



Structurele beoordeling van toren E.A.Z.-13.2

STRUCTURELE BEOORDELING VAN DE TOREN VAN DE E.A.Z.-13.2-
WINDTURBINE VOLGENS DE IEC-BELASTINGSGEVALLEN



Industrieweg 23a Hoogezand,
tel: 0598 372383.
www.eazwind.com



Versie:	Auteur:	Hoofdstuk:	Informatie toegevoegd/gewijzigd/verwijderd:	Datum:	Reviewer 1:
V7			Heeft eerste document aangemaakt	13-01-2021	
V8			Opneming van een verwijzing naar het EAZ-12-document over belastingsgevallen in de inleiding	12-02-2021	
V9			Belastingsset V174 geïmplementeerd	11-05-2022	
V10			Zin over vertrouwelijkheid verwijderd	22-03-2023	

1 Inhoud

2	Introductie	4
3	Referenties.....	4
4	Termen en definities	5
5	Torenontwerp	7
5.1	Afmetingen.....	7
5.2	Torensectieverbindingen.....	8
5.3	Torenonderzijde	8
5.4	Materialen	10
6	Berekeningsmethode	11
6.1	Kritieke locaties.....	11
6.2	Materiaalveiligheidsfactoren	13
6.3	Beoordeling eindsterkte	14
6.4	Beoordeling vermoeïngsterkte	14
6.5	FEM-analyse	14
7	Belastingen	18
8	Sterktebeoordeling	19
8.1	Beoordeling van onderdelen en lassen.....	19
8.2	Beoordeling van bouten	20
9	Bijlagen	22
9.1	Resultaten FEM-simulatie 1	22
9.2	Resultaten FEM-simulatie 2	25
9.3	Regenstroomtellingen	26
9.4	Boutspanningen bij maximale voorspanning.....	27
9.5	Boutspanningen bij minimale voorspanning.....	28

2 Introductie

Dit document geeft een gedetailleerde structurele beoordeling van de toren van de EAZ-13.2-windturbine. Dit wordt gedaan voor uiterste en vermoeïingsbelastingsgevallen volgens EC-61400-2 (1). De beoordeling wordt uitgevoerd op basis van de belastingen van de EAZ-13.2-windturbine, die zijn berekend in (2). Merk op dat de EAZ-13.2 een verbeterde versie is van de EAZ-12. Aangezien de belastingen van de EAZ-12 lager zijn dan die van de EAZ-13.2, voldoet deze toren ook aan de eisen voor de EAZ-12. De belastingen van de EAZ-12, inclusief een vergelijking tussen de EAZ-12 en de EAZ-13.2, worden gegeven in (3).

Eerst wordt het ontwerp van de toren besproken, de afmetingen en verbindingen worden geëvalueerd en de materialen worden gespecificeerd. In hoofdstuk 6 wordt de berekeningsmethode gepresenteerd. Hierbij worden de kritieke locaties van de toren, daar waar de sterkte wordt geanalyseerd, besproken en wordt de methode voor de berekening van de eindsterkte en de vermoeïingssterkte besproken. De verschillende gebruikte FEM-modellen worden eveneens in dit hoofdstuk gepresenteerd. De belastingen worden in hoofdstuk 7 gepresenteerd. Hoofdstuk 8 bevat de beoordeling van de sterkte van alle kritieke locaties.

3 Referenties

1. IEC. *Windturbines - Deel 2: Kleine windturbines*. 2013.
2. Visser, B. 82218 *Design loads (ontwerpbelastingen) EAZ-13.2*.
3. Visser, B. 82219 *Design loads (ontwerpbelastingen) EAZ-12*.
4. NEN. NEN-EN 1993-1-9+C2, *Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-9: Vermoeïing*. 2012.
5. Verein Deutscher Ingenieure. VDI 2230 - *Systematische berekening van boutverbindingen met hoge belasting*. 2001.
6. Mortensen, Jacob. *Friction Analysis of Bolts*. Aalborg Universitet Esbjerg : s.n., 2013.

4 Termen en definities

De volgende afkortingen, termen en definities zijn van toepassing.

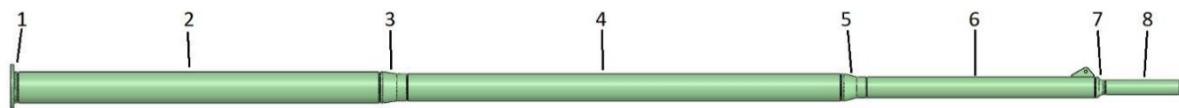
L	Lengte
d	Afstand tussen torendelen
L_{cum}	Cumulatieve lengte
D	Buitendiameter
σ_{yield}	Treksterkte
t	Wanddikte
$\sigma_{fac_{2E6}}$	Vermoeïngsterkte bij 2E6 cycli
$\sigma_{fac_{5E6}}$	Vermoeïngsterkte bij 2E5-cycli
F_{pre}	Nominale voorspanning
f_t	Spanningsfactor
$F_{pre_{max}}$	Maximale voorspanning
$F_{pre_{min}}$	Minimale voorspanning
$Fric_{thr}$	Wrijvingscoëfficiënt van boutschroefdraad
$Fric_{hd}$	Wrijvingscoëfficiënt van de boutkop
p	Spoed van de bout
d_2	Schroefdraaddiameter van de bout
D_{hd}	Kopdiameter van de bout
D_s	Effectieve diameter van de bout
A_s	Doorsnede
Z	Polaire sectiemodulus
W	Sectiemodulus
$\gamma_{m_{ult}}$	Materiaalveiligheidsfactor voor uiterste belastingen
$\gamma_{m_{fat}}$	Materiaalveiligheidsfactor voor vermoeïngsbelastingen
σ_{pre}	Spanning door voorspanning
s_{pre}	Eenheidsspanning veroorzaakt door voorspanning
σ_{calc}	Analytisch berekende spanning
σ_{FEM}	Spanning door FEM
$\sigma_{FEM_{nett}}$	Netto spanning door FEM
k_t	Spanningsconcentratiefactor
σ_{ext}	Spanning door externe belasting
σ_{tot}	Totale spanning
$\Delta\sigma_{ext}$	Spanningsbereik van extern momentbereik
ΔM_{ext}	Extern momentbereik
T_{pitch}	Torsiemoment door schroefdraadspoed

T_{thread}	Torsiemoment door schroefdraadwrijving
T_{head}	Torsiemoment door kopwrijving
τ_{pre}	Afschuifspanning door voorspanning
ΔF_{ext}	Extern krachtbereik

5 Torenontwerp

In Figuur 1 is een overzicht van de toren te zien. De toren bestaat uit 4 stalen buizen (hierna "torensecties" genoemd), elk met een specifieke diameter, wanddikte en lengte. De torensecties worden met elkaar verbonden via een overgangstuk (hierna "verloopstuk" genoemd). Aan de onderzijde is een flens verbonden. In de figuur is het volgende geannoteerd:

1. Onderste flens
2. Torensectie 1
3. Verloopstuk 1
4. Torensectie 2
5. Verloopstuk 2
6. Torensectie 3
7. Verloopstuk 3
8. Torensectie 4



Figuur 1: Overzicht van de toren

5.1 Afmetingen

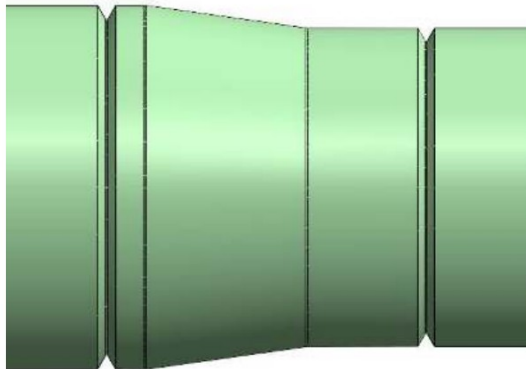
In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste afmetingen:

