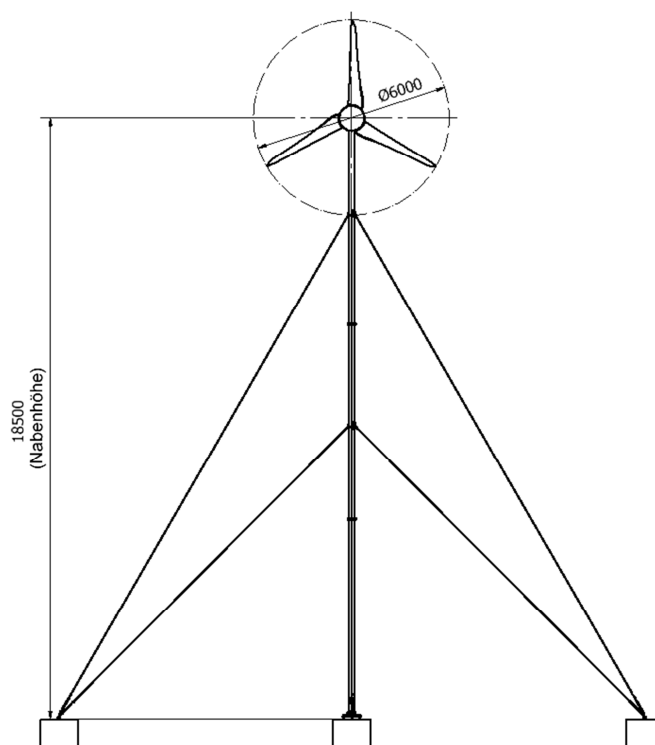


my!WIND

5 kW Kleinwindkraftanlage

Statische Stabilität bei abgESPANNTem Mast



Inhaltsübersicht

Inhaltsübersicht	2
Aktualisierungen.....	2
Anlagen	2
Allgemeines.....	3
1. Einleitung.....	4
2. Geometrie.....	4
3. Materialien.....	5
4. Lasten.....	6
5. Berechnungen	7
5.1 Maststabilität	7
5.2 Festigkeit des Mast-Sockels	12
5.3 Festigkeit der Zwischenstücke (Halterungen für die Abspannseile)	14
5.4 Abspannseile und Zubehör	17
5.5 Schraubverbindungen	20
5.6 Fundament	28
6. Schlussfolgerung.....	30

Aktualisierungen

Rev	Änderung	geändert von	Änderungsdatum
00	Reporterstellung	Pabut	25.05.2013
00d	Übersetzung ins Deutsche	Mach	16.01.2014

Anlagen

Nr.	Name	Revision
01	ICE 61400-2 2006 Wind turbines part 2; Design requirements for small wind turbines	-
02	5KW-MD-01.04.00.00.00-0 Tower guywired 18m_merged	0
03	5KW-MD-01.06.01.00.00-0 Guywired foundation center	0
04	5KW-MD-01.06.02.00.00-0 Guywired foundation side	0
05	EN 1993-1-3: 2006 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints	-

Allgemeines

Die in diesem und allen zugrundeliegenden Dokumenten der Firma my!WIND dargestellten Informationen wurden mit großer Sorgfalt vorbereitet.

my!WIND kann indes keine Garantie übernehmen für die korrekte Interpretation und Anwendung der Informationen durch den Kunden. Falls unvollständige, unverständliche oder fehlerhafte Information entdeckt wird, ist dieser Umstand umgehend mit dem Autor zu klären. Mit der Nutzung dieses Dokuments stimmt der Kunde zu, dass my!WIND ausschließlich für vorsätzliche und grobe Fahrlässigkeit zu verantworten ist.

Dieses Dokument ersetzt jegliche zu früheren Zeitpunkten veröffentlichte Versionen.

1. Einleitung

Eine Übersicht über die Stabilität der my!WIND 5 kW wird in diesem Dokument geliefert. Die angenommenen Lasten des Systems basieren auf Anlage 01 und legen die Kleinwindkraftanlage für Windklasse IIa aus. Berechnungen fußen auf dem vereinfachten Lastberechnungsmodell, das durch die ICE zugelassen ist.

Die Kleinwindkraftanlage wird auf einem abgespannten Rohrmast aufgerichtet und mit einem Fundamentblock verbunden. Die Stahlseile, die den Mast aufrecht halten, sind ebenso an Fundamentblöcken befestigt. Um die erforderliche Stabilität gemäß Anlage 01 zu gewährleisten, muss die charakteristische Belastbarkeit des abgespannten Masts jene Kräfte übersteigen, die durch maximale Lasten auftreten können. Die Fundamentblöcke der Stahlseile müssen widerstandsfähig sein hinsichtlich Herausreißen und Wegrutschen.

Die verwendeten Schrauben müssen standhalten gegenüber den durch Lasten auftretenden Kräften und dürfen kein Spiel an Verbindungsstellen erlauben. Außerdem müssen die ins Fundament eingebetteten Verbindungsbolzen sowie die Stahlseile samt Anbauteilen maximalen möglichen Zugkräften widerstehen.

FEM Analyse und analytische Berechnung werden angewandt, um die Stabilität der Kleinwindkraftanlage und des Fundaments sicherzustellen.

Die Einwirkkraft auf Schraubverbindungen sind dem FEM Modell entnommen, während die Festigkeit der Verbindungen analytisch berechnet worden ist anhand der Formeln aus Anlage 05.

Die Einwirkkraft auf die Stahlseile basieren ebenso auf dem FEM Model, und die Widerstandskraft der Anbauteile wurde auf Basis empirischer Formeln berechnet, die von den Herstellern stammen. Die Stabilität der Fundamentblöcke wurde anhand empirischer Formeln aus der allgemeinen Fachliteratur kalkuliert.

2. Geometrie

Die gesamte Kleinwindkraftanlage umfasst den zentralen Fundamentblock, vier seitliche Fundamentblöcke, Spannseile samt Anbauteilen, den abgespannten Mast und den Maschinenkopf. Allen Lastberechnungen liegt eine Nabenhöhe von 18,5 m zugrunde.

Der Mast besteht aus Bodenplatte, Bodenplatten-Winkelstück, einem ersten, einem zweiten und einem dritten Rohrsegment. Diese Komponenten sind geschweißte Stahlkonstruktionen, die durch Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 verbunden und elektrolytisch verzinkt sind (siehe Anlage 02).

