

2015

Dimensioneren en controleren op vermoeiing

Afstudeerscriptie

Naam:	Esther Brouwer
Studentnummer:	0845504
Opleiding:	Bouwkunde
Instituut:	Hogeschool Rotterdam
Afstudeerbedrijf:	Ingenieursstudio DCK
Bedrijfsbegeleider:	Dhr. Geldof
Docent:	Dhr. Slabbekoorn
Datum:	12-06-2015
Versie:	2.0

Gegevens student

Naam: Esther Brouwer

Studentnummer: 0845504

Adres: Anna van Burenstraat 26
3136 CG Vlaardingen

Tel. Nummer: 06 14 59 38 35

Mailadres: estherbrouwer94@gmail.com

Gegevens bedrijf en begeleider

Bedrijfsnaam: Ingenieursstudio DCK

Adres: Pesetastraat 48
2991 XT Barendrecht

Bedrijfsbegeleider: Dhr. Geldof

Tel. Nummer: 06 36 19 28 28

Mailadres: erik@studio-dck.nl

Gegevens school en begeleider

School: Hogeschool Rotterdam

Adres: G. J. de Jonghweg 4-6
3015 GG Rotterdam

Tel. nummer: 010 794 48 01

Schoolbegeleider: Dhr. Slabbekoorn

Mailadres: J.I.Slabbekoorn@hr.nl

Voorwoord

Het document dat voor u ligt is het afstudeerrapport waar ik het afgelopen halfjaar aan heb gewerkt. Het rapport met als onderwerp “Ontwerpen en *controleren op vermoeiing*” dient als mijn laatste opdracht voor de opleiding Bouwkunde aan de Hogeschool Rotterdam.

Het bedrijf, waarvoor dit rapport geschreven is, betreft Ingenieursstudio DCK. Een adviesbureau dat bestaat uit vier personen en gevestigd is in Barendrecht. Momenteel zijn er een aantal infrastructurele projecten aan de gang in Nederland, aan enkele heeft DCK in de bouwkundige afbouwfase meegewerkt. Een kenmerkend aspect bij deze projecten is de bewegingen van de treinen/metro's door de tunnels. Hierdoor ontstaan dynamische belastingen en dient een constructie getoetst te worden op vermoeiing. Binnen DCK was er niet veel bekend over dit onderwerp en moest er dus veel uitgezocht worden voor het maken van deze berekeningen. De wens van het bedrijf is om in de detaillering en dimensionering van de verbindingen al rekening te houden met het verschijnsel vermoeiing. Tevens willen ze de berekeningen sneller en efficiënter kunnen maken. Het plan hiervoor is het opstellen van een handleiding waarin dit verwerkt is, zodat er bij een dergelijke opdracht tijd bespaard kan worden. Hierbij wil ik Ingenieursstudio DCK bedanken voor deze opdracht en voor de goede begeleiding.

Binnen de opleiding Bouwkunde is het onderwerp vermoeiing niet behandeld, dat is ook de reden waarom dit onderwerp mij erg aansprak. Een geheel nieuw onderwerp waar ik gedurende een halfjaar mezelf in ga verdiepen en alleen maar nieuwe kennis op ga doen. Tevens zie ik dit onderwerp als een goede voorbereiding voor de TU Eindhoven waar ik volgend schooljaar mijn master wil gaan doen.

Naast dit document is er nog een ander document waarin alle bijlages zijn toegevoegd. Onder de bijlages vallen het analyserapport en de handleiding ten behoeve van vermoeiing.

Veel leesplezier,
Esther Brouwer
Mei 2015

Samenvatting

Ingenieursstudio DCK ondervond bij het maken van vermoeiingsberekeningen enkele knelpunten. Aangezien er in de infrastructuur veel ontwikkelingen rondom trein- en metrostations zijn wordt er verwacht dat er in de aankomende jaren nog enkele opdrachten komen. De wens bij DCK is om deze opdrachten sneller en efficiënter te kunnen maken en om die reden is er binnen DCK de vraag naar een handleiding voor het maken van vermoeiingsberekeningen. Hiervoor dient er wel het een en ander uitgezocht te worden, daarom staat bij dit onderzoek de volgende hoofdvraag centraal:

Hoe kan Ingenieursstudio DCK het controleren van een constructie op vermoeiing het efficiënts aanpakken, waarbij rekeningen gehouden wordt met de detaillering en de dimensionering?

In verschillende deelvragen wordt er gewerkt naar een antwoord op deze vraag. De eerste vraag die hierbij hoort is de vraag: “Wat is vermoeiing?” Vermoeiing is een verschijnsel wat kan zorgen voor het bezwijken van een constructie. Dit gebeurt wanneer er tijdens een lange periode herhaaldelijk de grootte van de spanning in een detail of doorsnede verandert. Deze wisselingen in spanningen worden veroorzaakt door dynamische belastingen die niet constant aanwezig zijn of niet telkens met dezelfde waarde aanwezig zijn. Door de wisselingen kunnen er scheuren ontstaan in de constructie die kunnen leiden tot het bezwijken ervan.

Eurocodes 0, 1 en 3 zijn benodigd voor het maken van een controleberekening voor vermoeiing. In de Eurocode 0 bepaalt de algemene randvoorwaardes van het ontwerp en de belastingen, in Eurocode 1 wordt de belasting bepaald en Eurocode 3 is speciaal voor staalconstructies. In het deel 1993-1-9 worden de specifieke eisen en formules voor het controleren op vermoeiing genoemd.

Vervolgens wordt er gekeken naar het referentieproject Spoortunnel Delft, bij dit project heeft DCK de controleberekeningen op vermoeiing gemaakt voor de ophangconstructies van de Wings en de Baffles. Bij het referentieproject wordt er gekeken wat de prestatie eisen zijn die door de opdrachtgevers zijn opgesteld en wordt er gekeken wat de knelpunten zijn die werden ondervonden door DCK tijdens het maken van de berekeningen. Vervolgens worden de gemaakte berekeningen geanalyseerd. Hierbij wordt er gekeken hoe de berekeningen zijn aangepakt en wordt er naar de detaillering en dimensionering gekeken.

In de utiliteitsbouw en in de woningbouw is vermoeiing veelal niet een maatgevend verschijnsel, echter bij andere bouwwerken wel. Om een idee te krijgen hoe er bij dergelijke bouwwerken om wordt gegaan, wordt er gekeken naar de detaillering en de dimensionering van verbindingen bij bruggen en reuzenraden. Vervolgens wordt er een vergelijking gemaakt met de detaillering en dimensionering bij utiliteitsbouw om de verschillen eruit te kunnen halen. Uit dit onderzoek is gebleken dat er rondom de verbindingen gebruik wordt gemaakt van extra staal. Er wordt dus voor gezorgd dat de spanningen verspreid worden over meer oppervlakte, hierdoor worden piekspanningen voorkomen.

Deze onderzoeken worden gebundeld in een analyserapport. Met de conclusies uit dit rapport en de randvoorwaardes en de formules uit de Eurocodes wordt de handleiding samengesteld voor het maken van de berekeningen voor vermoeiing. De handleiding bestaat uit een hoofdstappenplan. Hierin worden alle stappen vermeld die gedaan moeten worden. Per stap wordt er doorverwezen naar een bepaald hoofdstuk, waar wordt uitgelegd wat er gedaan moet worden. In de eerste stap worden er gegevens verzameld omtrent het project. Vervolgens wordt er in de tweede stap gekeken naar de detaillering en de dimensionering van de verbindingen, hierbij wordt er geprobeerd om een verbinding te creëren waarin vermoeiing een kleinere rol speelt. In de derde stap worden de uitgangspunten rondom de verbinding bepaald en in stap 4 wordt er gekeken naar de optredende belastingen. Vanuit deze belastingen wordt er in stap 5 bepaald wat de aanwezige spanningen in een detail zijn. Vervolgens wordt er in stap 6 de vermoeiingssterkte bepaald en als laatste wordt er in stap 7 de verbinding gecontroleerd op vermoeiing.

De handleiding is geschreven om de berekeningen te behoeve van vermoeiing efficiënter te maken. Om te kijken of dit daadwerkelijk het geval is wordt er aan de hand van een casus door drie personen de handleiding getest. In eerste instantie kon de persoon die nog nooit een vermoeiingsberekening gemaakt had, niet de gehele berekening maken in verband met onduidelijkheden. Nadat deze onduidelijkheden eruit zijn gehaald, kon de berekening door iedereen gemaakt worden en werd de handleiding helder en bruikbaar bevonden.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave	5
Symbolenlijst	7
1. De opdracht	8
1.1. Aanleiding.....	8
1.2. Onderzoeksopzet.....	8
1.3. Onderzoeksvraag.....	9
1.4. Afbakening.....	9
2. Vermoeiing	10
2.1. Definitie	10
2.2. Belastingen	10
2.3. S-N curve	11
2.4. Gevolgen.....	11
2.5. Scheurvorming	12
2.6. Conclusie	12
3. Eurocode	13
3.1. Normen.....	13
3.2. Belastingen	13
3.2.1. Belastingcombinatie	14
3.2.2. Benodigde belastingen	14
3.2.2.1. Aerodynamische belasting	14
3.2.2.2. Dynamische effecten.....	14
3.3. Vermoeiingstoetsing	15
3.3.1. Beoordelings- en rekenmethodes	15
3.3.2. Spanningsintervallen	16
3.3.3. Vermoeiingssterkte	16
3.3.4. Dimensionering en detailcategorie	17
3.4. Conclusie	17
4. Referentieproject	19
4.1. Referentieproject	19
4.2. Prestatie eisen opdrachtgevers	19

4.3.	Knelpunten DCK.....	20
4.4.	Analyseren gemaakte berekeningen DCK	20
4.4.1.	Aanpak vermoeiingsberekening	20
4.4.2.	Detaillering, dimensionering en uitkomsten.....	21
4.5.	Vergelijk met berekeningen zonder vermoeiing	21
4.5.1.	Bevestiging Wings.....	22
4.5.2.	Bevestiging Baffles.....	22
4.5.3.	Vershil in oplossing	22
4.6.	Conclusie	23
5.	Detaillering en dimensionering	24
5.1.	Reuzenrad	24
5.2.	Bruggen	25
5.3.	Utiliteitsbouw	26
5.4.	Conclusie	26
6.	Handleiding t.b.v. vermoeiing	27
6.1.	Hoofdstroomschema.....	27
6.2.	Stap 1: Gegevens verzamelen	28
6.3.	Stap 2: Ontwerp richtlijnen	28
6.4.	Stap 3: Bepalen uitgangspunten	29
6.5.	Stap 4: Bepalen belastingen	30
6.6.	Stap 5: Bepalen spanningsintervallen	30
6.7.	Stap 6: Bepalen vermoeiingssterkte.....	30
6.8.	Stap 7: Controleren vermoeiing	31
7.	Valideren van de handleiding.....	32
7.1.	De opdracht.....	32
7.2.	Uitwerking opdracht.....	33
7.3.	Feedback op de handleiding.....	36
8.	Conclusie	37
9.	Bronvermelding.....	39

Symbolenlijst

In dit document worden verschillende symbolen gebruikt. In de onderstaande tabel worden de betekenissen van de symbolen vermeld en de bijbehorende eenheid.

Symbol	Betekenis	Eenheid
Y_{Ff}	Partiële factor voor de spanningsintervallen met een constante amplitude	[-]
Y_{Mf}	Partiële factor voor de vermoeiingssterkte	[-]
N_c	Referentiewaarde levensduur, $N_c = 2$ miljoen cycli	[-]
N_R	Ontwerplevensduur uitgedrukt in het aantal cycli in relatie tot een constante spanningsinterval	[-]
m	Helling van de vermoeiingskromme	[-]
$\Delta\sigma$	Spanningsinterval normaalspanning	[N/mm ²]
$\Delta\tau$	Spanningsinterval schuifspanning	[N/mm ²]
$\Delta\sigma_c + \Delta\tau_c$	Referentiewaarde van de vermoeiingssterkte bij $N_c = 2$ miljoen cycli	[N/mm ²]
$\Delta\sigma_R + \Delta\tau_R$	Equivalentente spanningsinterval met een constante amplitude in relatie tot N_R	[N/mm ²]
$\Delta\sigma_D$	Vermoeiingsgrens met een constante amplitude	[N/mm ²]
$\Delta\sigma_{E,2} + \Delta\tau_{E,2}$	Equivalentente spanningsinterval met een constante amplitude in relatie tot 2 miljoen cycli.	[N/mm ²]

1. De opdracht

1.1. Aanleiding

Een aantal infrastructurele ondergrondse projecten worden op dit moment gerealiseerd in Nederland. Onder andere de spoortunnel in Delft en de Noord-Zuidlijn in Amsterdam (voor respectievelijk trein- en metroverkeer). Gezien de toenemende mobiliteit en aandacht voor de leefbaarheid in de samenleving is de verwachting dat ook in de toekomst nog meer van deze projecten zullen worden gerealiseerd.

Een kenmerkend aspect bij deze projecten is de bewegingen van treinen/metro's door de tunnel. Deze veroorzaken dynamische belastingen, in de vorm van drukgolven. Bij doorgaand verkeer met relatief hoge snelheden kunnen deze belastingen maatgevend zijn ten opzichte van de reguliere belastingen (wind/veranderlijk).

Om statische berekeningen mogelijk te maken worden dynamische belastingen veelal middels dynamische load factors (DLF) omgerekend naar quasi-statische belastingen. Daarnaast kunnen, door het frequente voorkomen, vermoeiingsaspecten een rol spelen.

