAAIPUNT

Uit het rapport van ITBB over de Kruiswaterbrug bleek dat serieus gekeken diende te worden naar de spanningen rondom het draaipunt. Door het lijf dunner te modelleren dan 40 mm wordt gekeken of de spanningen kunnen worden opgevoerd zodat een hogere staalkwaliteit voordeel biedt.

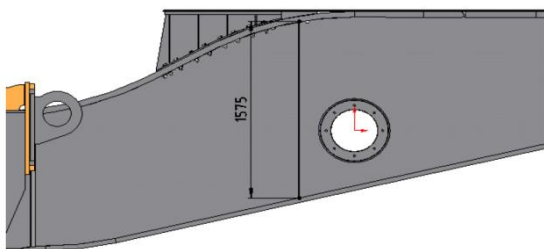
ITBB controleert een aantal punten rondom het draaipunt:

- De klasse waarin het samengestelde profiel valt;
- Knik boven het draaipunt;
- De spanning in het lijf net naast het verdikte element wanneer er een verplaatsing van 4,0 mm plaatsvindt door een temperatuursverandering van 30 Kelvin (ΔT).

Beschreven punten zullen wederom gecontroleerd worden maar dan met de staalkwaliteit S460 en een dunnere lijfplaat.

4.1 Klassebepaling lijf nabij het draaipunt

De grootste hoogte van het huidige model in het lijf van de hoofdligger naast het draaipunt blijft ongewijzigd. Op onderstaande afbeelding is de hoogte 1575 mm weergegeven. De klassebepaling geschiedt volgens tabel 5.2 van de NEN-EN 1993-1-1+C2:2011. Daarvoor moet de ϵ van S460 bepaald worden.



Lijfhoogte net naast het draaipunt. Bron: Rapport ITBB

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

Voor de dikte van het lijf wordt een t_w van 25 mm genomen (een reductie van 15 mm)

Om in ieder geval in klasse drie te vallen geldt de volgende formule uit tabel 5.2:

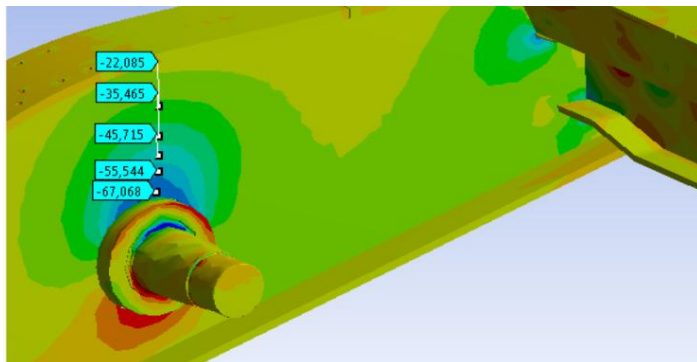
$$\begin{aligned}c/t &\leq 124 \epsilon \\ 1575 / 25 &\leq 124 * 0,71 \\ 63 &\leq 88,04\end{aligned}$$

Ondanks het feit dat de staalkwaliteit hoger en het lijf dunner wordt, blijft het profiel in klasse drie. Dit betekent dat het lijf ten gevolge van buiging ongevoelig is voor plooi. Tevens is het lijf naast het draaipunt niet gevoelig voor knik omdat de kracht hier niet wordt ingeleid. Dit geldt wel voor het lijf boven het draaipunt.

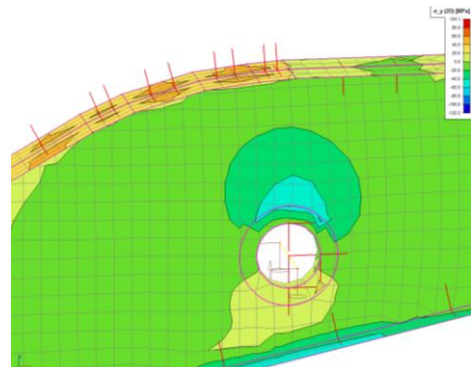
Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

4.2 Model

In Bijlage 8 zijn de spanningen en vervormingen vergeleken met de resultaten van ITBB. De spanning die nodig is voor de knikcontrole is niet in de vergelijking opgenomen. Om zeker te zijn dat het onderzoek klopt, wordt deze spanning alsnog gecontroleerd. Op de onderstaande afbeelding zijn de spanningen te zien die ITBB heeft berekend met behulp van ANSYS. Daarnaast is het model uit SCIA geplaatst. Omdat het gaat om een nauwkeurige inleiding van de spanningen is nu een fijnere netverdeling toegepast van netten van 100 mm. Bij onderstaande modellen is het lijf 40 mm dik.



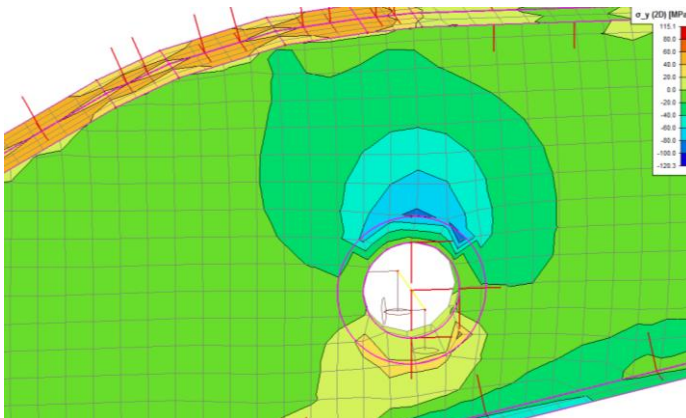
Spanning bij een lijfdikte van 40 mm. Bron: Rapport ITBB.



Spanning bij een lijfdikte van 40 mm. Bron: SCIA

ITBB controleert de knik met een spanning van 55 N/mm^2 . Uit het huidige model met SCIA wordt een spanning gevonden met een waarde van tussen de 40 en 60 N/mm^2 . De spanningen in de verschillende modellen komen overeen.

Nu wordt het lijf dunner gemaakt. De dikte van het lijf wordt in het model verandert van 40 mm naar 25 mm. Dit levert de volgende spanningen op rond het draaipunt:



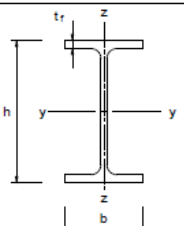
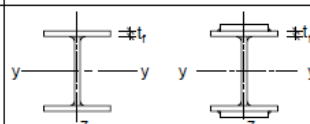
Spanning van $120,3 \text{ N/mm}^2$ bij een lijfdikte van 25 mm. Bron: SCIA

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

4.3 Knik

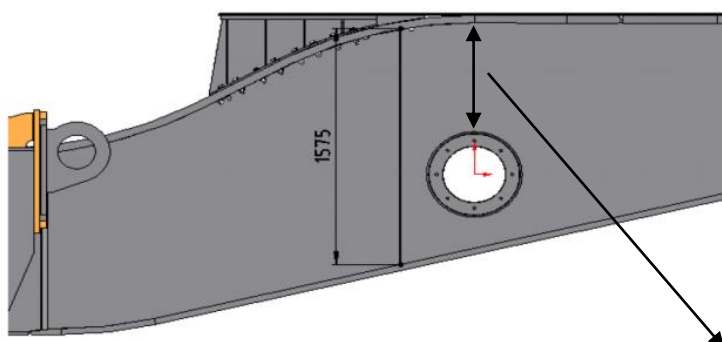
Volgens tabel 6.2 uit de NEN-EN 1993-1-1+C2:2011 is voor dit samengesteld profiel om de z-z as een knikkromme C van toepassing voor S460. Voor de knikberekening is deze kromme bepalend voor de imperfectiefactor α ($\alpha = 0,49$ [-]).

Tabel voor de keuze knikkromme voor doorsneden. Bron: Tabel 6.2 NEN-EN 1993-1-1+C2:2011

Doorsnede		Begrenzingen		Knik om de as	Knikkromme	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Gewalste profielen		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y	a	a ₀
				z - z	b	a ₀
		$h/b \leq 1,2$	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y	b	a
				z - z	c	a
			$t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y - y	b	a
				z - z	d	c
Gelaste profielen		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y	b	b	
			z - z	c	c	
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y - y	c	c	
			z - z	d	d	

Uitgangspunten voor de knikcontrole:

- Dikte lijf = 25 [mm]
- Vloeigrens = 460 [N/mm²]
- Spanning = 120,3 [N/mm²]
- Knikkromme = C [-]
- Imperfectiefactor = 0,49 [-]
- ϵ = 0,71 [-]
- Lcr = hoogte = 750 [mm]
- Materiaalfactor γ_{M1} = 1,0 [-]



$L_{cr} = h = 750 \text{ mm}$

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

Berekening:

Relatieve slankheid

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

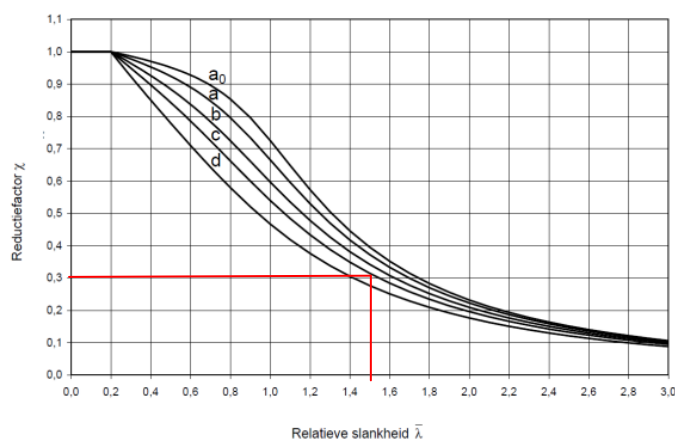
Waarde bepalend voor de reductiefactor

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

Reductiefactor knik

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

Wanneer de relatieve slankheid wordt bekeken in de onderstaande grafiek (figuur 6.4 – knikkromme NEN-EN 1993-1-1+C2:2011) wordt tevens een reductiefactor gevonden van net onder de 0,30 [-].



Grafiek voor de knikkromme met reductiefactor: Bron: Figuur 6.4 NEN-EN 1993-1-1+C2:2011

Knikcontrole

$$\begin{aligned}\sigma_{toel} &= \chi * f_y / \gamma_{M1} &= 137,7 & [N/mm^2] \\ UC &= \sigma_{optredend} / \sigma_{toel} &= 0,87 & [-]\end{aligned}$$

De Knikcontrole voldoet met een UC van 0,87 [-]. ITBB kwam uit op een UC van 0,28 bij een dikte van 40 mm en met S355.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

4.4 Spanning en temperatuur

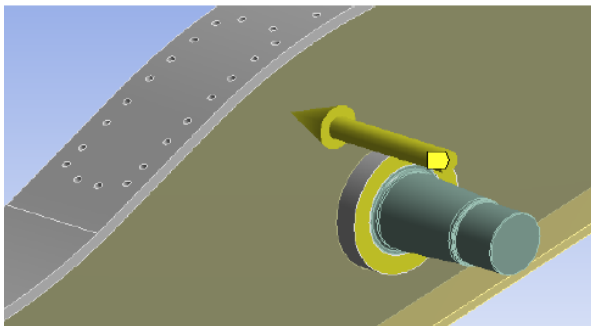
De UC van 0,28 voor de knikcontrole was door ITBB bewust laag gehouden. Door de invloed van temperatuur kan de hoofdligger een horizontale verplaatsing krijgen doordat de scharnieren hier zijn gemodelleerd als vrije lagers. Deze verplaatsing zorgt ervoor dat de spanningen flink toenemen.

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

$$\begin{aligned} \alpha &= 12.10^{-6} \\ L &= 8600 \quad [\text{mm}] \\ \Delta T &= 30 \quad [\text{K}] \end{aligned}$$

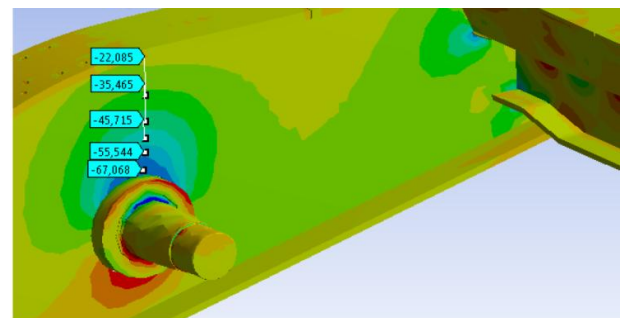
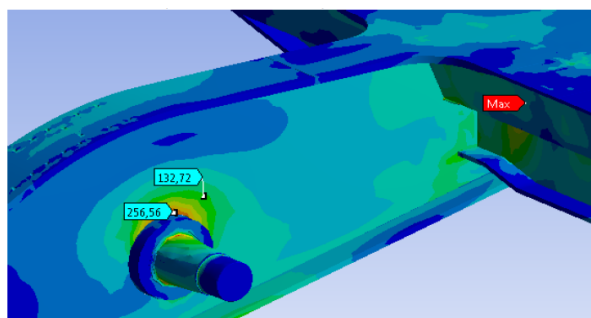
$$\Delta L = 3,096 \quad [\text{mm}]$$

ITBB heeft in het model een horizontale verplaatsing van 4,0 mm aangebracht op de hoofdligger nabij het draaipunt.



Verplaatsing van 4,0 mm. Bron: Rapport ITBB

Op de onderstaande afbeeldingen uit het rapport van ITBB is het gevolg te zien van de verplaatsing voor de optredende spanningen. De spanning die nu maatgevend is, bedraagt 256,56 N/mm² in plaats van de 55 N/mm² die gebruikt werd voor de knikcontrole. De forse toename van de onderstaande spanning is de reden waarom ITBB uitkwam op een lage UC voor knik.

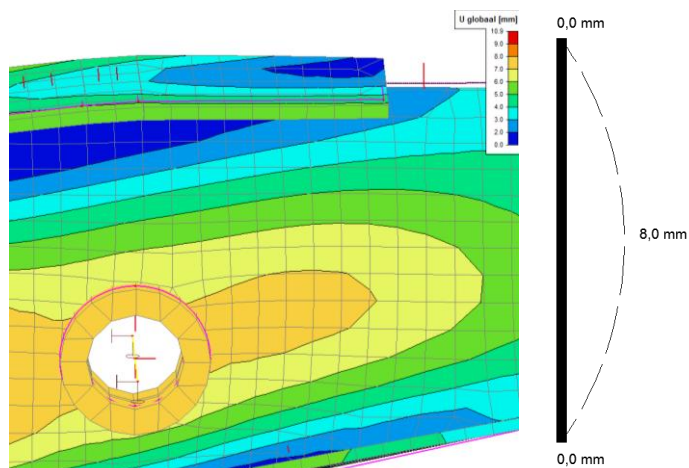


Spanningen met en zonder de invloed van temperatuur. Bron: Rapport ITBB

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

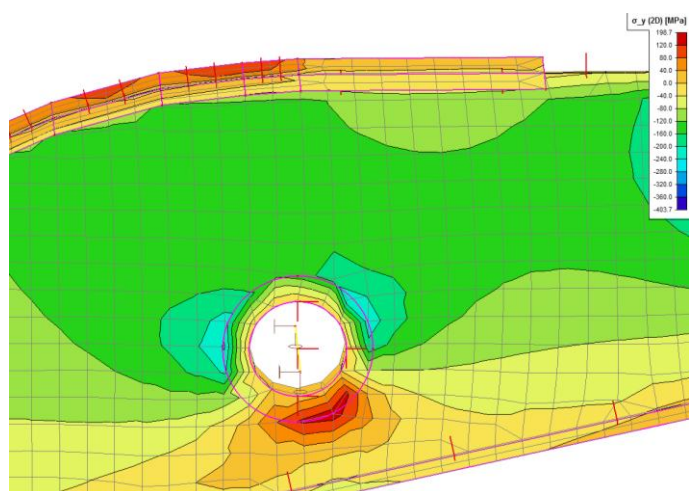
4.4.1 Model met temperatuur

Wederom wordt weer gekeken of het is gelukt met behulp van een verplaatsing de spanningen te laten toenemen. De verplaatsing van het lijf is vereenvoudigd. Met SCIA kan op een 2D plaalement een kromming worden aangebracht. Deze kromming is rondom het draaipunt maximaal 8,0 mm. Deze is twee keer zo groot gemodelleerd omdat er geen verplaatsingen optreden bij de flenzen. Het gemiddelde is dan wel ongeveer 4,0 mm.



Model met de bijbehorende verplaatsingen met een lijfdikte van 40 mm. Bron: SCIA en AutoCAD

SCIA geeft door de aanwezigheid van de verplaatsing net als Ansys een hogere spanning. De hoogste aanwezige spanning is een waarde van tussen de 200 en 240 N/mm². De dikte van het lijf is in de onderstaande simulatie weer 40 mm dik. De spanning neemt dus toe. Zonder de verplaatsing had de spanning een waarde van tussen de 40 en 60 N/mm². Omdat het model niet helemaal exact is overgenomen is het aannemelijk dat de spanningen niet helemaal overeen komen (dit wordt nader verklaard in Bijlage 8). Ook is de verplaatsing ten gevolge van het temperatuursverschil van 30 K iets anders gemodelleerd.

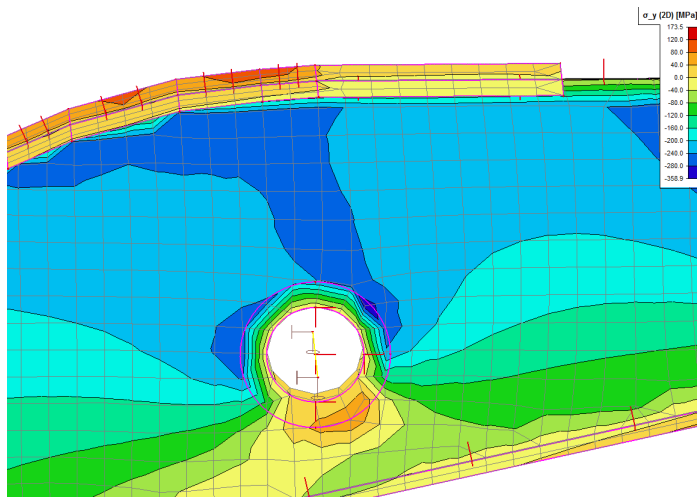


Model met de bijbehorende spanning met een lijfdikte van 40 mm. Bron: SCIA

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

4.4.2 Uitkomst

In SCIA is vervolgens de dikte van het lijf aangepast van 40 mm naar 25 mm. Op de onderstaande afbeelding is te zien dat de spanning flink toeneemt. De maximale spanning bedraagt nu 358,9 N/mm².



Model met de bijbehorende spanning met een lijfdikte van 25 mm. Bron: SCIA

De spanning is door het versmallen van de lijfplaat toegenomen. Door 15 mm dunner te ontwerpen is de spanning toegenomen van 256,56 naar 358,9 N/mm². S355 is in dat geval niet meer in staat deze spanning te kunnen opnemen. Het lijf wordt daarom vervangen door S460. Om deze reden is er voor de knikcontrole meteen gebruikt gemaakt S460 in plaats van S355.

Voor de controle van de spanning met S355 gebruikte ITBB een minimum vloeigrens van 345 N/mm². Wanneer S460 wordt gebruikt bij een staaldikte van 25 mm moet er 440 worden gebruikt volgens onderstaande tabel.