Mastspezifikation:

Durchmesser 1. Segment:	168,3 mm
Wandstärke 1. Segment:	4 mm
Durchmesser 2. Segment:	168,3 mm
Wandstärke 2. Segment:	4 mm
Durchmesser 3. Segment:	168,3 mm
Wandstärke 3. Segment:	4 mm
Gesamtmasse:	389 kg

Der Fundamentblock wird aus gegossenem/geschaltem Beton mit integrierter Stahlbewehrung zur Aufnahme von Lasten hergestellt. Die Aufgabe der seitlichen Betonblöcke besteht ausschließlich darin, als Gegengewichte gegenüber Zugkräften zu dienen, die aufgrund von Windlasten in den Abspannseilen auftreten. Der zentrale Fundamentblock dient einerseits als Basis beim Aufstellen und nimmt andererseits Kompressionskräfte auf, die durch Windlasten verursacht werden. Die Einheiten sind so ausgelegt, dass alle unmittelbar wirkenden Kräfte von ihren Stahlarmierungen aufgenommen werden (Anlagen 03 und 04).

Spezifikation der seitlichen Betonblöcke:

Länge (l)	1,15 m
Breite (w)	1,15 m
Höhe (h)	0,85 m
Gewicht (W)	je 2 585 kg

Spezifikation des zentralen Fundamentblocks:

Länge (l)	1,15 m
Breite (w)	1,15 m
Höhe (h)	0,85 m
Gewicht (W)	2 585 kg

3. Materialien

Mast – Stahl S355J2H:

Elastizitätsmodul	200 GPa
Querdehnzahl	0,3
Zugfestigkeit	355 MPa

Fundamentblöcke – Beton C20/25:

Dichte	2300 kg/m ³
Druckfestigkeit	20 MPa

Fundamentbewehrung – Stahl S235JR:

Elastizitätsmodul	200 GPa
Querdehnzahl	0,3
Zugfestigkeit	235 MPa

4. Lasten

Die Lasten von Mast und Fundament wurden gemäß Anlage 01, Punkt 7, berechnet. Lastnahmen basieren auf dem sogenannten vereinfachten Lastmodell, da die Kleinwindkraftanlage alle Voraussetzungen der zugrundeliegenden Kategorie erfüllt. In diesem Fall sind im Report nur jene Lastfälle beschrieben, die auf Mast- und Fundamentstabilität Einfluss nehmen. Für einige Lastfälle ist aus den vereinfachten Berechnungsformeln leicht zu erkennen, dass diese für die Stabilität der Tragstruktur von geringer Bedeutung sind. Für den Lastfall „I: Parkposition mit maximaler Windlast“ wird nur die kritischste Situation analysiert. Da der Mast mit Abspannseilen auf zwei Ebenen eine statisch nicht definierte Konstruktion ist, wurden Belastungen und Kräfte in den Seilen dem FEM Model entnommen; dies wird im folgenden Kapitel detailliert erklärt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Kräfte bei jedem Lastfall und die daraus resultierenden Zugkräfte in den Abspannseilen, sowie die dadurch hervorgerufenen Belastungen. Bei der vorliegenden Konstruktion sind die Verbindungsstellen der Abspannseile am Mast die kritischsten Punkte (siehe Anlage 01).

Tabelle 1 – Lasten und resultierende Einwirkkräfte

Betrachtete Lastfälle / Lastwirkung	A: Normalbetrieb	B: Maximale Windlast	H: Parkposition mit Windlast	I: Parkposition mit maximaler Windlast
Schubkraft (Wind)	801 N	3 910 N	2 351 N	3 472 N
Windkraftanlagenkopfgewicht	2 570 N	2 570 N	2 570 N	2 570 N
Mastgewicht	3 816 N	3 816 N	3 816 N	3 816 N
Drittes Mastsegment (Windwirkung)	0 N	0 N	1 533 N	782 N
Zweites Mastsegment (Windwirkung)	0 N	0 N	1 533 N	782 N
Erstes Mastsegment (Windwirkung)	0 N	0 N	1 533 N	782 N

Gondelabdeckung (Windwirkung)	0 N	0 N	738 N	377 N
Ergebnisse				
Einwirkkraft auf 1. Abspannseilverbindung	1 142 N	3 643 N	456 N	1 890 N
Einwirkkraft auf 2. Abspannseilverbindung	3 136 N	12 511 N	12 616 N	13 644 N
Einwirkkraft am Mastfuß	9 595 N	19 504 N	16 790 N	19 253 N
Belastung an der 1. Abspannseilverbindung	16 MPa	56 MPa	46 MPa	56 MPa
Belastung an der 2. Abspannseilverbindung	31 MPa	235 MPa	207 MPa	236 MPa