Tabel 1: Overzicht van de belangrijkste afmetingen van de toren

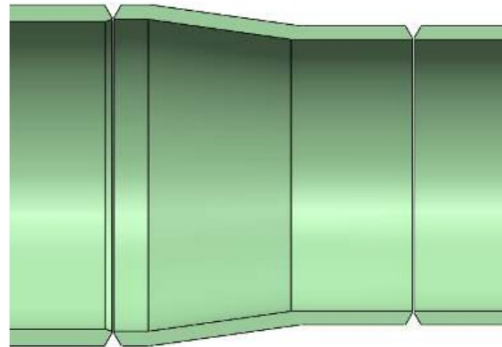
		Flens	Sectie 1	Verloop stuk 1	Sectie 2	Verloop stuk 2	Sectie 3	Verloop stuk 3	Sectie 4
Lengte	L [m]	0.09	4.706	0.356	5.64	0.33	2.972	0.128	0.964
Afstand tussen onderdelen	d [m]	0.002							
Cumulatieve lengte	L_{cum} [m]	0.09	4.798	5.156	10.798	11.13	14.104	14.234	15.2
Totale lengte van de toren:	L_{tot} [m]	15.2							
Buitendiameter (bovenste en onderste deel voor verloopstukken)	D [m]	0.4064	0.4064	0.3556	0.3556	0.273	0.273	0.1937	0.1937
				0.4064		0.3556		0.273	
Wanddikte (bovenste en onderste deel voor verloopstukken)	t [m]	0.02	0.02	0.016	0.016	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
				0.0175		0.016		0.0125	

5.2 Torenssectieverbindingen

In Figuur 2 en Figuur 3 is de verbinding tussen de torensecties te zien. Het verloopstuk is via een V-boutverbinding met de torensecties verbonden. Dit is meer gedetailleerd te zien in tekening 83405.



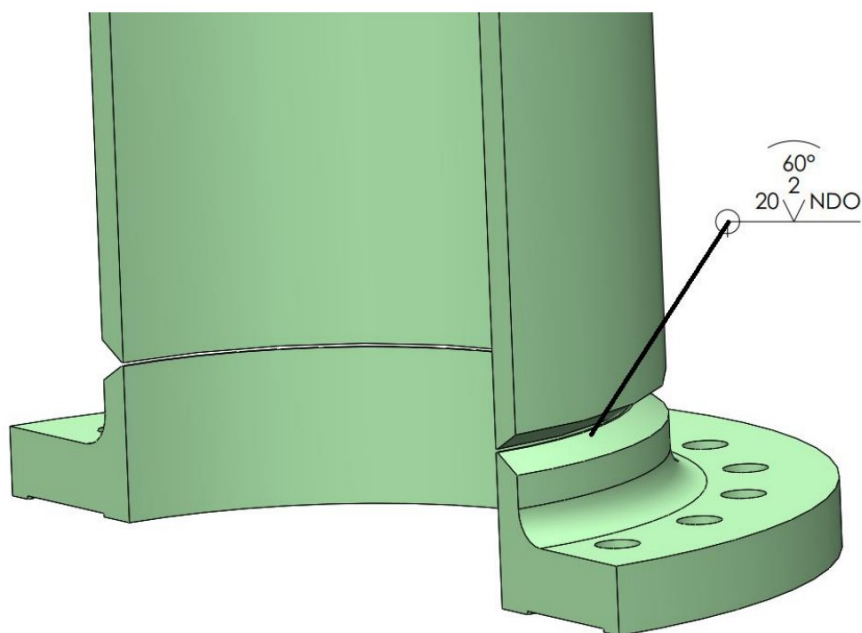
Figuur 2: Verbinding van de torensecties



Figuur 3: Doorsnede van de verbinding

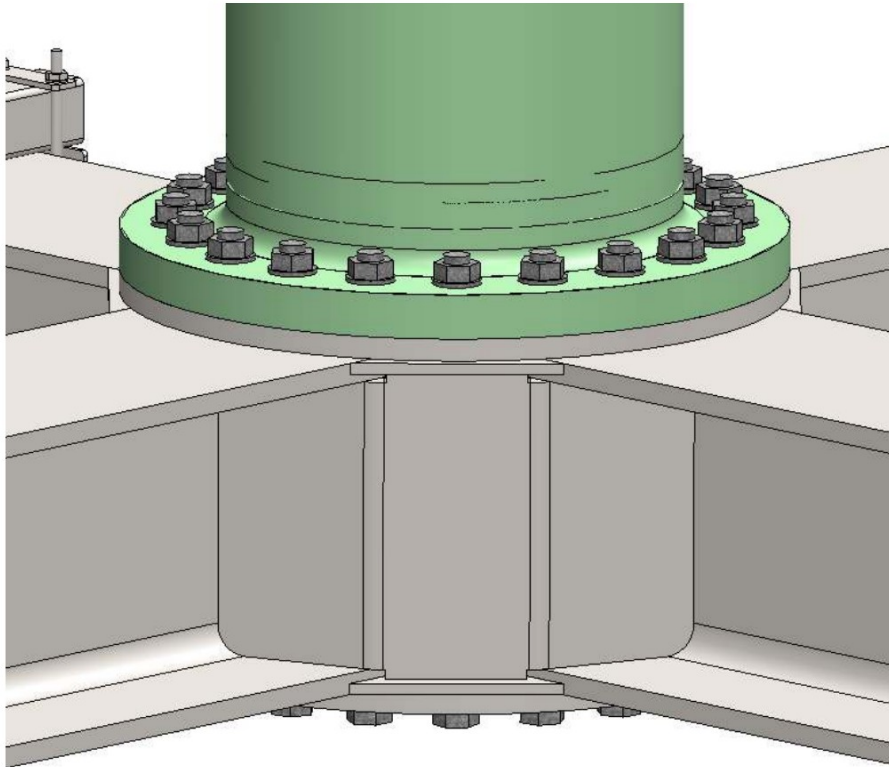
5.3 Torenonderzijde

In Figuur 4 is een doorsnede van de torenbasis met inbegrip van de lasverbindingen te zien. De flens is gelast door middel van een V-naadverbinding. Meer details zijn te zien in tekening 83405.



Figuur 4: Doorsnede van de basis van de toren met inbegrip van de las

De flensring is met in totaal 20 bouten met de fundering verbonden. Dit wordt weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Boutverbinding van de flens met de fundering

In Tabel 2 staan de relevante specificaties van de boutverbinding van de onderste flens van de toren.

Tabel 2: Specificaties van de boutverbinding

Boutverbindingen		Onderste flens tot fundering
bouttype		M24
sterkteklasse		10.9
Treksterkte	σ_{yield} [Mpa]	940
detailcategorie van EC3 (2)		tabel 8.1 nummer 14
Vermoeïngsgrens bij 2E6 cycli	$\sigma_{facc,Ed}$ [Mpa]	50

Voorspanbout		
Nominale voorspanning	F_{pre} [N]	231000
Spanningsfactor	f_t [-]	1,1667
maximale voorspanning (3)	F_{premax} [N]	269500
minimale voorspanning (3)	F_{premin} [N]	192500

Wrijvingseigenschappen bout		
wrijvingscoëfficiënt schroefdraad (4)	$Fric_{thr}$ [-]	0.13
wrijvingscoëfficiënt kop (4)	$Fric_{hd}$ [-]	0.08

Boutafmetingen

spoed	p [m]	0.003
Schroefdraaddiameter	d_2 [m]	0.022051
Kopdiameter	D_{hd} [m]	0.0315
Effectieve diameter	D_s [m]	0.02121
Effectieve doorsnede [mm ²]	A_s [m ²]	0.000353
Polaire sectiemodulus	Z [m ³]	1.87E-06
Sectiemodulus	W [m ³]	9.3666E-07

5.4 Materialen

Een overzicht van de materialen van alle onderdelen van de toren is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Overzicht van de maximaal toelaatbare spanning van de torenonderdelen

	Flens	Sectie 1	Verloopstu k 1	Sectie 2	Verloopstu k 2	Sectie 3	Verloopstu k 3	Sectie 4
Materiaal	S355	S355	S355	S355	S355	S355	S355	S355