Tabel met mechanische eigenschappen normaalgegleeid staal. Bron: Tabel 5 NEN-EN 10025-3

Aanduiding		Minimumvloeigrens R_{eH}^a MPa ^b Nominale dikte mm								Treksterkte R_m^a MPa ^b Nominale dikte mm			Minimumrek na breuk ^a % $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ Nominale dikte mm					
Volgens EN 10027-1 en CR 10260	Volgens EN 10027-2	≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 100	> 100 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 200	> 200 ≤ 250
S275N	1.0490	275	265	255	245	235	225	215	205	370 t.m. 510	350 t.m. 480	350 t.m. 480	24	24	24	23	23	23
S275NL	1.0491																	
S355N	1.0545	355	345	335	325	315	295	285	275	470 t.m. 630	450 t.m. 600	450 t.m. 600	22	22	22	21	21	21
S355NL	1.0546																	
S420N	1.8902	420	400	390	370	360	340	330	320	520 t.m. 680	500 t.m. 650	500 t.m. 650	19	19	19	18	18	18
S420NL	1.8912																	
S460N	1.8901	460	440	430	410	400	380	370	—	540 t.m. 720	530 t.m. 710	—	17	17	17	17	17	—
S460NL	1.8903																	

^a Voor plaat, band en universeelstaal met breedten ≥ 600 mm geldt de richting dwars (t) op de walsrichting. Voor alle andere producten gelden de waarden in de richting evenwijdig (l) aan de walsrichting.

^b 1 MPa = 1 N/mm²

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

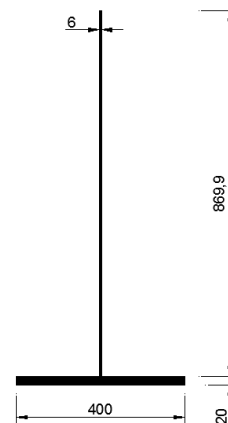
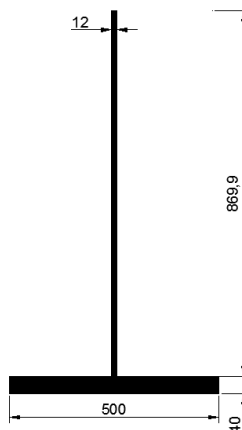
Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

5 HOOFDLIGGER ONDER HET BRUGDEK

De profielafmetingen van het huidige samengestelde profiel van de hoofdligger in het oude en nieuwe ontwerp zijn als volgt:

Huidige model:

Lijf:		
Hoogte	896,9	[mm]
Dikte	12	[mm]
Flens:		
Dikte	40	[mm]
Breedte	500	[mm]



Nieuw model:

Lijf:		
Hoogte	896,9	[mm]
Dikte	6	[mm]
Flens:		
Dikte	20	[mm]
Breedte	400	[mm]



5.1 Klassebepaling hoofdligger

De klassebepalingen berusten weer op de methode beschreven in hoofdstuk 2.1 die van de tabellen 5.2.

Lijf van de hoofdligger:

c/t	$\leq$	124ε
$896,9 / 6$	$\leq$	$124 * 0,71$
$144,98$	$\leq$	$88,04$

Het lijf valt nu in klasse vier wanneer S460 wordt gebruikt met de factor 0,71. Wanneer S355 zou worden toegepast, dan bevindt het lijf zich alsnog in klasse vier. Dit betekent dat het lijf op plooi moet worden gecontroleerd. Een stap die logisch is omdat er opeens grotere plaatvelden ontstaan door het weglaten van twee dwarsdragers.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

Flens van de hoofdligger:

Om de klassebepaling van de flens niet boven klasse 3 te laten komen, wordt er gekeken wat de minimaal mogelijke afmetingen zijn voor het nieuwe ontwerp van de Kruiswaterbrug. Door zo weinig mogelijk staal toe te passen moet de vloeigrens worden opgeschroefd.

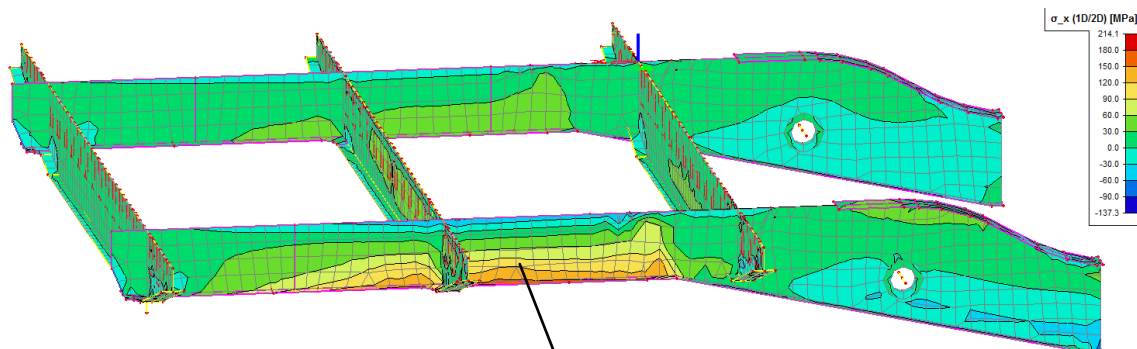
De 'c' uit tabel 5.2 voor een samengesteld profiel is de helft van de breedte min de korte zijde van een hoeklas. Voor het gemak wordt 190 mm aangehouden. De flensdikte die wordt toegepast is 20 mm. Voorheen was dit 40 mm.

c/t	$\leq$	14ϵ
$190 / 20$	$\leq$	$14 * 0,71$
9,5	$\leq$	9,94

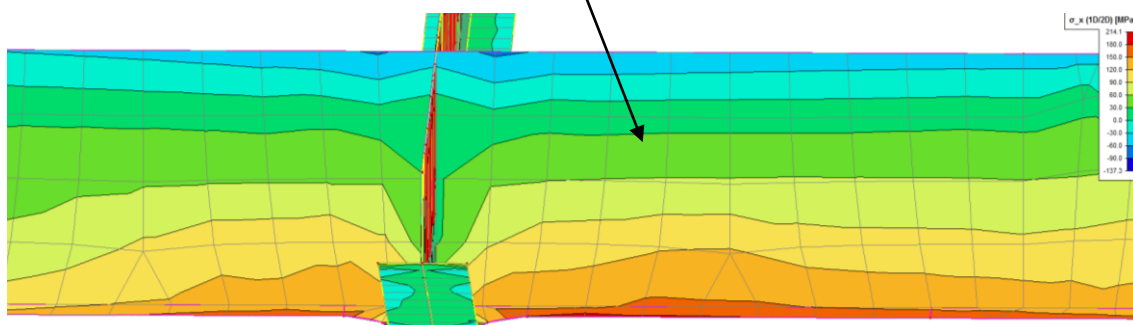
De flens met een dikte van 20 mm bevindt zich in klasse drie. Voor de bepaling van de dikte is de 0,71 toegepast van S460. In geval van S355 komt deze hoger te liggen en dan valt deze tevens in klasse 3.

5.2 Model en optredende spanningen

Voordat de grote vrije plaat van het lijf op plooi gecontroleerd kan worden, worden de spanningen in kaart gebracht. Het valt gelijk op dat de spanningen in het lijf niet boven de 200 N/mm² komen.

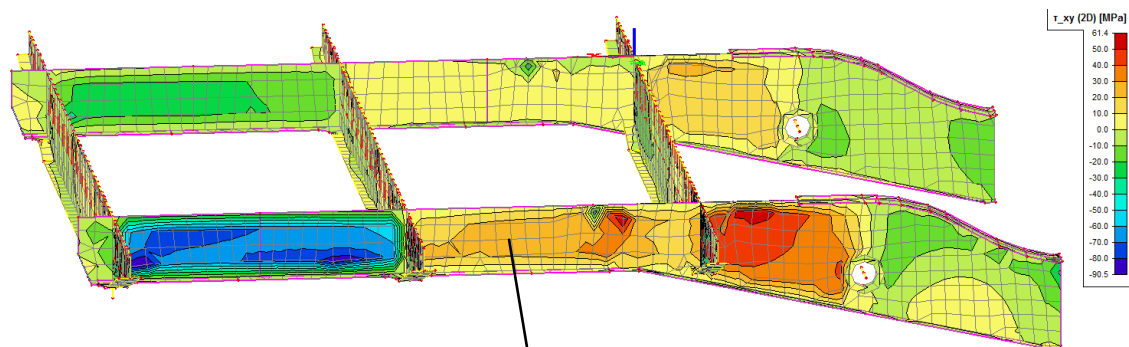


Optredende spanningen in de x richting. Merk op dat de piek van 214,1 N/mm² zich bevindt in de flens. De spanning van 180 N/mm² wordt aangehouden als maximale spanning in het lijf. De minimale spanning bedraagt -137,9 N/mm². Bron: SCIA

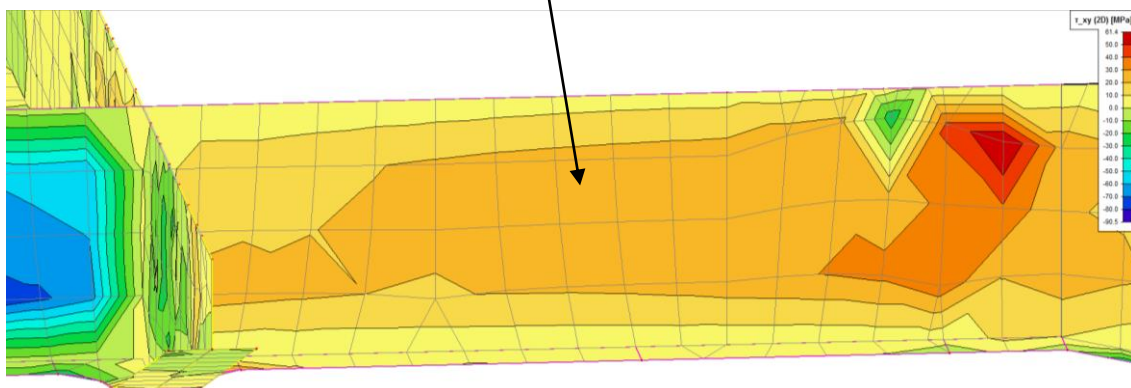


Ingezoomd op de optredende spanningen in de x richting. Bron: SCIA

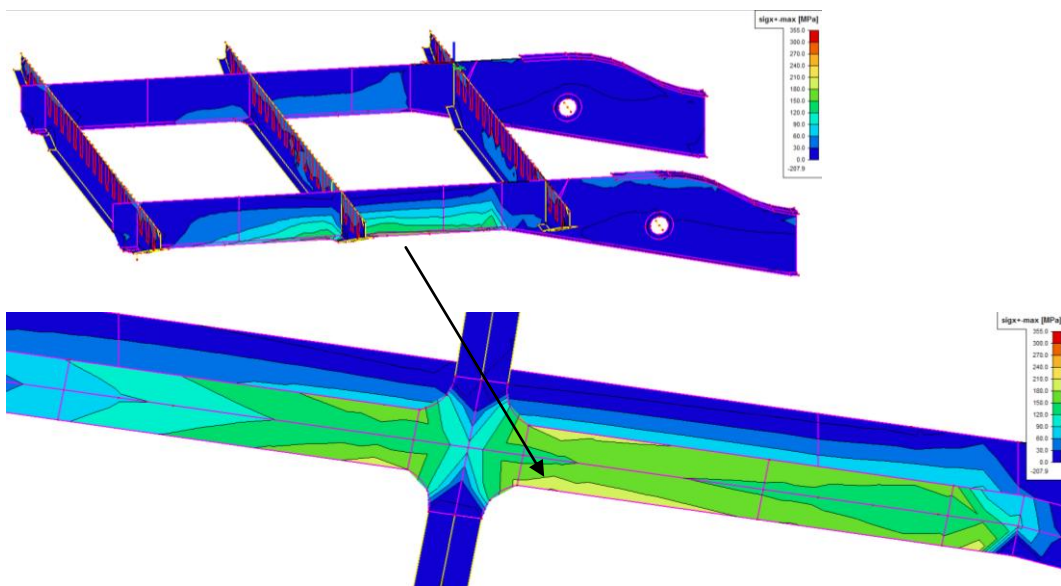
Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA



Optredende schuifspanningen in de xy richting. De schuifspanning zal ervoor zorgen dat het verschijnsel plooi wordt versterkt. In de berekening is het belangrijk om hiermee rekening te houden. Bron: SCIA



Ingezoomd op de optredende schuifspanningen in de xy richting. De plooi wordt in de berekening gecontroleerd in het midden van de plaat. Het is dan logisch dat op die plek ook de spanningen worden afgelezen. Bron: SCIA



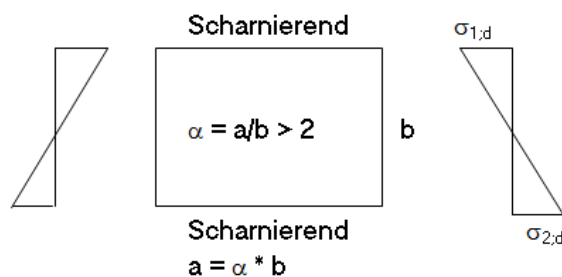
Kijkend naar de omhullende spanningen worden er spanningen van tussen de 210 en 240 N/mm² aangetroffen aan de onderzijde van de flens. Bron: SCIA

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

5.3 Controle plooi met S460

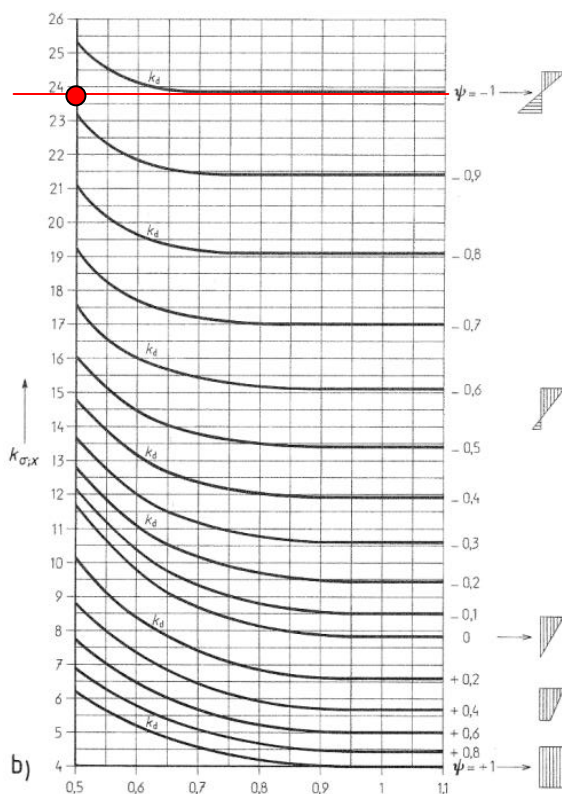
Invoer:

a	=	lengte van de plaat	=	3960	[mm]
b	=	breedte van de plaat	=	869,9	[mm]
t	=	dikte van het lijf	=	6,0	[mm]
E	=	Elasticiteitsmodulus	=	$2,1 \cdot 10^5$	[N/mm ²]
f_{yd}	=	Vloeigrens	=	460	[N/mm ²]
$\sigma_{1;d}$	=	Spanning aan de bovenzijde	=	-137,9	[N/mm ²]
$\sigma_{2;d}$	=	Spanning aan de onderzijde	=	180	[N/mm ²]
τ	=	Schuifspanning	=	30	[N/mm ²]



Berekening:

α	=	a/b	=	4,55	[-]
ψ_x	=	$\sigma_{2;d} / \sigma_{1;d}$	=	-1,31	[-]
k_{σ_x}	=	voor ($\psi_x < -1$)	=	23,88	[-]



Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

$$\begin{aligned}
 k_{\tau} &= 5,35 + 4,0/\alpha^2 &= 5,54 & [-] \\
 \sigma_E &= 19 * (100*t / b)^2 &= 9,03 & [N/mm^2] \\
 \sigma_{i;k;x} &= \sigma_E * k_{\sigma_x} * -1 &= -215,62 & [N/mm^2] \\
 \tau_{i;k} &= \sigma_E * k_{\tau} &= 50,05 & [N/mm^2] \\
 \sigma_{i;k;v} &= \frac{\sqrt{\sigma_{x1;d}^2 + 3\tau^2}}{\frac{1+\psi_{\text{pl}}}{4} * \frac{\sigma_{x1;d}}{\sigma_{i;k;x}} + \sqrt{(\frac{3-\psi_{\text{pl}}}{4} * \frac{\sigma_{x1;d}}{\sigma_{i;k;x}})^2 + (\frac{\tau}{\tau_{i;k}})^2}} &= 170,57 & [N/mm^2] \\
 \lambda_{\text{plt;rel}} &= \sqrt{f_{yd} / \sigma_{i;k;v}} &= 1,64 & [-]
 \end{aligned}$$

(1,291 < $\lambda_{\text{plt;rel}}$ < 2,5) zorgt dat onderstaande formule van toepassing is:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{ploo;rel}} &= 1/\lambda_{\text{plt;rel}}^2 + 0,132 \lambda_{\text{plt;rel}} - 0,17 &= 0,4176 & [-] \\
 \sigma_{\text{ploo}} &= \sigma_{\text{ploo;rel}} * f_{yd} &= 192,09 & [N/mm^2]
 \end{aligned}$$

De grootste optredende spanning in het lijf moet onder de berekende waarde van σ_{ploo} blijven.

$$\text{UC} = \sigma_{2;d} / \sigma_{\text{ploo}} = 0,94 \quad [-]$$

voldoet

De plaat van het lijf van 6 mm dik voldoet volgens bovenstaande plooierekening met S460. Om het verschil aan te tonen wordt ter vergelijking op de volgende bladzijde dezelfde berekening gedaan met een vloeigrens van S355.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

5.4 Controle plooi met S355

Alleen de vloeigrens is anders. De overige invoer verandert niet. In onderstaande berekening staan de verschillen ten opzichte van de controle met S460 dikgedrukt aangegeven.

Invoer:

$$f_{yd} = \text{Vloeigrens} = 355 \quad [\text{N/mm}^2]$$

Berekening:

$$\begin{aligned} \alpha &= a/b = 4,55 \quad [-] \\ \psi_x &= \sigma_{2;d} / \sigma_{1;d} = -1,31 \quad [-] \\ k_{\sigma_x} &= \text{voor } (\psi_x < -1) = 23,88 \quad [-] \\ k_{\tau} &= 5,35 + 4,0/\alpha^2 = 5,54 \quad [-] \\ \sigma_E &= 19 * (100*t / b)^2 = 9,03 \quad [\text{N/mm}^2] \\ \sigma_{i;k;x} &= \sigma_E * k_{\sigma_x} * -1 = -215,62 \quad [\text{N/mm}^2] \\ \tau_{i;k} &= \sigma_E * k_{\tau} = 50,05 \quad [\text{N/mm}^2] \\ \sigma_{i;k;v} &= \frac{\sqrt{\sigma_{x1;d}^2 + 3\tau^2}}{\frac{1+\psi_{\sigma\sigma}}{4} * \frac{\sigma_{x1;d}}{\sigma_{i;k;x}} + \sqrt{(\frac{3-\psi_{\sigma\sigma}}{4} * \frac{\sigma_{x1;d}}{\sigma_{i;k;x}})^2 + (\frac{\tau}{\tau_{i;k}})^2}} = 170,57 \quad [\text{N/mm}^2] \\ \lambda_{pl;rel} &= \sqrt{(f_{yd} / \sigma_{i;k;v})} = 1,44 \quad [-] \end{aligned}$$

(1,291 < $\lambda_{pl;rel}$ < 2,5) zorgt dat onderstaande formule van toepassing is:

$$\begin{aligned} \sigma_{ploo;rel} &= 1/\lambda_{pl;rel}^2 + 0,132 \lambda_{pl;rel} - 0,17 = 0,501 \quad [-] \\ \sigma_{ploo} &= \sigma_{ploo;rel} * f_{yd} = 177,83 \quad [\text{N/mm}^2] \end{aligned}$$

De grootste optredende spanning in het lijf moet onder de berekende waarde van σ_{ploo} blijven.

$$UC = \sigma_{2;d} / \sigma_{ploo} = 1,01 \quad [-]$$

Voldoet niet

De plaat van het lijf van 6 mm dik voldoet volgens bovenstaande plooi berekening niet met S355. Door de verhoging van de vloeigrens is aan de hand van de twee berekeningen te zien dat de UC gunstiger uitvalt (een paar tiende).