5. Berechnungen

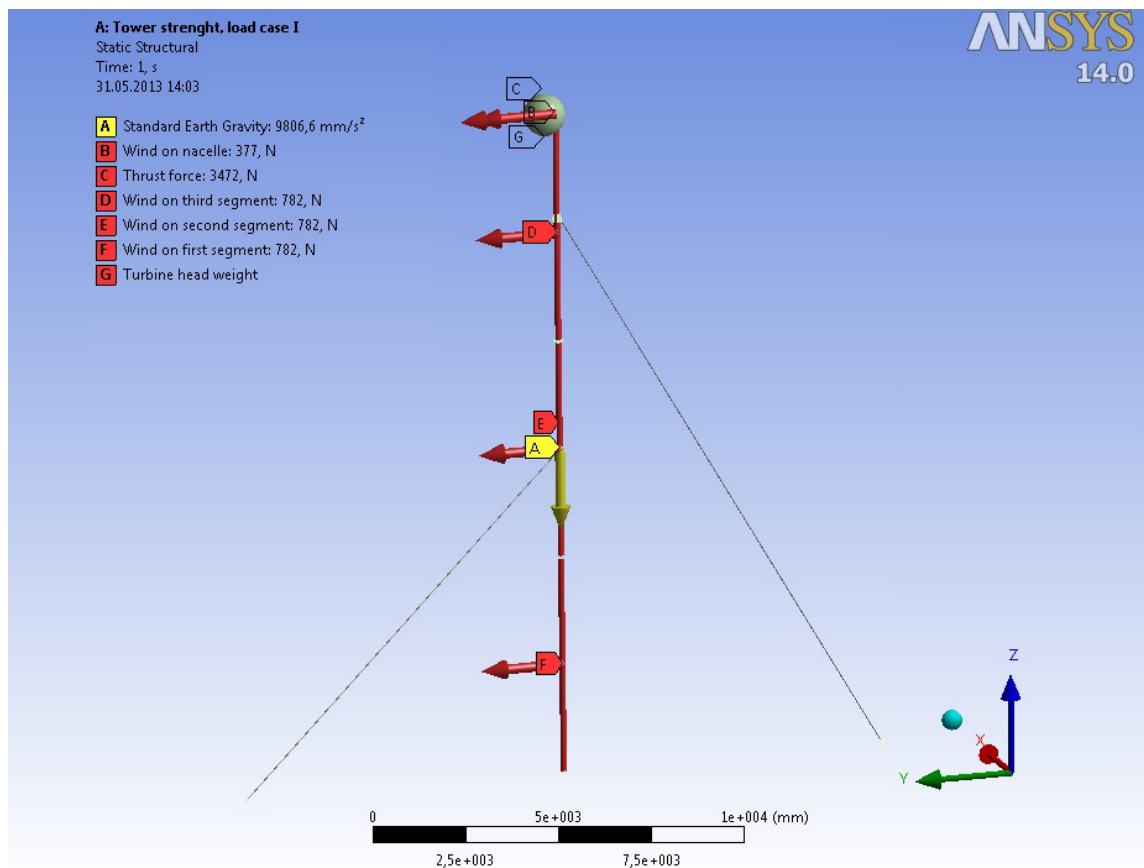
5.1 Maststabilität

Die FEM Berechnungen werden in drei Schritten durchgeführt: Zunächst werden die Mastsegmente und Abspannseile analysiert. Die so berechneten Einwirkkräfte werden zugrunde gelegt, um die Mastsockel-Gruppe und die Verbindungselemente der Abspannseile zu überprüfen. Durch diese Vorgehensweise werden alle Berechnungsmodelle so einfach wie möglich gehalten, um bei gegebener Computer-Rechenleistung die realistischsten Ergebnisse zu ermitteln. Das FEM Model des Mastes besteht aus vier soliden Teilen: 1. Mastsegment, 2. Mastsegment, 3. Mastsegment, sowie alle Halterungen zur Befestigung der Abspannseile an den Segmenten. Die Abspannseile sind als feste Körper modelliert, um Einflüsse aufgrund ihrer Deformationsfähigkeit auszuschließen. Die Abspannseile sind so positioniert, dass sie nur Zugkräften entgegenwirken. Im gegenwärtigen Modell sind das obere Abspannseil an einer Mastseite und das untere Abspannseil an einer anderen Seite angebracht. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass sich der untere Mastbereich aufgrund auftretender Deformationskräfte in Windrichtung neigt. Diese Annahme wurde verifiziert, indem die Richtung von Einwirkkräften so festgelegt wurde, dass Abspannseile nur Zugkräften ausgesetzt sind.

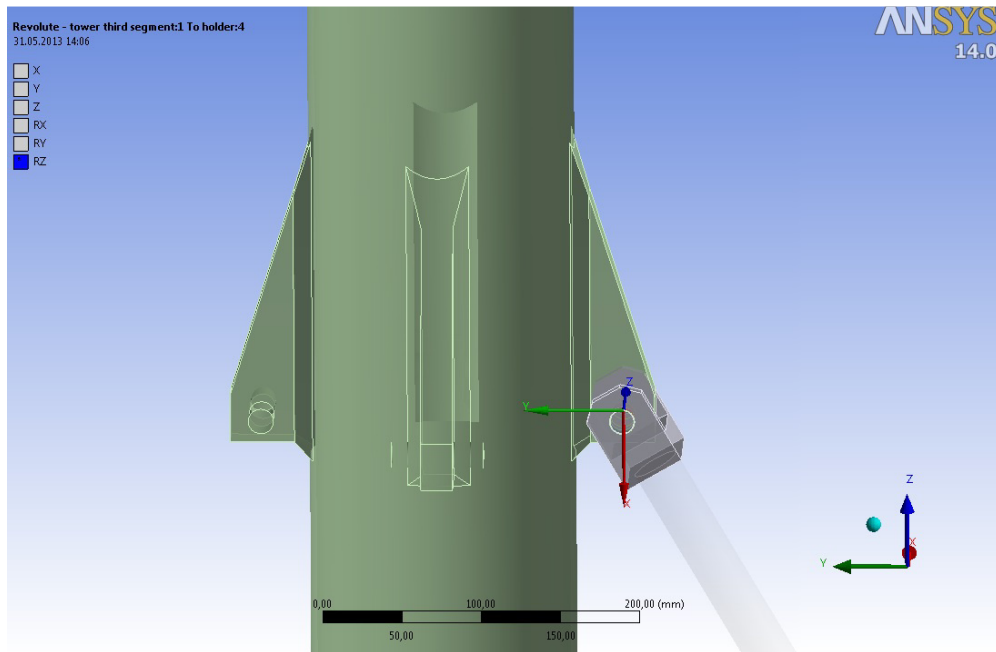
Die Kopfmassse der Kleinwindkraftanlage wird durch einen Massepunkt repräsentiert, der sich in horizontaler Richtung (y-Achse in Zeichnung 1) 314 mm vom der Mastmitte befindet. Die Mastsegmente sind zusammengefügt durch Schraubverbindungen in Größe der Unterlegscheiben. Diese Verbindungsflächen werden zugrunde gelegt, um die Wirkkräfte auf alle Schraubverbindungen zwischen den Mastsegmenten zu ermitteln. Übrige Kontaktflächen, die in keiner Weise fest verbunden sind, werden ohne Reibungskräfte betrachtet. Die Halterungen der Seile sind über drehbaren Verbindungen am Mast angebracht (siehe Zeichnung 2) und die Seile selbst sind als feste Körper mit den Halterungen verbunden.

Das erste Mastsegment ist über ein Drehgelenk mit dem Boden verbunden. Diese Verbindungsart wird gewählt, um die Einwirkkräfte auf Kabel und andere Anbauteile zu ermitteln.

Um für die hochbelasteten Bereiche an der Verbindungsstelle zwischen den Haltestreben und den Mastrohren realistischere Ergebnisse zu erzielen, wurden dem Modell Schweißnähte hinzugefügt, um Singularitätsprobleme zu verhindern. Dies wurde getan, um eine gleichmäßigere Lastverteilung an den Übergängen von Elementen zu erhalten. Die Wirklasten sind Tabelle 1 entnommen und gemäß ihrer Charakteristik und Richtung angewandt (siehe Zeichnung 1). Nur Lastfall I “Parkposition mit maximaler Windlast” wird in diesem Report betrachtet, da hieraus die höchsten Belastungen an den Übergängen vom dritten Mastsegment zu den oberen Abspannseil-Verbindungen resultieren.