Ingenieursstudio DCK is als constructeur betrokken bij de afbouw van een aantal tunnels voor trein- en metroverkeer. In die hoedanigheid heeft DCK voor bouwkundige constructies de detailengineering verricht en haar opdrachtgevers geadviseerd. Tijdens het maken van de berekening ten behoeve van vermoeiingscapaciteit moest er veel worden uitgezocht en werd de berekening door verschillende uitgangspunten en project specifieke randvoorwaardes anders gemaakt. Dit komt mede door de richtlijnen die door opdrachtgevers gesteld worden. Om de berekeningen efficiënter/beter/sneller te maken is er binnen DCK de wens om een handleiding te maken, waarin de stappen staan uitgewerkt die gedaan moeten worden voor het controleren van een constructie op vermoeiing. Tevens moet er in deze handleiding de dimensionering en de detaillering van de constructie op vermoeiing meegenomen worden.

1.2. Onderzoeksopzet

Er moet dus een handleiding geschreven worden waarin de stappen die gedaan moeten worden voor het maken van de controleberekeningen voor vermoeiing zijn genoteerd. Hierbij dient er tevens rekening gehouden te worden met de dimensionering en detaillering. Om dit te bereiken moeten er enkele stappen genomen worden en dit gebeurt in fases. De eerste fase is de oriëntatiefase, hierin wordt het plan van aanpak opgesteld en wordt er ingelezen in het onderwerp. In de inventarisatiefase wordt er gekeken naar het referentieproject en wordt er gekeken naar hoe er wordt omgegaan met vermoeiing bij andere bouwwerken. Bij de analysefase wordt de opgedane informatie verzameld en in kaart gebracht, vervolgens worden er in de concluderende fase conclusies getrokken uit de verzamelde fase. In de volgende fase wordt de oplossing uitgewerkt, die daarna wordt getest aan de hand van een casus. Al deze stappen dienen gedocumenteerd te worden en vormen uiteindelijk het afstudeerverslag.

1.3. Onderzoeksvraag

Hoofdvraag

De hoofdvraag die centraal staat tijdens in dit afstudeerrapport is:

Hoe kan Ingenieursstudio DCK het controleren van een constructie op vermoeiing het efficiënts aanpakken, waarbij rekeningen gehouden wordt met de detaillering en de dimensionering?

Deelvragen

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden zijn er deelvragen opgesteld, de antwoorden op deze deelvragen vormen samen het antwoord op de hoofdvraag.

- Wat is vermoeiing?
- Onderzoeken naar welke beoordelings- en rekenmethoden in de normen staan vermeld.
 - Welke beoordelings- en rekenmethoden worden in de normen gegeven?
 - Belastingen
 - Spectrum van spanningsintervallen
 - Dynamisch gedrag (DLF)
 - Vermoeiingsgedrag
 - Voor welke onderdelen zijn deze belastingen relevant/maatgevend?
 - Welke invloeden heeft vermoeiing op de dimensionering en detaillering?
- Welke (prestatie)eisen stellen opdrachtgevers aan de constructie?
- Wat zijn de tegengekomen knelpunten bij het maken van de benodigde berekeningen binnen DCK?
 - Wat had er beter/sneller/efficiënter gekund?
- Analyseren referentieproject Spoortunnel Delft
 - Op welke wijze zijn ze hiermee omgegaan bij het referentieproject Spoortunnel Delft?
 - In het ontwerptraject
 - In de uitvoeringsfase
 - Toepassing en praktische toepasbaarheid regelgeving
 - Wat zijn de gevolgen van de berekeningen op de dimensionering en detaillering van de verschillende onderdelen die berekend worden?
- Hoe wordt er bij andere bouwwerken waar vermoeiing een grote rol speelt omgegaan met de detaillering en dimensionering van de constructie?

1.4. Afbakening

Om bij het onderzoek niet teveel onderwerpen te betrekken en het haalbaar te maken binnen de te verkregen tijd worden er enkele afbakeningen gemaakt. Deze afbakeningen staan hieronder vermeld:

- Er wordt alleen gekeken naar vermoeiing van constructies die uit staal worden opgebouwd, dit houdt in dat vermoeiing met betrekking tot gewapend beton buiten beschouwing wordt gelaten.
- Om een beperking te maken binnen de vele belastingen wordt er alleen gekeken naar belastingen die zich rondom spoorwegen bevinden.

2. Vermoeiing ¹

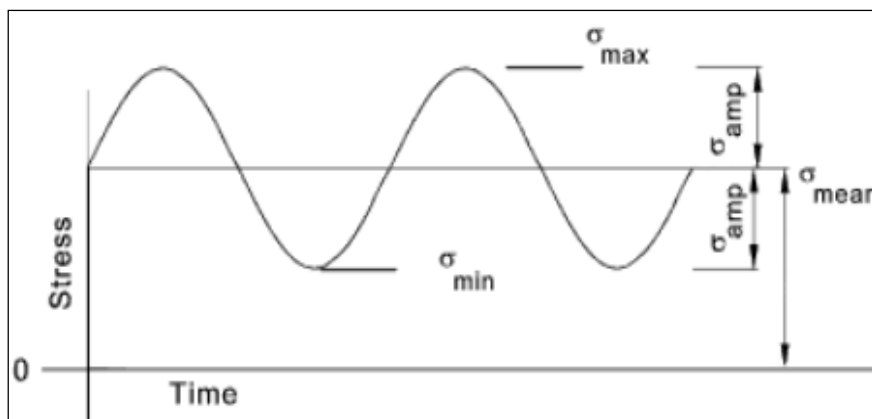
Voordat er inhoudelijk naar de berekeningen gekeken kan worden is het van belang om eerst te weten wat vermoeiing inhoudt en waardoor het ontstaat. In dit hoofdstuk wordt er daarom gekeken naar de deelvraag: “Wat is vermoeiing?”

2.1. Definitie

De letterlijke definitie van vermoeiing volgens NEN-EN 1993-1-9 is: “Proces van ontstaan en het voortschrijden van scheuren in een constructief onderdeel door belastingen die een wisselende spanning veroorzaken”.

2.2. Belastingen

Elke constructie wordt belast met statisch belastingen en dynamische belastingen. Statische belasting is altijd in dezelfde mate van grote aanwezig. De dynamische belastingen zijn daarentegen niet altijd hetzelfde, deze belastingen kunnen met kleine of grote verschillen veranderen. De veranderingen kunnen optreden over een lang of kort tijdsbestek. Wanneer de grootte van de dynamische belastingen sterk wisselt, waarmee bedoeld wordt dat de aanwezige belasting het ene moment zeer hoog is en het andere moment niet of nauwelijks aanwezig is, als dit herhaaldelijk voor komt kan er in de loop der jaren vermoeiing van het materiaal optreden. In afbeelding 2.1 zijn deze schommelingen in de maximale en minimale belasting weergegeven. Enkele voorbeelden van krachten die deze wisselingen veroorzaken zijn windbelastingen, temperatuurswisseling, trillingen van machines, trillingen veroorzaakt door het verkeer, etc.



Afbeelding 2.1: Wisseling in belastingen t.a.v. tijd ²

¹ Bron tekst:

Voor de gebruikte bronnen voor de tekst zie bladzijde 39 voor de verdere gegevens.

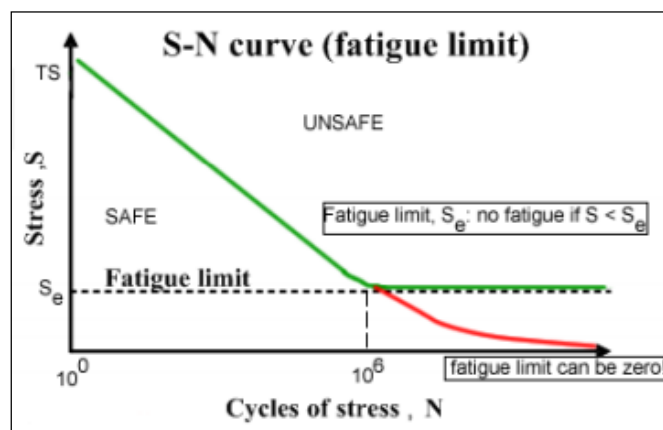
² Bron afbeelding:

Afstudeerwerk van B. Meertens, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

2.3. S-N curve

Aan August Wöhler werd in 1852 door de Pruisische minister van handel gevraagd om te onderzoeken waarom er in de assen van treinen en wagons breuken ontstonden. Zijn onderzoek was het eerste systematische onderzoek naar vermoeiing. Hieruit is de S-N curve ontstaan. Deze curve geeft het verband tussen de spanning in het materiaal en het aantal wisselingen weer. Aan de hand van het aantal spanningswisselingen die tijdens de gehele levensduur zullen optreden kan er bepaald worden hoe groot de spanningen in het constructie element maximaal mogen zijn. Wanneer er onder deze grens wordt gebleven zal de constructie niet bezwijken. In afbeelding 2.2 is de deze SN-curve weergegeven.

Tevens is in deze afbeelding te zien dat er voor sommige materialen, bijv. staal, er een vermoeiingsgrens is (horizontale lijn) en dat andere materialen, bijv. aluminium, bij een bepaald aantal wisselingen geen spanning meer op kunnen nemen (rode lijn). Vermoeiingsgrens houdt in dat een materiaal onder een bepaald spanningsniveau niet bezwijkt of dat het pas bezwijkt na 10^7 spanningswisselingen. Door verschillende factoren kan de waarde van deze vermoeiingsgrens variëren, enkele factoren zijn aantasting door corrosie, aantasting door chemische stoffen en temperatuur.



Afbeelding 2.2: S-N curve³

2.4. Gevolgen

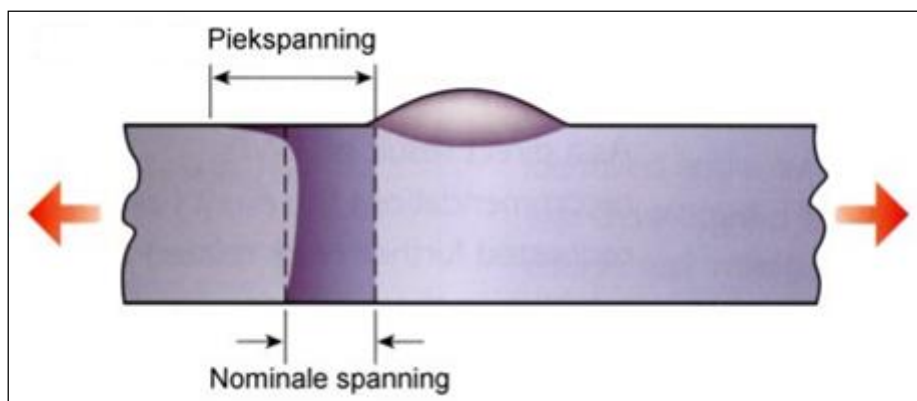
Bij vermoeiing van het materiaal verminderen bepaalde eigenschappen wat uiteindelijk kan leiden tot bezwijken. Onder deze eigenschappen vallen sterkte, elasticiteit en hardheid. Door de verminderde eigenschappen ontstaan er scheuren in het materiaal, het ontstaan van scheuren kan opgedeeld worden in drie fases: stabiele scheurvorming, onstabiele scheurvorming en bezwijken. De eerste fase houdt in dat er een scheur ontstaat, waarvan de lengte langzaam en geleidelijk zal toenemen. Door de scheur wordt de doorsnede die de belasting op moet nemen kleiner waardoor de scheur op een gegeven moment sneller groter wordt (de tweede fase). Dit proces loopt door tot dat in het materiaal de maximale capaciteit is bereikt en de constructie bezwijkt (de derde fase).

³ Bron afbeelding:

Afstudeerwerk van B. Meertens, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

2.5. Scheurvorming

Een vermoeiingsscheur ontstaat meestal rond plaatsen waar zich hoge spanningsconcentraties voordoen. Dit bevindt zich vaak rondom lasverbindingen, boutverbindingen, dikteovergangen en rondom oneffenheden in het materiaal. In afbeelding 2.3 is een mogelijke weergave gemaakt van een piekspanning rondom een dikteovergang van het materiaal. Van de vier mogelijke plaatsen van het ontstaan van een vermoeiingsscheur is de plek rondom een lasverbinding de meest voorkomende. Dit komt doordat de structuur van de materialen veranderd door het lassen en doordat er spanningen overgedragen moeten worden tussen de elementen. Hierdoor ontstaan er hoge spanningsconcentraties rondom de aansluiting. Echter niet alle lasverbindingen zijn hetzelfde en kunnen dus niet op dezelfde manier beschouwd worden wanneer de levensduur van een constructie bepaald moet worden en de maximale kracht die hiermee samen gaat.



Afbeelding 2.3: Weergave piekspanning naast dikteovergang van het materiaal ⁴

2.6. Conclusie

Het bezwijken van constructies door vermoeiing houdt in dat tijdens een lange periode herhaaldelijk een afwisselende spanning in de constructie optreedt. Deze afwisselende spanning komt voort uit de dynamische belastingen die niet constant in dezelfde waarde aanwezig is. Door die afwisseling moet de constructie zich telkens aanpassen om de belastingen op te kunnen vangen. Wanneer dit over een lange periode gebeurt, kan er scheurvorming in de constructie ontstaan. Deze scheuren kunnen uiteindelijk leiden tot het bezwijken van de constructie.