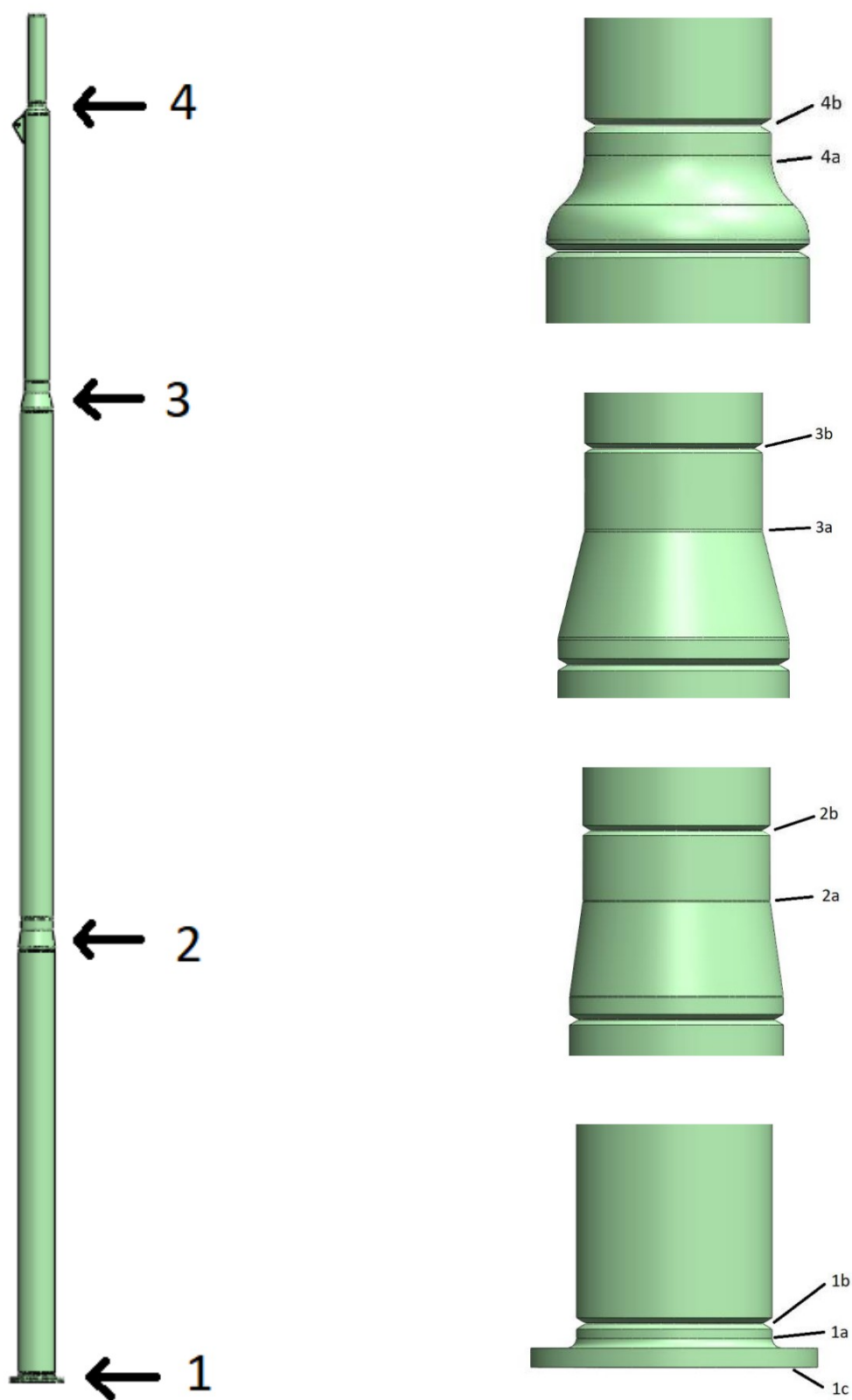
6 Berekeningsmethode

In dit hoofdstuk wordt de berekeningsmethode gepresenteerd. Eerst worden alle kritieke locaties waar de sterkte wordt beoordeeld gepresenteerd, met inbegrip van hun afmetingen en materialen. Vervolgens wordt de methode voor de berekening van de eindsterkte en de vermoeïingssterkte besproken. Tenslotte worden de voor deze beoordeling gebruikte FEM-modellen gepresenteerd en wordt aangegeven hoe deze worden gebruikt.

6.1 Kritieke locaties

De structurele beoordeling wordt uitgevoerd voor de meest kritieke locaties van de toren. Deze worden hieronder opgesomd en zijn weergegeven in Figuur 6.

1. Flens:
 - a. Flensradius
 - b. Flenslas
 - c. Flensboutverbinding met fundering
2. Verloopstuk 1:
 - a. Verloopstuk 1 conische overgang
 - b. Verloopstuk 1 bovenste las
3. Verloopstuk 2:
 - a. Verloopstuk 2 conische overgang
 - b. Verloopstuk 2 bovenste las
4. Verloopstuk 3
 - a. Verloopstuk 3 conische overgang
 - b. Verloopstuk 3 bovenste las



Figuur 6 kritieke locaties van de toren

De afmetingen en doorsnede-eigenschappen van de kritieke torenonderdelen die van belang zijn voor de spanningsberekeningen, zijn weergegeven in Tabel 4. Hierbij werd gebruik gemaakt van de vergelijking in Kader 1.

Tabel 4: afmetingen en doorsnede-eigenschappen van de kritieke torenonderdelen

		1. Flens		2. Verloopstuk 1		3. Verloopstuk 2		4. Verloopstuk 3	
		1a. Flensradius	1b. Flenslasis	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las	3a. Conische overgang	3b. Bovenste las	4a. Conische overgang	4b. Bovenste las
Hoogte	h [m]	0,04	0,09	5.024	5.156	11.006	11.13	14.204	14.234
Buitendiameter	D [m]	0,4064	0,4064	0.3556	0.3556	0.273	0.273	0.1937	0.1937
Wanddikte	t [m]	0,02	0,02	0.016	0.016	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
Sectiemodulus	W [m ³]	2.24E-03	2.24E-03	1.39E-03	1.39E-03	6.37E-04	6.37E-04	3.03E-04	3.03E-04

Kader 1

Sectiemodulus:

$$W = \frac{\pi}{2D} \left(\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D}{2} - t \right)^4 \right)$$

De eigenschappen inzake materiaalmoetheid en uiterste sterkte worden weergegeven in Tabel 5. De vermoeiingssterkte-eigenschappen worden bepaald op basis van EC3 (2)

Tabel 5: materiaalmoetheid en uiterste sterkte-eigenschappen

		1. Flens		2. Verloopstuk 1		3. Verloopstuk 2		4. Verloopstuk 3	
		1a. Flensradius	1b. Flenslasis	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las	1a. Flensradius	1b. Flenslasis	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las
detailcategorie ¹		Tabel 8.1 cat 3	tabel 8.6. cat 3	tabel 8.1 cat 3	tabel 8.6. cat 3	tabel 8.1 cat 3	tabel 8.6. cat 3	tabel 8.1 cat 3	tabel 8.6. cat 3
Vermoeiingsgrens bij 2E6 cycli	$\sigma_{fat_{2E6}}$ [Mpa]	160	90	160	90	160	90	160	90
Treksterkte	σ_{yield} [Mpa]	355.0	355.0	355.0	355.0	355.0	355.0	355.0	355.0

6.2 Materiaalveiligheidsfactoren

Overeenkomstig IEC-61400-2 (1) zijn de in Tabel 6 weergegeven materiaalveiligheidsfactoren toegepast voor de beoordeling van de uiterste belasting en de vermoeiingsbelasting:

¹ Voor alle lassen waarbij detailcategorie nummer 4 uit tabel 8.6 van toepassing is, worden twee categorieën hoger gebruikt, aangezien de dikte groter is dan 8 mm.