S460 met een hogere vloeigrens dan S355 krijgt een hogere σ_{ploo} waarde na de reductie van de vloeigrens.

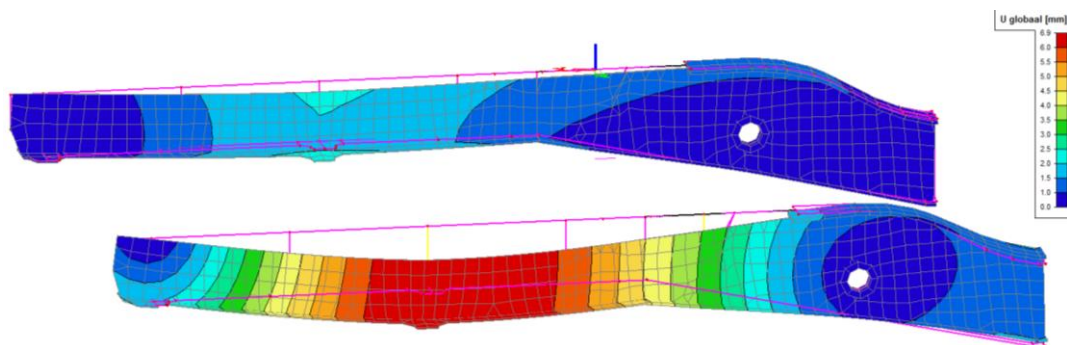
Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

5.5 Vervorming van de hoofdligger

Na het aantonen van de onderdelen op het gebied van spanningen is het nu belangrijk dat ook de doorbuigingen kloppen. In dit hoofdstuk worden alleen de hoofdliggers gecontroleerd. Daarbij geldt dat de maximale doorbuiging van de overspanning niet groter mag zijn dan:

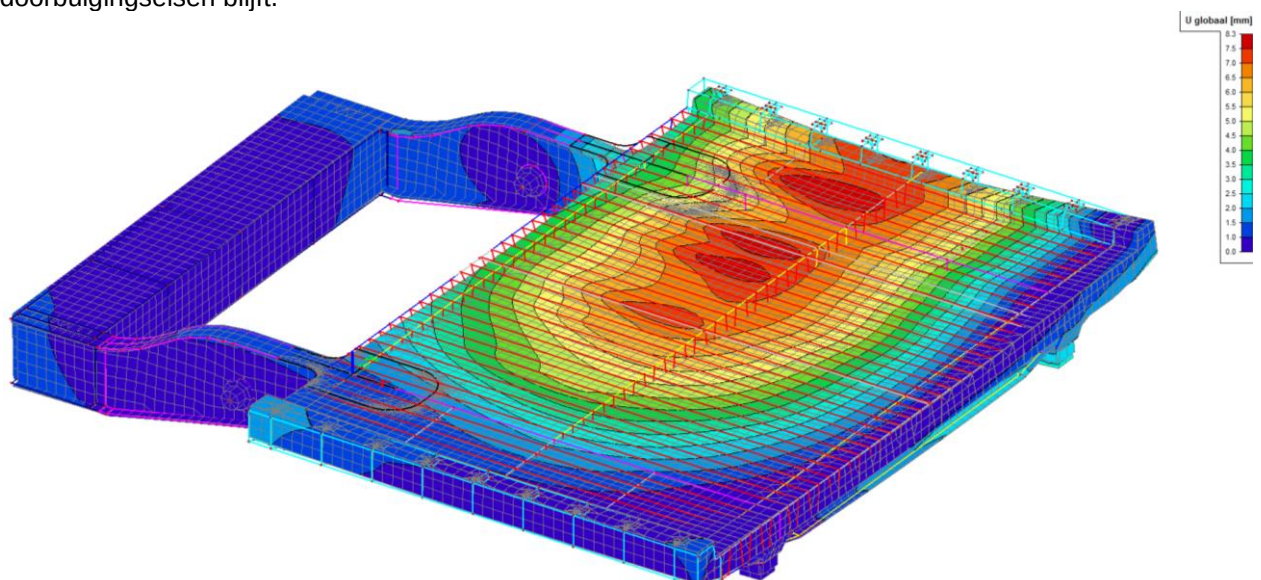
$$\begin{aligned} 0,002 * 7920 &= 15,84 \text{ [mm]} && \text{voor de totale ligger} \\ 0,002 * 3960 &= 7,92 \text{ [mm]} && \text{stuk tussen de dwarsdragers} \end{aligned}$$

De doorbuiging van de hoofdligger bepaalt voor een deel de doorbuiging van de voor- en achterhar. Het is daarom niet mogelijk de grens op te zoeken. De dwarsdragers buigen immers verder waar de hoofdliggers stoppen. Dat betekent dat er voor de dwarsdragers niet wordt gekeken vanaf de nullijn maar vanaf iets daaronder. In hoofdstuk 7 worden de voor- en achterhar behandeld.



Doorbuiging van 6,9 mm van de hoofdligger met het zwaarste TS in het midden en bovenop de ligger in de BGT. Bron: SCIA

De gevonden maximale doorbuiging van de ligger voldoet omdat deze onder de toegestane doorbuigingseisen blijft.



Doorbuigingen van de gehele brug met het zwaarste TS in het midden en bovenop de ligger in de BGT. Bron: SCIA

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

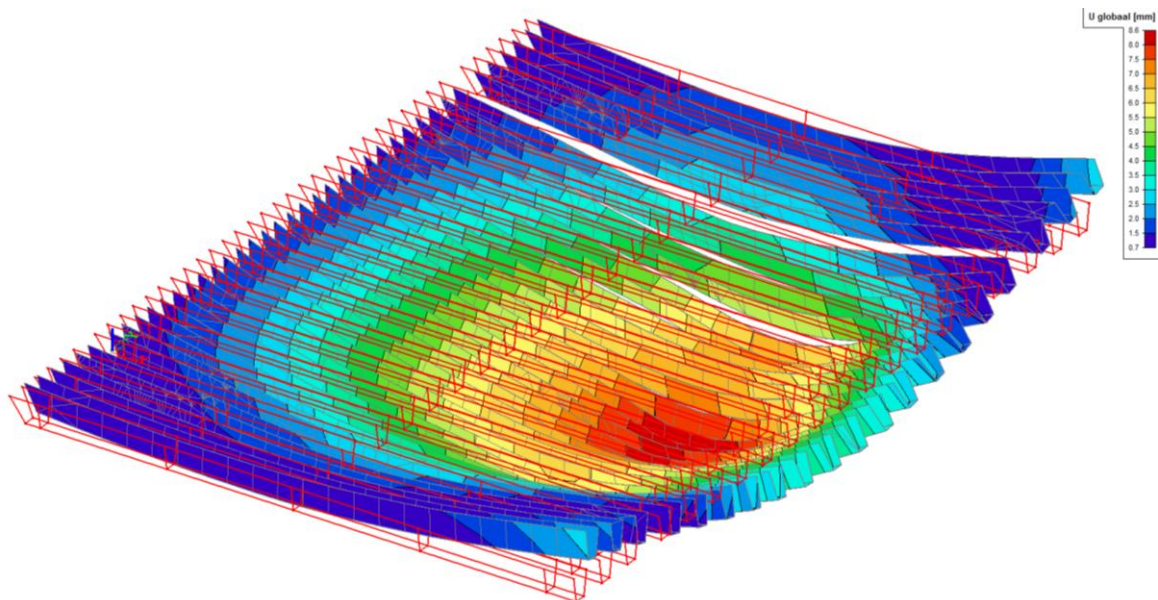
6 TROGGEN EN HAMERKOPPLAAT

6.1 Vervorming

De eerste vraag die gesteld kan worden wanneer er twee dwarsdragers worden verwijderd is of de doorbuiging van de troggen en de dekplaat nog voldoet. Het grootste deel van het traagheidsmoment tegen deze doorbuiging wordt gecreëerd door de troggen die zich onder het dek bevinden. Na het weghalen van twee dwarsdragers wordt de overspanning van de troggen 3960 mm in plaats van 1980 mm. Dat betekent dat de maximale verplaatsing gelijk is aan:

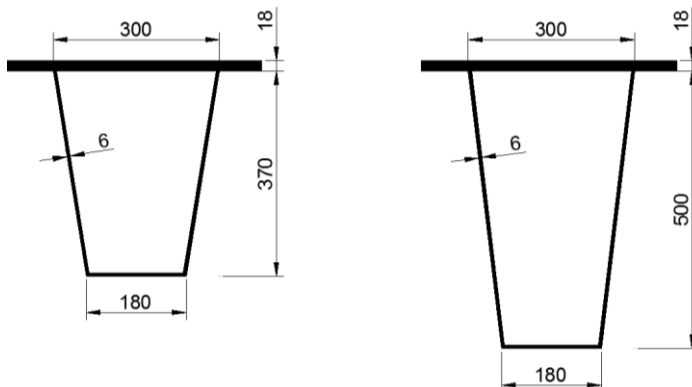
$$0,002 * 3960 = 7,92 \text{ [mm]}$$

Hieronder zijn de huidige troggen gebruikt om de doorbuiging tegen te gaan. Een maximale verplaatsing van 8,6 mm betekent dat er nu niet wordt voldaan aan de vervorming.



De huidige troggen bieden niet genoeg weerstand tegen de vervormingen van de wiellasten. Bron: SCIA

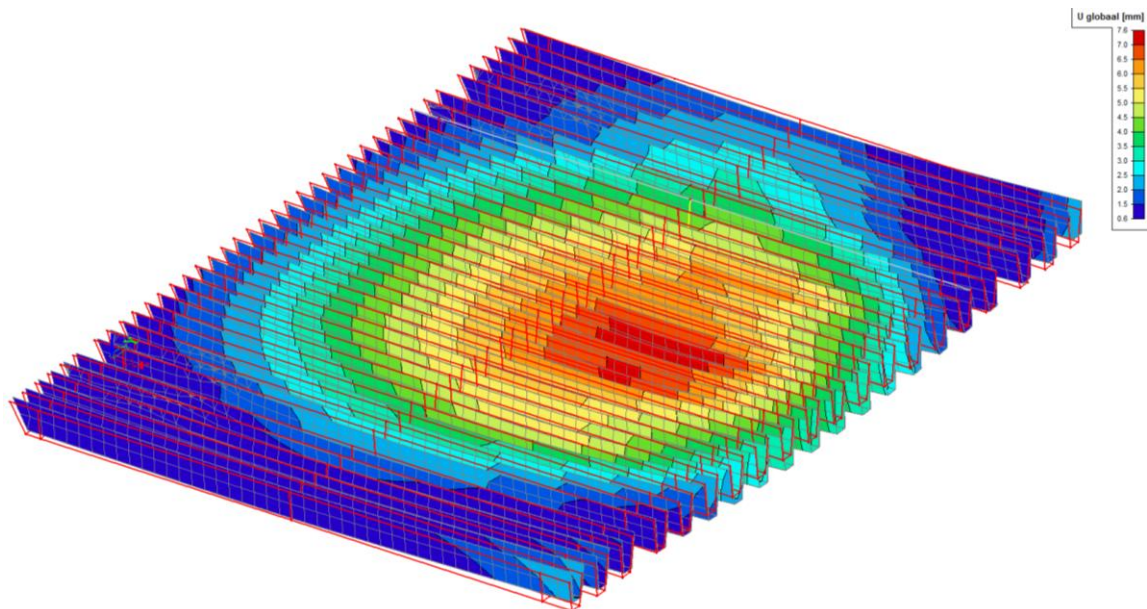
Om het probleem te verhelpen worden de hoogtes van de troggen aangepast van 370 mm naar 500 mm. Dit zorgt voor een hoger traagheidsmoment en een kleinere doorbuiging.



Wijziging in de troggen

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

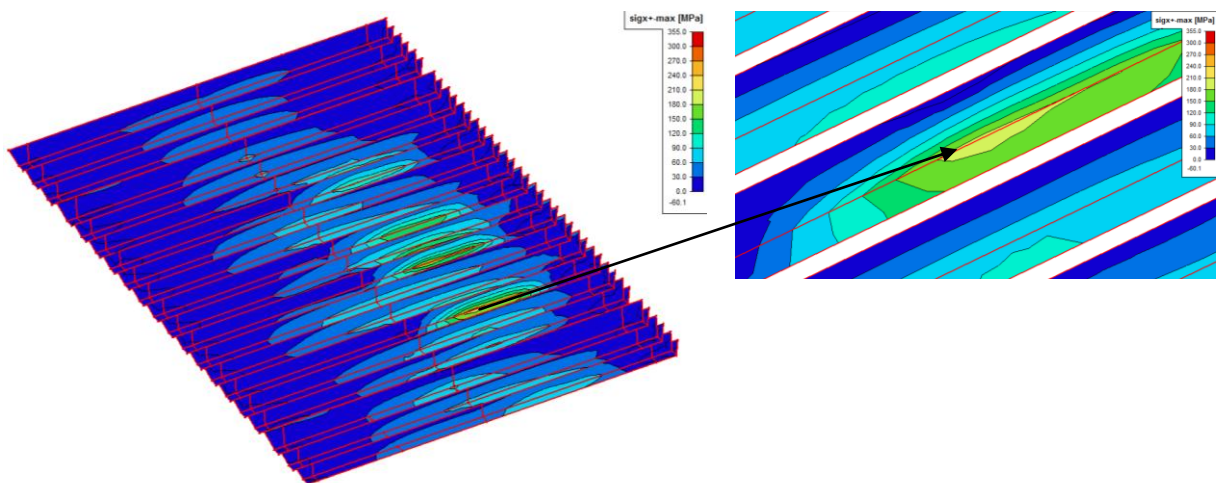
De doorbuiging die in het nieuwe model optreedt met de aangepaste troggen voldoet nu wel. De maximale doorbuiging van 7,6 mm zit net onder de toelaatbare waarde van 7,92 mm.



De nieuwe troggen met de bijbehorende vervormingen. Bron: SCIA

6.2 Spanningen in de troggen

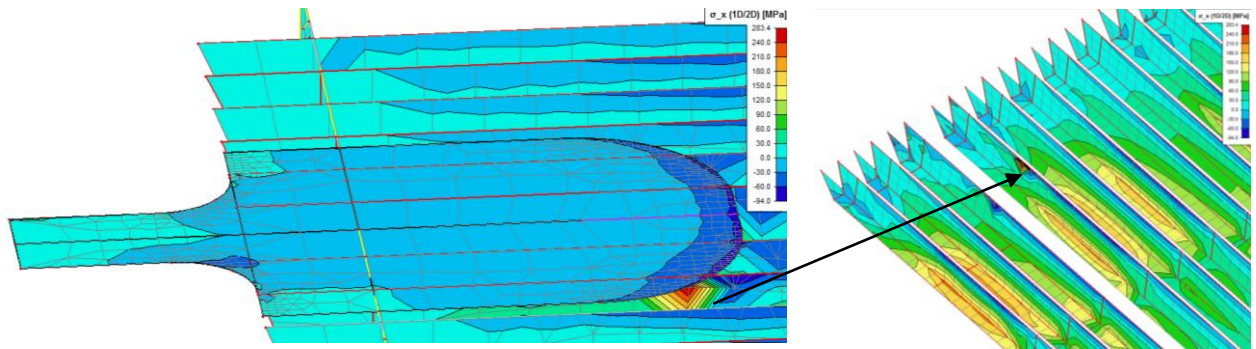
De spanningen die horen bij de doorbuigingen van 6.1 zijn hieronder weergegeven. De maximale waarde bedraagt 210 N/mm².



De optredende spanningen die horen bij de belastingscombinatie van 6.1 (maar dan in de UGT). Bron: SCIA

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

Wanneer de combinatie van de tandemstelsels op de hoofdligger in het midden wordt gezet gaat er een krachtsinleiding door de hamerkopplaat (50 mm dik) naar de troggen. Op deze locatie is er een piek aanwezig van $283,4 \text{ N/mm}^2$. De piek is niet gevonden door ITBB. Onbekend is of ITBB er wel rekening mee hebben gehouden maar het is niet opgenomen in hun rapport. Aan de onderzijde worden wel dezelfde spanningen gevonden als bij de omhullende situaties, namelijk 210 N/mm^2 .

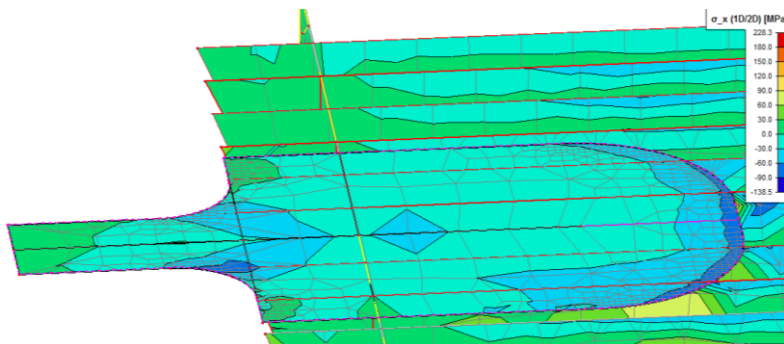


Bovenzijde met de hamerkopplaat en de trog aan de onderzijde met een piek van $283,4 \text{ N/mm}^2$. Bron: SCIA

6.3 Hamerkopplaat

Tot dusver is de hamerkopplaat in het onderzoek onveranderd gebleven. De kracht die erop komt te staan op het moment dat de brug opeen gaat is onbekend. Verder richt dit onderzoek zich alleen op de brug in dichte toestand. Voor de dichte toestand wordt gekeken of het mogelijk is de spanningen toe te laten nemen door de hamerkopplaat te versmallen. De spanning die hoort bij de oorspronkelijke dikte van 50 mm bedraagt 94 N/mm^2 .

Op de onderstaande foto is de plaat uitgevoerd met een dikte van 40 mm. De spanning aan de linkerkant neemt toe tot een waarde rond de 30 N/mm^2 .

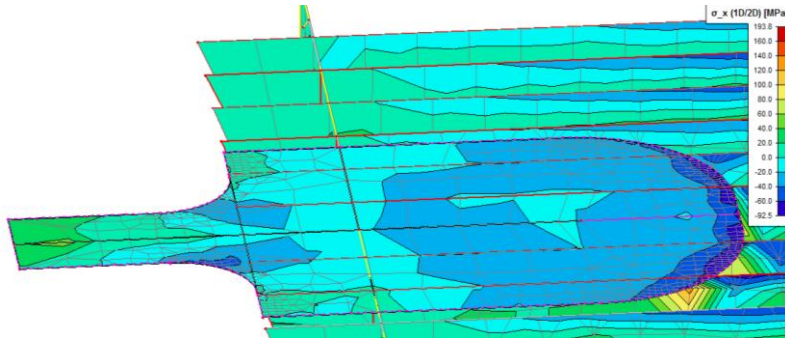


Hamerkopplaat met een dikte van 40 mm. Bron: SCIA

Opvallend is dat de spanningen in de plaat toenemen wanneer deze dunner wordt gemaakt. De optredende piek in de troggen valt hierdoor lager uit.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

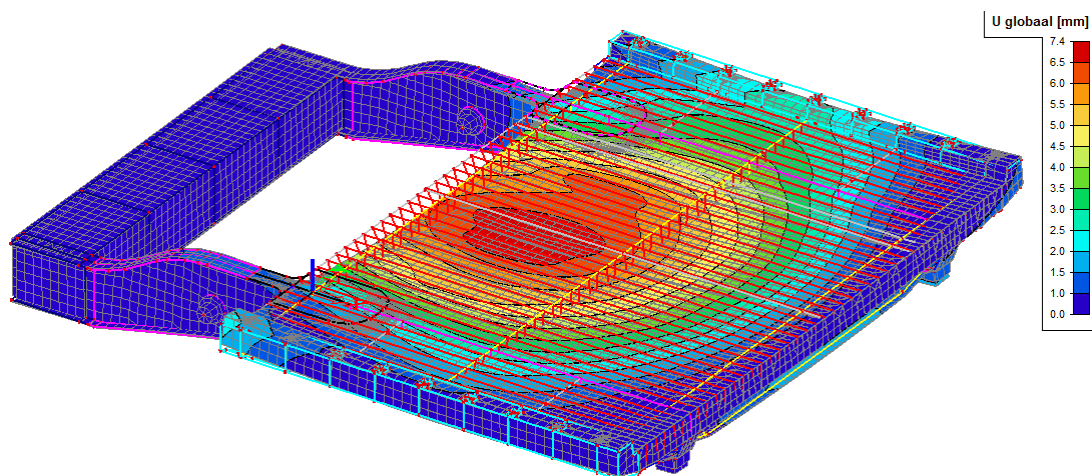
In onderstaande afbeelding is het resultaat te zien van wat er gebeurt wanneer de plaat nog eens 10 mm dunner wordt uitgevoerd. De spanning aan de linkerkant neemt nog meer toe tot 40 N/mm^2 .