⁴ Bron afbeelding:

Nederlands instituut voor lastechniek, zie bladzijde 39 voor de verdere gegevens.

3. Eurocode ⁵

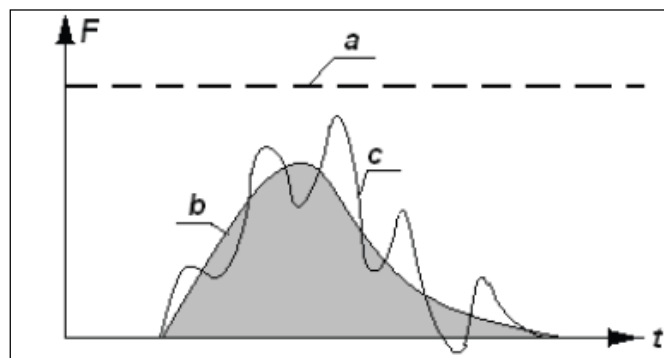
In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de vraag: “Welke onderdelen in de normen zijn van belang en wat moet er gedaan worden volgens de normen om te kunnen controleren of een staalconstructie voldoet aan de gestelde eisen voor vermoeiing?” Om deze vraag te kunnen beantwoorden is de vraag opgedeeld in onderwerpen. Als eerste wordt er gekeken naar welke normen van toepassing zijn, vervolgens wordt er gekeken naar de belastingen, welke belastingen er optreden en welke belastingcombinaties er gebruikt moeten worden. Daarna wordt er naar het controleren van vermoeiing zelf gekeken. Hierbij worden de stappen die genomen worden stuk voor stuk behandeld.

3.1. Normen

De Eurocodes bestaan uit 58 bestanden, deze zijn onderverdeeld in Eurocode 0 t/m Eurocode 9. Voor het berekenen van staal constructies wordt er gekeken naar Eurocode 0, Eurocode 1 en Eurocode 3. In Eurocode 0 wordt er gekeken naar de grondslagen van het ontwerp en worden dus enkele randvoorwaardes opgesteld. In Eurocode 1 wordt de belasting bepaald waarmee gerekend moet worden en in Eurocode 3 worden de staalconstructies behandeld. In het deel 1993-1-9 wordt er specifiek gekeken naar het berekenen van vermoeiing.

3.2. Belastingen

In hoofdstuk 2 “Vermoeiing” is vermeld dat op een constructie altijd een dynamische en een statische belasting (a) werkt. Wanneer de dynamische belasting (b) herhaaldelijk in een hoge waarde op een constructie werkt kan dit voor een dynamisch respons van de constructie (c) zorgen, een voorbeeld van hoe een constructie door een dynamische belasting in beweging wordt gebracht is in afbeelding 3.1 weergegeven. Door deze respons kan er vermoeiing in de constructieve onderdelen en/of verbindingen optreden.



Afbeelding 3.1: Respons van constructie op dynamische belasting ⁶

⁵ Bron tekst:

Voor de gebruikte bronnen voor de tekst zie bladzijde 39 voor de verdere gegevens.

⁶ Bron afbeelding:

Figuur 1.1 uit NEN-EN 1991-1-7+C1:2011, voor verdere gegevens zie bladzijde 39.

3.2.1. Belastingcombinatie

Het controleren van een constructie op vermoeiing wordt naast de gebruikelijke drie controles gedaan, de toetsing op stijfheid, sterkte en stabiliteit. De toetsing voor sterkte en stabiliteit is ten behoeve van de veiligheid van de personen en de constructie. Deze toetsing wordt gedaan in de uiterste grenstoestand en dienen er dus extra veiligheidsfactoren meegenomen te worden. Deze verschillen per type constructies en per belastingtypen. De toetsing van stijfheid wordt gedaan in de bruikbaarheidsgrenstoestand. Deze toetsing wordt gedaan ten behoeve van het uiterlijk en de bruikbaarheid van de constructie. Hierbij worden er geen veiligheidsfactoren meegenomen. Het berekenen van vermoeiing vindt dus naast deze controles plaats en wordt net als bij de toetsing van de stijfheid gedaan zonder veiligheidsfactoren. De berekende blijvende en veranderlijke belastingen worden bij elkaar opgeteld.

3.2.2. Benodigde belastingen

Er wordt gekeken naar constructies die zich naast spoorwegen bevinden. In deze omgeving komen er belastingen voor die worden veroorzaakt door het treinverkeer, deze belastingen kunnen zorgen voor een dynamische reactie van een constructie. Echter wordt er hier gekeken naar bouwkundige constructies en niet naar civiele constructies, dus de belastingen die op het spoor werken worden niet meegenomen. Hierdoor blijven alleen de dynamische effecten, de aerodynamische belastingen en de aanrijbelastingen over. Echter treedt aanrijbelasting nauwelijks op en wanneer een element belast wordt op aanrijbelasting dan moet het element in zijn geheel worden doorgerekend om te kijken wat de schade is en of er aanpassingen gedaan moeten worden. Naast de belastingen die worden gecreëerd door het treinverkeer zijn er ook nog algemene belastingen die meegenomen moeten worden zoals het eigengewicht van de constructie en de overige blijvende elementen. Tevens moet in sommige gevallen de windbelasting ook meegenomen worden. Bij het bepalen van de windbelasting wordt NEN-EN 1991-1-4 gebruikt.

3.2.2.1. Aerodynamische belasting

Een aerodynamische belasting veroorzaakt een voortbewegende drukgolf. Deze wisselt druk- en zuigkracht op een constructie af. De grootte van deze belasting hangt af van de vorm van de constructie, de plaatsing ten opzichte van het spoor en de snelheid en vorm van de trein. De belastingen worden geschematiseerd als equivalente belastingen ter plaatse van de voor- en achterzijde van een trein. Om de waarde van deze belasting te bepalen, zijn de belastingen opgedeeld in vijf situaties. In deze situaties worden de verschillende plaatsen waar zich de constructies bevinden ten opzichten van het spoor. Voor het bepalen van deze aerodynamische belasting wordt er in NEN-EN 1991-2 paragraaf 6.6 per situatie de manier van berekenen uitgelegd.

3.2.2.2. Dynamische effecten

De dynamische belastingen zorgen voor een respons van de constructie, de respons van een constructie dient meegenomen te worden in de berekeningen. Dit wordt gedaan met behulp van de Dynamic Load Factor (DLF), met deze factor wordt de statische bepaalde belasting vermenigvuldigd. In NEN-EN 1991-2 in paragraaf 6.6.1 wordt de dynamische versterkingsfactor voor situaties waarbij de constructies zich evenwijdig aan het spoor bevinden gegeven. Bij deze situatie moet de equivalente belastingen over een lengte van 5m gemeten vanaf het begin en het einde van de constructie vermenigvuldigd worden met een dynamische versterkingsfactor 2,0. Echter moet er bij constructies die zeer gevoelig zijn voor dynamisch respons een nader onderzoek gedaan worden of deze factor groot genoeg is. Voor een dergelijk onderzoek wordt er een simulatie gemaakt van de te verwachten situatie en wordt er met de maatgevende aspecten rekening gehouden.

3.3. Vermoeiingstoetsing

De belastingen zijn in kaart gebracht, vervolgens kan de constructie op vermoeiing gecontroleerd worden. Deze toetsing wordt gedaan met behulp van Unity Checks. In totaal zijn er drie Unity Checks waarnaar gekeken moet worden, hieronder worden de verschillende Unity Checks weergegeven.

$$UC \text{ voor normaalspanning} = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C \div Y_{Mf}} \leq 1,0 \quad [1]$$

$$UC \text{ voor schuifspanning} = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C \div Y_{Mf}} \leq 1,0 \quad [2]$$

Hierin is:

- Y_{Ff} Partiele factor voor de spanningsintervallen [-]
- Y_{Mf} Partiele factor voor de vermoeiingssterkte [-]
- $\Delta\sigma_{E,2}$ en $\Delta\tau_{E,2}$ Equivalente spanningsinterval [in N/mm²]
- $\Delta\sigma_C$ en $\Delta\tau_C$ Referentiewaarde van vermoeiingssterkte [in N/mm²]

Tevens moeten alle constructies waarbij beide spanningen aanwezig zijn getoetst worden met de volgende controle formule:

$$UC \text{ gecombineerd} = \left(\frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C \div Y_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{Y_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C \div Y_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0 \quad [3]$$

In de volgende paragrafen wordt er bekeken hoe aan de verschillende grootheden gekomen moet worden, dit kan gedaan worden aan de hand van berekeningen of uit het halen van tabellen.

3.3.1. Beoordelings- en rekenmethodes

Er zijn drie beoordelingsmethodes: de schadetolerante methode, de veilige levensduurmethode en de eindige methode. De *schadetolerante methode* houdt in dat het gedrag van de constructie in de gaten gehouden wordt. Bij deze methode wordt er regelmatig tijdens de gehele ontwerplevensduur gecontroleerd op vermoeiingsschade. Mocht er schade zijn ontstaan, dan kan dit hersteld worden. Deze methode is alleen toepasbaar wanneer er bij de maatgevende verbindingen gekomen kan worden om te kunnen controleren en moet er een mogelijkheid zijn om de belasting her te verdelen. Tevens dient er een inspectieprogramma opgesteld te worden.

De *veilige levensduurmethode* houdt in dat er tijdens de gehele ontwerplevensduur het gedrag van de constructie bepaald wordt. Echter kan er bij deze methode niet bij alle constructieve verbindingen gecontroleerd worden op vermoeiingsschade, daarom wordt er bij deze methode met een zwaardere factor gerekend.

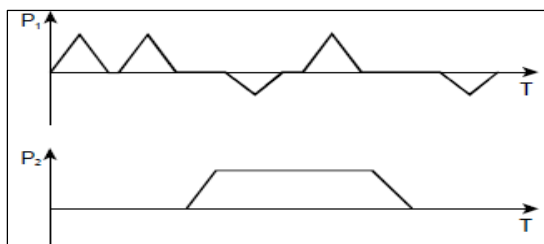
De verschillen in deze methode worden meegenomen in de berekening door middel van een partiële factor voor vermoeiingsterkte (Y_{Mf}), deze factor is weergegeven in tabel 3.1 van NEN-EN 1993-1-9. Tevens wordt hierin onderscheid gemaakt in de grootte van de gevolgen wanneer het constructie onderdeel zou bezwijken door vermoeiing.

Bij de *eindige methode* is er bekend wat de levensduur is van bepaalde onderdelen. Wanneer dat het geval is, hoeft er geen vermoeiingscontrole gedaan te worden van het betreffende onderdeel. Er dient alleen in de gaten gehouden te worden dat het element voor het einde van zijn levensduur vervangen wordt.

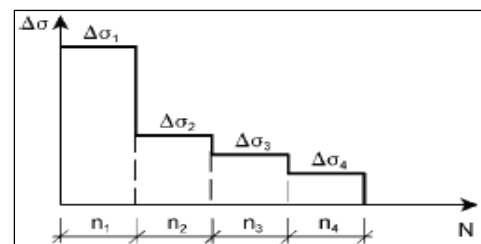
3.3.2. Spanningsintervallen

Het bepalen van de maatgevende spanningsinterval kan op twee manieren gedaan worden en is afhankelijk van de beoordelingsmethode, hoeveelheid belastingen en de ontwerplevensduur. De eerste mogelijkheid is dat de spanning bepaald wordt met behulp van de belasting die zorgt voor de hoogste spanningsinterval. Deze mogelijkheid wordt toegepast wanneer er maar één type dynamische belasting optreedt tijdens de ontwerplevensduur of wanneer er meerdere belastingspectrums aanwezig zijn maar niet bekend is hoe vaak deze zich voordoet tijdens de ontwerplevensduur en/of in stap 3 gekozen is voor veilige levensduurmethode.

De tweede mogelijkheid wordt toegepast wanneer er in stap 3 gekozen is voor schadetolerante methode en wanneer er meerdere belastingspectrums aanwezig zijn waarvan bekend is hoe vaak die voorkomen tijdens de ontwerplevensduur. Bij deze mogelijkheid wordt er per belastingspectrum bepaald wat de spanningsintervallen zijn, in afbeelding 3.2 is een voorbeeld gegeven van mogelijke spanningsintervallen. Vervolgens worden deze spanningsintervallen verwerkt in een histogram per aantal keer dat de interval zich voor doet tijdens de ontwerplevensduur. Uit een histogram wordt vervolgens de maatgevende spanningsinterval bepaald, in afbeelding 3.3 is een voorbeeld weergave van een histogram weergegeven.



Afbeelding 3.2: Spanningsintervallen ⁷



Afbeelding 3.3: Histogram spanningsintervallen ⁸

3.3.3. Vermoeiingssterkte

De vermoeiingssterkte van een constructie is afhankelijk van de elementen en de verbindingen. Het bepalen van de vermoeiingssterkte wordt gedaan met behulp van de tabellen 8.1 tot en met 8.10 in NEN-EN 1993-1-9. In deze tabellen bevinden zich verschillende verbindingen, die vervolgens worden gekoppeld aan een detailcategorie. Een detailcategorie geeft de referentiewaarde van de vermoeiingssterkte ($\Delta\sigma$ en $\Delta\tau$) aan in N/mm^2 bij een N_c van 2 miljoen cycli.