Tabel 6: materiaalveiligheidsfactoren

Materiaalveiligheidsfactor uiterste belastingen	$\gamma_{m_{uit}}$	1.1
Materiaalveiligheidsfactor vermoeïngsbelastingen	$\gamma_{m_{fat}}$	1.25

6.3 Beoordeling eindsterkte

De uiterste sterkte werd bepaald door de verhouding van de hoogste optredende spanning gedeeld door de maximaal toelaatbare spanning. Deze laatste is de treksterkte verminderd met de materiaalveiligheidsfactor voor uiterste belastingen zoals beschreven in paragraaf 6.2. De voor deze analyse vereiste belastingen worden berekend met behulp van een aëro-elastisch model, FAST genaamd. Document 82218 beschrijft in detail hoe deze belastingset wordt berekend. Hoofdstuk 7 geeft een overzicht van deze belastingen op de kritieke locaties. In hoofdstuk 6.5 wordt beschreven hoe de eenheidsspanningen en de concentratiefactoren worden berekend met behulp van een FEM-model. Deze eenheidsspanningen en concentratiefactoren worden gebruikt om de uiterste sterkte te berekenen. Deze beoordeling wordt gepresenteerd in hoofdstuk 8.

6.4 Beoordeling vermoeïngssterkte

De vermoeïngssterkte van alle kritieke locaties werd bepaald op basis van EC3 (2). Daarbij werd aan elk van de kritieke locaties een detailcategorie toegekend. Het resultaat is te vinden in Tabel 5.

De vermoeïngsschade is bepaald in de volgende stappen:

- Met behulp van FAST werden de belastingen voor verschillende windsnelheden berekend. Dit wordt nader beschreven in document 82218.
- Er werd een regenstroomtellingsmethode toegepast. Daarbij worden de spanningsbereiken berekend met behulp van de eenheidsspanningen zoals berekend in hoofdstuk 6.5. Deze spanningsbereiken zijn onderverdeeld in klassen.
- Een Weibull-verdeling werd gebruikt om de waarschijnlijkheid van elke windsnelheid te bepalen.
- Voor elke spanningsbereikklasse is het aantal cycli bepaald op basis van een levensduur van 20 jaar.
- De vermoeïngsschade voor één spanningsbereikklasse is de verhouding van het aantal cycli gedeeld door de maximaal toelaatbare cycli voor de gegeven spanningsbereikklasse. Hierbij is de materiaalveiligheidsfactor voor vermoeïngsbelasting toegepast, zoals beschreven in paragraaf 6.2.
- De totale vermoeïngsschade is de som van de vermoeïngsschade van alle spanningsbereik klassen. Het resultaat van deze beoordeling wordt gepresenteerd in hoofdstuk 8.

6.5 FEM-analyse

Ter ondersteuning van de spanningsberekeningen werd een Final Element Model (FEM, uiteindelijk elementmodel) -analyse uitgevoerd. Dit werd gedaan om het volgende te bepalen:

- Eenheidsspanning door voorspanning
- Eenheidsspanning door externe belasting
- Boutspanningen

In totaal werden 4 FEM-simulaties uitgevoerd. Een overzicht van de meest relevante invoerparameters is opgenomen in Tabel 7

Tabel 7: Overzicht van relevante invoerparameters voor FEM-simulaties

	simulatie 1	simulatie 2	simulatie 3	simulatie 4
Bovenbelasting toren	6578,9N (resultierend in 100 kNm aan de onderzijde van de toren)	Geen belasting	12499,9N (resultierend in 190 kNm aan de onderzijde van de toren)	Geen belasting
Verbinding toren op fundering	Boutverbinding zoals beschreven in paragraaf 5.3. Hierbij werd de minimale voorspanning van 192,5 kN per bout gebruikt.	Boutverbinding zoals beschreven in paragraaf 5.3. Hierbij werd de minimale voorspanning van 192,5 kN per bout gebruikt.	Boutverbinding zoals beschreven in paragraaf 5.3. Hierbij werd de maximale voorspanning van 269,5 kN per bout gebruikt.	Boutverbinding zoals beschreven in paragraaf 5.3. Hierbij werd de maximale voorspanning van 269,5 kN per bout gebruikt.
Ondersteuning	Verticale en horizontale steun aan alle 4 uiteinden van de fundering.			

6.5.1 Eenheidsspanning door voorspanning

De flens wordt blootgesteld aan spanningen als gevolg van de voorspanning van de bouten. Dit is geanalyseerd in simulatie 2. Hierbij werd de minimale voorspanning van 192,5 kN op de bout uitgeoefend. Er werd geen externe belasting toegepast.

De resulterende eenheidsspanningen veroorzaakt door voorspanning van de bouten van de torenonderflens zijn weergegeven in Tabel 8. De gebruikte vergelijking staat in Kader 2. Deze eenheidsspanning wordt gebruikt bij de beoordeling van de uiterste belasting.

Tabel 8: Bepaling van de eenheidsspanningen veroorzaakt door voorspanning van de bouten van de torenonderzijdeflens

		1. Flens		2. Verloopstuk 1		3. Verloopstuk 2		4. Verloopstuk 3	
		1a. Flensradius	1b. Flenslas	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las	1a. Flensradius	1b. Flenslas	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las
Spanning door voorspanning (192,5 kN)	σ_{pre} [Mpa]	52.5	21.9	0	0	0	0	0	0
Eenheidsspanning door voorspanning	s_{pre} [Mpa/kN]	0.273	0.114	0	0	0	0	0	0

Kader 2

Eenheidsspanning door voorspanning: $s_{pre} \cdot \frac{\sigma_{pre}}{F_{pre}}$
--

6.5.2 Eenheidsspanning door externe belasting

Voor elk van de kritieke locaties is de eenheidsspanning van de externe belasting bepaald. Dit is gedaan op basis van simulatie 1. Deze eenheidsspanningen worden gebruikt in zowel de vermoeiings- als de eindsterktebeoordeling, beschreven in paragraaf 6.4 Een overzicht van de eenheidsspanningen ten

gevolge van externe belasting wordt gegeven in Tabel 9. Daarbij zijn de gebruikte vergelijkingen weergegeven in Kader 3. De resultaten van FEM-simulatie 1 zijn weergegeven in bijlage 9.1.

Tabel 9: Bepaling van de eenheidsspanningen

		1. Flens		2. Verloopstuk 1		3. Verloopstuk 2		4. Verloopstuk 3	
		1a. Flensradius	1b. Flenslasis	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las	3a. Conische overgang	3b. Bovenste las	4a. Conische overgang	4b. Bovenste las
Moment	M [kNm]	100	99.7	67.1	66.3	27.7	26.8	6.6	6.4
Spanning uit berekening	σ_{calc} [Mpa]	44.7	44.6	48.4	47.8	43.4	42.1	21.7	21.0
Totale spanning uit FEM	σ_{tot} [Mpa]	146.6	74.5	57.2	47.7	51	42	37.4	17.2
Spanning door externe belasting	σ_{ext} [Mpa]	94.1	52.6	57.2	47.7	51	42	37.4	17.2
Spanningsconcentratiefactor	k_t [-]	2.10	1.18	1.18	1.00	1.17	1.00	1.72	1.00
Eenheidsspanning door externe belasting	s_{ext} [Mpa/kNm]	0.941	0.528	0.852	0.721	1.843	1.569	5.693	3.301

Kader 3

Buigmoment:	$M = F \cdot (L_{tot} - h)$
Analytisch berekende spanning:	$\sigma_{calc} \cdot \frac{M}{W}$
Spanning door externe belasting:	$\sigma_{ext} = \sigma_{tot} - s_{pre} \cdot F_{pre}$
Spanningsconcentratiefactor:	$k_t \cdot \frac{\sigma_{ext}}{\sigma_{calc}}$
Eenheidsspanning door externe belasting:	$s_{ext} \cdot \frac{k_t}{W}$

6.5.3 Boutspanningen

Voor de verbinding tussen onderflens en fundering werd het volgende bepaald:

- Bouteenheidsspanning door externe belasting bij maximale voorspanning
- Bouteenheidsspanning door externe belasting bij minimale voorspanning

De minimum- en maximumspanningen zijn opgenomen in Tabel 2 in paragraaf 5.3.