Hamerkopplaat met een dikte van 30 mm. Bron: SCIA

6.4 Vervormingen

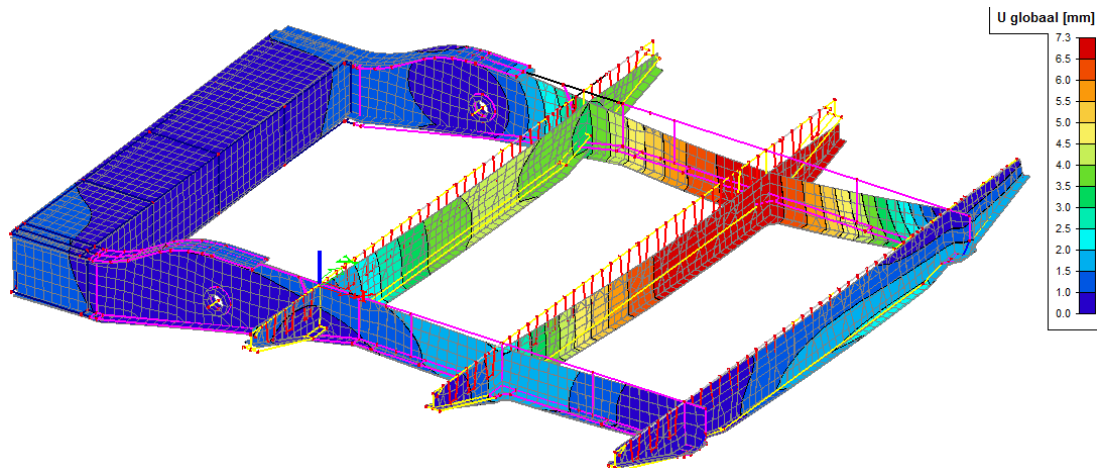
Voordat er gekeken wordt naar de vervormingen en de aanpassingen van de voor- en achterhar zal er eerst worden gekeken of de vervormingen van het geheel door de aanpassing van de hamerkopplaat veranderd zijn. Op de onderstaande afbeelding zijn de vervormingen weergegeven. Op het eerste gezicht verandert niets dat ervoor zorgt dat de brug niet meer voldoet qua doorbuiging.



Vervormingen na de aanpassing van de hamerkopplaat naar 30 mm. Bron: SCIA

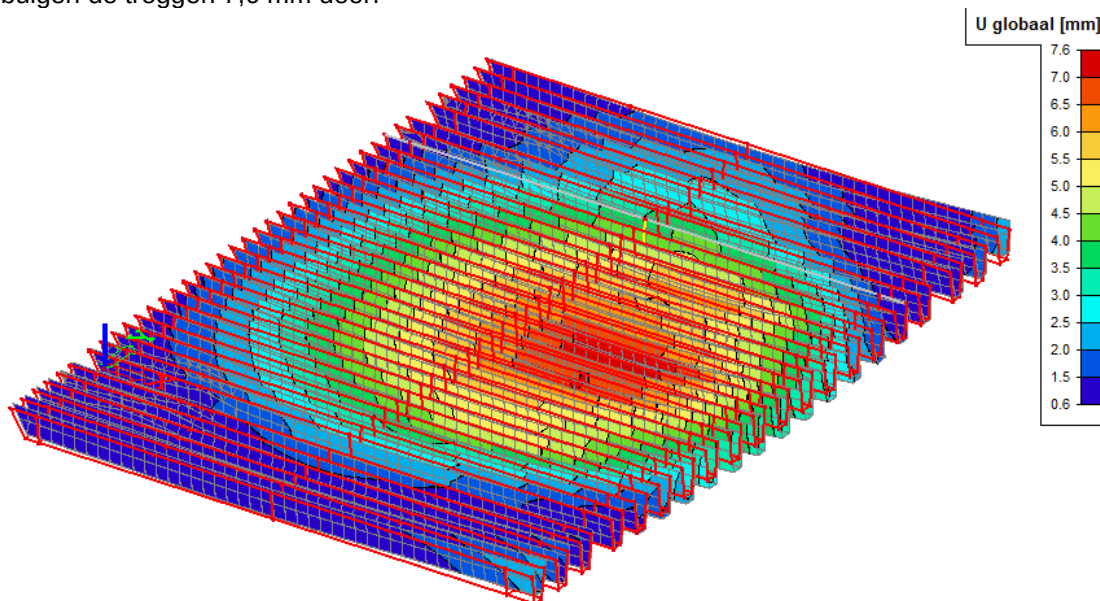
Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

In de onderstaande afbeelding is opnieuw de doorbuiging van de hoofdligger weergegeven. In plaats van 6,9 treedt er nu 7,3 mm doorbuiging op als maximale doorbuiging. De toegestane doorbuiging bedroeg 7,92 mm. Dit betekent dat de constructie nog voldoet aan de vervormingseisen.



Vervormingen na de aanpassing van de hamerkopplaat naar 30 mm op de hoofdligger. Bron: SCIA

Ook de troggen mochten maximaal 7,92 mm doorbuigen. Na het berekenen van de nieuwe doorbuiging buigen de troggen 7,6 mm door.

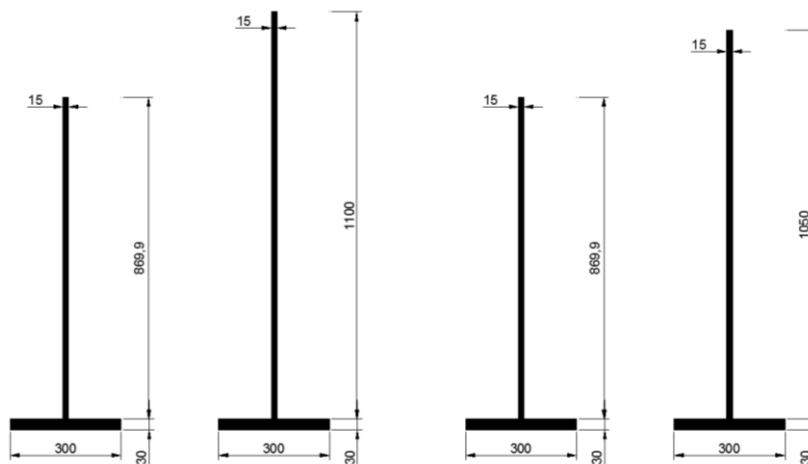


Vervormingen na de aanpassing van de hamerkopplaat naar 30 mm in de troggen. Bron: SCIA

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

7 VOOR- EN ACHTERHAR

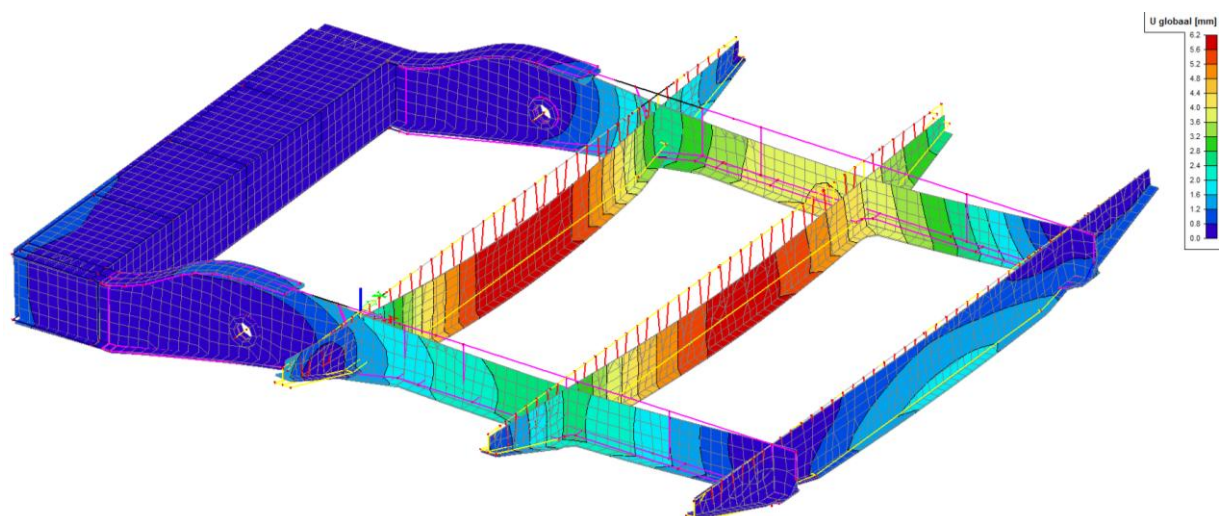
Door het weghalen van twee dwarsdragers wordt de constructie gevoeliger voor doorbuiging. Ook het versmallen van de behandelde onderdelen draagt hiertoe bij. Om te voldoen aan de gestelde eis voor de doorbuiging van de voor- en achterhar dienen de volgende aanpassingen aan de buitenste dwarsdragers te worden gedaan:



Voor en achterhar worden niet voorzien van smallere elementen. De reden hiervoor is de eis van de doorbuiging maximaal 5,0 mm. Ze zullen juist iets worden verhoogd om het traagheidsmoment te vergroten.

Achterhar:

Voor de doorbuiging was gesteld dat ongeveer 6,0 mm werd aangehouden om te kunnen voldoen aan de gestelde eisen voor de Kruiswaterbrug. Na de aanpassing van de achterhar wordt een doorbuiging verkregen van 6,2 mm.



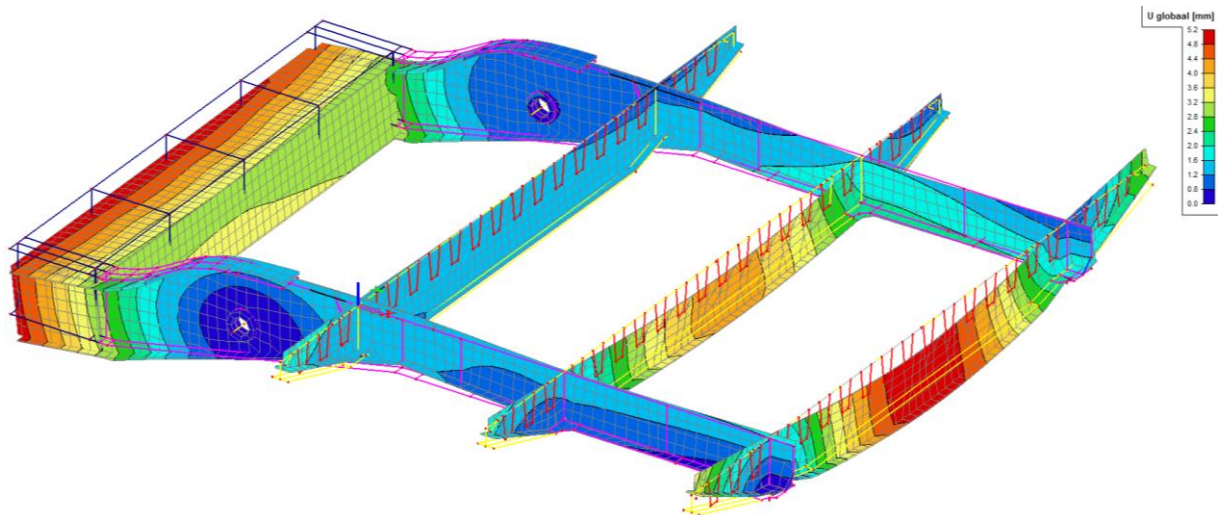
Doorbuiging van de achterhar. Bron: SCIA



Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

Voorhar:

Voor de voorhar lag de toelaatbare doorbuiging niet rond de 6,0 mm, maar gewoon rond de 5,0 mm (officiële toelaatbare vervorming). In het nieuwe model wordt er een doorbuiging berekend van 5,2 mm.

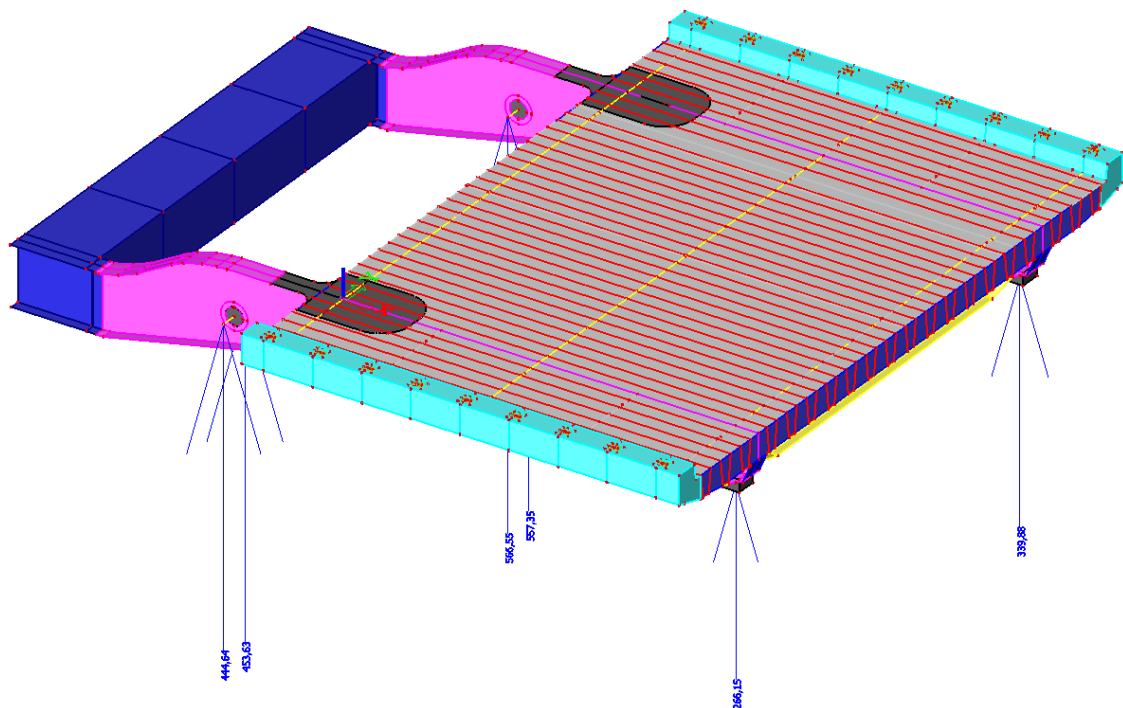


Doorbuiging van de voorhar. Bron: SCIA

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

8 OPLEGGINGEN

Het is belangrijk dat de brug niet omhoog komt aan de kant van de voorhar wanneer de tandemstelsels staan op de achterhar. Op de onderstaande afbeelding is te zien dat er oplegdrukken ontstaan voor de beschreven simulatie.

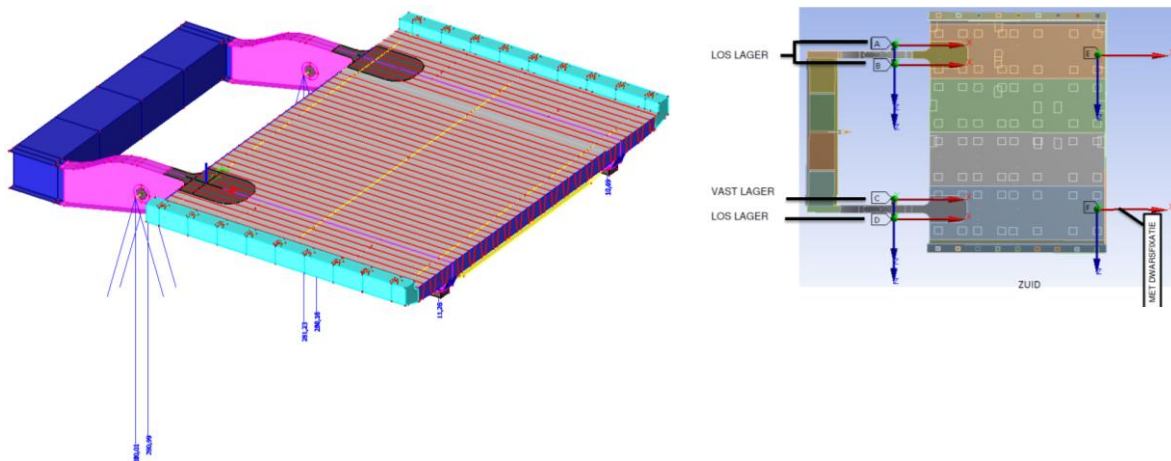


Bij de oplegblokken ontstaat een oplegdruk wanneer het TS op de achterhar staat. Dit zorgt ervoor dat de brug niet opwipt (399,88 en 266,15 kN). Bron: SCIA

In de voorgaande hoofdstukken is aangetoond dat de brug voldoet qua stijfheid. Doordat de doorbuigingsgrenzen zijn opgezocht, is er een minder stijf geheel ontstaan. Dit zorgt ervoor dat er geen neerwaartse oplegkracht kan ontstaan.

Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

Er wordt in dit rapport niet gekeken naar de besparing van het staal per onderdeel omdat er nog geen aandacht is besteed aan vermoeiing van de geoptimaliseerde Kruiswaterbrug. Wel wordt er gekeken naar de nieuwe oplegreacties door alleen het eigen gewicht. Op de onderstaande afbeelding zijn de nieuwe reactiekrachten weergegeven.



Oplegreacties en de fixatie van de opleggingen. Bron: SCIA en rapport ITBB.

Oplegreacties berekent door SCIA. De totale belasting van het eigen gewicht is gelijk aan 1144,33 kN.

- Oplegging A: 280,16 kN
- Oplegging B: 281,23 kN
- Oplegging C: 280,99 kN
- Oplegging D: 280,01 kN
- Oplegging E: 11,26 kN
- Oplegging E: 15,72 kN

In het huidige model lagen de oplegreacties hoger. De totale belasting van het eigen gewicht was gelijk aan 1389,70 kN.

- Oplegging A: 337,71 kN
- Oplegging B: 342,09 kN
- Oplegging C: 342,00 kN
- Oplegging D: 337,20 kN
- Oplegging E: 10,69 kN
- Oplegging E: 14,96 kN

In totaal is de brug 245,37 kN lichter. Omgerekend naar kilo's staal is dit 25012 kg.