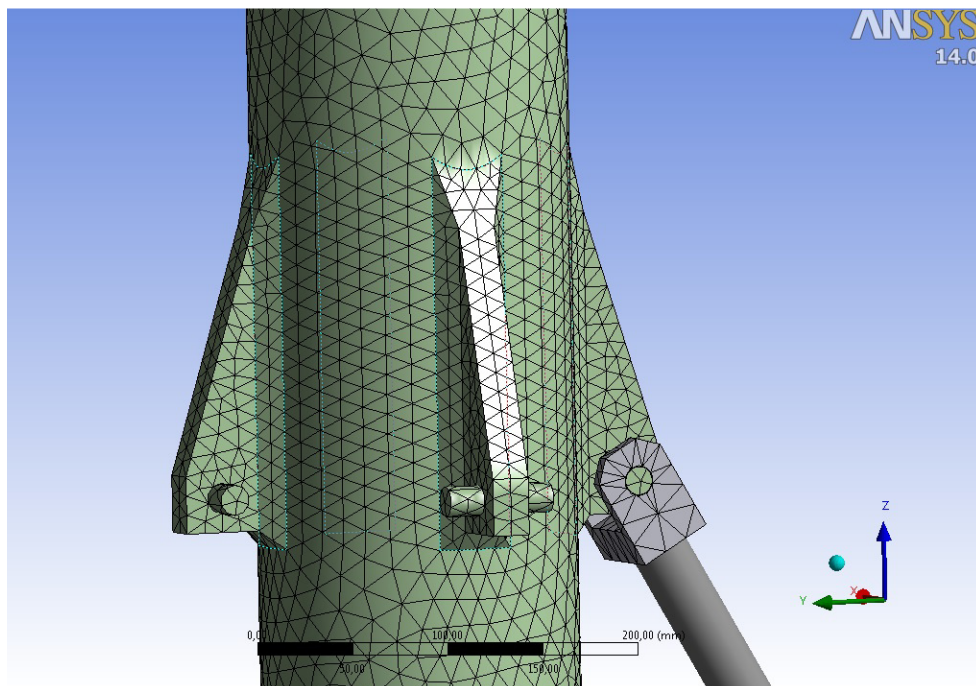


Zeichnung 1 - Grenzbedingungen



Zeichnung 2 – Verbindung zwischen Abspannseil und Mast

Ein Tetraeder-Gittermodell mit einer überwiegenden Elementgröße von 15 mm wurde eingesetzt, was zu einer Gesamtgitterstruktur aus 321.780 Elementen mit 642.737 Knotenpunkten führt. An den Verstärkungsstreben ist das Gitter verfeinert auf eine Elementgröße von 8 mm (siehe Zeichnung 2).