De boutenheidsspanning bij maximale voorspanning wordt gebruikt voor de beoordeling van de uiteindelijke sterkte van de bout. Deze zijn bepaald aan de hand van onderstaande stappen. De resultaten worden weergegeven in bijlage 9.4. De gebruikte vergelijkingen zijn weergegeven in Kader 4. Dit wordt gedaan voor alle bouten in de verbinding. Hieruit wordt de maximumwaarde gebruikt voor de eenheidsspanning, die is opgenomen in Tabel 10. Deze eenheidsspanning wordt gebruikt om de uiteindelijke sterkte van de bout te bepalen met de analytische vergelijkingen zoals beschreven in paragraaf 8.2.1.

- Uit simulatie 4 is het buigmoment bepaald dat door de maximale voorspanning ($M_{preMax.}$) wordt veroorzaakt.
- Uit simulatie 3 zijn het buigmoment (M_{tot}) en de axiale kracht (F_{tot}), veroorzaakt door zowel de maximale voorspanning als de externe belasting, bepaald.
- Het buigmoment en de axiale kracht die uitsluitend door externe belasting worden veroorzaakt, zijn bepaald.
- De spanning van de externe belasting werd bepaald
- De eenheidsspanning van externe belasting werd bepaald.

De spanning per bouteenheid bij minimale voorspanning wordt gebruikt voor de beoordeling van de vermoeïngsterkte van de bouten. Daarbij werd echter een soortgelijke aanpak gevolgd, waarbij de resultaten van simulatie 2 werden gebruikt om het door de minimale voorspanning veroorzaakte buigmoment te bepalen ($M_{preMax.}$), en de resultaten van simulatie 1 om het totale buigmoment en de axiale kracht te bepalen (M_{tot} en F_{tot}). De resultaten zijn opgenomen in bijlage 9.5, en de gebruikte vergelijkingen zijn weergegeven in Kader 5. Dit wordt gedaan voor alle bouten in de verbinding. Hieruit wordt de absolute maximumwaarde gebruikt voor de eenheidsspanning, die is opgenomen in Tabel 10. Deze eenheidsspanning wordt gebruikt bij de vermoeïngsterktebeoordeling van de bouten zoals beschreven in paragraaf 6.4.

Kader 4

Axiale kracht door externe belasting:	$F_{ext} = F_{tot} - F_{preMax.}$
Buigmoment door externe belasting:	$M_{ext} = M_{tot} - M_{preMax.}$
Spanning door externe belasting:	$\sigma_{ext} = \frac{F_{ext}}{A_s} + \frac{M_{ext}}{W}$
Eenheidsspanning door externe belasting	$S_{ext} \cdot \frac{\sigma_{ext}}{190 \text{ kNm}}$

Kader 5

Axiale kracht door externe belasting:	$F_{ext} = F_{tot} - F_{preMin.}$
Buigmoment door externe belasting:	$M_{ext} = M_{tot} - M_{preMin.}$
Spanning door externe belasting:	$\sigma_{ext} = \frac{F_{ext}}{A_s} + \frac{M_{ext}}{W}$
Eenheidsspanning door externe belasting	$S_{ext} \cdot \frac{\sigma_{ext}}{100 \text{ kNm}}$

De resulterende waarden voor de spanning van de bouteenheid bij maximale en minimale voorspanning worden weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10: Spanning van de bouteenheid bij maximale en minimale voorspanning

	Onderste flens tot fundering
Eenheidsspanning door externe belasting - maximale voorspanning S_{ext} [Mpa/kNm]	0,0525
Eenheidsspanning door externe belasting - minimale voorspanning S_{ext} [Mpa/kNm]	0,1221

7 Belastingen

Alle belastingen, uiterste en vermoeiingsbelastingen, worden berekend met het aëro-elastische FAST-model zoals beschreven in document 82218. De uiteindelijke torenbelasting is op 4 locaties berekend. Een overzicht van deze belastingen, met inbegrip van de veiligheidsfactor van de belasting, is opgenomen in Tabel 11.

Tabel 11: Uiteindelijke belastingen inclusief belastingsveiligheidsfactor

		1. Flens	2. Verloopstuk 1	3. Verloopstuk 2	4. Verloopstuk 3
Hoogte	[m]	0	5.127	11.159	14.000
Moment	[kNm]	211.5	130.6	66.5	38.00

De tot het regendebiet gerekende belastingsbereiken over een levensduur van 20 jaar zijn weergegeven in bijlage 9.3. Deze zullen worden ingevoerd voor de beoordeling van de vermoeiingssterkte zoals beschreven in paragraaf 6.4.

8 Sterktebeoordeling

8.1 Beoordeling van onderdelen en lassen

8.1.1 Beoordeling eindbelasting

De beoordeling van de uiterste belasting van de torenonderdelen en de lassen is weergegeven in Tabel 12. Daarbij zijn de gebruikte vergelijkingen weergegeven in Kader 6.

Tabel 12: Overzicht van de beoordeling van de uiterste belasting van de torenonderdelen en de lassen

		1. Flens		2. Verloopstuk 1		3. Verloopstuk 2		4. Verloopstuk 3	
		1a. Flensradius	1b. Flenslas	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las	1a. Flensradius	1b. Flenslas	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las
Extern moment	M [kNm]	211.5	211.5	130.6	130.6	66.5	66.5	38	38
Spanning door voorspanning	σ_{pre} [Mpa]	73.50	30.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Spanning door externe belasting	σ_{ext} [Mpa]	199.02	111.62	111.29	94.15	122.59	104.37	216.32	125.42
Spanning totaal	σ_{tot} [Mpa]	272.52	142.28	111.29	94.15	122.59	104.37	216.32	125.42
Beoordeling		0.844	0.441	0.345	0.292	0.380	0.323	0.670	0.389

Kader 6

Spanning door voorspanning	$\sigma_{pre} = s_{pre} * F_{pre}$
Spanning door externe belasting:	$\sigma_{ext} = \frac{M}{W} \cdot k_t$
Totale spanning:	$\sigma_{tot} = \sigma_{pre} + \sigma_{ext}$
Beoordeling:	$\frac{\sigma_{tot}}{\sigma_{meegeving} / \gamma_{m_{ult}}} > 1$

8.1.2 Beoordeling vermoeiingsbelasting

De beoordeling van de vermoeiingsbelasting van de torenonderdelen en de lassen is weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13: Overzicht van de beoordeling van de vermoeiingsbelasting van de torenonderdelen en de lassen

		1. Flens		2. Verloopstuk 1		3. Verloopstuk 2		4. Verloopstuk 3	
		1a. Flens radius	1b. Flens las	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las	1a. Flens radius	1b. Flens las	2a. Conische overgang	2b. Bovenste las
Beoordeling	[-]	0.714	0.724	0.037	0.287	0.033	0.269	0.733	0.875

8.2 Beoordeling van bouten

8.2.1 Beoordeling eindbelasting

De beoordeling van de uiterste belasting van de bouten is weergegeven in Tabel 14. Daarbij zijn de gebruikte vergelijkingen weergegeven in Kader 7.

Tabel 14: beoordeling van de uiterste belasting van de bout

		Onderste flens tot fundering
Moment torenonderzijde	M [kNm]	211.5
Spanning door externe belasting	σ_{ext} [Mpa]	11.10
Maximale voorspanning	F_{premax} [N]	269500
Moment veroorzaakt door maximale voorspanning	m_{premax} [Nm]	23.10
Torsiemoment t.g.v. spoed	T_{pitch} [Nm]	129
Torsiemoment t.g.v. wrijving	T_{thread} [Nm]	448
Torsiemoment t.g.v. kopwrijving	T_{head} [Nm]	340
Torsiespanning t.g.v. voorspanning	τ_{pre} [Mpa]	308.25
Normale spanning t.g.v. voorspanning	σ_{pre} [Mpa]	788.12
Totale spanning	σ_{tot} [Mpa]	843.68
Beoordeling	[-]	0.898

Kader 7

Torsiemoment door spoed:	$T_{pitch} = p * 0.16 * F_{premax}$
Torsiemoment door schroefdraadwrijving:	$T_{thread} = 0.58 * F_{premax} * Fric_{thr} * d_2$
Torsiemoment door kopwrijving:	$T_{head} = F_{premax} * Fric_{hd} \frac{D_{hd}}{2}$
Spanning door externe belasting:	$\sigma_{ext} = M * s_{ext}$
Spanning door voorspanning:	$\sigma_{pre} = \frac{F_{premax}}{A_s}$
Spanning door voorspanningstorsie:	$\tau_{pre} = \frac{T_{pitch} + T_{thread}}{Z}$
Totale spanning:	$\sigma_{tot} = \sqrt{(\sigma_{pre} + \sigma_{ext} \cdot \gamma_{mult})^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{pre}}{2}\right)^2}$
Beoordeling:	$\frac{\sigma_{tot}}{\sigma_{yield}} > 1$

8.2.2 Beoordeling vermoeiingsbelasting

De beoordeling van de vermoeiingsbelasting van de bouten is weergegeven in Tabel 15.