Ten eerste moet er bepaald worden wat de ontwerplevensduur is voor de constructie. Met behulp van deze ontwerplevensduur kan er bepaald worden hoeveel cycli (N_R) er optreden tijdens deze periode. Wanneer al deze gegevens bekend zijn kan er met behulp van de onderstaande formule de maximale vermoeiingssterkte bij een constante amplitude berekend worden:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m N_C \quad \text{Met } m=3, N_R \leq 5 \times 10^6 \text{ en } N_C = 2 \times 10^6 \quad [4]$$

Voor de schuifspanning geldt de volgende formule voor het berekenen van de maximale vermoeiingssterkte met een constante amplitude:

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m N_C \quad \text{Met } m=5, N_R \leq 10^8 \text{ en } N_C = 2 \times 10^6 \quad [5]$$

⁷ Bron afbeelding:

Figuur A.1 uit NEN-EN 1993-1-9+C2:2012. Voor verdere gegevens zie blz. 39.

⁸ Bron afbeelding:

Figuur A.1 uit NEN-EN 1993-1-9+C2:2012 Voor verdere gegevens zie blz. 39.

Bij spanningsintervallen die zowel boven als onder de vermoeiingsgrens liggen optreden, moet er voor het bepalen van de vermoeiingssterkte gebruik worden gemaakt van de volgende formules:

Bij $N_R \leq 5 \times 10^6$ en $N_c = 2 \times 10^6$ zie formule 4.

Bij $m=5$, $5 \times 10^6 \leq N_R \leq 10^8$ en $N_c = 2 \times 10^6$ gebruik: $\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m N_c$ [6]

Hierin is $\Delta\sigma_D = 0,737 \Delta\sigma_c$ de vermoeiingsgrens bij een constante amplitude.

3.3.4. Dimensionering en detailcategorie

De tabellen maken een onderscheid in de verschillende details waar vermoeiing kan optreden, de details zijn gekoppeld aan detailcategorieën. In totaal zijn er 14 detailcategorieën, de hoogste is 160 N/mm² en de laagste is 36 N/mm². In de hoogste categorie bevinden zich alleen de massieve elementen, hierdoor zal een constructie dus eerder bezwijken op de verbinding van verschillende elementen dan op het element zelf. In totaal zijn er twee hoofdverbindingen te onderscheiden de boutverbinding en de lasverbinding.

Bij boutverbindingen komt vooral naar voren dat wanneer er voorgespannen hogesterktebouten toegepast worden er een hogere vermoeiingssterkte is dan wanneer er gebruik gemaakt wordt van een standaard bout. Bij lasverbindingen is het afhankelijk van de afmetingen van de elementen die aan elkaar gelast worden en de richting van de krachtsoverdracht.

3.4. Conclusie

In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de vraag: *“Welke onderdelen zijn in de normen van belang en wat moet er gedaan worden volgens de normen om te kunnen controleren of een staalconstructie voldoet aan de gestelde eisen voor vermoeiing?”* De normen die van belang zijn voor het berekenen van vermoeiing zijn de Eurocodes 0, 1 en 3. Voor een constructie die naast een spoorweg gelegen is zijn de volgende belastingen van belang: Eigengewicht constructie en overige blijvende elementen, windbelasting, aerodynamische belastingen en dynamische effecten. De belastingen worden berekend in de bruikbaarheidsgrenstoestand, dus de volgende formule wordt gebruikt voor het berekenen van de optredende belasting: blijvende + veranderlijke belasting.

De toetsing van de constructie op vermoeiing wordt gedaan met behulp van 3 Unity Checks: voor de normaalspanning, schuifspanning en voor de combinatie van beide spanningen. Om te kunnen controleren zijn er enkele gegevens benodigd: de optredende spanning, de vermoeiingssterkte, de beoordelingsmethode en de ontwerplevensduur.

Er zijn drie beoordelingsmethodes waartussen gekozen moet worden, schade-tolerante methode en de veilige-levensduurmethode. Bij de eerste wordt de constructie regelmatig gecontroleerd en kunnen de constructieve onderdelen indien nodig vervangen of hersteld worden. Bij de tweede methode wordt de constructie niet gecontroleerd. De beoordelingsmethode wordt uitgedrukt in de factor γ_{Mf} . Naast deze twee methodes is er ook nog de eindige methode, bij deze methode is er bekend wat de levensduur is en dient er voor die tijd een keer vervangen te worden. Wanneer dit wordt toegepast dan zijn er geen vermoeiingsberekeningen benodigd.

Voor het bepalen van de maatgevende spanningsinterval wordt er gekeken naar de verschillende spanningsintervallen die optreden tijdens de bepaalde ontwerplevensduur. Tevens wordt er gekeken hoe vaak deze spanningsintervallen voorkomen, dit wordt in een histogram weergegeven en vandaaruit wordt de waarde voor de spanningsinterval bepaald. Echter wanneer er de veilige-levensduurmethode wordt toegepast wordt er uitgegaan van de grootste spanningsinterval.

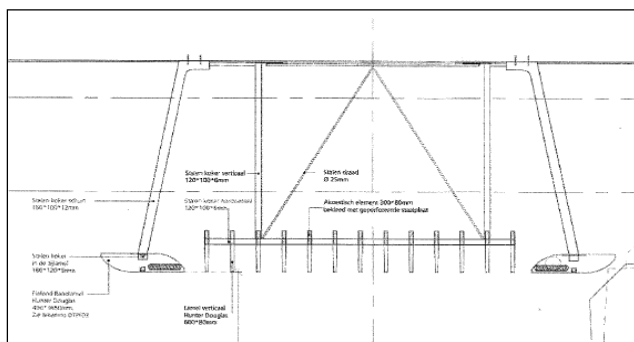
Voor de maximaal op te nemen spanning wordt er gekeken naar het detail dat gecontroleerd wordt, hierbij wordt een vergelijkbaar detail gezocht in tabel 8.1 tot en met tabel 8.10. Het gekozen detail is gekoppeld aan een detailcategorie die is gegeven in N/mm^2 bij een N_c van 2 miljoen cycli. Vervolgens wordt de gegeven detailcategorie omgerekend naar de vermoeiingssterkte van het desbetreffende detail per het aantal optredende cyclus in de bepaalde ontwerplevensduur.

4. Referentieproject

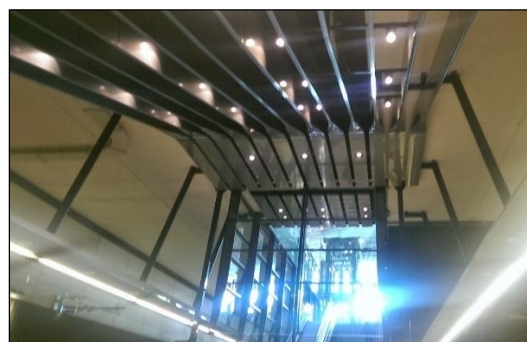
In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de opdracht die is uitgewerkt door Ingenieursstudio DCK. Voordat DCK de opdracht kreeg voor Spoortunnel Delft was vermoeiing onbekende materie, omdat er nog in de materie gedoken moest worden kostte het maken van de berekeningen veel tijd. In dit hoofdstuk wordt er als eerst informatie gegeven met betrekking tot het referentieproject, vervolgens wordt er gekeken naar de prestatie eisen die worden gesteld door de opdrachtgevers. Wanneer deze eisen bekend zijn worden de knelpunten die door DCK zijn ondervonden besproken. Als laatst worden de gemaakte berekeningen geanalyseerd.

4.1. Referentieproject

Ingenieursstudio DCK heeft meegewerkt aan het project Spoortunnel Delft. Hiervoor moesten er enkele controleberekeningen gemaakt worden voor enkele onderdelen in de afbouwfase, onder de afbouwfase wordt verstaan de bouwkundige afwerking van de wanden en het plafond. De controleberekeningen ten behoeve van vermoeiing moeten alleen gedaan worden voor de ophangconstructies van de Baffles en de Wing, in afbeelding 4.1 zijn deze onderdelen weergegeven. Op 30 maart 2015 is de locatie bezocht om een indruk te krijgen van de te controleren onderdelen, een foto van dit bezoek is te zien in afbeelding 4.2.



Afbeelding 4.1: Ophangstelsel t.b.v. de lamellen ⁹



Afbeelding 4.2: Ophangconstructie Baffles en Wings ¹⁰

4.2. Prestatie eisen opdrachtgevers ¹¹

Door de opdrachtgevers zijn er enkele prestatie eisen gesteld voor de constructie. Er waren al verschillende berekeningen gemaakt ten behoeve van de sterkte, stijfheid en stabiliteit. Hierdoor waren de onderlinge verbindingen van de constructie al bepaald. Door deze detaillering was de uitstraling van de constructie bepaald en mochten er geen aanpassingen gedaan worden die de uitstraling veranderen. Daardoor werden de oplossingsmogelijkheden beperkt. Andere gestelde eisen door de opdrachtgevers waren vermeld in het bestek en hebben vooral betrekking op de eigenschappen van de lasverbindingen en de boutverbindingen. Zo moeten alle lasverbindingen in het zicht blijvende lassen moeten vlak geslepen worden. Voor de boutverbindingen is de belangrijkste eis dat er maar een beperkt aantal voorgespannen hogesterktebouten toegepast mogen worden.

⁹ Bron afbeelding:

¹⁰ Bron afbeelding:

¹¹ Bron tekst:

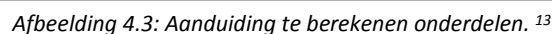
Tekenwerk door Benthem Crouwel Architecten BV, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

Foto gemaakt op 30-03-2015 door Esther Brouwer.

Voor de gebruikte bronnen bij de tekst zie de gegevens op bladzijde 39.

Bij het maken van de controleberekeningen ten behoeve van vermoeiing werden er enkele knelpunten ondervonden door Ingenieursstudio DCK. Dit had te maken met verschillende aspecten binnen de opdracht. Een knelpunt was dat ze voorheen nog geen vermoeiingscontroles gemaakt hadden en alle materie was dus nog onbekend. Hierdoor duurde het een geruime tijd voordat ze zich hadden ingelezen en wisten hoe ze de berekeningen moesten maken. Een ander groot knelpunt was dat de detaillering en dimensionering al nagenoeg vast lagen. Dit zorgde ervoor dat de oplossingen beperkt waren en in veel gevallen niet gunstig voor de detaillering en dimensionering op vermoeiing. Om de verbindingen te laten voldoen moesten de berekeningen meerdere keren gemaakt worden en iedere keer met kleine aanpassingen, waarbij er gekeken werd naar de invloeden op de verbinding.

De berekeningen zijn opgedeeld in drie verslagen, de opdeling in de drie verslagen betreft de drie te controleren hoofdonderdelen. De verbindingen van de ophangconstructie lamellen (1), de bevestiging van de Baffles (2) en de bevestiging van de Wings (3). In afbeelding 4.3 is er met getallen aangegeven waar zich de drie te berekenen hoofdonderdelen zitten.



De berekeningen die gemaakt zijn door DCK zijn iedere keer op dezelfde manier aangepakt. Er zijn drie verslagen gemaakt door DCK, verslag één betreft het controleren van de ophangconstructie aan het tunneldek, verslag twee betreft het controleren van de Baffles aan de staalconstructie en het derde verslag betreft het controleren van de Wings aan de staalconstructie. In alle drie de verslagen worden eerst de benodigde gegevens verzameld, hieronder valt onder andere het bepalen van de ontwerplevensduur, het schematiseren van het detail en de materiaal gegevens.

Tekenwerk door Benthem Crouwel Architecten BV, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

Vervolgens werden de optredende belastingen in kaart gebracht, bij dit project waren deze belastingen al bepaald door de hoofdconstructeur. Echter moest uit de gegevens van de hoofdconstructeur de benodigde belastingen gehaald worden, hierbij werd er hoofdzakelijk gekeken naar de dynamische belastingen die optreden. Er is niet in kaart gebracht hoe vaak bepaalde belastingen voorkomen, dus er is niet gekozen om de spanningsintervallen uit te zetten aan de hand van een histogram. Om aan de veilige kant te zitten is er besloten om er vanuit te gaan dat het grootste verschil iedere keer optreedt. Met deze optredende dynamische belasting wordt er bepaald wat de aanwezige spanning is. Tevens wordt er gekeken naar welke spanningen er in een detail aanwezig zijn.

Daarna wordt er gekeken wat de vermoeiingssterkte van het te controleren onderdeel is. Dit wordt gedaan met behulp van tabel 8.1 tot en met tabel 8.10 in NEN-EN 1993-1-9. Uit deze tabellen moet er een vergelijkbaar detail gekozen worden, naast het gekozen detail staat een detailcategorie vermeld. Een detailcategorie geeft een referentiewaarde voor de spanningen aan bij 2 miljoen cycli. Met deze referentiewaarde wordt er bepaald wat de vermoeiingssterkte van het te controleren onderdeel is bij de bepaalde ontwerplevensduur.

Wanneer de waardes voor de optredende spanningsinterval en voor de vermoeiingssterkte bekend zijn, kan het onderdeel gecontroleerd worden op vermoeiing. In totaal zijn er drie mogelijke toetsingen, dit zijn toetsing voor schuifspanning, toetsing voor normaalspanning en de toetsing voor gecombineerde spanning. Niet alle toetsingen zijn bij elke controle van toepassing, alleen de aanwezige spanningen bepalen welke er gebruikt moet worden.