Nieuw ontwerp Kruiswaterbrug met SCIA

9 CONCLUSIE

Na het aanpassen van het huidige model van de Kruiswaterbrug is het gelukt om er HSS in te verwerken. Daarbij is nauwkeurig rekening gehouden met de toegestane vervormingen. De onderdelen waarin HSS zijn verwerkt zijn:

- Het lijf van de hoofdligger rondom het draaipunt. In het oorspronkelijke model was dit het enige punt waar een spanning van rond de 250 N/mm^2 voorkwam. Voor de overige onderdelen bevonden de spanningen zich veel rond de 120 N/mm^2 tot en de 180 N/mm^2 . Door het lijf rondom het draaipunt te verdunnen van 40 mm naar 25 mm ontstaat er een spanning van $358,9 \text{ N/mm}^2$. Voor de spanning biedt S355 geen optie meer. S460 is nodig om onder de vloeispanning te blijven.
- Het lijf van de hoofdligger onder het brugdek is zodanig verdund dat HSS kan worden toegepast. Nu is het niet de vloeispanning die boven de 355 N/mm^2 komt, maar de plooispanning die gunstiger is bij S460 dan S355. Doordat de vloeigrens gereduceerd moet worden om de toegestane plooispanning te verkrijgen, blijft er een hogere waarde over als er gekeken wordt naar S460 dan naar S355.

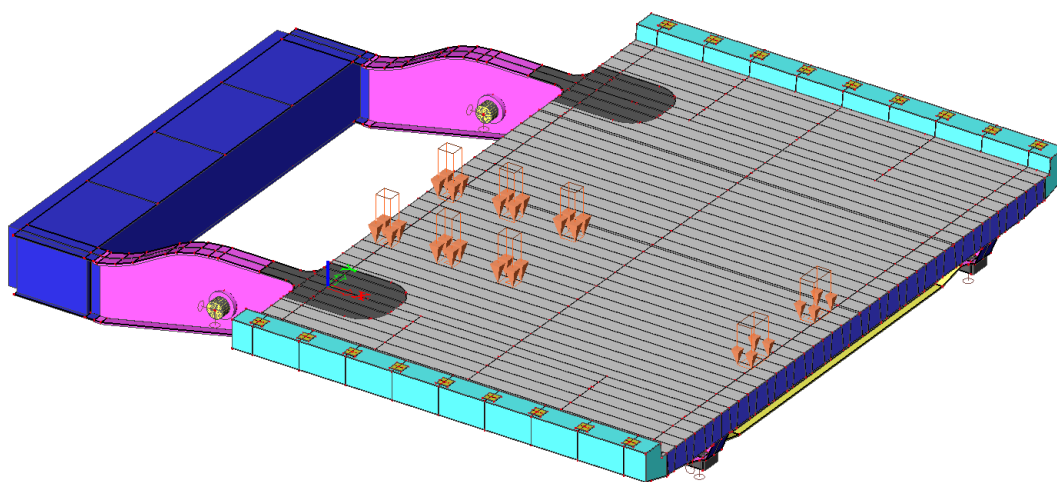
Uiteindelijk valt te concluderen dat het lastig is om de spanningen in een brug met een korte overspanning op te voeren tot boven de 355 N/mm^2 . De toegestane doorbuigingen zorgen ervoor dat het niet lukt om zulke hoge spanningen te krijgen. Daarom is gekeken naar de overige positieve aspecten die HSS heeft. Knik en plooï werden kritischer doordat de platen dunner werden gemaakt en er grotere plaatoppervlaktes ontstonden doordat er twee dwarsdragers tussenuit werden gehaald. Voor de optimalisatie zijn de grenzen van de toegestane doorbuigingen zoveel mogelijk opgezocht. Door dit te doen zijn de grootste mogelijke spanningen bereikt die te halen waren. Het stond aan het begin vast dat het ontwerp van de brug min of meer hetzelfde moest blijven in verband met de vrije doorvaarthoogte. Het was dus niet mogelijk traagheidsmoment te winnen door de buigliggers te verhogen.

De volgende en laatste stap die nu nog moet worden gedaan, is de vermoeiingscontrole. Er zal gekeken worden of de lassen met HSS weerstand kunnen bieden tegen wisselingen gedurende de komende 100 jaar (lassen rondom het draaipunt en die met het dunne lijf van de hoofdligger onder het brugdek). Verder wordt er qua vermoeiing gekeken of de lassen überhaupt de spanningen kunnen verdragen na de optimalisatie van het model (lassen tussen de verbindingen met S355).



Afstudeeronderzoek HSS in brugdekken

Vermoeiingscontrole



Document : Vermoeiingscontrole
Revisie : 0
Datum : 25-5-2016
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	25-5-2016	
Gecontroleerd			25-5-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Vermoeiingscontrole

INHOUDSOPGAVE		PAG.
0	INLEIDING	3
1	SIMULATIES	4
2	LASSEN BIJ ONDERDELEN MET HSS	8
2.1	Lassen en HSS	8
2.2	Draaipunt Hoofdligger	9
2.3	Flenzen aan het lijf nabij het draaipunt	10
2.4	Hoofdligger onder de dekplaat	11
3	VERMOEIINGSCONTROLE GEOPTIMALISEERDE ONDERDELEN S355	12
3.1	Dekplaat en trog	12
3.2	Hamerkopplaat	13
3.3	Troggen aan de dwarsdrager	14
4	CONCLUSIE	15
EXCELBEREKENINGEN VERMOEIING		1

Vermoeiingscontrole

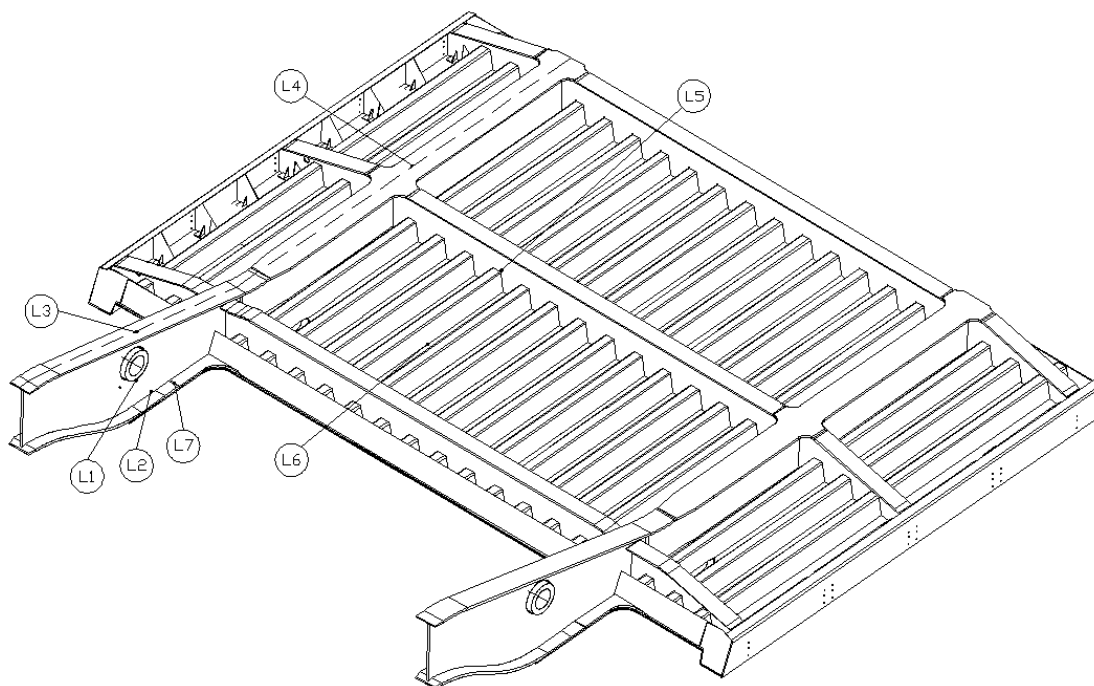
0 INLEIDING

Na het toepassen van onderdelen in HSS en het optimaliseren van het huidige ontwerp van de Kruiswaterbrug, wordt in de laatste fase van het onderzoek gekeken naar de optredende vermoeiing van de lasdetails. In dit rapport wordt gekeken naar de lasen van verschillende onderdelen. Voornamelijk wordt aan de volgende lasen aandacht besteed:

- De lasen rondom het draaipunt waar het lijf is uitgevoerd in HSS in het nieuwe ontwerp;
- De las tussen de flens en het lijf van de hoofdligger onder het brugdek;
- Een aantal lasen in het model waarvan het staal niet is omgezet in HSS, maar wel is geoptimaliseerd.

Het laatste punt moet aantonen dat de optimalisatie überhaupt mogelijk is. Wanneer blijkt dat de spanningen in de lasen niet voldoen aan de vermoeiingsberekeningen, dan is er aangetoond dat vermoeiing een belangrijke rol speelt.

Voordat de spanningen in de lasen gecontroleerd kunnen worden op vermoeiing, moeten de spanningen bepaald worden. In de NEN-EN 1991-2 + NB wordt beschreven waar rekening mee moet worden gehouden wanneer vermoeiing gecontroleerd wordt. In dit rapport wordt dat kort toegelicht. De juiste spanningen worden verkregen met behulp van SCIA Engineer. De vermoeiingscontrole geschiedt volgens de spanning- wisselingen methode (SN- curve) beschreven in de NEN-EN 1993-1-9 en Bijlage 7.



De lasen die in dit document worden gecontroleerd

Vermoeiingscontrole

1 SIMULATIES

Voor de invoer van de vermoeiingsberekening moeten de optredende spanningen in de lassen afkomstig van de wielasten van vrachtwagens worden gehaald uit het geoptimaliseerde SCIA model. Deze spanningen zijn afhankelijk van:

- Het type voertuig
- De wieltypes die horen bij de assen van de verschillende type voertuigen
- De positie van de belasting op het brugdek (simulatie)

Omdat vermoeiing niet alleen wordt gecontroleerd op de grootst mogelijke spanningsconcentratie, moeten bovenstaande punten op alle mogelijke plekken worden doorgevoerd. Ingenieursbureau ITBB heeft uiteindelijk 19 verschillende mogelijkheden (simulaties) gemodelleerd die de spanningen verschaffen voor de vermoeiingscontrole.

Type voertuig

Voor vermoeiing wordt voor de controle gebruik gemaakt van vermoeiingsbelasting model 4 (FLM4) conform de NEN-EN 1991-2 + NB. De vrachtwagens die in het SCIA model moeten worden verwerkt zijn weergegeven in de onderstaande tabel. Het betreft vijf vrachtwagens waarbij de afstand tussen de assen met de bijbehorende belastingen per as verschillen. Voor de Kruiswaterbrug geldt dat voor het verkeerstype de percentages van de lange afstand moet worden aangehouden omdat de brug onderdeel is van een hoofdweg. De percentages worden aan het eind bij de vermoeiingscontrole gebruikt om de eventuele optredende schade te berekenen.

Tabel met de type voertuigen voor de vermoeiingscontrole volgens FLM4. Bron: NEN-EN 1991-2 + NB

Type voertuig			Verkeerstype			Wiel-type
Afbeelding van de vrachtwagen	Afstand tussen de assen m	Gelijkwaardige aslast kN	Lange afstand % ^a	Middellange afstand % ^a	Lokaal verkeer % ^a	
	4,5	70 130	20,0	50,0	80,0	A B
	4,20 1,30	70 120 120	5,0	5,0	5,0	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90 90	40,0	20,0	5,0	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	25,0	15,0	5,0	A B C C
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10,0	10,0	5,0	A B C C C

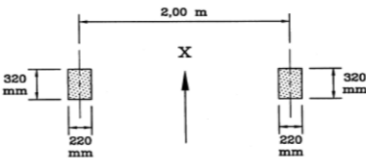
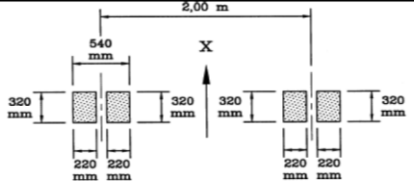
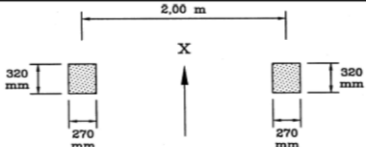
^a Percentage vrachtwagens.

Wieltype

In de laatste kolom worden voor de assen van de vijf vrachtwagens per as de wieltypes voorgeschreven. Voor de sterkte en vervormingen mocht er gebruik worden gemaakt van wielen met een contactoppervlak van 400 x 400 mm. Voor de spreiding van de gelijkwaardige aslasten voor vermoeiing moeten andere contactoppervlakten worden gebruikt. Deze oppervlaktes staan gegeven in de NEN-EN 1991-2 + NB.

Vermoeiingscontrole

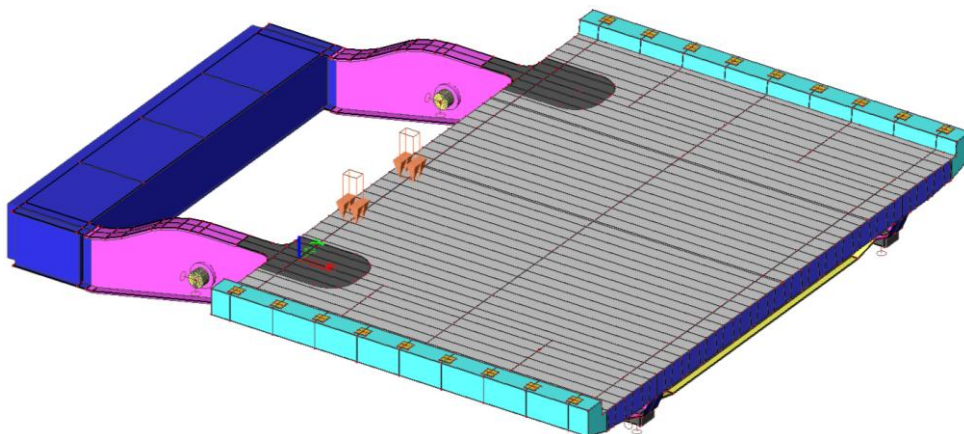
Tabel met de wieltypen voor de vijf verschillende vrachtwagens voor vermoeiing. Bron: NEN-EN 1991-2 + NB

WHEEL/ AXLE TYPE	GEOMETRICAL DEFINITION
A	
B	
C	

Simulaties

De 19 simulaties die door ITBB zijn gemodelleerd in Ansys zijn voor de vermoeiingscontrole gemodelleerd in SCIA. Daarbij is rekening gehouden met de afstanden tussen de assen, de belasting per as en het type wiel dat van toepassing is. Voor de controle valt er één rijbaan in verkeerscategorie 1 die benaderd wordt als "slow lane". Zodoende hoeven de simulaties maar op één rijbaan op verschillende locaties te worden geplaatst.

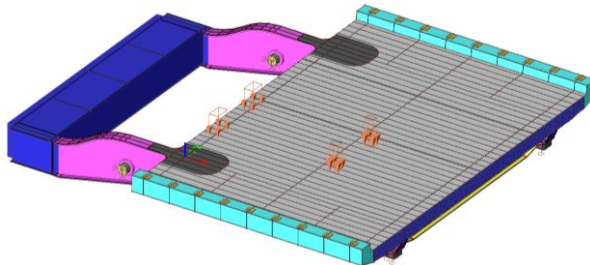
In SCIA schuiven de assen van de vrachtwagens steeds een stuk op totdat de volgende as op het brugdek komt te staan. De eerste as is voor iedere vrachtwagen gelijk. Deze wordt maar één keer gemodelleerd. Merk op dat deze as in de eindcontrole van de vermoeiing wel vijf keer moet worden berekend op eventuele schade.



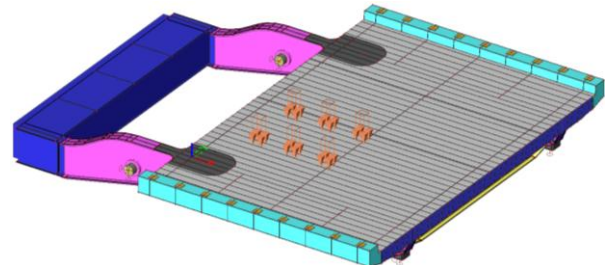
Voorste as van elke vrachtwagen op het brugdek. Simulaties 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 en 5.1. Bron: SCIA

Vermoeiingscontrole

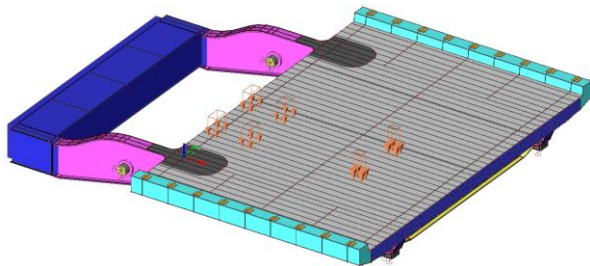
De overige simulaties zijn hieronder afbeeld. De assen die niet direct op het brugdek staan, hebben geen invloed betreft de spanningen van het geoptimaliseerde model.