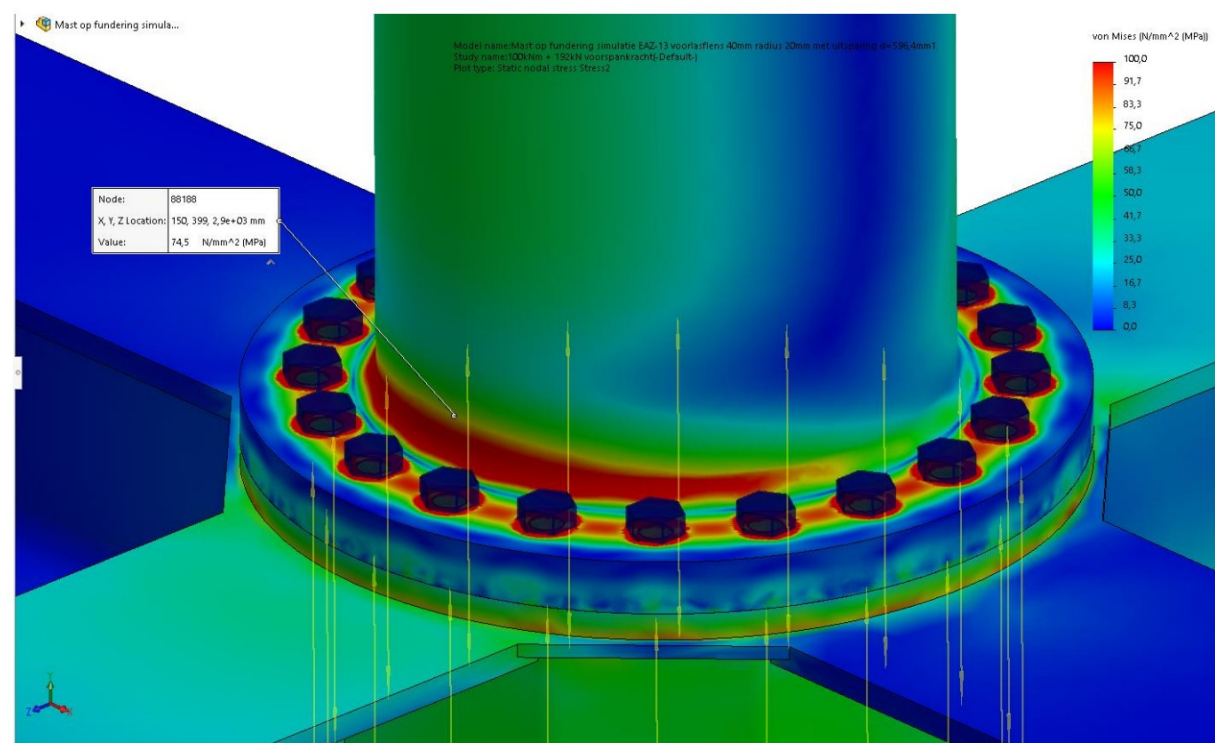
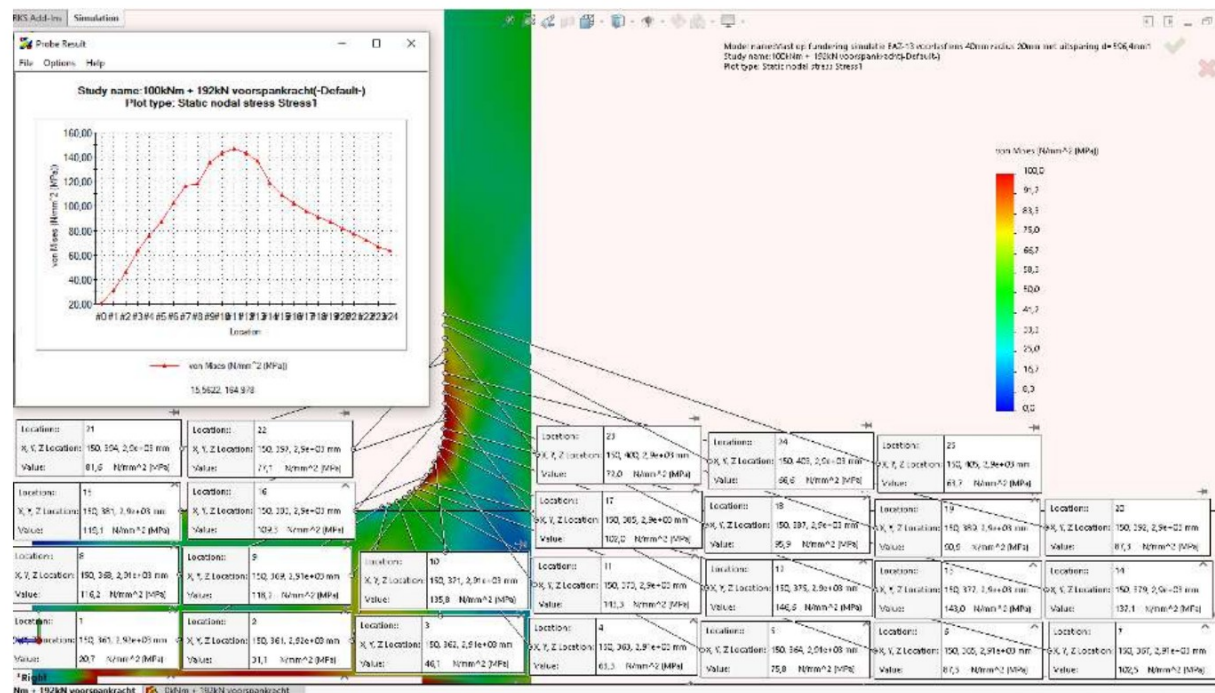
Tabel 15: Vermoeiingsbelasting van bouten