4.4.2. Detaillering, dimensionering en uitkomsten

In totaal zijn er twee hoofdverbindingen, de boutverbinding en de lasverbinding. Bij de boutverbindingen is het opvallend dat de normaalspanning maatgevend is ten opzichte van de schuifspanning. Dit is te verklaren door de referentiewaarde van de detailcategorieën bij 2 miljoen cycli. Bij een bout die belast wordt op normaalspanningen is de waarde van de detailcategorie 50N/mm^2 en bij een bout belast op schuifspanning is deze waarde 100N/mm^2 . Hieruit kan de conclusie getrokken worden dat de wisselende normaalspanning in een bout gereduceerd moet worden, dit kan onder andere door meerdere bouten toe te passen waarover de spanningen verspreid kunnen worden of door voorspanbouten toe te passen. Bij de lasverbindingen is net als bij de boutverbinding de normaalspanning in de meeste gevallen maatgevend, dit heeft te maken met de richting van de lasverbinding ten opzichte van de krachtsoverdracht en de functies van de te verbinden onderdelen.

4.5. Vergelijk met berekeningen zonder vermoeiing ¹⁴

Er zijn enkele berekeningen gemaakt ten behoeve van sterkte, stabiliteit en stijfheid voordat de onderdelen op vermoeiing werden gecontroleerd. Om een idee te kunnen krijgen hoe groot de verschillen in de detaillering en dimensionering zijn, worden de berekeningen van de bevestiging van de Baffles en van de Wings vergeleken.

¹⁴ Bron tekst:

Berekening "Reactiekrachten t.b.v. staalconstructie", door Den Hollander Bouwadvies en Ontwerp bv. Verdere gegevens zie bladzijde 39.

4.5.1. Bevestiging Wings

Bij de bevestiging van de Wings aan de staalconstructie is geen verandering in de hoeveelheid toe te passen bouten en de afmetingen van de materialen. Het enige is dat in plaats van 'normale' bouten voorgespannen bouten toegepast moeten worden. Door voorgespannen bouten toe te passen worden spanningswisselingen in een bout gereduceerd, waardoor die wel voldoet op vermoeiing.

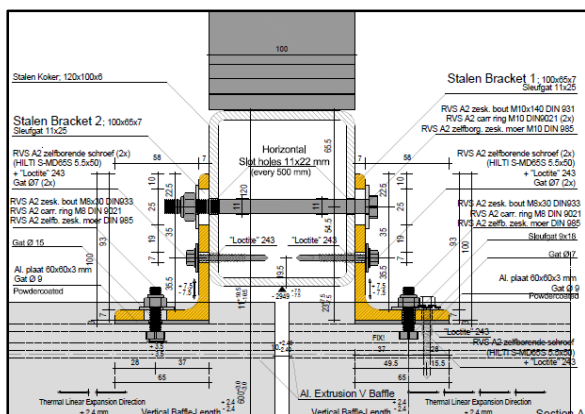
4.5.2. Bevestiging Baffles

Uit de vergelijking tussen berekening waarbij er getoetst wordt op sterkte, stabiliteit en stijfheid en de berekening waarbij ook vermoeiing wordt meegenomen zijn er in tegenstelling tot de bevestiging van de Wings wel veranderingen gekomen in de afmetingen en in de aantallen. In tabel 7.1 zijn de afmetingen en de aantallen per berekening weergegeven.

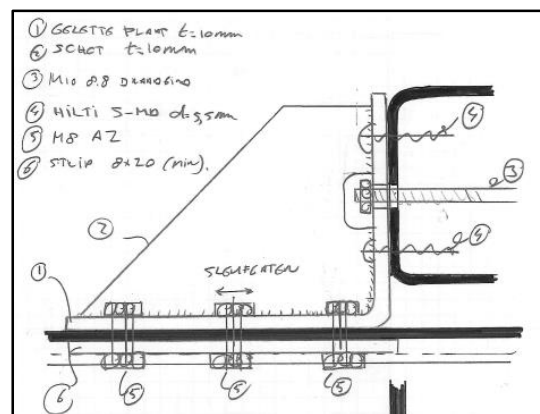
Onderdeel	Berekening zonder vermoeiing	Berekening met vermoeiing
Bouten tussen bracket en Baffles	1 bout M8	6 bouten M8
Bracket	L-profiel 100x65x7mm	L-profiel 200x150x10mm
Bouten bracket met staalconstr.	2 HILTI-schroeven + 1 bout M10	4 HILTI-schroeven + 1 bout M10

Tabel 7.1: Vergelijking berekeningen met en zonder vermoeiing.

Bij alle te toetsen onderdelen blijkt na de toetsing op vermoeiing het dubbele aan materiaal nodig te zijn om te voldoen op vermoeiing. In afbeelding 4.4 is de detaillering weergegeven van de verbinding zonder dat er getoetst is op vermoeiing en in afbeelding 4.5 is er een detail aangegeven waarin de verbinding is getoetst inclusief vermoeiing.



Afbeelding 4.4: Verbinding zonder vermoeiing ¹⁵



Afbeelding 4.5: Verbinding met vermoeiing ¹⁶

4.5.3. Verschil in oplossing

Bij de verbinding tussen de Baffles en de staalconstructies dient er veel veranderd te worden, dit in tegenstelling tot de verbinding tussen de Wing en de staalconstructie. Dit heeft te maken omdat bij de verbinding van de Wing met de staalconstructie een grotere eigengewicht aanwezig is dan bij de Baffles. De controle op sterkte, stijfheid en stabiliteit heeft daarom een groter invloed gehad op de dimensionering van de verbinding tussen de Wing en de staalconstructie. Hierdoor is de verbinding al ruimer gedimensioneerd, waardoor de spanningswisseling die door de aerodynamische belastingen worden veroorzaakt gemakkelijker opgenomen worden.

¹⁵ Bron afbeelding: Berekening "Reactiekrachten t.b.v. staalconstructie", door Den Hollander Bouwadvies en Ontwerp bv. Verdere gegevens zie bladzijde 39.

¹⁶ Bron afbeelding: Berekeningen Bevestiging Baffles, door Ingenieursstudio DCK (bestand 1354-03 v.17-10-2013)

4.6. Conclusie

In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de berekeningen die door Ingenieursstudio DCK zijn gemaakt, bij deze berekeningen werd er gekeken naar de aanpak van de berekeningen en naar de detaillering en de dimensionering.

Met betrekking tot de aanpak van de berekeningen is er vast systeem waargenomen dat bij elke berekening naar voren komt. Deze aanpak heeft de volgende stappen en geldt zowel voor normaalspanning als voor schuifspanning:

- Gegevens verzamelen;
- Bepalen van de optredende belastingen;
- Bepalen van de spanningsintervallen en de aanwezige spanningen;
- Bepalen van de vermoeiingssterkte aan de hand van de tabellen in NEN-EN 1993-1-9;
- Controleren of het er wordt voldaan op vermoeiing, met behulp van Unity Checks.

Met betrekking tot de detaillering en de dimensionering zijn er enkele bevindingen. Deze hebben te maken met de twee verschillende verbindingen: boutverbinding en lasverbinding. Bij boutverbindingen moet er voor worden gezorgd dat er een geringe normaalspanningswisseling optreedt in de bout, deze wisseling is in de meeste gevallen maatgevend. Dit kan worden verholpen door voorspanbouten toe te passen of door meerdere bouten toe te passen. Bij de lasverbindingen is net als bij de boutverbindingen de normaalspanning in de meeste gevallen maatgevend. Echter is hier niet direct te zeggen waardoor dit verminderd kan worden, dat is afhankelijk van de functie van de onderdelen en de richting van de lasverbinding ten opzichte van de krachtsoverdracht.

5. Detaillering en dimensionering

Voor utiliteitsbouw en woningbouw komt de toetsing op vermoeiing nauwelijks voor. In vele andere bouwwerken is deze toetsing wel relevant en heeft vaak gevolgen voor de detaillering van de verbindingen. Enkele voorbeelden van bouwwerken waarbij vermoeiing optreedt zijn bruggen en reuzenraden. Hierbij wordt vermoeiing wel veroorzaakt door een andere optredende belasting, maar het aspect vermoeiing blijft hetzelfde. Om te weten wat voor gevolgen vermoeiing heeft op de dimensionering en detaillering worden de verbindingen van een reuzenrad en een brug vergeleken met een verbinding bij een bouwwerk in utiliteit.

5.1. Reuzenrad ¹⁷

Een reuzenrad is een staalconstructie die telkens roteert, hierdoor komen er veel belastingen vrij die ieder keer veranderen. Doordat die veranderlijke belastingen herhaaldelijk en met grote verschillen plaatsvindt, is het mogelijk dat de constructie bezwijkt op vermoeiing. Met dit verschijnsel wordt er al bij het ontwerpen van de verbindingen rekening gehouden. Bij het Millennium Wheel te Londen is er om te voorkomen dat er piekspanningen optreden in de verbindingen gekozen om de verbindingen geleidelijk te laten aflopen. Door het laatste stuk af te ronden wordt de oppervlakte vergroot en de piekspanningen verlaagd. Bij een andere verbinding in het rad wordt er gebruik gemaakt van bouten. In een dergelijke verbinding mag er alleen contactdruk optreden, om trek tegen te gaan worden er voorspanbouten toegepast. Deze verbinding is te zien in afbeelding 5.1. Bij het Riesenrad Prater in Wenen is er gebruik gemaakt van boutverbindingen, rondom de verbindingen zijn er extra schotten geplaatst om de oppervlakte waardoor de spanningen overgedragen moeten worden te vergroten en dus de spanningen te verlagen. In afbeelding 5.2 is dit weergegeven.



Afbeelding 5.1: Verbinding Millennium Wheel te Londen ¹⁸



Afbeelding 5.2: Riesenrad Prater te Wenen ¹⁹

Een andere mogelijkheid die onderzocht is voor het Great Dubai Wheel, is de gehele verbinding aan elkaar te gieten. Er ontstaat dan een homogene verbinding waarbij de piekspanningen eruit gedimensioneerd kunnen worden. Op een ander punt in de constructie waar de spanningen lager zijn kan dan de verbinding gesitueerd worden. Echter is dit wel een dure oplossing en is alleen economisch haalbaar op het moment dat de verbinding zeer regelmatig voorkomt.

¹⁷ Bron tekst:

¹⁸ Bron afbeelding:

¹⁹ Bron afbeelding:

Voor de gegevens van de gebruikte bronnen zie bladzijde 39.

www.nl.wikipedia.org geraadpleegd op 13-04-2015, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

www.desitravel.nl geraadpleegd op 13-04-2015, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

5.2. Bruggen ²⁰

Een ander type bouwwerk dat net als reuzenraden op vermoeiing belast wordt is een brug. Het aspect vermoeiing hangt af van het brugtype. Wanneer de brug alleen voor voetgangers en fietsers te betreden is, zal de constructie minder snel op vermoeiing bezwijken dan wanneer de brug voor treinen en zwaar vrachtverkeer bedoeld is. In afbeelding 5.3 is de spoorbrug bij Weesp weergegeven, hierin is te zien dat er rondom knooppunten verstijvingsplaten worden toegepast. Deze zorgen voor een spreiding van de aanwezige spanningen en vermindert piekspanningen. Bij de Meernbrug te Utrecht is te zien dat de overgangen net als bij het Millennium Wheel in Londen worden afgerond en dus worden de spanningen over een groter oppervlakte verdeeld.



Afbeelding 5.3: Spoorbrug Weesp onderkant ²¹



Afbeelding 5.4: Meernbrug te Utrecht ²²

Door Rijkswaterstaat is er een onderzoek gedaan naar vermoeiing bij bruggen, uit dit onderzoek blijkt dat er veertien bruggen gerenoveerd moeten worden. Bij enkele van deze bruggen is dit onlangs gebeurd. Zo is er bij de Boogbrug te Beek het brugdek verstevigd met extra staalplaten en hogesterktebeton. Tevens zijn er bij de verbinding met de boog en het brugdek en de verbinding van de dwarsliggers met de randliggers verstijfd door extra staalplaten te lassen tussen de elementen. Een andere brug die onlangs gerenoveerd is, is de Waalbrug bij Ewijk. Bij deze brug moesten er grotere aanpassingen gedaan worden, de tuien moesten vervangen worden en de pylonen moesten verstijfd worden met behulp van staalplaten. Dit brugdek werd eveneens verstijfd met staalplaten en hogesterktebeton net als bij de boogbrug. In afbeelding 5.5 en 5.6 zijn de bruggen weergegeven.



Afbeelding 5.5: Boogbrug te Beek ²³



Afbeelding 5.6: Waalbrug te Ewijk ²⁴

²⁰ Bron tekst:

²¹ Bron afbeelding:

²² Bron afbeelding:

²³ Bron afbeelding:

²⁴ Bron afbeelding:

Voor de gebruikte bronnen bij deze paragraaf zie bladzijde 39.

www.keesvaneijden.nl geraadpleegd op 18-05-2015, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

www.keesvaneijden.nl geraadpleegd op 18-05-2015, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

www.rijkswaterstaat.nl geraadpleegd op 18-05-2015, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

www.rijkswaterstaat.nl geraadpleegd op 18-05-2015, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

5.3. Utiliteitsbouw

Er is een duidelijk verschil in detaillering en dimensionering tussen bouwwerken waarbij vermoeiing wel of geen rol speelt. In afbeelding 5.7 is een verbinding weergegeven van het onderwijsgebouw OI2 te Amsterdam. In het detail zijn zowel las- als boutverbindingen weergegeven. Er wordt een ligger gekoppeld aan een opzetstuk van een kolom. In het detail wordt er door middel van een abrupte overgang van een profiel overgegaan op kleiner profiel. Bij een detail waarbij vermoeiing een rol speelt is deze verbinding minder efficiënt, er zullen door de abrupte overgang en de overgang op een kleiner profiel grote piekspanningen ontstaan die uiteindelijk kunnen leiden tot het bezwijken op vermoeiing.