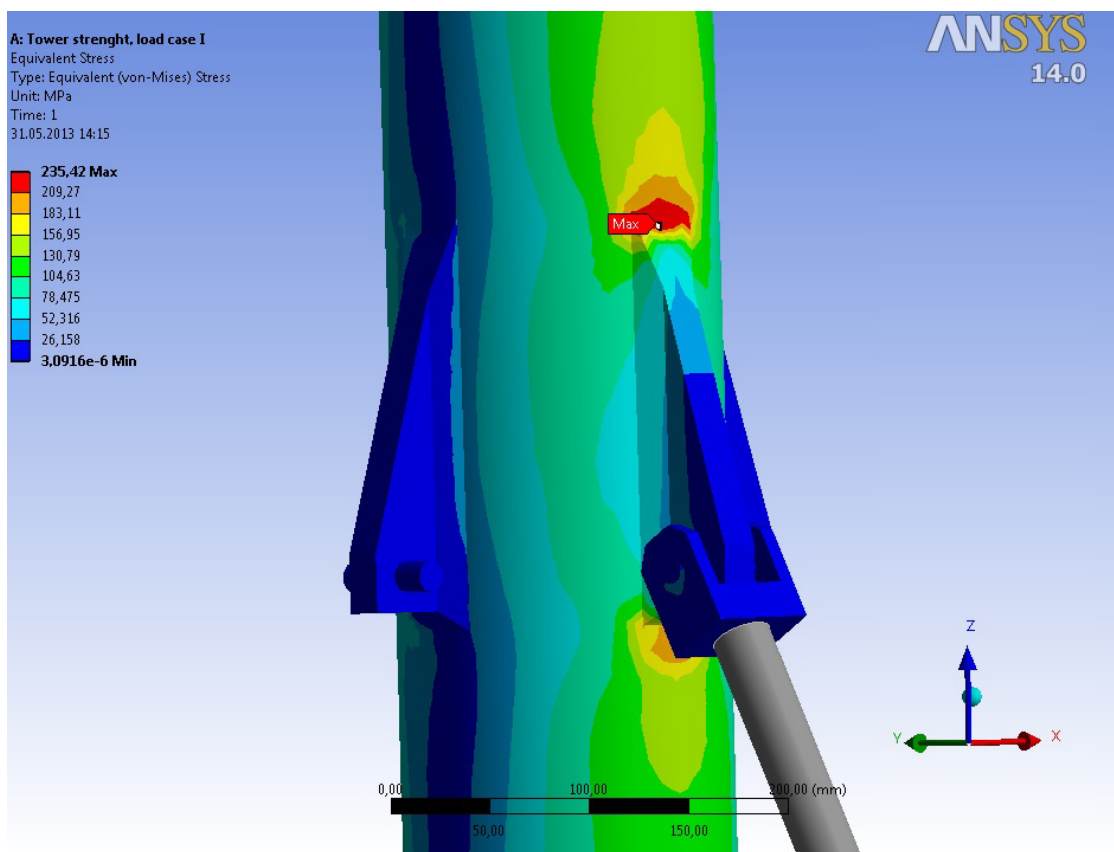


Zeichnung 3 – Gittermodell

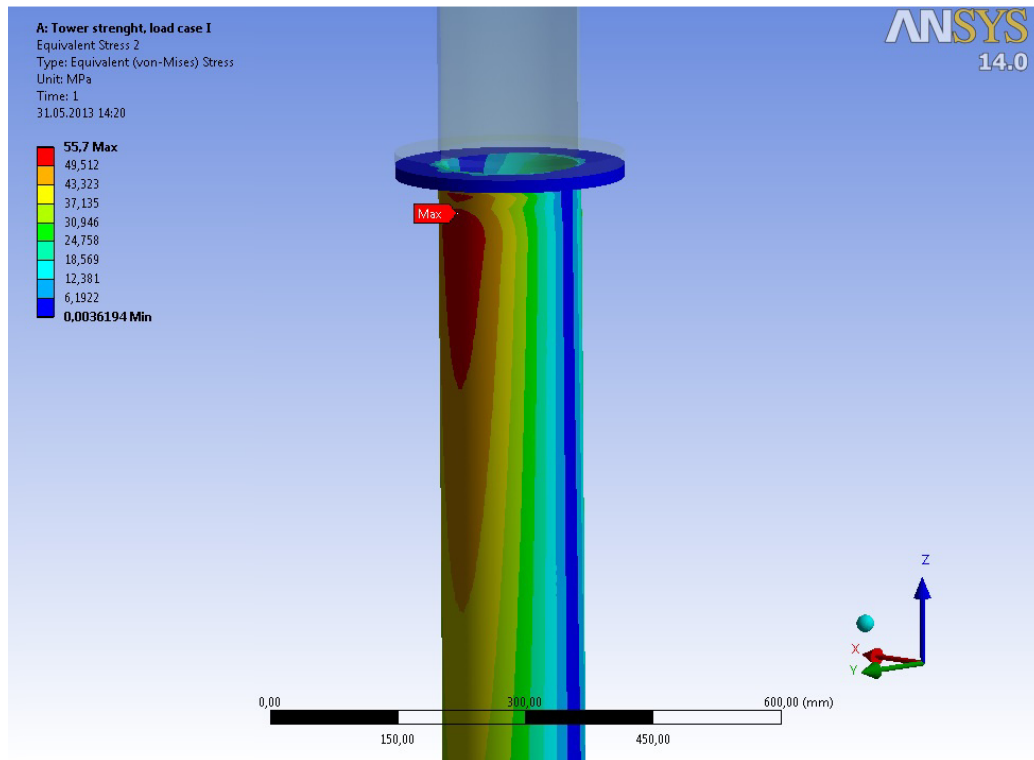
Die höchsten Belastungen treten in den oberen Haltestreben des dritten Mastsegments auf (siehe Zeichnung 4); diese Werte erreichen bis zu 236 MPa. Zwei Faktoren sind bei der Betrachtung von Kräften an konkreten Punkten zu berücksichtigen: Zum einen liegt die Erzeugung zum Teil hoher Belastungswerte im Wesen der FEM Analyse, zum anderen hat der Punkt in der Realität eine Schweißverbindung, die für Schäden anfällig ist. Aus Gründen der Sicherheit wird die höchste auftretende Belastung zur Berechnung des Sicherheitsfaktors herangezogen und keine Kompensation bei Auftreten von Singularitätseffekten durchgeführt. An weiteren Komponenten sind die Belastungen niedriger (siehe Zeichnungen 5 und 6).

Die zulässige Belastbarkeit gemäß Anlage 01 beträgt $\frac{355}{1,1 \cdot 1,35} = 239 \text{ MPa} > 236 \text{ MPa}$ (d.h. in Ordnung).
Siehe Anlage 01 – Teilsicherheitsbeiwert für Materialien 1,1; Teilsicherheitsbeiwert für Lasten 1,35.

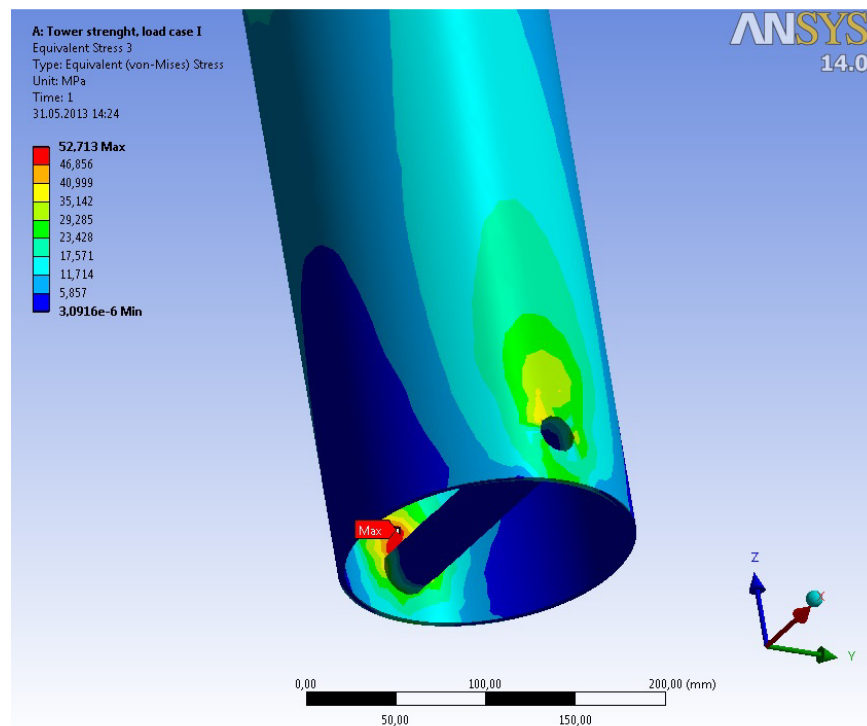
Demzufolge ist die Festigkeit des Mastes auch in Extremlastfällen gewährleistet.