		Onderste flens tot fundering
Beoordeling	[-]	0.010

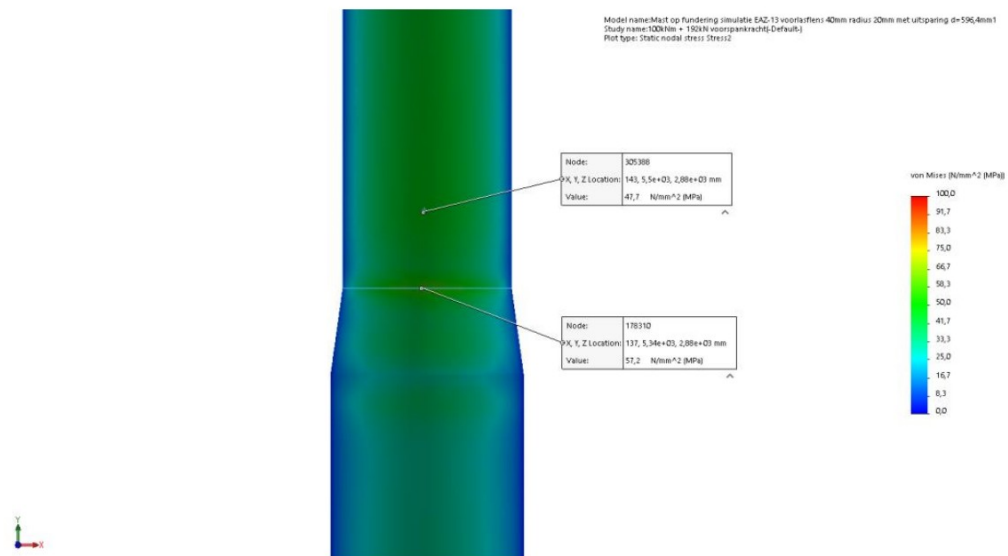
9 Bijlagen

9.1 Resultaten FEM-simulatie 1

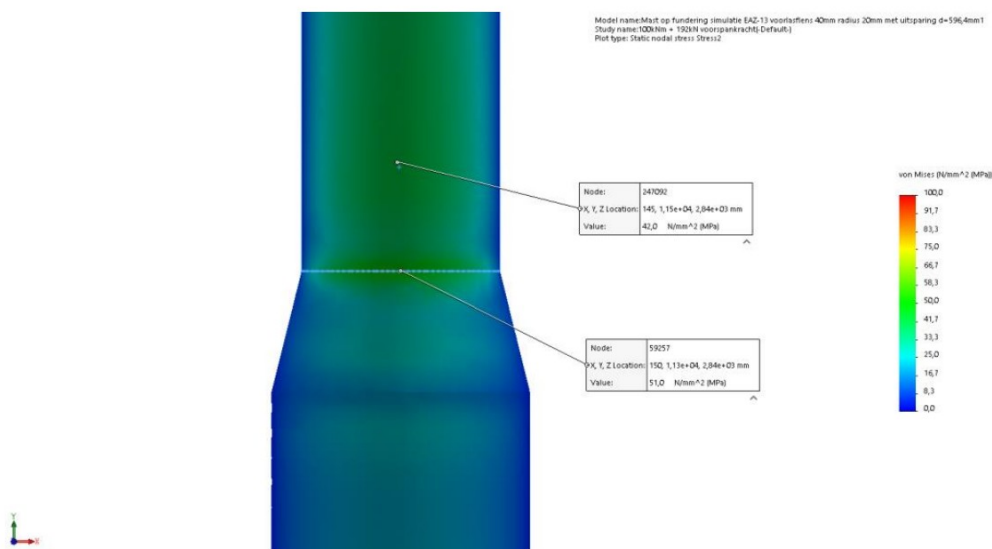
Onderste flens:



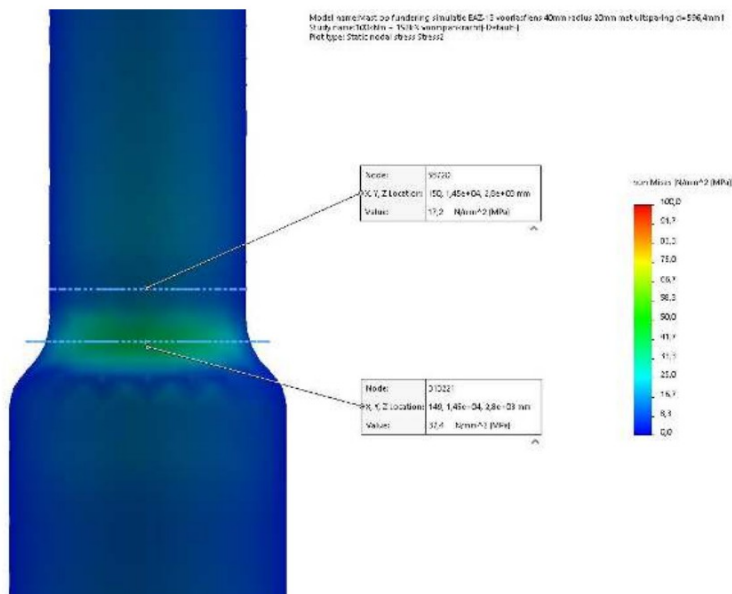
Verloopstuk 1:



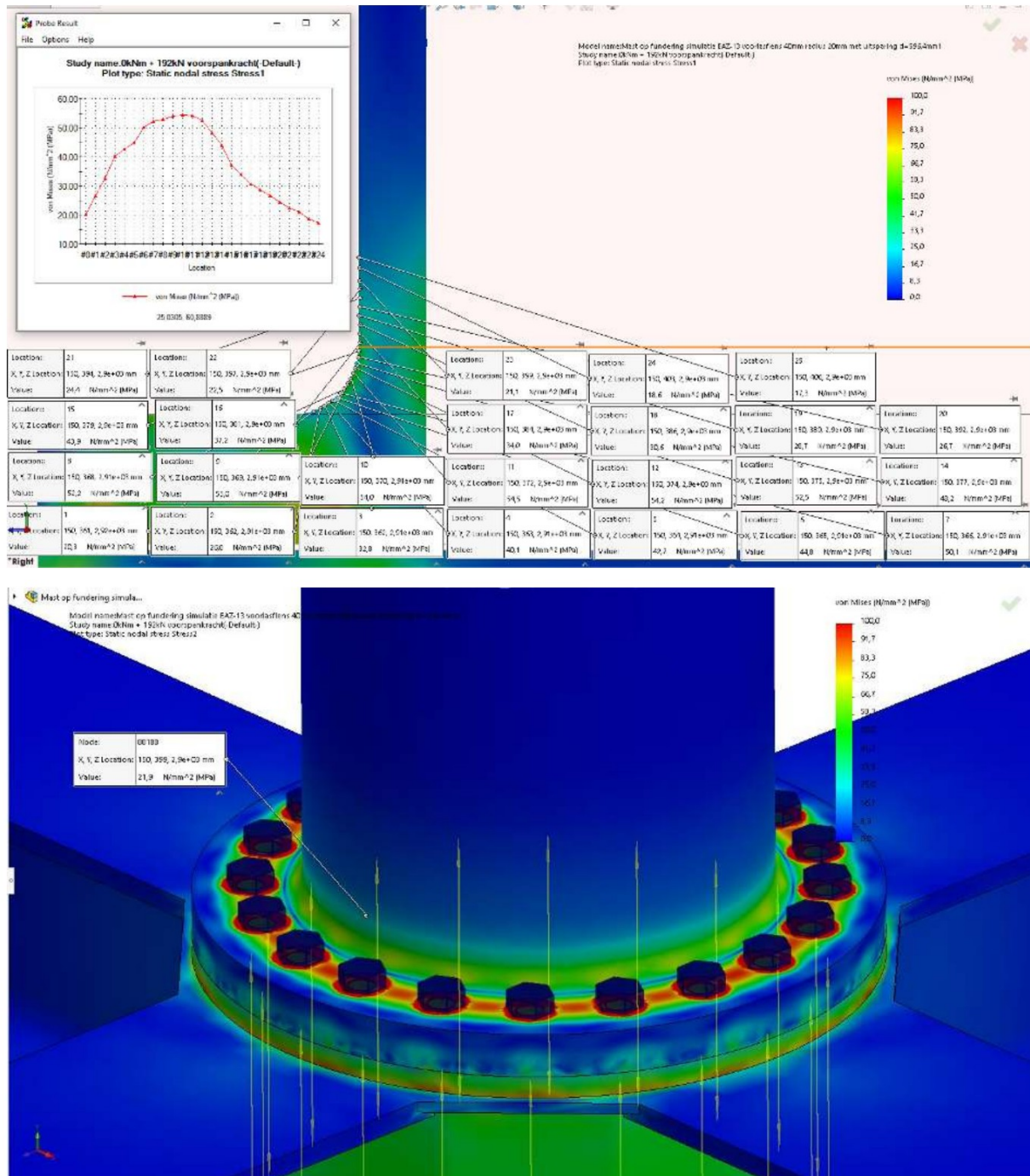
Verloopstuk 2:



Verloopstuk 3:



9.2 Resultaten FEM-simulatie 2



9.3 Regenstroomtellingen

4. Verloopstuk 3		3. Verloopstuk 2		2. Verloopstuk 1		1. Flens	
bereik	cycli	bereik	cycli	bereik	cycli	bereik	cycli
[kNm]	[#]	[kNm]	[#]	[kNm]	[#]	[kNm]	[#]
0,58275	8.39E+08	1,1755	1.72E+09	2,7745	8.71E+08	4,503	2.44E+09
1,1655	7.51E+08	2,351	1.03E+09	5,549	1.31E+08	9,006	6.68E+08
1,74825	5.7E+08	3,5265	4.88E+08	8,323501	89552128	13,509	2.21E+08
2,331	4.27E+08	4,702	2.51E+08	11,098	56800540	18,012	1.14E+08
2,91375	3.14E+08	5,8775	1.39E+08	13,8725	32592324	22,515	65800420
3,4965	2.33E+08	7,053	75403544	16,647	19948206	27,018	35188876
4,07925	1.6E+08	8,2285	40613724	19,4215	11449059	31,521	19669592
4,662	1.08E+08	9,404	21039778	22,196	6441310	36,024	10345615
5,24475	71449912	10,5795	11415456	24,9705	4021883	40,527	6024196
5,8275	46534008	11,755	6351149	27,745	3293768	45,03	4505534
6,41025	29750164	12,9305	4518734	30,5195	1781178	49,533	2994511
6,993	18853492	14,106	2830035	33,294	1512944	54,036	1684703
7,57575	11308144	15,2815	1947082	36,0685	1409280	58,539	1411482
8,1585	7590749	16,457	1683148	38,843	1181879	63,042	1358739
8,74125	4617648	17,6325	1243158	41,6175	991728	67,545	1215805
9,323999	3679572	18,808	1352848	44,392	808158,3	72,048	974118,3
9,90675	2371728	19,9835	1042075	47,1665	936001,6	76,551	945422,4
10,4895	1623539	21,159	845785	49,941	818727,8	81,054	840874,9
11,07225	1160241	22,3345	926695	52,7155	731691,7	85,557	814637,3
11,655	683545,3	23,51	616018,4	55,49	512118,5	90,06	575196,7
12,23775	717300	24,6855	506058,6	58,2645	328400,3	94,563	367224,4
12,8205	409650	25,861	426507,8	61,039	301716,1	99,066	313381,2
13,40325	240652,5	27,0365	286502,9	63,8135	199897,1	103,569	223460,1
13,986	211770	28,212	141380,1	66,58801	177096,9	108,072	125842,2
14,56875	124396,3	29,3875	111952,4	69,3625	84847,62	112,575	110881,7
15,1515	89047,45	30,563	89839,3	72,137	63898,66	117,078	44431,81
15,73425	42569,33	31,7385	50620,19	74,9115	18885,54	121,581	16844,39
16,317	26529,89	32,914	33688,96	77,686	8718,096	126,084	13260,43
16,89975	31068,16	34,0895	16449,29	80,4605	14803,24	130,587	14322,03
17,4825	21972,08	35,265	5132,486	83,235	8712,388	135,09	7645,081
18,06525	14715,49	36,4405	4061,116	86,00951	5609,638	139,593	7742,605
18,648	7654,853	37,616	8706,68	88,784	0	144,096	5609,638
19,23075	4070,887	38,7915	6194,084	91,5585	19925,96	148,599	9670,754
19,8135	6194,084	39,967	3097,042	94,333	0	153,102	0
20,39625	3097,042	41,1425	0	97,10751	4645,563	157,605	3097,042
20,979	486,9226	42,318	1548,521	99,882	1548,521	162,108	3097,042
21,56175	1548,521	43,4935	1548,521	102,6565	0	166,611	3097,042
22,1445	0	44,669	0	105,431	0	171,114	1548,521
22,72725	0	45,8445	0	108,2055	1548,521	175,617	0
23,31	0	47,02	0	110,98	0	180,12	0

9.4 Boutspanningen bij maximale voorspanning

Boutnummer	Van voorspanning		Totaal		Van externe belasting			
	Axiale kracht ($F_{preMax.}$) [N]	Moment ($M_{preMax.}$) [Nm]	Axiale kracht (F_{tot}) [N]	Moment (M_{tot}) [Nm]	Axiale kracht (F_{ext}) [N]	Moment (M_{ext}) [Nm]	Normale spanning (σ_{ext}) [Mpa]	Eenheidsspanning (S_{ext}) [MPa/kNm]
1	269500	10,462	2.71E+05	10,462	1300,00	0	3,683	0,0194
2	269500	21,19	2.72E+05	21,19	2990,00	0	8,470	0,0446
3	269500	21,919	2.73E+05	21,919	3510,00	0	9,943	0,0523
4	269500	23,101	2.73E+05	23,101	3520,00	0	9,972	0,0525
5	269500	19,415	2.72E+05	19,415	2990,00	0	8,470	0,0446
6	269500	11,741	2.72E+05	11,741	2180,00	0	6,176	0,0325
7	269500	13,22	2.71E+05	13,22	1280,00	0	3,626	0,0191
8	269500	17,068	2.70E+05	17,068	560,00	0	1,586	0,0083
9	269500	2,3925	2.69E+05	2,3925	-650,00	0	-1,841	-0,0097
10	269500	12,827	2.68E+05	12,827	-1530,00	0	-4,334	-0,0228
11	269500	14,663	2.67E+05	14,663	-2670,00	0	-7,564	-0,0398
12	269500	11,769	2.66E+05	11,769	-3910,00	0	-11,076	-0,0583
13	269500	17,805	2.65E+05	17,805	-4620,00	0	-13,088	-0,0689
14	269500	19,194	2.65E+05	19,194	-4660,00	0	-13,201	-0,0695
15	269500	14,453	2.66E+05	14,453	-3920,00	0	-11,105	-0,0584
16	269500	14,966	2.67E+05	14,966	-2710,00	0	-7,677	-0,0404
17	269500	12,841	2.68E+05	12,841	-1550,00	0	-4,391	-0,0231
18	269500	1,1909	2.69E+05	1,1909	-630,00	0	-1,785	-0,0094
19	269500	17,667	2.70E+05	17,667	510,00	0	1,445	0,0076
20	269500	10,893	2.72E+05	10,893	2200,00	0	6,232	0,0328

9.5 Boutspanningen bij minimale voorspanning

	Van voorspanning		Totaal		Van externe belasting			
Boutnummer	Axiale kracht ($F_{preMin.}$) [N]	Moment ($M_{preMin.}$) [Nm]	Axiale kracht (F_{tot}) [N]	Moment (M_{tot}) [Nm]	Axiale kracht (F_{ext}) [N]	Moment (M_{ext}) [Nm]	Normale spanning (σ_{ext}) [Mpa]	Eenheidsspanning (S_{ext}) [MPa/kNm]
1	192500	3,766	193200	5,5235	700	1,758	3,860	0,0386
2	192500	4,664	194030	12,041	1530	7,377	12,210	0,1221
3	192500	5,646	194270	12,256	1770	6,610	12,071	0,1207
4	192500	6,434	194310	12,58	1810	6,146	11,689	0,1169
5	192500	4,052	194050	11,102	1550	7,050	11,918	0,1192
6	192500	0,926	193680	6,3794	1180	5,453	9,165	0,0916
7	192500	4,223	193210	6,4222	710	2,199	4,359	0,0436
8	192500	5,041	192800	9,7602	300	4,719	5,888	0,0589
9	192500	5,782	192170	1,5498	-330	-4,232	-5,453	-0,0545
10	192500	2,894	191700	7,3474	-800	4,454	2,488	0,0249
11	192500	1,455	191130	8,8645	-1370	7,410	4,030	0,0403
12	192500	4,495	190520	7,1557	-1980	2,660	-2,769	-0,0277
13	192500	5,380	190090	9,7549	-2410	4,375	-2,157	-0,0216
14	192500	5,326	190090	10,776	-2410	5,450	-1,008	-0,0101
15	192500	4,351	190490	7,475	-2010	3,124	-2,359	-0,0236
16	192500	0,775	191120	7,8703	-1380	7,096	3,666	0,0367
17	192500	3,223	191720	6,8345	-780	3,612	1,647	0,0165
18	192500	5,430	192190	0,79202	-310	-4,638	-5,830	-0,0583
19	192500	5,965	192780	10,631	280	4,667	5,775	0,0578
20	192500	1,577	193660	5,2378	1160	3,661	7,195	0,0719