Afbeelding 5.7: Knooppunt Onderzoek- en onderwijsgebouw OI2 te Amsterdam²⁵

5.4. Conclusie

In dit hoofdstuk werd er gekeken naar de detaillering en de dimensionering van andere bouwwerken waarbij vermoeiing een rol speelt. Er is gekeken naar de reuzenraden en bruggen, vervolgens is er een vergelijking gemaakt met de detaillering en dimensionering in de utiliteitsbouw.

Zowel bij bruggen als bij reuzenraden komen dezelfde soorten oplossingen rondom de verbindingen naar voren. Bij boutverbindingen moet er voorkomen worden dat de normaalspanningswisseling in de bouten te hoog wordt, hiervoor wordt er gebruik gemaakt van voorspanbouten. Verder wordt er rondom de verbinding extra staalplaten geplaatst om de overgangsoppervlakte te vergroten, wat de piekspanningen vermindert. Bij lasverbindingen worden er tevens extra staalplaten gebruikt om de overdrachtsoppervlaktes te vergroten. Tevens wordt er met de overgang van de elementen geprobeerd abrupte overgangen te vermijden, er wordt met afgeronde overgangen geprobeerd een natuurlijke overgang te creëren. Een andere mogelijke verbinding is het geheel gieten van een knooppunt, hierbij worden de piekspanningen eruit gedimensioneerd en wordt het met de rest van de constructie verbonden op een plek waar weinig spanningen voorkomen. Echter is deze oplossing wel duurder en alleen relevant wanneer het knooppunt regelmatig voorkomt met dezelfde soort belastingen. Bij constructies waarbij vermoeiing optreedt, wordt er geprobeerd geen abrupte overgangen te creëren, dit is in tegenstelling tot bouwwerken waarbij vermoeiing geen rol speelt. Bij dergelijke verbindingen is het mogelijk om abrupte verbindingen te maken en over te gaan op kleinere profielen.

²⁵ Bron afbeelding:

www.nationalestaalprijs.nl geraadpleegd op 13-04-2015, zie bladzijde 39 voor verdere gegevens.

6. Handleiding t.b.v. vermoeiing

De oplossing om de controleberekeningen voor vermoeiing efficiënter te maken is het door een handleiding op te stellen waarin er per stap wordt uitgewerkt wat er exact gedaan moet worden. Tevens moet er in de handleiding een stap worden opgenomen waarin er opmerkingen worden genoteerd die betrekking hebben op de detaillering en de dimensionering. De handleiding is te groot om in zijn geheel op te nemen in dit hoofdstuk, daarom worden de belangrijkste punten vermeld en is de rest te vinden in de bijlage.

6.1. Hoofdstroomschema

In totaal zijn er zeven hoofdstappen, deze zijn hieronder weergegeven. In de volgende paragrafen wordt er per stap uitgelegd wat er gedaan wordt.



6.2. Stap 1: Gegevens verzamelen

In de eerste stap wordt er gekeken naar de omgeving waarin de te controleren verbindingen zich bevinden. Hieronder valt het verzamelen van de tekeningen van de omgeving, bepalen van de afmetingen en er dient gekeken te worden hoe vaak bepaalde verbindingen zich voor doen.

6.3. Stap 2: Ontwerp richtlijnen

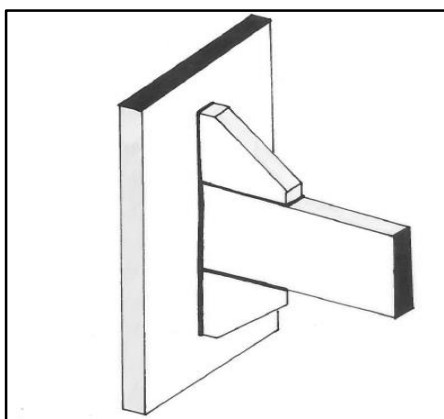
In de tweede stap worden de richtlijnen voor het detailleringen en dimensioneren van de verbindingen benoemd. Met deze richtlijnen wordt er specifiek gekeken naar de manier van verbinden, hierbij wordt er geprobeerd de verbinding zo gunstig mogelijk te maken ten opzichten van vermoeiing. In deze stap wordt er onderscheid gemaakt in drie onderdelen: de algemene punten, de lasverbindingen en de boutverbindingen. Hieronder worden de belangrijkste richtlijnen per onderdeel benoemd, voor alle richtlijnen zie de handleiding in de bijlagen.

→ Algemene punten

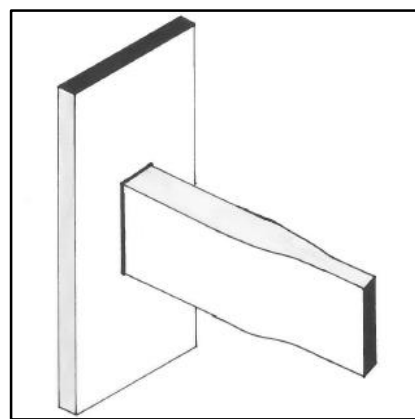
Onder de algemene punten worden opmerkingen vermeld die niet specifiek gekoppeld zijn aan een verbindingstype en worden er richtlijnen vermeld die te maken hebben met de richting van de elementen ten opzichte van het spoor. De belangrijkste opmerking in dit punt is dat het verhogen van de materiaalsterkte van het te controleren onderdeel geen invloed op een constructie wel of niet voldoet op vermoeiing. In de controleberekeningen wordt de materiaalsterkte nergens meegenomen en zal dus geen effect hebben of het element wel of niet voldoet op vermoeiing.

→ Lasverbindingen

Bij lasverbindingen wordt er onderscheid gemaakt in de functie van de verbindingen en in de profieltypes die met elkaar verbonden worden, voor deze punten gelden er in sommige gevallen andere richtlijnen. Echter zijn er ook richtlijnen die voor alle lasverbindingen meegenomen kunnen worden. Een van deze richtlijnen is dat er voorkomen moet worden dat er abrupte overgangen plaats vinden tussen elementen, door dergelijke aansluitingen ontstaan er hoge piekspanningen en is de kans dat de verbinding voldoet op vermoeiing kleiner. Om abrupte overgangen te voorkomen kan er gekozen worden om extra staalplaten te plaatsen rondom de verbindingen, zie afbeelding 6.1. Een andere optie om abrupte overgangen te voorkomen is door de profieldikte van de elementen te vergroten ten hoogte van de aansluiting, zie voor een weergave afbeelding 6.2.



Afbeelding 6.1: Verbinding aangelaste schotten ²⁶



Afbeelding 6.2: Element met verdikt profiel ²⁷

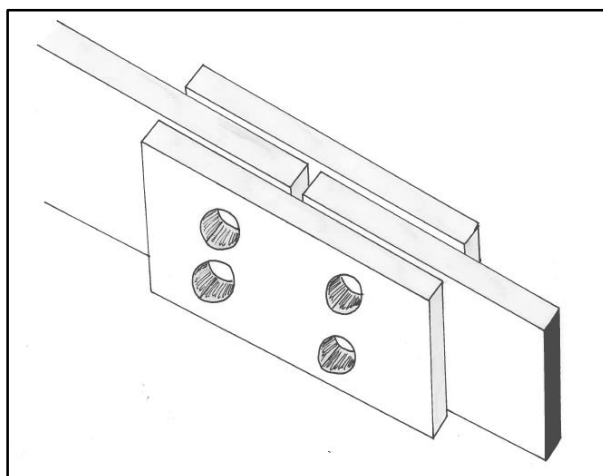
²⁶ Bron afbeelding: Verbinding getekend door Esther Brouwer.

²⁷ Bron afbeelding: Verbinding getekend door Esther Brouwer.

➔ Boutverbindingen

Bij boutverbindingen wordt er gekeken naar de doorsnede van het element waarin zich de sparingen bevinden en er wordt gekeken naar de bouten zelf. In een bout die op vermoeiing belast wordt kan meer schuifspanning opnemen dan normaalspanning. Er moet dus gezorgd worden dat de normaalspanning in een bout zo klein mogelijk is, dit kan gedaan worden door voorgespannen hogesterktebouten toe te passen. Hierbij moet er gezorgd worden dat de voorspanning in de bout de wisselingen in de kracht kan opvangen, zodat er te allen tijde contactdruk aanwezig is. Hierdoor moet de kracht worden opgenomen in de doorsnede van de elementen. Deze kunnen in de meeste gevallen meer spanningen opnemen dan de bout zelf. Echter wanneer er geen voorgespannen bouten gebruikt mogen of kunnen worden, dan is de consequentie dat er meer bouten toegepast moeten worden.

Voor de doorsnede inclusief sparingen is het handig om de verbindingen te verstijven rondom de aansluiting, dit kan gedaan worden met behulp van extra staalplaten rondom de verbinding. Voor een weergave hiervan zie afbeelding 6.3.



Afbeelding 6.3: Verstijven van de boutverbindingen ²⁸

6.4. Stap 3: Bepalen uitgangspunten

In de derde stap worden de uitgangspunten voor de verbinding verzameld en bepaald. In deze stap wordt er onderscheid gemaakt in de globale en in specifieke punten. Onder de globale punten vallen het bepalen van de beoordelingsmethode en het bepalen van de ontwerplevensduur met de bijbehorende aantal cycli. Er zijn drie verschillende beoordelingsmethodes, twee daarvan worden uitgedrukt in een partiële factor die is gegeven in tabel 3.1. uit NEN-EN 1993-1-9. Bij de andere beoordelingsmethode hoeft er geen berekening gedaan te worden, dit komt omdat de levensduur van het te controleren onderdeel bekend is.

Bij het bepalen van de ontwerplevensduur uitgedrukt in cycli zijn er enkele gegevens benodigd: de ontwerplevensduurklasse en het aantal passages dat er per dag plaats vindt. De ontwerplevensduur wordt berekend met behulp van de onderstaande formule:

$$N_R = 2 \times \text{Periode (in dagen)} \times \text{Passages (aantal per dag)} \quad [7]$$

²⁸ Bron afbeelding:

Verbinding getekend door Esther Brouwer.

In de uitgangspunten onder het kopje specifieke punten wordt er hoofdzakelijk gekeken naar de te controleren verbindingen. Hierbij wordt er gekeken naar de typeverbindingen, de profielafmetingen en er dient een schets/tekening van het te controleren detail verzameld te worden.

6.5. Stap 4: Bepalen belastingen

In stap 4 wordt er gekeken naar de belastingen die werken op de constructie. De belasting die bepalend is voor vermoeiing zijn de dynamische belastingen. In de omgeving van spoorwegen treden er andere belastingen op waar rekening mee gehouden moet worden. Dit zijn de aerodynamische belastingen en de dynamische effecten, met behulp van paragraaf 6.6 in NEN-EN 1991-2 worden deze belastingen bepaald. Wanneer de constructie aan weersomstandigheden wordt blootgesteld dan moet de windbelasting ook worden meegenomen. Naast deze belastingen is er te allen tijde blijvende belasting aanwezig. Echter is de waarde hiervan altijd hetzelfde en hoeft daarom niet meegenomen te worden bij het controleren van een constructie op vermoeiing. Wanneer er windbelasting en/of verschillende aerodynamische belastingen aanwezig zijn, moet er gekeken worden of er bekend is hoe vaak deze belastingen optreden tijdens de ontwerplevensduur. Wanneer dit niet het geval is, dient de hoogste variërende belastingen meegenomen te worden.

6.6. Stap 5: Bepalen spanningsintervallen

Met de belastingen die zijn bepaald bij de vorige stap worden nu de bijbehorende spanningen bepaald. Er zijn twee mogelijkheden om de spanningsinterval te berekenen. De eerste mogelijkheid wordt toegepast wanneer er maar één type dynamische belasting optreedt tijdens de ontwerplevensduur of wanneer er meerdere belastingspectrums aanwezig zijn maar niet bekend is hoe vaak deze zich voordoet tijdens de ontwerplevensduur en/of in stap 3 gekozen is voor veilige levensduurmethode. Wanneer dit het geval is wordt met de hoogste dynamische belasting de aanwezige spanningsinterval bepaald.

De tweede mogelijkheid wordt toegepast wanneer er in stap 3 gekozen is voor schadetolerante methode en wanneer er meerdere belastingspectrums aanwezig zijn waarvan bekend is hoe vaak die voorkomen tijdens de ontwerplevensduur. Bij deze mogelijkheid wordt er per belastingspectrum bepaald wat de spanning is en wordt deze uitgezet in een histogram. Vanuit dit histogram wordt dan de maatgevende spanningsinterval bepaald.

6.7. Stap 6: Bepalen vermoeiingssterkte

Het bepalen van de vermoeiingssterkte wordt gedaan met behulp van de tabellen 8.1 tot en met 8.7 in NEN-EN 1993-1-9. In deze tabellen worden verschillende details weergegeven die gekoppeld zijn aan detailcategorieën. Een detailcategorie geeft een referentiewaarde aan van de vermoeiingssterkte bij 2 miljoen cycli. Uit de verschillende details in de tabellen dient een overeenkomend detail gekozen te worden die vergelijkbaar is met het te controleren detail. Met de bijbehorende detailcategorie wordt met behulp van de bepaalde ontwerplevensduur de vermoeiingssterkte bepaald.