Zeichnung 4 – Belastungen an Verbindungen zum zweiten und ersten Mastsegment



Zeichnung 5 – Belastung am zweiten Segment

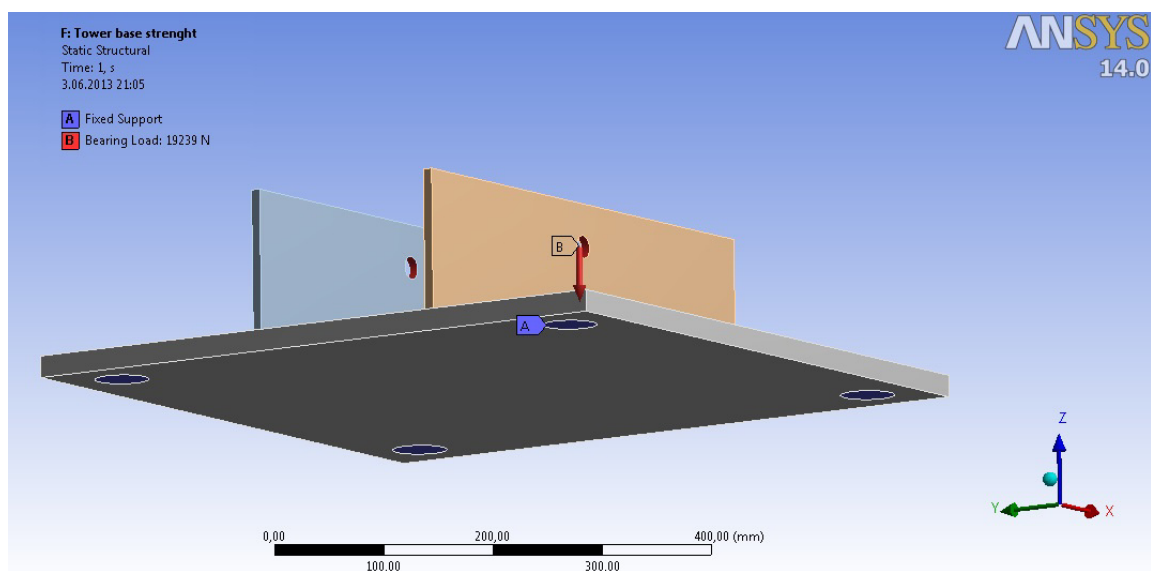


Zeichnung 6 – Belastung am dritten Segment

5.2 Festigkeit des Mast-Sockels

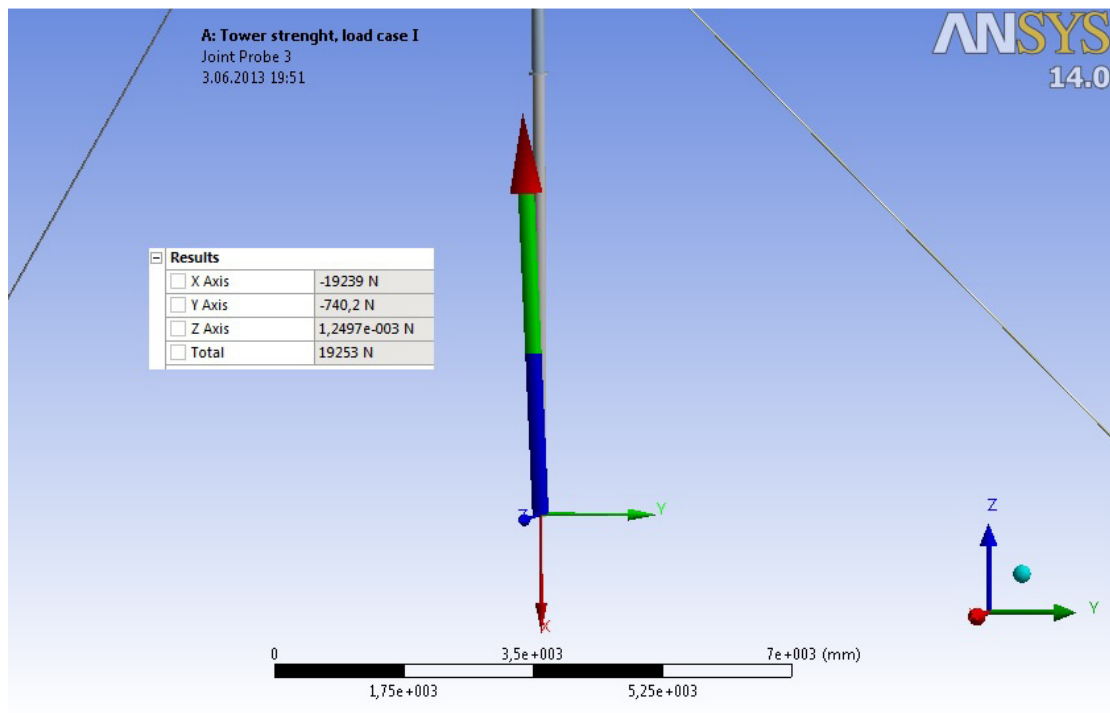
Die Mastsockel-Gruppe wird zur effizienten Nutzung von Rechenressourcen in einem gesonderten FEM Model betrachtet. Das Model setzt sich aus drei festen Körpern zusammen: Zwei Winkelstücke und einer Bodenplatte (siehe Zeichnung 7). Die Winkelstücke sind durch Schraubverbindungen in der Größe von Unterlegscheiben mit der Bodenplatte verbunden. Diese Verbindungsflächen werden zugrunde gelegt, um die Wirkkräfte auf alle Schraubverbindungen zwischen den Komponenten zu ermitteln. Übrige Kontaktflächen, die in keiner Weise fest verbunden sind, werden ohne Reibungskräfte betrachtet. Die Bodenplatte ist über vier feste Verbindungen in der Größe von Unterlegscheiben mit dem Boden verbunden. Diese Flächen werden herangezogen, um die Einwirkkräfte auf die im Fundamentblock eingebetteten Schrauben zu ermitteln.

Ein Hexaeder-Gittermodel mit einer überwiegenden Elementgröße von 5 mm wurde eingesetzt, was zu einer Gesamtgitterstruktur aus 106.490 Elementen mit 481.479 Knotenpunkten führt.



Zeichnung 7 – Grenzbedingungen

Die Gruppe wird unter einer für Lager typischen Grenzbedingung belastet. Stärke und Richtung der Kräfte sind aus dem Model für die Mastbelastbarkeit abgeleitet (siehe Zeichnung 8).