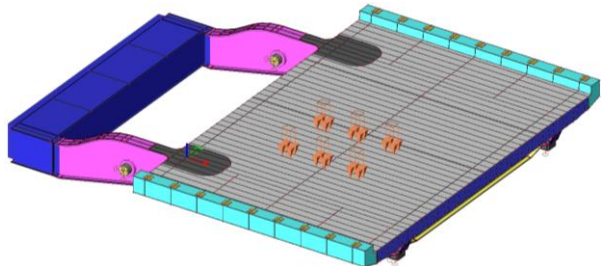
Simulatie 1.2



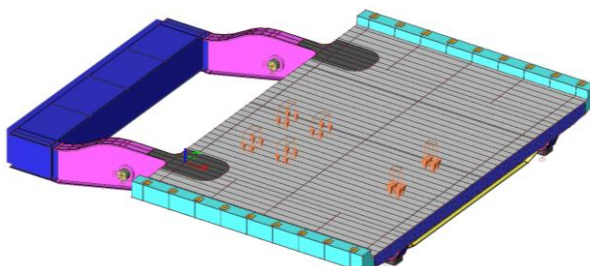
Simulatie 3.4



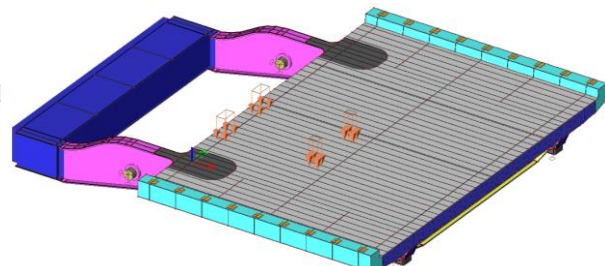
Simulatie 2.2



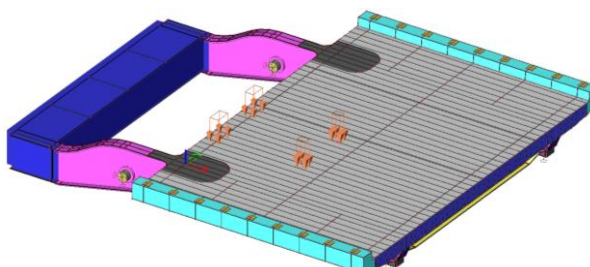
Simulatie 3.5



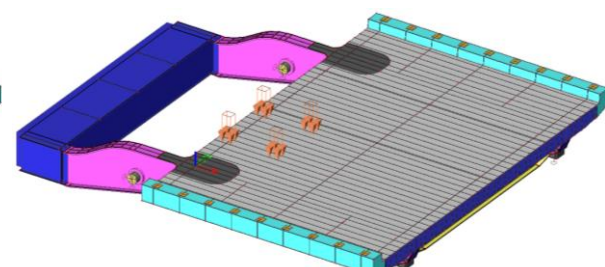
Simulatie 2.3



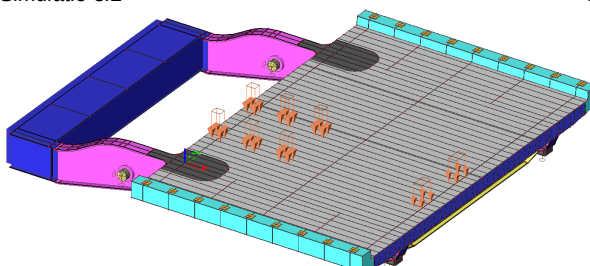
Simulatie 4.2



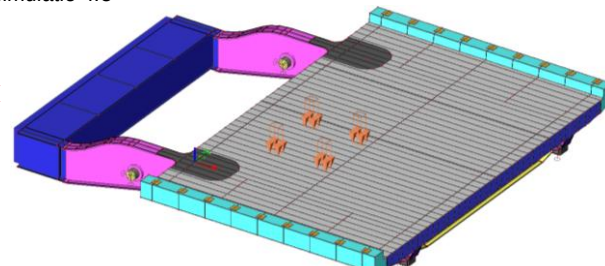
Simulatie 3.2



Simulatie 4.3



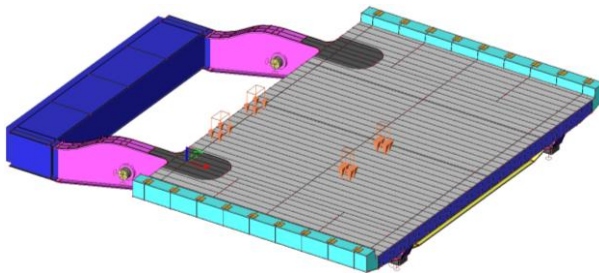
Simulatie 3.3



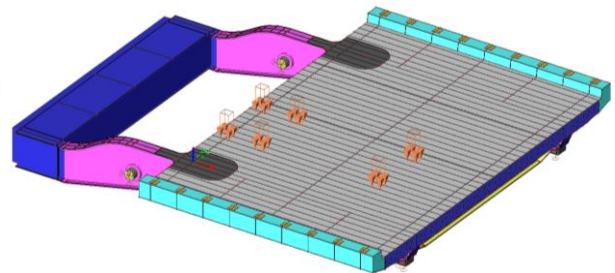
Simulatie 4.4



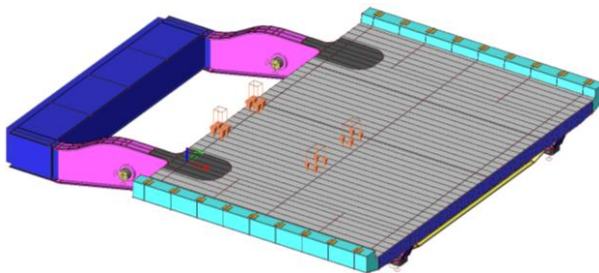
Vermoeiingscontrole



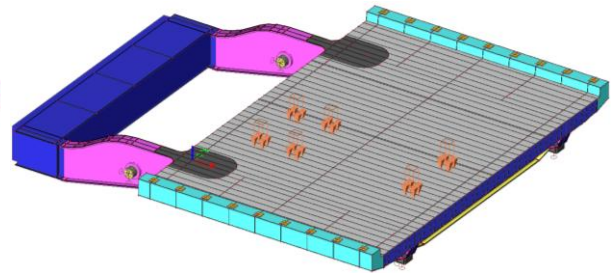
Simulatie 5.2



Simulatie 5.4



Simulatie 5.3



Simulatie 5.5

In de volgende hoofdstukken worden de spanningen van bovenstaande simulaties berekend met SCIA Engineer. Wanneer blijkt dat een spanning van één enkele simulatie ervoor zorgt dat de controle op vermoeiing niet voldoet, dan wordt in dit onderzoek niet meer gekeken naar de overige simulaties. Wanneer blijkt dat de spanningen dusdanig laag zijn dat geen schade optreedt, dan wordt in dit onderzoek alleen gekeken naar de grootste mogelijke spanning omdat de overige spanningsconcentraties geen schade zullen opleveren. Om de grootste spanningen te bepalen zijn wel alle simulaties gemodelleerd in SCIA.

Vermoeiingscontrole

2 LASSEN BIJ ONDERDELEN MET HSS

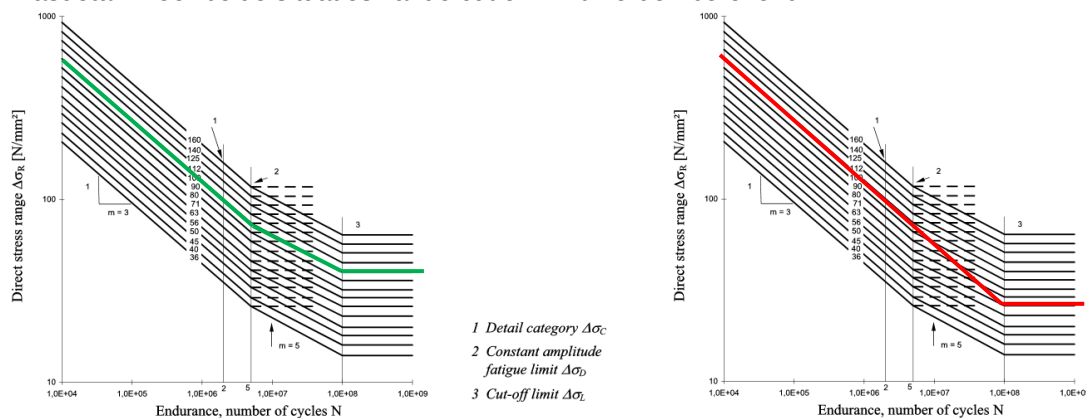
Er zijn een aantal lassen waarbij onderdelen (flenzen) worden gelast aan lijven die zijn uitgevoerd in HSS. Het betreft de volgende lassen:

- Las tussen het lijf van de hoofdlijger en de verdikte ring van het draaipunt
- Lassen tussen het lijf en de flenzen nabij het draaipunt
- Las tussen de onderflens en het lijf onder het brugdek

Voordat de lassen gecontroleerd worden op vermoeiing na het aflezen van de aanwezige spanningen uit SCIA, wordt eerst kort toegelicht waarin het verschil zit wanneer HSS wordt gebruikt. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van een gevalideerde rekensheet van VSF. Deze zijn weergegeven aan het eind van dit rapport voor de behandelde lassen. In dit rapport wordt de uitkomst gegeven uit de rekensheets met een verklaring.

2.1 Lassen en HSS

Wanneer vermoeiing wordt gecontroleerd met HSS veranderen er aspecten in berekening ten opzichte van vermoeiing bij S355 (Bijlage 7). Het stukje helling van $m = 5$ gaat bij HSS steiler lopen en wordt $m = 3$. Het gevolg daarvan is dat de cut off limit wordt bereikt bij een lagere spanning. Hieronder is de grafiek gegeven die wordt gebruikt voor het vaststellen van het gebied waar de optredende spanning in valt voor een lasdetail 100 in S355 (groene lijn). Om duidelijk het verschil aan te tonen wordt vervolgens in dezelfde grafiek met een rode lijn het gedrag van vermoeiing bij HSS weergegeven voor hetzelfde lasdetail. Voor beide situaties zal de cut off limit worden berekend.



Grafieken met SN- curven met het verschil tussen S355 (groen) en S460 (rood) voor lasdetail 100. Bron: NEN-EN 1993-1-9

S355:

Detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		= 100 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C * (2/5)^{(1/3)}$	= 73,7 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D * (5/100)^{(1/5)}$	= 40,5 [N/mm ²]

Designspanningen onder de 40,5 N/mm² zullen geen schade opleveren.

S460:

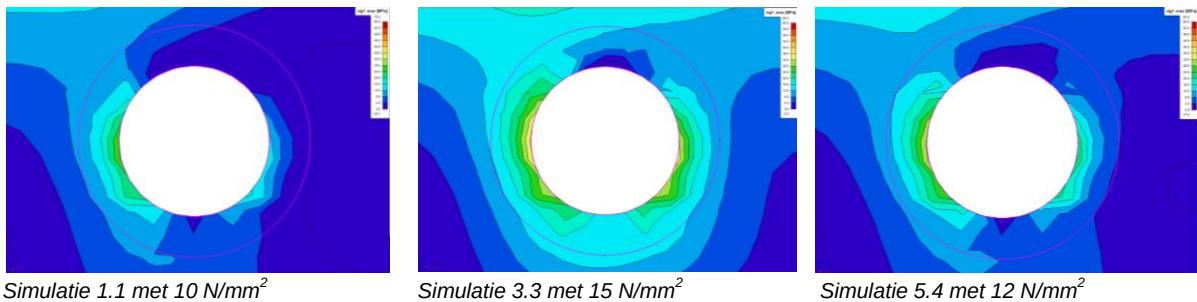
Detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		= 100 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C * (2/5)^{(1/3)}$	= 73,7 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D * (5/100)^{(1/3)}$	= 27,1 [N/mm ²]

Designspanningen onder de 27,1 N/mm² zullen geen schade opleveren. Het steiler lopen van de helling zorgt ervoor dat de cut off limit voor HSS ongunstiger wordt.

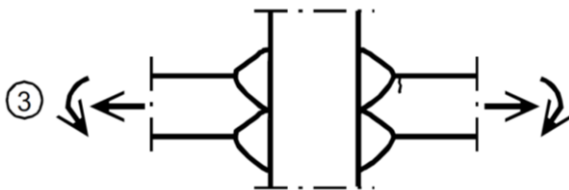
Vermoeiingscontrole

2.2 Draaipunt Hoofdligger

Voor de controle van de vermoeiing wordt op dit punt niet gekeken naar de spanningen die ontstaan door het openen en sluiten van de brug. Er wordt alleen gekeken naar de spanningen ten gevolge van het verkeer en de permanent aanwezige belastingen. ITBB heeft zich voor de vermoeiing van dit onderdeel gericht op de spanning afkomstig van de buigspanningen. De grootste waarde die zij hadden berekend met ANSYS bedroeg $2,4171 \text{ N/mm}^2$. Op de onderstaande afbeelding zijn drie simulaties weergegeven van de spanningen die optreden in het geoptimaliseerd model van de Kruiswaterbrug.



De grootst optredende spanningsconcentratie is gelijk aan 15 N/mm^2 . Deze zal worden berekend op een eventuele optredende schade door vermoeiing. Onderstaande las (volledige doorgelaste K-naad) wordt toegepast voor de vermoeiingscontrole. De detailcategorie voor deze las bedraagt 100 N/mm^2 .



Volledige doorgelaste K-naad met detailcategorie 100 N/mm^2 . Bron: NEN-EN 1993-1-9

Uit de berekening in hoofdstuk 2.1 blijkt dat designspanningen onder de $27,1 \text{ N/mm}^2$ geen schade zullen opleveren. Van de spanningen die SCIA berekent, is 15 N/mm^2 ingevuld in de rekensheet voor de vermoeiingscontrole (gegeven aan het eind van dit rapport).

Designspanning	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$1,35 * 15$	= $20,25 \text{ [N/mm}^2]$
----------------	----------------------	---	-------------	----------------------------

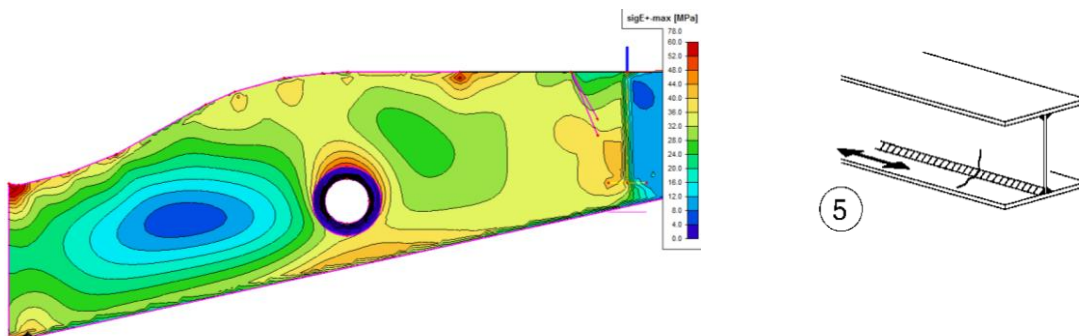
Optredende schade	$D\sigma$	=	optredende wisselingen (N) / toelaatbare N	
-------------------	-----------	---	--	--

Omdat er oneindig veel wisselingen worden toegelaten ($m = \infty$) voldoet het onderdeel uitgevoerd in HSS met het bijbehorende lasdetail voor de 19 simulaties.

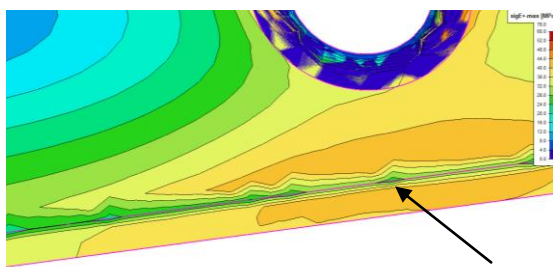
Vermoeiingscontrole

2.3 Flenzen aan het lijf nabij het draaipunt

Voor de verbindingen tussen de flenzen en het lijf nabij het draaipunt moeten wel de omhullende spanningen worden gebruikt uit SCIA. Op de onderstaande afbeeldingen is de ligger afgebeeld. Voor de precieze spanningen wordt ingezoomd op de locaties waar de lassen zich bevinden. Voor deze lassen is detail 5 uit de NEN-EN 1993-1-9 van toepassing met een detailcategorie van 100 N/mm².



Omhullende spanningen in de lassen van de flenzen en het lijf. Bron: SCIA



Onderzijde met de grootste spanning van 28 N/mm².



Bovenzijde met de grootste spanning van 40 N/mm². Bron: SCIA

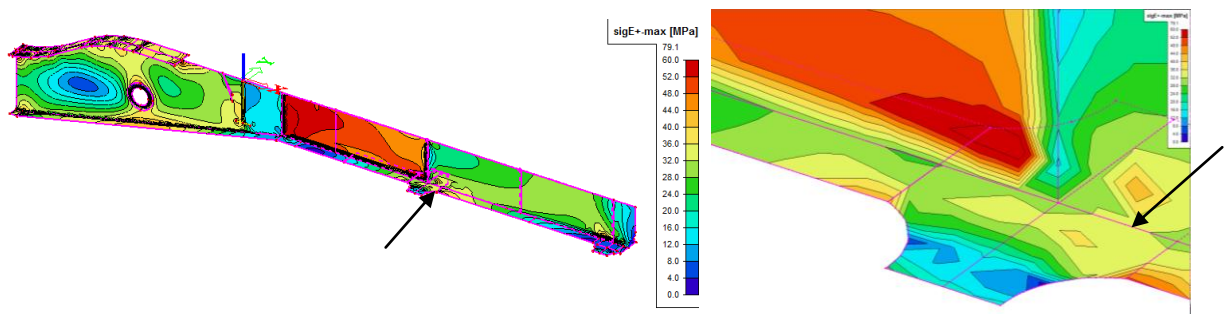
De spanningen zijn ingevoerd in de rekensheets. Uit het resultaat blijkt dat voor dit lasdetail voor één enkele simulatie al schade optreedt. De spanningen uit bovenstaande afbeeldingen zijn afkomstig van simulatie 3.3. Een simulatie met drie aslasten dicht bij elkaar en met een aanwezigheidspercentage van 40 procent.

Optredende schade	$D\sigma$	=	optredende wisselingen (N) / toelaatbare N
Schadecontrole onderzijde		=	2,70 [-] voldoet niet
Schadecontrole bovenzijde		=	7,87 [-] voldoet niet

Vermoeiingscontrole

2.4 Hoofdligger onder de dekplaat

Het andere lasdetail met HSS bevindt zich bij de overgang van het lijf naar de flens van de hoofdligger onder het brugdek. Voor de vermoeiingscontrole geldt hetzelfde lasdetail 5 dat is gebruikt voor de lassen uit hoofdstuk 2.3. Hieronder zijn de spanningen weergegeven van simulatie 3.3 voor het te toetsen onderdeel.



Spanningen onder het brugdek met de grootste spanning van 32 N/mm^2 . Bron: SCIA

In de las tussen de onderste flens van de hoofdligger en het dunne lijf is de grootste aanwezige spanning 32 N/mm^2 . Uit de rekensheet blijkt dat de simulatie 3.3 er al voor zorgt dat er teveel schade optreedt.

Optredende schade	$D\sigma$	=	optredende wisselingen (N) / toelaatbare N
Schadecontrole onderzijde		=	4,03 [-] voldoet niet

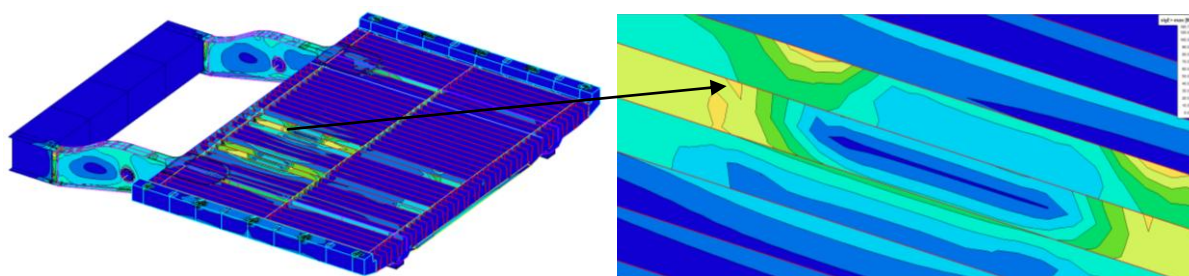
Vermoeiingscontrole

3 VERMOEIINGSCONTROLE GEOPTIMALISEERDE ONDERDELEN S355

Om aan te tonen dat optimalisatie mogelijk is, worden in dit hoofdstuk de overige onderdelen gecontroleerd op vermoeiing. Voor deze onderdelen komen de vloeispanningen niet boven de vloeigrens van S355. Zodoende is ervoor gekozen om deze onderdelen in de oorspronkelijke staalkwaliteit te behouden.

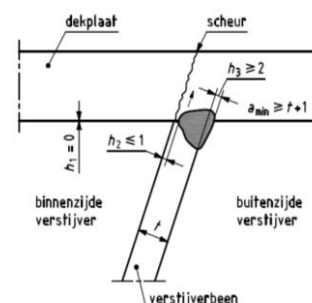
3.1 Dekplaat en trog

Omdat er nu gekeken wordt naar een vermoeiingscontrole met S355, betekent dit dat de helling $m = 5$ wordt gebruikt in de vermoeiingscurve (SN-curve). Door de gunstigere helling komt de spanning voor de cut off limit hoger te liggen dan die voor HSS. Voor de bepaling van de spanningen met SCIA is er voor deze controle gebruik gemaakt van simulatie 2.3, een minder zware simulatie dan 3.3 waarbij er maar een aanwezigheidspercentage van 5,0 % geldt. Hieronder staan de spanningen uit SCIA afgebeeld. De rekensheet is weer aan het eind van het document te vinden.



Spanningen afkomstig van simulatie 2.3 waarbij het dek is weggelaten (grootste spanning = 70 N/mm²). Bron: SCIA

Voor de controle wordt het lasdetail genomen uit de NEN-EN 1993-2 met de bijbehorende detailcategorie van 125 N/mm². Na de controle (rekensheet aan het einde van dit rapport) blijkt dat er bij een lichte simulatie 2.3 al teveel schade optreedt. Voor de overige simulaties kan gesteld worden dat deze ook niet zullen voldoen omdat zowel de spanningen als het aanwezigheidspercentage toenemen.