6.8. Stap 7: Controleren vermoeiing

Als laatste is de toetsing van de verbinding op vermoeiing, hierbij worden de drie mogelijke toetsingen weergegeven: Toetsing op vermoeiing voor schuifspanning, normaalspanning en de combinatie van de twee. Niet alle drie de toetsingen zijn bij alle berekeningen nodig, in stap 4 is er bepaald welke spanningen aanwezig zijn en alleen de aanwezige spanningen dienen getoetst te worden. Hieronder zijn de drie formules voor de toetsing op vermoeiing weergegeven.

$$Unity\ Check\ normaalspanning = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C \div Y_{Mf}} \leq 1,0 \quad [1]$$

$$Unity\ Check\ schuifspanning = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C \div Y_{Mf}} \leq 1,0 \quad [2]$$

$$Unity\ Check\ gecombineerde\ spanning = \left(\frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C \div Y_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{Y_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C \div Y_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0 \quad [3]$$

7. Valideren van de handleiding

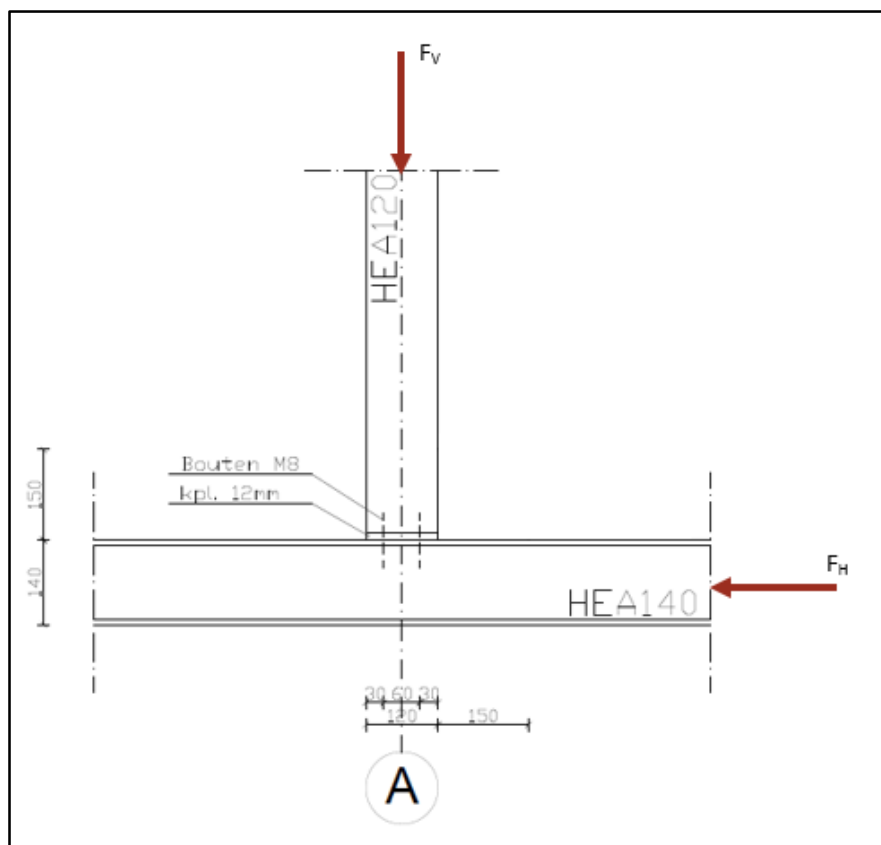
Voor het uittesten van de handleiding 'Dimensioneren en ontwerpen op vermoeiing' wordt er met behulp van een opdracht controleberekeningen voor vermoeiing gemaakt. De opdracht bevat zowel boutverbindingen als lasverbindingen, dit is gedaan om ervoor te zorgen dat de gehele handleiding behandeld wordt. Het uittesten van de handleiding wordt gedaan door drie personen. Iemand die al eerder controleberekeningen voor vermoeiing heeft gemaakt, iemand die nog nooit vermoeiingsberekeningen heeft gemaakt en ik zal zelf ook een berekening maken.

In dit hoofdstuk wordt de opdracht besproken, er wordt één van de gemaakte berekeningen weergegeven en de feedback op de handleiding wordt vermeld.

7.1. De opdracht

Situatie

In afbeelding 7.1 is een verbinding weergegeven van een ophangconstructie. Aan deze ophangconstructie bevinden zich om de 1,0 meter lamellen die evenwijdig aan het spoor zijn gesitueerd. Deze verbinding is dus loodrecht geplaatst ten opzichte van het spoor.



Afbeelding 7.1: Schets verbinding ²⁹

²⁹ Bron afbeelding:

Verbinding getekend door Esther Brouwer.

Gegevens

Hieronder zijn de benodigde gegevens weergegeven:

Ontwerplevensduurklasse	3
Ontwerplevensduur	50 jaar
Betrouwbaarheidsklasse	RC2
Gevolgklasse	CC2
Aantal treinpassages	104 per dag
Staalkwaliteit	S235
Betonkwaliteit	C35/45
Bouten	8.8
Moeren	8

Belastingen

In tabel 7.1 zijn alle krachten weergegeven die in de verbinding aanwezig zijn. Hierbij zijn nog geen belastingcombinaties gemaakt.

Kracht	Blijvende belasting	Dynamische belasting
F Verticaal	3,2 kN	2,1 kN
F Horizontaal	0,0 kN	8,6 kN

Tabel 7.1: Belastingen

7.2. Uitwerking opdracht

De opdracht is in totaal door drie personen uitgewerkt. De berekening die door mijzelf gemaakt is wordt hieronder uitgewerkt, de andere berekeningen zijn terug te vinden in de bijlage.

➔ Stap 1: Gegevens verzamelen

De gegevens zijn verzameld en staan tevens vermeld bij de opdracht in paragraaf 7.1.

➔ Stap 2: Ontwerp richtlijnen

N.v.t. er treden kleine krachten op, dus er hoeft geen aanpassingen gedaan te worden aan de verbinding.

➔ Stap 3: Bepalen uitgangspunten

Bepalen ontwerplevensduur

$$N_R = 2 \times 365 \times 50 \times 104 = 3,8 \cdot 10^6 \text{ cycli}$$

Beoordelmethode

Veilige-levensduurmethode + geringe gevolgen $\rightarrow \gamma_{Mf} = 1,15$

Partiële factor voor spanningsinterval

$$\gamma_{Ff} = 1,0$$

Kwaliteit materialen

Zie de informatie die in paragraaf 7.1 gegeven is.

Afmetingen van de materialen

Kolom	HEA120
Ligger	HEA140
Bouten	M8
Kopplaat	12mm
Keeldoorsnede	4mm

➔ Stap 4: Bepalen belastingen**Belasting per bout**

$$V_{dyn} = \frac{8600}{4} = 2150 \text{ N}$$

$$N_{dyn} = \frac{2100}{4} = 530 \text{ N}$$

Kopplaat en las

$$F_{V,dyn} = 2100 \text{ N}$$

$$F_{H,dyn} = 8600 \text{ N}$$

➔ Stap 5: Bepalen spanningsinterval**Bouten**

M8 heeft een $A_s = 36 \text{ mm}^2$

$$\sigma_{E,2} = \frac{N_{dyn}}{A} = \frac{530}{36} = 14,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{E,2} = \frac{V_{dyn}}{A} = \frac{2150}{36} = 59,7 \text{ N/mm}^2$$

Kopplaat

$$A_{netto} = (120 - 2 \times 10) \times 12 = 1200 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{E,2} = \frac{N_{dyn}}{A} = \frac{8600}{1200} = 7,2 \text{ N/mm}^2$$

Las

$$\sigma_{E,2} = \frac{F_{V,dyn}}{A \times l_{eff}} = \frac{2100}{4 \times (120 \times 4)} = 1,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{E,2} = \frac{F_{H,dyn}}{A \times l_{eff}} = \frac{8600}{4 \times (120 \times 4)} = 4,48 \text{ N/mm}^2$$

➔ Stap 6: Bepalen vermoeiingssterkte

Met behulp van de tabellen in NEN-EN 1993-1-9 wordt de vermoeiingssterkte van het onderdeel bepaald.

Bouten

Voor de bouten is er gekeken in tabel 8.1. Voor de normaalspanning komt detail 14 overeen, hierbij is $\Delta\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$. Voor de schuifspanning komt detail 15 overeen, hierbij is $\Delta\tau_c = 100 \text{ N/mm}^2$.

$$\Delta\sigma_R = \sqrt[m]{\Delta\sigma_c^m \times \frac{N_C}{N_R}} = \sqrt[3]{50^3 \times \frac{2}{3,8}} = 40,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\tau_R = \sqrt[m]{\Delta\tau_c^m \times \frac{N_C}{N_R}} = \sqrt[5]{100^5 \times \frac{2}{3,8}} = 88,0 \text{ N/mm}^2$$

Kopplaat

Voor de kopplaat is er gekeken in tabel 8.1. Voor de normaalspanning komt detail 13 overeen, hierbij is $\Delta\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$.

$$\Delta\sigma_R = \sqrt[m]{\Delta\sigma_C^m \times \frac{N_C}{N_R}} = \sqrt[3]{50^3 \times \frac{2}{3,8}} = 40,4 \text{ N/mm}^2$$

Las

Voor de lasverbinding is er gekeken in tabel 8.5. Voor de normaalspanning komt detail 3 overeen, hierbij is $\Delta\sigma_c = 36 \text{ N/mm}^2$. Voor de schuifspanning komt detail 8 overeen, hierbij is $\Delta\tau_c = 80 \text{ N/mm}^2$.

$$\Delta\sigma_R = \sqrt[m]{\Delta\sigma_C^m \times \frac{N_C}{N_R}} = \sqrt[3]{36^3 \times \frac{2}{3,8}} = 29,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\tau_R = \sqrt[m]{\Delta\tau_C^m \times \frac{N_C}{N_R}} = \sqrt[5]{80^5 \times \frac{2}{3,8}} = 70,4 \text{ N/mm}^2$$

➔ Stap 7: Controleren vermoeiing

De gegevens zijn berekend en bepaald. Nu moet er alleen nog gecontroleerd worden of de verbinding voldoet op vermoeiing. Dit wordt gedaan met de onderstaande formules:

Bouten

$$UC \text{ normaalspanning} = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C \div Y_{Mf}} = \frac{1,0 \times 14,7}{40,4 \div 1,15} = 0,42 \leq 1,0 \text{ dus voldoet}$$

$$UC \text{ schuifspanning} = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_R \div Y_{Mf}} = \frac{1,0 \times 59,7}{88,0 \div 1,15} = 0,78 \leq 1,0 \text{ dus voldoet}$$

$$UC \text{ combinatie} = \left(\frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_R \div Y_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{Y_{Ff} \times \Delta\tau_V}{\Delta\tau_R \div Y_{Mf}} \right)^5 = 0,36 \leq 1,0 \text{ dus voldoet op vermoeiing}$$

Kopplaat

$$UC \text{ normaalspanning} = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C \div Y_{Mf}} = \frac{1,0 \times 7,2}{40,4 \div 1,15} = 0,21 \leq 1,0 \text{ dus voldoet op vermoeiing}$$

Las

$$UC \text{ normaalspanning} = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C \div Y_{Mf}} = \frac{1,0 \times 1,1}{29,1 \div 1,15} = 0,04 \leq 1,0 \text{ dus voldoet}$$

$$UC \text{ schuifspanning} = \frac{Y_{Ff} \times \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_R \div Y_{Mf}} = \frac{1,0 \times 4,48}{70,4 \div 1,15} = 0,08 \leq 1,0 \text{ dus voldoet}$$

$$UC \text{ combinatie} = \left(\frac{Y_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_R \div Y_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{Y_{Ff} \times \Delta\tau_V}{\Delta\tau_R \div Y_{Mf}} \right)^5 = 0,00 \leq 1,0 \text{ dus voldoet op vermoeiing}$$

7.3. Feedback op de handleiding

Bij de feedback op de handleiding wordt er gekeken verschillende punten, dit betreft de vormgeving en de opbouw van de handleiding, de uitwerking van de stappen en onduidelijkheden. De belangrijkste opmerkingen die gegeven werden over de handleiding zijn:

- ➔ De opbouw en vormgeving is duidelijk. Door als eerst een globale stappenplan te vermelden is het duidelijk welke stappen er genomen moeten worden en waar alles te vinden is aangezien er per stap wordt doorverwezen naar een bepaalde bladzijde. Vanaf deze bladzijde wordt de globale stap verder uitgewerkt.
- ➔ In de globale stappen wordt er met behulp van rode pijlen duidelijk gemaakt waar welke informatie te vinden is. Hierdoor kunnen bepalen onderdelen overgeslagen worden en hoeft niet alles doorgelezen te worden om de benodigde informatie eruit te halen.
- ➔ In de tweede globale stap waren enkele richtlijnen onduidelijk omschreven. Onder deze richtlijnen vielen onder andere de richtlijn over de kracht overdragende lasverbinding en de richtlijn over de hulpstukken die op profielen gelast worden. Deze onduidelijkheid is opgelost door de tekst iets aan te passen en door het maken van voorbeeld verbindingen.
- ➔ Bij de Unity Checks was het onduidelijk uit welke stappen de benodigde gegevens gehaald moesten worden, dit kwam mede doordat de symbolen niet in alle stappen vermeld waren en doordat de symbolen niet overeen kwamen met de symbolen in de Unity Checks. Deze onduidelijkheid is opgelost door overal de juiste symbolen te vermelden.
- ➔ In eerste instantie kon Dijeannio Hobsen de berekeningen niet afronden, dit kwam voor namelijk door de bovenstaande twee opmerkingen. Nadat deze verwerkt waren heeft hij de berekening wederom gemaakt en toen kon de gehele berekening gemaakt worden.
- ➔ De handleiding werd na de aanpassingen helder en bruikbaar bevonden. De handleiding zal in de toekomst wanneer er projecten zijn waarbij getoetst moet worden op vermoeiing ook gebruikt worden.