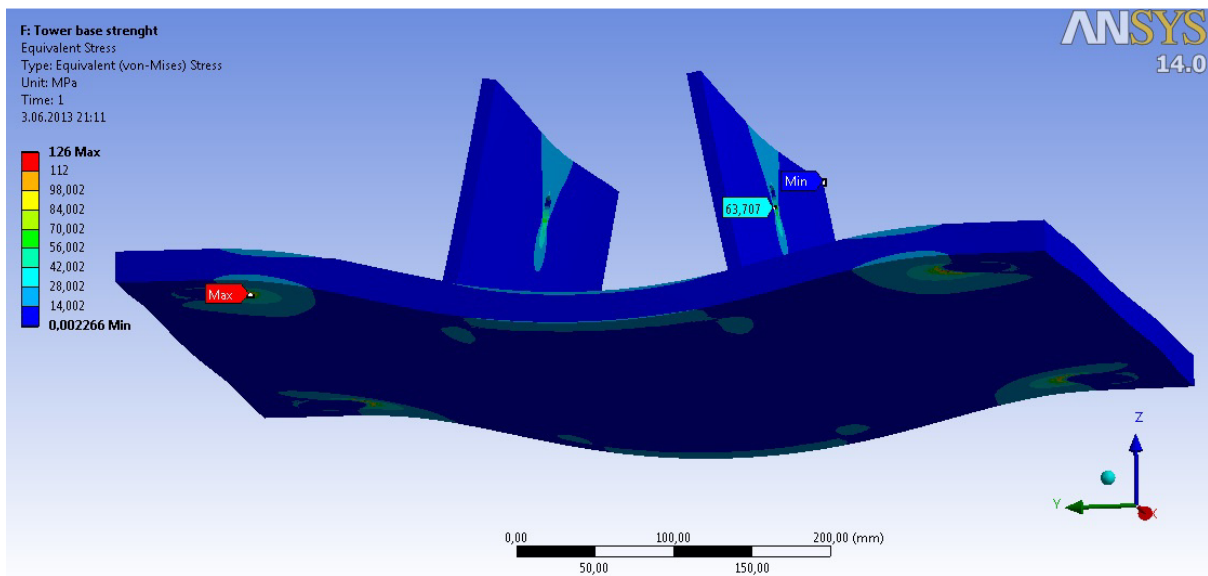
Zeichnung 8 – Einwirkkräfte auf Mastsockel

Maximale Belastungen treten an der Unterseite der Bodenplatte auf, wo diese mit den ins Fundament eingebetteten Schrauben ist (siehe Zeichnung 9); hier werden Werte von bis zu 126 MPa erreicht. Aus Gründen der Sicherheit wird die höchste auftretende Belastung zur Berechnung des Sicherheitsfaktors herangezogen und keine Kompensation bei Auftreten von Singularitätseffekten durchgeführt. An weiteren Komponenten sind die Belastungen niedriger.

Die zulässige Belastbarkeit gemäß Anlage 01 beträgt $\frac{355}{1,1 \cdot 1,35} = 239 \text{ MPa} > 126 \text{ MPa}$ (d.h. in Ordnung).

Siehe Anlage 01 – Teilsicherheitsbeiwert für Materialien 1,1; Teilsicherheitsbeiwert für Lasten 1,35.

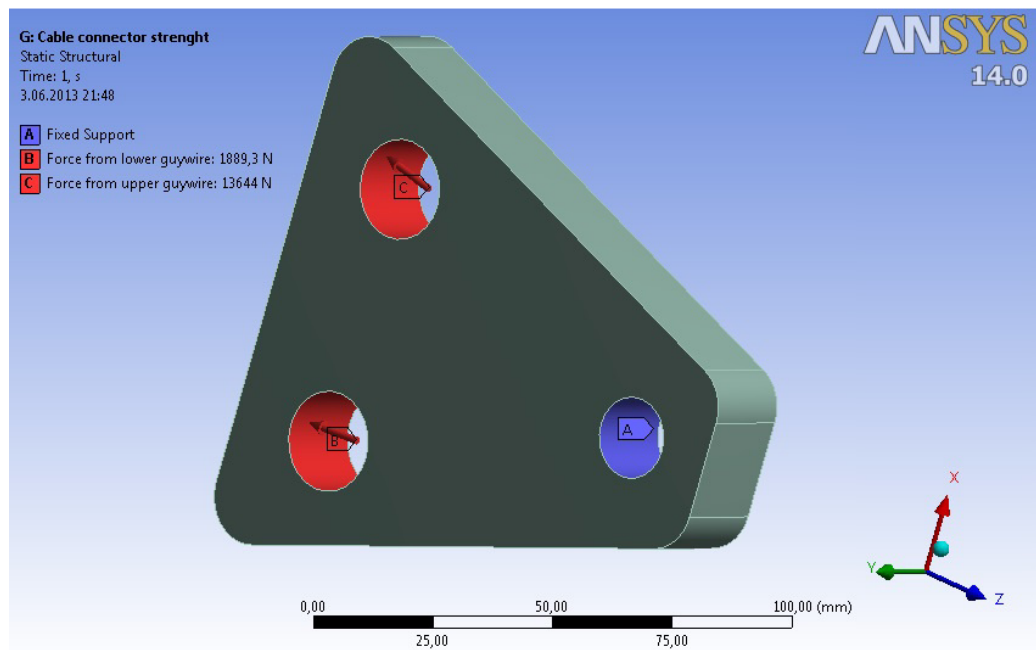
Demzufolge ist die Festigkeit des Mastsockels auch in Extremlastfällen gewährleistet.



Zeichnung 9 – Belastungen an der Bodenplatte

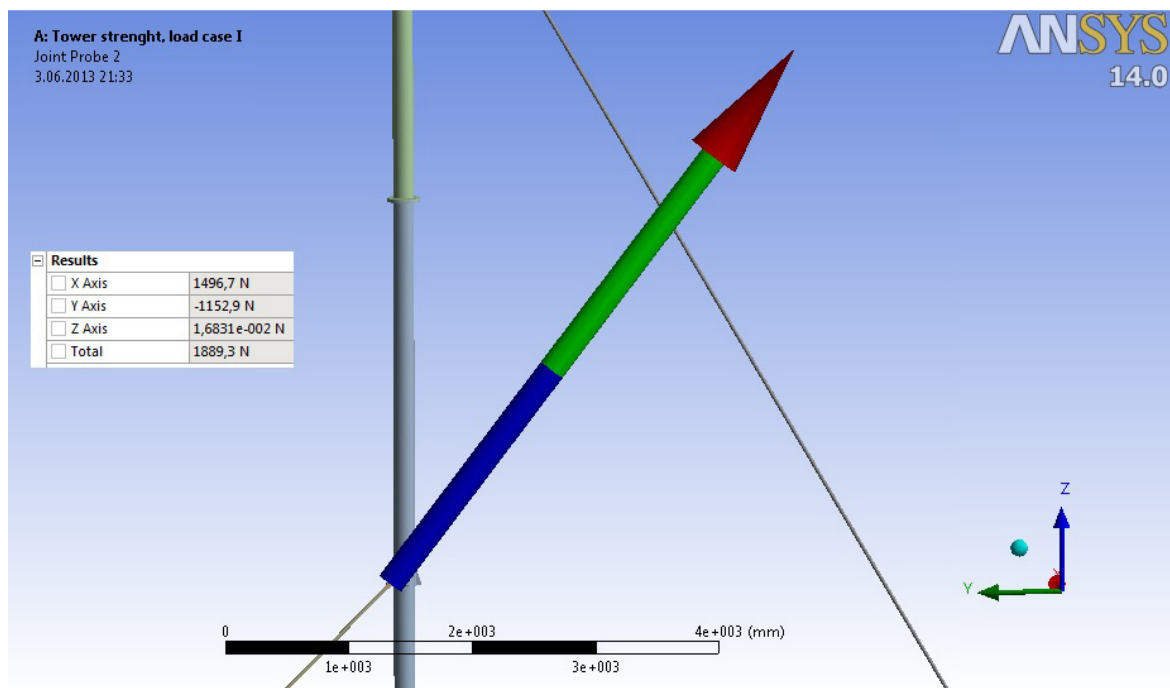
5.3 Festigkeit der Zwischenstücke (Halterungen für die Abspannseile)