Optredende schade	D_{σ}	=	optredende wisselingen (N) / toelaatbare N
Schadecontrole trog aan dekplaat		=	2,70 [-] voldoet niet

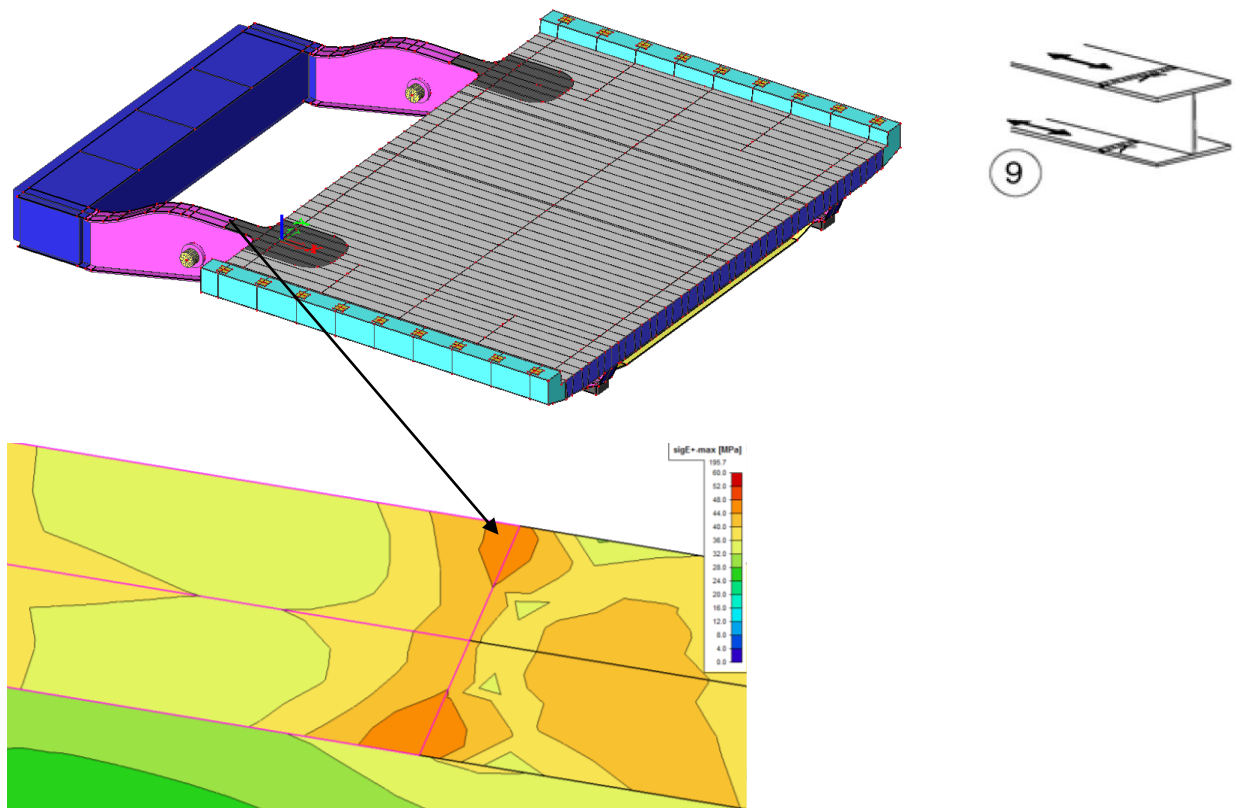
In de bijlage van dit rapport (Excelberekeningen vermoeiing) is er met een rekensheet aangetoond dat 57 N/mm² voor dit detail ervoor zorgt dat net niet wordt voldaan aan de vermoeiing.

Na de controle wordt een UC van 1,02 [-] verkregen. Een spanning iets lager dan 57 N/mm² voldoet dan wel voor één enkele simulatie, maar dan moeten de andere simulaties ook worden bepaald en de som van alle losse schadecontroles samen moet dan kleiner zijn dan 1,0. Er moet dus een flinke reductie van de spanning plaatsvinden om te voldoen aan vermoeiing. Hieruit blijkt dat het willen opvoeren van de spanningen om HSS toe te kunnen passen een tegenwerking oplevert wanneer de vermoeiing wordt gecontroleerd.

Vermoeiingscontrole

3.2 Hamerkopplaat

Het tweede lasdetail zonder S460 dat wordt gecontroleerd is de las tussen de hamerkopplaat en de bovenflens van de hoofdligger. Op onderstaande afbeelding is het model met de bijbehorende spanning gegeven voor simulatie 3.3. Voor deze las is detail 9 uit de NEN-EN 1993-1-9 van toepassing met een detailcategorie van 80 N/mm^2 .



Spanning van 44 N/mm^2 bij de overgang van de hamerkopplaat en de hoofdligger. Bron: SCIA

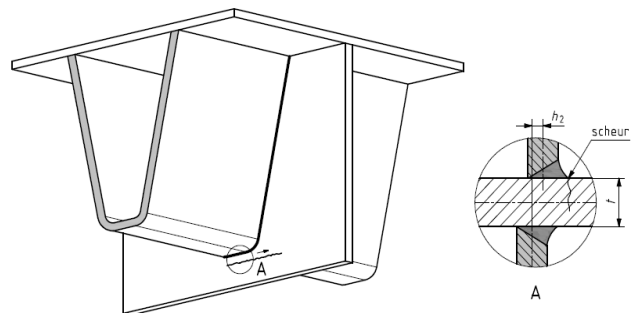
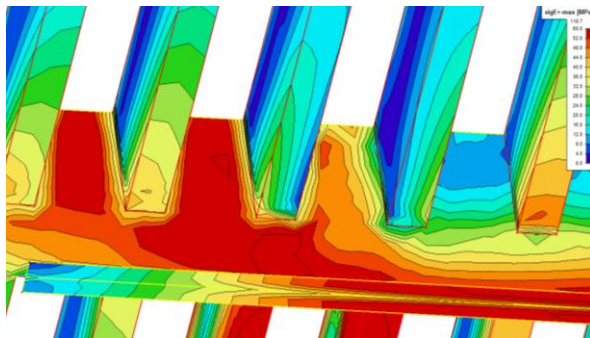
Ook bij dit detail is de spanning in de las te hoog en treedt er schade op door toedoen van één enkele simulatie waardoor de overige simulaties niet meer worden gecontroleerd. De rekensheet voor de controle die veel schade oplevert is te vinden aan het eind van dit document.

Optredende schade	$D\sigma$	=	optredende wisselingen (N) / toelaatbare N
Schadecontrole trog aan dekplaat		=	20,47 [-] voldoet niet

Vermoeiingscontrole

3.3 Troggen aan de dwarsdrager

Het laatste detail dat gecontroleerd wordt is de verbinding tussen de troggen aan de dwarsdragers. Door de overspanningen van de troggen twee keer zo groot te maken zijn de spanningen toegenomen. Uit het geoptimaliseerde model in SCIA worden spanningen gevonden van 42 N/mm^2 voor simulatie 3.3. Voor de controle is er wederom een lasdetail uit de NEN-EN 1993-2 toepasbaar met een detailcategorie van 80 N/mm^2 .



Troggen aan de dwarsdrager met een maximale spanning van 42 N/mm^2 . Bron: SCIA

Optredende schade	$D\sigma$	=	optredende wisselingen (N) / toelaatbare N
Schadecontrole trog aan dekplaat		=	16,47 [-] voldoet niet



Vermoeiingscontrole

4 CONCLUSIE

Aan de hand van de details die gecontroleerd zijn op vermoeiing is te concluderen dat het laatst onderzochte aspect grote invloed heeft op het ontwerpen en berekenen van stalen bruggen. Veel onderdelen kunnen na de optimalisatie niet worden gerealiseerd omdat er scheuren ontstaan binnen een tijdsbestek van 100 jaar. Het is duidelijk dat het opvoeren van spanningen om HSS toe te kunnen passen en de controle van vermoeiing elkaar tegenwerken. Uit het rapport van ITBB worden er spanningen gecontroleerd met de waarden tussen de 5,0 en 27 N/mm². Op dit moment kan er geconcludeerd worden dat ze dat hebben gedaan om te voldoen aan vermoeiing.

Wanneer een simulatie over de brug rijdt, is deze in staat de las in zijn eentje binnen 100 jaar kapot te rijden. Dit geeft aan dat de vermoeiingscontrole voor 19 simulaties niet zal voldoen. Bij het ontwerpen van stalen bruggen moet er voor gezorgd worden dat de optredende spanning in de las onder de cut off limit blijft. Zodoende kunnen de simulaties onderling geen schade teweeg brengen. Uit de rekensheets blijkt dat wanneer de spanning boven de cut off limit komt, al snel schade ontstaat. Dit komt voornamelijk door de hoge percentages van sommige vrachtwagens en de 2.500.000 wisselingen die de brug voor 100 jaar moet kunnen verdragen.

Wanneer HSS wordt toegepast, komt de cut off limit lager te liggen dan bij S355. Dit betekent dat de spanningen dan nog lager moeten worden gehouden om, kijkend naar vermoeiing, geen schade te genereren. Als de spanningen in het model dusdanig laag moeten worden gehouden voor vermoeiing, dan heeft het dus geen zin om de vloeigrens van S355 te overschrijden. In feite had de huidige brug (zonder te kijken naar de normen, wetten en technische regelgevingen) kunnen worden gerealiseerd in S235.

Doordat de spanningen boven het draaipunt anders worden benaderd dan de overige spanningen is het mogelijk om hier HSS te verwerken. Echter, wanneer wordt gekeken naar de spanningen van de lassen tussen de flenzen en het lijf, dan blijkt dat er teveel vermoeiing optreedt. Hierdoor is het dus niet mogelijk het lijf uit te voeren in S460.



EXCELBEREKENINGEN VERMOEIING

De volgende vermoeiingsberekeningen zijn toegevoegd waarin onderdelen met HSS zijn verwerkt:

- Las rondom het draaipunt (verdikte ring en het lijf)
- Las onderflens / lijf nabij het draaipunt
- Las bovenflens / lijf nabij het draaipunt
- Las onderflens / lijf onder het brugdek

De volgende vermoeiingsberekeningen zijn toegevoegd waarin de staalkwaliteit S355 is gebleven.

- Las trog / dwarsdrager
- Las trog / dekplaat met 70 N/mm^2
- Las trog / dekplaat met 57 N/mm^2
- Las hamerkopplaat / bovenflens hoofdligger

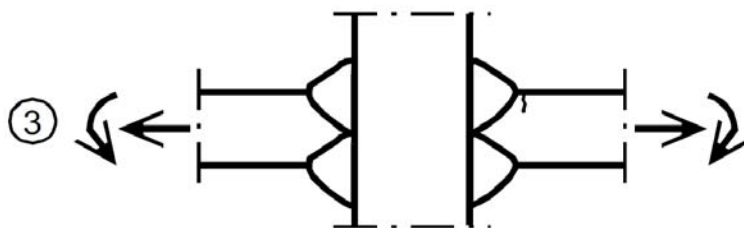


**controle vermoeiing voor constructiedetail 3 (tabel B1)**

berekningen volgens NEN-EN 1993-1-9 + NB

invoer

optredende spanning	$\Delta\sigma_i$	=	15 [N/mm ²]
aantal wisselingen	n/jaar	=	2500000 [wisselingen/jaar]
aandeel van de wisselingen	%	=	40 [procenten]
levensduur		=	100 [jaar]
partiële factor	γ_{Mf}	=	1,35 [-]
dikte staal	t	=	25 [mm]

**berekening**

detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		=	100 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C \cdot (2/5)^{(1/3)}$	=	73,7 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D \cdot (5/100)^{(1/3)}$	=	27,1 [N/mm ²]
helling S-N curve	m	=	$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$	=	∞ [-]
wisselingen index	N_C	=	index C	=	2,00E+06 [wisselingen]
	N_D	=	index D	=	5,00E+06 [wisselingen]
	N_L	=	index L	=	∞ [wisselingen]
dikte-effect	k_s	=	$(25/t)^{0,2}$	=	1,00 [-]
spanning met partiële factor	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$\Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Mf} / k_s$	=	20,25 [N/mm ²]
Helling S-N curve	m	=		=	∞ [-]
vermoeiingssterkte	$\Delta\sigma_k$	=		=	27,1 [N/mm ²]
wisselingenindex	N_k	=	NL	=	∞ [wisselingen]
toelaatbaar aantal wisselingen	N_i	=	$(\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot N_k$	=	∞ [wisselingen]

schade

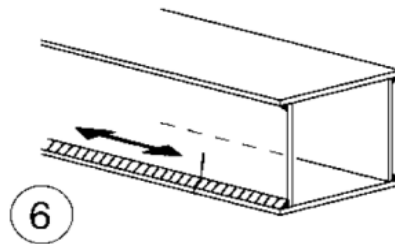
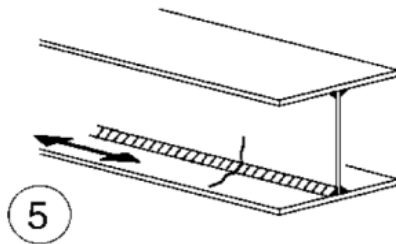
optredend aantal wisselingen	n	=	levensduur * (n/jaar) * %	=	100000000 [wisselingen]
schade	Dσ	=	optredende / toelaatbare	=	0,00 [-]

**controle vermoeiing voor constructiedetail 5 & 6 (tabel 8.2)**

berekeningen volgens NEN-EN 1993-1-9 + NB

invoer

optredende spanning	$\Delta\sigma_i$	=	28 [N/mm ²]
aantal wisselingen	n/jaar	=	2500000 [wisselingen/jaar]
aandeel van de wisselingen	%	=	40 [procenten]
levensduur		=	100 [jaar]
partiële factor	γ_{Mf}	=	1,35 [-]

**berekening**

detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		=	100 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C * (2/5)^{(1/3)}$	=	73,7 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D * (5/100)^{(1/3)}$	=	27,1 [N/mm ²]
helling S-N curve	m	=	$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$	=	∞ [-]
wisselingen index	N_C	=	index C	=	2,00E+06 [wisselingen]
	N_D	=	index D	=	5,00E+06 [wisselingen]
	N_L	=	index L	=	∞ [wisselingen]
spanning met partiële factor	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$\Delta\sigma_i * \gamma_{Mf}$	=	37,80 [N/mm ²]
aanwezige S-N curve	m	=		=	3 [-]
vermoeiingssterkte	$\Delta\sigma_k$	=		=	100,0 [N/mm ²]
wisselingenindex	N_k	=	N_C	=	2000000 [wisselingen]
toelaatbaar aantal wisselingen	N_i	=	$(\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i * \gamma_{Mf})^m * N_k$	=	37030075 [wisselingen]

schade

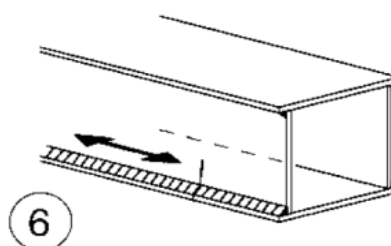
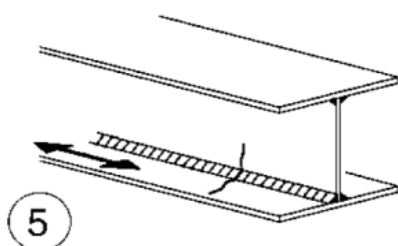
optredend aantal wisselingen	n	=	levensduur * (n/jaar) * %	=	100000000 [wisselingen]
schade	$D\sigma$	=	optredende / toelaatbare	=	2,70 [-] Voldoet niet!

**controle vermoeiing voor constructiedetail 5 & 6 (tabel 8.2)**

berekeningen volgens NEN-EN 1993-1-9 + NB

invoer

optredende spanning	$\Delta\sigma_i$	=	40 [N/mm ²]
aantal wisselingen	n/jaar	=	2500000 [wisselingen/jaar]
aandeel van de wisselingen	%	=	40 [procenten]
levensduur		=	100 [jaar]
partiële factor	γ_{Mf}	=	1,35 [-]

**berekening**

detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		=	100 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C \cdot (2/5)^{(1/3)}$	=	73,7 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D \cdot (5/100)^{(1/3)}$	=	27,1 [N/mm ²]
helling S-N curve	m	=	$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$	=	∞ [-]
wisselingen index	N_C	=	index C	=	2,00E+06 [wisselingen]
	N_D	=	index D	=	5,00E+06 [wisselingen]
	N_L	=	index L	=	∞ [wisselingen]
spanning met partiële factor	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$\Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Mf}$	=	54,00 [N/mm ²]
aanwezige S-N curve	m	=		=	3 [-]
vermoeiingssterkte	$\Delta\sigma_k$	=		=	100,0 [N/mm ²]
wisselingenindex	N_k	=	N_C	=	2000000 [wisselingen]
toelaatbaar aantal wisselingen	N_i	=	$(\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot N_k$	=	12701316 [wisselingen]

schade

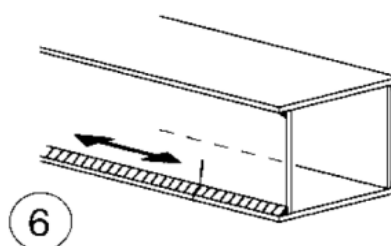
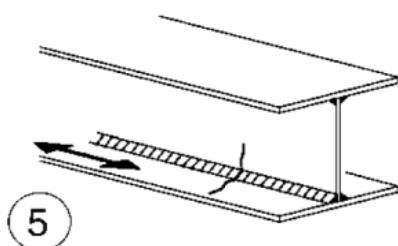
optredend aantal wisselingen	n	=	levensduur * (n/jaar) * %	=	100000000 [wisselingen]
schade	$D\sigma$	=	optredende / toelaatbare	=	7,87 [-] Voldoet niet!

**controle vermoeiing voor constructiedetail 5 & 6 (tabel 8.2)**

berekningen volgens NEN-EN 1993-1-9 + NB

invoer

optredende spanning	$\Delta\sigma_i$	=	32 [N/mm ²]
aantal wisselingen	n/jaar	=	2500000 [wisselingen/jaar]
aandeel van de wisselingen	%	=	40 [procenten]
levensduur		=	100 [jaar]
partiële factor	γ_{Mf}	=	1,35 [-]

**berekening**

detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		=	100 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C * (2/5)^{(1/3)}$	=	73,7 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D * (5/100)^{(1/3)}$	=	27,1 [N/mm ²]
helling S-N curve	m	=	$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$	=	∞ [-]
wisselingen index	N_C	=	index C	=	2,00E+06 [wisselingen]
	N_D	=	index D	=	5,00E+06 [wisselingen]
	N_L	=	index L	=	∞ [wisselingen]
spanning met partiële factor	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$\Delta\sigma_i * \gamma_{Mf}$	=	43,20 [N/mm ²]
aanwezige S-N curve	m	=		=	3 [-]
vermoeiingssterkte	$\Delta\sigma_k$	=		=	100,0 [N/mm ²]
wisselingenindex	N_k	=	N_C	=	2000000 [wisselingen]
toelaatbaar aantal wisselingen	N_i	=	$(\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i * \gamma_{Mf})^m * N_k$	=	24807258 [wisselingen]

schade

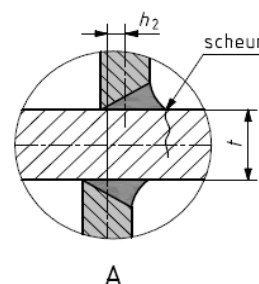
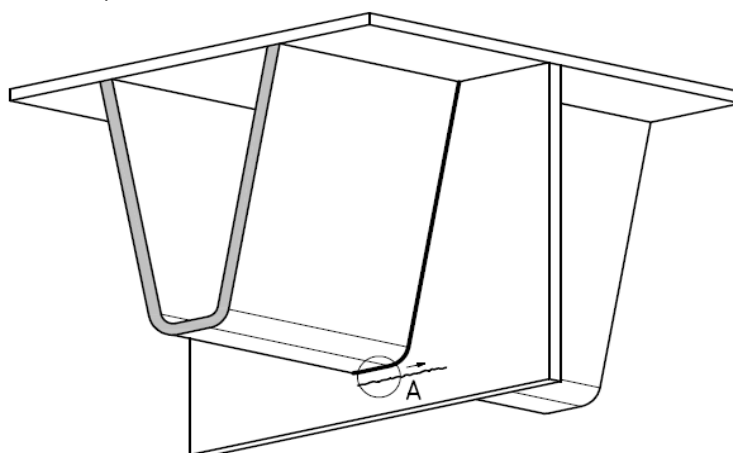
optredend aantal wisselingen	n	=	levensduur * (n/jaar) * %	=	100000000 [wisselingen]
schade	$D\sigma$	=	optredende / toelaatbare	=	4,03 [-] Voldoet niet!