8. Conclusie

In het afgelopen halfjaar is er een afstudeerstudie gedaan met als doel een document op te stellen waarin staat aangegeven welke stappen er genomen moeten worden om een constructie te kunnen controleren op vermoeiing. Tevens moest er in het document naar voren komen hoe er het beste gedetailleerd en gedimensioneerd kon worden op vermoeiing. Dit doel is samengevat in de volgende hoofdvraag:

Hoe kan Ingenieursstudio DCK het controleren van een constructie op vermoeiing het efficiënts aanpakken, waarbij rekeningen gehouden wordt met de detaillering en de dimensionering?

Doordat het onderwerp vermoeiing nog niet eerdere besproken was binnen de opleiding Bouwkunde aan de Hogeschool Rotterdam, moest er eerst in kaart worden gebracht wat vermoeiing is en hoe de berekeningen gemaakt moesten worden. Het uit zoeken hoe de berekeningen gemaakt moesten worden werd gedaan met behulp van de Eurocodes en het referentieproject. Dit is geformuleerd in deelvragen en deze deelvragen zijn op één na allemaal behandeld in het afstudeerrapport. In tabel 8.1 is een leeswijzer vermeld waar per deelvraag wordt door verwezen naar het hoofdstuk waarin het antwoord vermeld is.

Deelvraag	Hoofdstuk
Wat is vermoeiing?	H2
Onderzoeken naar welke beoordelings- en rekenmethoden in de normen staan vermeld	H3
Welke beoordelings- en rekenmethoden worden in de normen gegeven?	H3
- Belastingen	H3
- Spectrum van spanningsintervallen	H3
- Dynamisch gedrag (DLF)	H3
- Vermoeiingsgedrag	H2, H3
Voor welke onderdelen zijn deze belastingen relevant/maatgevend?	H3
Welke invloeden heeft vermoeiing op de dimensionering en detaillering?	H3
Welke (prestatie)eisen stellen opdrachtgevers aan de constructie?	H4
Wat zijn de tegengekomen knelpunten bij het maken van de benodigde berekeningen binnen DCK?	H4
Analyseren referentieproject Spoortunnel Delft	H4
Op welke wijze zijn ze hiermee omgegaan bij het referentieproject Spoortunnel Delft?	H4
- In het ontwerptraject	H4
- In de uitvoeringsfase	*
- Toepassing en praktische toepasbaarheid regelgeving	H4
Wat zijn de gevolgen van de berekeningen op de dimensionering en detaillering van de verschillende onderdelen die berekend worden?	H4
Hoe wordt er bij andere bouwwerken waar vermoeiing een grote rol speelt omgegaan met de detaillering en dimensionering van de constructie?	H5

Tabel 8.1: Leeswijzer terug vinden antwoord op deelvragen

* Vraag niet behandeld in onderzoeksrapport

Doel

Het doel van dit afstudeeronderzoek was het opstellen van een document waarin staat aangegeven welke stappen er genomen moeten worden om een constructie te kunnen controleren op vermoeiing. Tevens moest er in het document naar voren komen hoe er het beste gedetailleerd en gedimensioneerd kon worden op vermoeiing. Dit doel is behaald door het opstellen van de handleiding *‘Dimensioneren en controleren op vermoeiing’*. Deze handleiding is toegevoegd in de bijlage. De handleiding bevat een stroomschema, waarin er per stap wordt doorverwezen naar een bepaalde bladzijde. In totaal zijn er zeven stappen die gedaan moeten worden, hieronder worden de stappen weergegeven:

- Stap 1:* Gegevens verzamelen
- Stap 2:* Ontwerp richtlijnen
- Stap 3:* Bepalen uitgangspunten
- Stap 4:* Bepalen belastingen
- Stap 5:* Bepalen spanningsintervallen
- Stap 6:* Bepalen vermoeiingssterkte
- Stap 7:* Controleren vermoeiing

De handleiding is gevalideerd door drie personen, in eerste instantie was de handleiding niet door iedereen direct te volgen en moesten er nog aanpassingen gedaan worden. Na deze aanpassingen is er door de persoon, die de berekening in eerste instantie niet kon afronden in verband met onduidelijkheden, de handleiding nogmaals gevalideerd. Dit keer was de handleiding helder en bruikbaar. De handleiding zal daarom ook in de toekomst wanneer er projecten zijn waarbij er getoetst moet worden op vermoeiing gebruikt worden.

Het eerste gedeelte van de hoofdvraag *“Hoe kan Ingenieursstudio DCK het controleren van een constructie op vermoeiing het efficiënts aanpakken, waarbij rekeningen gehouden wordt met de detaillering en de dimensionering?”* is hiermee beantwoord. Echter het laatste stukje van de hoofdvraag is in zijn geheel verwerkt in stap 2. In deze stap wordt er per categorie verschillende aandachtspunten vermeld. Een voorbeeld van een aandachtspunt is dat er rondom een lasverbinding gebruik gemaakt kan worden van extra staalplaten om zo de piekspanningen in een verbinding te verlagen. Een ander voorbeeld is dat het verhogen of verlagen van de staalkwaliteit geen invloed heeft om de controleberekeningen, er wordt namelijk nergens in de berekeningen de staalkwaliteit meegenomen.

9. Bronvermelding

Per hoofdstuk worden de geraadpleegde bronnen voor de tekst en voor de afbeeldingen vermeld.

Nr.	Bronvermelding voor tekst en afbeeldingen hoofdstuk 2
1a	P.Geertsma (december 2013), "Wat is metaalmoeheid en wat zijn de oorzaken van metaalmoeheid?" Geraadpleegd op 09-02-2015 via: www.technischwerken.nl/kennisbank
1b	Morgo aluminium bv. Geraadpleegd op 09-02-2015 via: www.morgo.nl
1c	G. van Krieken en J.Brinksma (juni 2012), "Vermoeiing en gelaste constructies" Geraadpleegd op 09-02-2015 via: www.element.com
1d	A.M.M. Snijders, (juni 2013). "Fatigue and shear failure, differences between NEN and Eurocode" (Ongepubliceerd eindwerk). TU Delft
1e	E.Vaders (januari 2015), "Vermoeiing van aluminium" Geraadpleegd op 09-02-2015 via: www.aluknowledge.com
1f	P.Geertsma (mei 2014), "Welke factoren hebben invloed op vermoeiing van metalen?" Geraadpleegd op 18-02-2015 via: www.technischwerken.nl/kennisbank
2	B. Meertens, (juni 2010). "Experimenteel onderzoek naar het vermoeiingsgedrag van geschroefde buisverbindingen" (Ongepubliceerd eindwerk). Universiteit Gent.
3	Voor de gegevens van de geraadpleegde bron zie punt 2.
4	Nederlands instituut voor Lastechniek (mei 2006) "Vermoeiingsbeproeving. Deel 2: Oorzaken afwijkend gedrag van lasverbindingen". Geraadpleegd op 05-03-2015 via www.nil.nl

Nr.	Bronvermelding voor tekst en afbeeldingen hoofdstuk 3
5a	Staalinformatiesysteem van bouwen met staal, geraadpleegd op 12-02-2015 via www.staalsupport.nl
5b	NEN-EN 1990+A1+A1/C2 (december 2011), Eurocode voor "Grondslagen van het constructieve ontwerp"
5c	NEN-EN 1991-1-1 +C1 (december 2011), Eurocode voor "Algemene belastingen, volumieke gewichten, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen"
5d	NEN-EN 1991-2+C1 (december 2011), Eurocode voor "Verkeersbelasting op bruggen"
5e	NEN-EN 1993-1-8+C2 (december 2011), Eurocode voor "Ontwerp en berekening van staalverbindingen"
5f	NEN-EN 1993-1-9+C2+NB (september 2012), Eurocode voor "Vermoeiing van staalconstructies"
6	Figuur 1.1 uit NEN-EN 1991-1-7+C1:2011
7	Figuur A.1 uit NEN-EN 1993-1-9+C2:2011
8	Figuur A.1 uit NEN-EN 1993-1-9+C2:2011

Nr.	Bronvermelding voor tekst en afbeeldingen hoofdstuk 4
9	Tekenwerk project Spoorzone Delft getekend door Benthem Crouwel architecten BV, beschikbaar gegeven door Ingenieursstudio DCK.
10	Foto's gemaakt door Esther Brouwer op 30-03-2015
11a	Bestekboek Spoorzone Delft bouwkundige afbouw station, opgesteld door ProRail (bestandnummer PO500000, v.30-03-2012).
11b	Constructieberekening Afbouw station Delft, opgesteld door DHV (13-07-2013)
12a	Berekening "Verbinding ophangconstructie lamellen", door Ingenieursstudio DCK (bestand 1354-01 v.11-07-2013)
12b	Berekening "Bevestiging Wing", door Ingenieursstudio DCK (bestand 1354-05 v.08-11-2013)
12c	Berekening "Aluminium Wing Spoortunnel Delft", door Bom Engineering BV. (v.05-11-2013)
12d	Berekening "Bevestiging Baffles", door Ingenieursstudio DCK (bestand 1354-03 v.17-10-2013)
12e	Berekening "Constructie Baffles", door Den Hollander Bouwadvies en Ontwerp bv (bestand B2-006D v.30-08-2013)
13	Tekenwerk project Spoorzone Delft getekend door Benthem Crouwel architecten BV, beschikbaar gegeven door Ingenieursstudio DCK.
14a	Zie voor de gegevens punt 12a t/m 12e
14b	Berekening "Reactiekrachten t.b.v. staalconstructie", door Den Hollander Bouwadvies bv (bestand B2-052 v.21-06-2013)
15	Zie gegevens bij punt 14b
16	Zie gegevens bij punt 12d

Nr. Bronvermelding voor tekst en afbeeldingen hoofdstuk 5	
17a	Wikipedia site betreft Millennium Wheel te Londen, geraadpleegd op 13-04-2015 via www.nl.wikipedia.org/wiki/London_Eye
17b	Site van de nationale staalprijs, geraadpleegd op 13-04-2015 via www.nationalestaalprijs.nl
17c	J.A.N. Bolleboom, (oktober 2013), <i>“De constructieve haalbaarheid van ‘s werelds eerste multifunctionele spaakloze reuzenrad”</i> (ongepubliceerd eindwerk). Technische universiteit Delft.
18	Wikipedia site betreft Millennium Wheel te Londen, geraadpleegd op 13-04-2015 via www.nl.wikipedia.org/wiki/London_Eye
19	Reispagina over Wenen, geraadpleegd op 13-04-2015 via www.desitravel.nl/fotoalbum/oostenrijk-wenen.htm
20a	Internetpagina van Rijkswaterstaat over renovatie van enkele bruggen, geraadpleegd op 18-05-2015 via http://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/veiligheid/renovatie_bruggen/
20b	Internetpagina van Platform voor stalen bruggen over enkele te renoveren bruggen, geraadpleegd op 18-05-2015 via http://www.platformstalenbruggen.nl/nieuws
20c	Internetpagina van Rijkswaterstaat over renovatie brug bij Ewijk, geraadpleegd op 18-05-2015 via www.rijkswaterstaat.nl/wegen/plannen_en_projecten/a_wegen/a50/a50_brug_bij_ewijk/index.aspx
20d	Internetpagina van Rijkswaterstaat over renovatie brug bij Beek, geraadpleegd op 18-05-2015 via www.rijkswaterstaat.nl/actueel/nieuws_en_persberichten/2012/oktober2012/a2_renovatie_boogbrug_bij_beek_afgerond.aspx
21	Expositie site van Dhr. Van Eijden, geraadpleegd op 18-05-2015 via www.keesvaneijden.nl/onder-de-brug/
22	Expositie site van Dhr. Van Eijden, geraadpleegd op 18-05-2015 via www.keesvaneijden.nl/onder-de-brug/
23	Afbeelding brug bij Beek, geraadpleegd op 18-05-2015 via www.rijkswaterstaat.nl/wegen/veiligheid/renovatie_bruggen/
24	Afbeelding brug bij Ewijk, geraadpleegd op 18-05-2015 via www.rijkswaterstaat.nl/wegen/veiligheid/renovatie_bruggen/
25	Site van de nationale staalprijs, geraadpleegd op 13-04-2015 via www.nationalestaalprijs.nl
Nr. Bronvermelding voor tekst en afbeeldingen hoofdstuk 6	
26	Verbinding getekend door Esther Brouwer.
27	Verbinding getekend door Esther Brouwer.
28	Verbinding getekend door Esther Brouwer.
Nr. Bronvermelding voor tekst en afbeeldingen hoofdstuk 7	
29	Verbinding getekend door Esther Brouwer.