**controle vermoeiing voor constructiedetail 8 (tabel NB.7)**

berekeningen volgens NEN-EN 1993-1-9 + NB, details volgens de NEN-EN 1993-2 + NB

invoer

optredende spanning	$\Delta\sigma_i$	=	42 [N/mm ²]
aantal wisselingen	n/jaar	=	2500000 [wisselingen/jaar]
aandeel van de wisselingen	%	=	40 [procenten]
levensduur		=	100 [jaar]
partiële factor	γ_{Mf}	=	1,35 [-]

**berekening**

detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		=	80 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C \cdot (2/5)^{(1/3)}$	=	58,9 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D \cdot (5/100)^{(1/5)}$	=	32,4 [N/mm ²]
helling S-N curve	m	=	$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$	=	5 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$	=	∞ [-]
wisselingen index	N_C	=	index C	=	2,00E+06 [wisselingen]
	N_D	=	index D	=	5,00E+06 [wisselingen]
	N_L	=	index L	=	∞ [wisselingen]
spanning met partiële factor	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$\Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Mf}$	=	56,70 [N/mm ²]
aanwezige S-N curve	m	=		=	5 [-]
vermoeiingssterkte	$\Delta\sigma_k$	=		=	58,9 [N/mm ²]
wisselingenindex	N_k	=	ND	=	5000000 [wisselingen]
toelaatbaar aantal wisselingen	N_i	=	$(\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot N_k$	=	6071155 [wisselingen]

schade

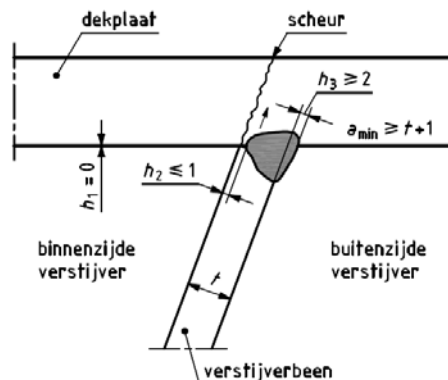
optredend aantal wisselingen	n	=	levensduur * (n/jaar) * %	=	100000000 [wisselingen]
schade	$D\sigma$	=	optredende / toelaatbare	=	16,47 [-] Voldoet niet!

**controle vermoeiing voor constructiedetail 1 (tabel NB.7)**

berekeningen volgens NEN-EN 1993-1-9 + NB, details volgens de NEN-EN 1993-2 + NB

invoer

optredende spanning	$\Delta\sigma_i$	=	70 [N/mm ²]
aantal wisselingen	n/jaar	=	2500000 [wisselingen/jaar]
aandeel van de wisselingen	%	=	5 [procenten]
levensduur		=	100 [jaar]
partiële factor	γ_{Mf}	=	1,35 [-]

**berekening**

detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		=	125 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C * (2/5)^{(1/3)}$	=	92,1 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D * (5/100)^{(1/5)}$	=	50,6 [N/mm ²]
helling S-N curve	m	=	$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$	=	5 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$	=	∞ [-]
wisselingen index	N_C	=	index C	=	2,00E+06 [wisselingen]
	N_D	=	index D	=	5,00E+06 [wisselingen]
	N_L	=	index L	=	∞ [wisselingen]
spanning met partiële factor aanwezige S-N curve	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$\Delta\sigma_i * \gamma_{Mf}$	=	94,50 [N/mm ²]
	m	=		=	3 [-]
vermoeiingssterkte	$\Delta\sigma_k$	=		=	125,0 [N/mm ²]
wisselingenindex	N_k	=	N_c	=	2000000 [wisselingen]
toelaatbaar aantal wisselingen	N_i	=	$(\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i * \gamma_{Mf})^m * N_k$	=	4628759 [wisselingen]

schade

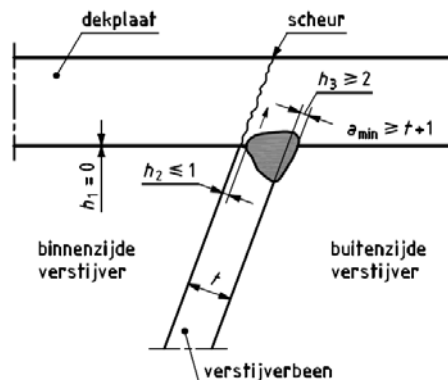
optredend aantal wisselingen	n	=	levensduur * (n/jaar) * %	=	12500000 [wisselingen]
schade	$D\sigma$	=	optredende / toelaatbare	=	2,70 [-] Voldoet niet!

**controle vermoeiing voor constructiedetail 1 (tabel NB.7)**

berekeningen volgens NEN-EN 1993-1-9 + NB, details volgens de NEN-EN 1993-2 + NB

invoer

optredende spanning	$\Delta\sigma_i$	=	57 [N/mm ²]
aantal wisselingen	n/jaar	=	2500000 [wisselingen/jaar]
aandeel van de wisselingen	%	=	5 [procenten]
levensduur		=	100 [jaar]
partiële factor	γ_{Mf}	=	1,35 [-]

**berekening**

detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		=	125 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C * (2/5)^{(1/3)}$	=	92,1 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D * (5/100)^{(1/5)}$	=	50,6 [N/mm ²]
helling S-N curve	m	=	$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$	=	5 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$	=	∞ [-]
wisselingen index	N_C	=	index C	=	2,00E+06 [wisselingen]
	N_D	=	index D	=	5,00E+06 [wisselingen]
	N_L	=	index L	=	∞ [wisselingen]
spanning met partiële factor	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$\Delta\sigma_i * \gamma_{Mf}$	=	76,95 [N/mm ²]
aanwezige S-N curve	m	=		=	5 [-]
vermoeiingssterkte	$\Delta\sigma_k$	=		=	92,1 [N/mm ²]
wisselingenindex	N_k	=	ND	=	5000000 [wisselingen]
toelaatbaar aantal wisselingen	N_i	=	$(\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i * \gamma_{Mf})^m * N_k$	=	12281279 [wisselingen]

schade

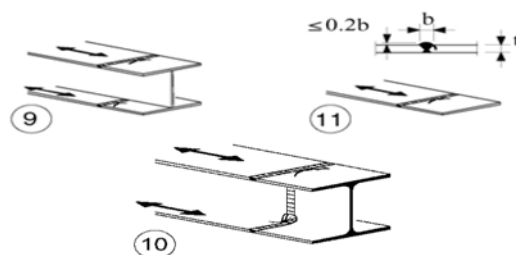
optredend aantal wisselingen	n	=	levensduur * (n/jaar) * %	=	12500000 [wisselingen]
schade	$D\sigma$	=	optredende / toelaatbare	=	1,02 [-] Voldoet niet!

**controle vermoeiing voor constructiedetail 9,10 & 11 (tabel 8.3)**

berekeningen volgens NEN-EN 1993-1-9 + NB

invoer

optredende spanning	$\Delta\sigma_i$	=	44 [N/mm ²]
aantal wisselingen	n/jaar	=	2500000 [wisselingen/jaar]
aandeel van de wisselingen	%	=	40 [procenten]
levensduur		=	100 [jaar]
partiële factor	γ_{Mf}	=	1,35 [-]
dikte staal	t	=	40 [mm]

**berekening**

detailcategorie	$\Delta\sigma_C$	=		=	80 [N/mm ²]
constant amplitude fatigue limit	$\Delta\sigma_D$	=	$\Delta\sigma_C \cdot (2/5)^{(1/3)}$	=	58,9 [N/mm ²]
cut off limit	$\Delta\sigma_L$	=	$\Delta\sigma_D \cdot (5/100)^{(1/5)}$	=	32,4 [N/mm ²]
helling S-N curve	m	=	$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_D$	=	3 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_L < \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$	=	5 [-]
	m	=	$\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L$	=	∞ [-]
wisselingen index	N_C	=	index C	=	2,00E+06 [wisselingen]
	N_D	=	index D	=	5,00E+06 [wisselingen]
	N_L	=	index L	=	∞ [wisselingen]
dikte-effect	k_s	=	$(25/t)^{0,2}$	=	0,91 [-]
spanning met partiële factor	$\Delta\sigma_{i,d}$	=	$\Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Mf} / k_s$	=	65,25 [N/mm ²]
Helling S-N curve	m	=		=	3 [-]
vermoeiingssterkte	$\Delta\sigma_k$	=		=	80,0 [N/mm ²]
wisselingenindex	N_k	=	N_C	=	2000000 [wisselingen]
toelaatbaar aantal wisselingen	N_i	=	$(\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Mf})^m \cdot N_k$	=	4885856 [wisselingen]

schade

optredend aantal wisselingen	n	=	levensduur * (n/jaar) * %	=	100000000 [wisselingen]
schade	$D\sigma$	=	optredende / toelaatbare	=	20,47 [-]

Voldoet niet!



Afstudeeropdracht HSS in brugdekken

Reflectie, evaluatie en competentieverantwoording

Document : Reflectie, evaluatie en competentieverantwoording
Revisie : 0
Datum : 8-6-2016
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	8-6-2016	
Gecontroleerd			8-6-2016	
Geaccepteerd	Björn van der Maale (BVM)	Opdrachtgever Volker Staal en Funderingen		
	Sven van Rosmalen	Begeleider civiele Techniek Hogeschool Rotterdam		



Reflectie, evaluatie en competentieverantwoording

REFLECTIE EN EVALUATIE

In dit document wordt teruggekeken op 20 weken onderzoek bij Volker Staal en Funderingen. Voordat de student begon met het onderzoek was het concept Plan van Aanpak (PvA) gereed. In de eerste week zijn de laatste wijzigingen doorgevoerd. In dit document wordt gekeken of dat wat opgesteld was in het PvA ook daadwerkelijk is uitgevoerd of dat er is afgeweken op bepaalde onderzoeksfasen. Naast de beschrijving van het onderzoekproces deelt de student zijn beleving van het onderzoek in zijn reflectie. Tot slot wordt er gekeken of de gestelde competenties zijn gehaald vanuit de Hogeschool Rotterdam.

Reflectie en evaluatie op het PvA:

Na de onderzoeksfase werd in fase 3 duidelijk dat er een stap ontbrak in het PvA. Voordat de Kruiswaterbrug geoptimaliseerd kon worden, moest een basismodel worden gemodelleerd. Aan de hand van tekeningen van VSF werd de Kruiswaterbrug één op één overgenomen. In eerste instantie werd het huidige ontwerp eenvoudig gemodelleerd, maar aan de hand van de resultaten, die werden vergeleken met de uitkomsten van ingenieursbureau ITBB, bleek dat de resultaten niet overeen kwamen. Hierdoor moest het model vrij nauwkeurig worden overgenomen. Vanuit het basismodel, waarin alle afmetingen, belastingen en combinaties goed waren gemodelleerd, kon fase 3 (nieuw ontwerp brugdek) worden uitgevoerd. Dit zorgde voor een uitloop van 6 weken. Dit kwam onder andere door een gebrek aan kennis van het programma SCIA Engineer. Hierna is het onderzoek gegaan zoals het was opgesteld in het PvA.

De kwaliteit van het onderzoek heeft uiteindelijk geen invloed ondervonden van de vertraging.

Eigen reflectie:

Na 20 weken ben ik tevreden over hoe het onderzoek is verlopen. Uit ervaring kan ik meedelen dat er veel kennis nodig is om een stalen brug te ontwerpen. Aan de hand van deze Afstudeeropdracht heb ik veel kennis opgedaan op het gebied van onder andere:

- Onderzoek doen in het algemeen;
- Constructies en de achterliggende berekeningen;
- De vele aspecten die van betekenis zijn voor het ontwerpen van een stalen brug;
- Het modelleren met het programma SCIA Engineer.

In de reflectie op het PvA staat beschreven dat ik een belangrijke stap was vergeten. Tijdens een onderzoek blijkt dan hoe belangrijk de voorbereidingen zijn. Aan het Plan van Aanpak is veel aandacht besteed. Het vergeten van bepaalde stappen wordt beschouwd als een leermoment wanneer er onderzoek wordt gedaan. Naast dit ene punt ben ik over de wijze waarop het onderzoek is verlopen zeer tevreden.

Aan het begin van het onderzoek waren zowel mijn eigen verwachting als die van de begeleiders dat er voordeel kon worden gehaald uit het toepassen van een hogere staalkwaliteit in een brugdek. Aan de ene kant is het jammer dat uit het onderzoek geen positief advies naar voren is gekomen. Aan de andere kant is een negatief advies ook een advies.

Tijdens mijn afstudeerperiode ben ik iedere dag met een zeer goed gevoel naar Volker Staal en Funderingen gegaan. Niet alleen door mijn begeleider Björn van der Maale ben ik goed begeleid, maar ook bij de overige mensen op de constructieafdeling kon ik terecht met verschillende vraagstukken. Vanuit de Hogeschool Rotterdam is circa zes keer overleg waarbij ik feedback kreeg van Sven van Rosmalen. Bij deze wil ik nogmaals de betrokken personen bedanken tijdens mijn afstudeerperiode.



COMPETENTIEVERANTWOORDING



Competentieverantwoording

Naam : Maurits van der Linden

Studentnummer : 0868441

Toelichting: Met het afstuderen toon je aan dat je onderstaande competenties ontwikkeld hebt. Dit moet je kunnen aantonen! Geef aan of en hoe je gewerkt hebt aan deze competenties en waar het bewijs daarvoor terug te vinden is in het rapport. Voeg dit verslag toe als laatste hoofdstuk van het rapport.

Competenties met Kerntaken	Niveau	Beoordeling ¹	Wat heb je gedaan? Waar is dat terug te vinden in het rapport?
1 Initiëren 1.1 Signaleren en/of analyseren van (de behoefte aan) een civieltechnisch project in de gebouwde omgeving. 1.2 Ontwikkelen van een Programma van Eisen voor een te maken civiel technisch project.	2	B.1, B.3	De Kruiswaterbrug is gebruikt als referentieproject voor het afstuderen. Om inzicht te krijgen, zijn het rapport van ITBB en de tekeningen van VSF nauwkeurig onderzocht. In Bijlage 3 en het begin van het hoofdrapport wordt het analyseren van een civieltechnisch project toegepast. Het PvE dat van toepassing is voor dit afstudeeronderwerp bestaat uit meerdere uitgangspunten. Deze punten berusten op de Eurocode 0, Eurocode 1 en Eurocode 3 (opgenomen in het hoofdverslag en Bijlage 3). Verder berusten de uitgangspunten op de eisen gesteld door RWS (ROK) en de uitgangspunten die van kracht waren bij het project van de Kruiswaterbrug.
2 Ontwerpen 2.1 Ontwerpen van oplossingsvarianten in de vorm van bv. schema's, tekeningen en/of berekeningen voor civieltechnische (deel)problemen. 2.2 Oplossingsvarianten beoordelen en de meest passende kiezen. 2.3 Inventariseren en verzamelen van gegevens	3	B.1, B.4,	Er is geoptimaliseerd ontwerp ontworpen met behulp van SCIA Engineer 15.3. Aan de hand van berekeningen, waarin de resultaten overzichtelijk zijn weergegeven in tekeningen en tabellen, is aangetoond dat de optimalisatie mogelijk is. (Bijlage 10) Voor het uitwerken van de berekeningsmethodieken is veel literatuur bestudeert om zo tot benodigde gegevens te kunnen komen. Omschreven in hoofdstuk 6 van het hoofdrapport en in Bijlage 5. Belangrijke gegevens voor o.a. doorbuigingen, temperatuur en vermoeiing zijn behandeld in hoofdstuk 3 van het hoofdrapport. Informatie afkomstig uit de EC en het rapport van ITBB.

¹ De codes verwijzen naar de rubric uit de modulehandleiding CIVAFS

Competenties met Kerntaken	Niveau	Beoordeling ¹	Wat heb je gedaan? Waar is dat terug te vinden in het rapport?
3 Specificeren 3.1 Schematiseren van de werkelijke situatie in een (vereenvoudigd) rekenkundig of fysisch model 3.2 Detailleren en/of berekenen en tekenen van een (deel van een) civieltechnische ontwerp 3.3 Contract-, begrotings- en vergunningsdocumenten opstellen en contractvorming organiseren en begeleiden	3	B.5	Om SCIA Enigineer te kunnen hanteren is in Bijlage 9 een handberekening uitgewerkt om aan competentie 3.1 te voldoen. De meeste tekeningen zijn 3D tekeningen die gemaakt zijn met SCIA. In het hoofdrapport zijn tevens tekeningen opgenomen die met AutoCAD zijn gerealiseerd. Voor de optimalisatie is de werkelijke situatie van de Kruiswaterbrug gesimuleerd. Dit model dient als basis voor de volgende stap in het onderzoek. De uitkomsten in SCIA en de resultaten van ITBB worden in hoofdstuk 6 vergeleken.
6 Monitoren, toetsen en evalueren 6.1 Hanteren van plan-do-check-act cyclus 6.2 Omgevingsbewust en maatschappelijk verantwoord handelen	3	A.2, B.1, B.2, B.3, B.5	Gedurende de periode is er gewerkt volgens de vooraf opgestelde planning in het plan van aanpak. Wanneer hier van af is geweken, werd dit tijdig gemeld aan de begeleiding. De stand van zaken werd wekelijks besproken om zo de voortgang van het onderzoek te bewaken.
7 Analyseren en onderzoeken 7.1 Uitvoeren van onderzoek	3	A.1, A.2, B.2, B.3, B.4, B.5	Aan de hand van de resultaten van het geoptimaliseerde model van de Kruiswaterbrug zijn de uitkomsten van het onderzoek geanalyseerd. Het onderzoek staat beschreven in hoofdstuk 6. Het onderzoek zelf staat beschreven in hoofdstuk 5.
8 Communiceren en samenwerken 8.1 Verwoorden en verbeelden van informatie 8.2 Functioneren in teams	3	C.2, C.3, C.4	Tijdens het afstuderen is er geregeld contact geweest met zowel de begeleider vanuit het bedrijf als die vanuit de Hogeschool. Voor het verbeelden van informatie werken illustraties nog steeds het beste. Daarom dat deze in grote getalen aanwezig zijn. De goede communicatie binnen het bedrijf blijkt uit het resultaat, aangezien werkmethodes, uitwerkingen en resultaten uitvoerig zijn besproken.
9 Managen en ondernemen 9.1 Regie voeren over eigen leerproces 9.2 Projectmatig werken en processen aansturen	2	A.2, B.2, C.1, C.2	Tijdens de afstudeerperiode heeft de afstudeerder met regelmaat contact opgenomen met de begeleiders (school en bedrijf) om zo de voortgang te kunnen bespreken. Er is gewerkt volgens de wensen van het bedrijf. Aan het begin van het afstuderen zijn er een aantal zaken naar voren gekomen met de punten die van belang zijn vanuit de Hogeschool Rotterdam. Zodoende is er met beide partijen rekening gehouden.