Die Zwischenstücke für die Abspannseile werden zur effizienten Nutzung von Rechenressourcen in einem gesonderten FEM Model betrachtet. Das Model besteht aus einem einzigen festen Körper (siehe Zeichnung 10). Das Zwischenstück wird unter Grenzbedingungen belastet, die einer doppelten Lagerung entsprechen. Stärke und Richtung der Kräfte sind aus dem Model für die Mastbelastbarkeit abgeleitet (siehe Zeichnungen 11 und 12). Aus Gründen der Sicherheit wird angenommen, dass das Zwischenstück unter bestimmten Umständen den Maximalkräften beider Abspannseile zugleich ausgesetzt ist. Das Zwischenstück ist über eine feste Verbindung mit dem Boden verbunden; diese Bedingung wird verwendet, um die Einwirkkräfte auf die im Fundamentblock eingebetteten Schrauben zu ermitteln.

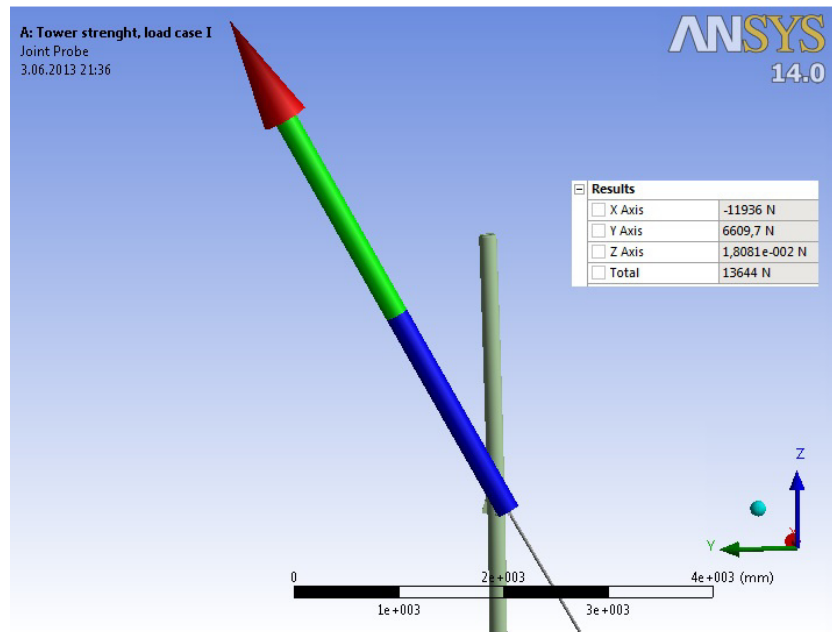


Zeichnung 10 – Grenzbedingungen

Ein Hexaeder-Gittermodell mit einer überwiegenden Elementgröße von 5 mm wurde eingesetzt, was zu einer Gesamtgitterstruktur aus 1.915 Elementen mit 8.550 Knotenpunkten führt.



Zeichnung 11 – Einwirkkraft auf unteres Abspannseil

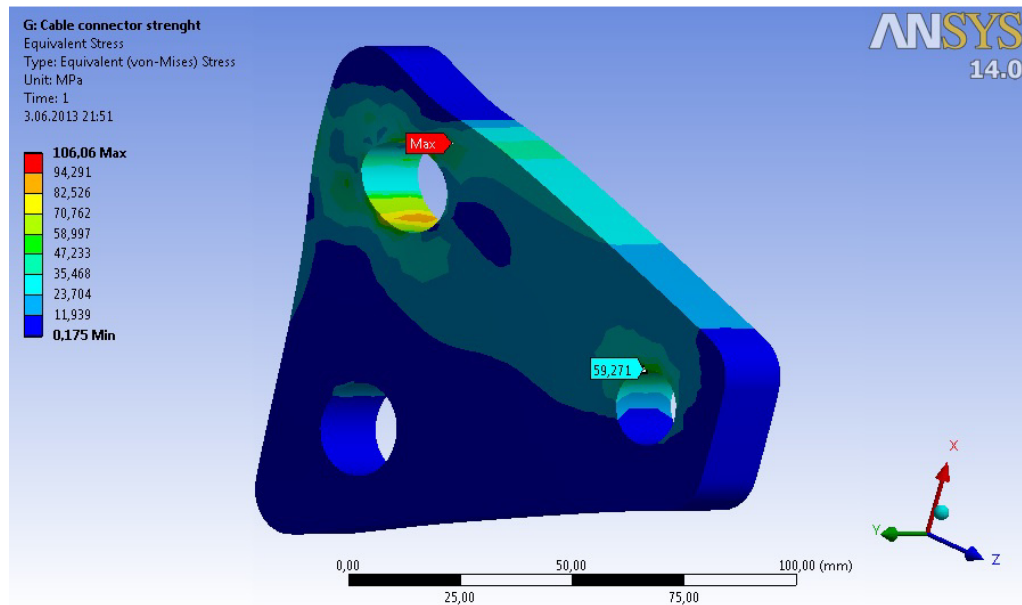


Zeichnung 12 – Einwirkkraft auf oberes Abspannseil

Die höchsten Belastungen treten an der Befestigungsöse des oberen Abspannseils auf (siehe Zeichnung 13); diese Werte erreichen bis zu 106 MPa. Aus Gründen der Sicherheit wird die höchste auftretende Belastung zur Berechnung des Sicherheitsfaktors herangezogen und keine Kompensation bei Auftreten von Singularitätseffekten durchgeführt.

Die zulässige Belastbarkeit gemäß Anlage 01 beträgt $\frac{355}{1,1 \cdot 1,35} = 239 \text{ MPa} > 106 \text{ MPa}$ (d.h. in Ordnung).
Siehe Anlage 01 – Teilsicherheitsbeiwert für Materialien 1,1; Teilsicherheitsbeiwert für Lasten 1,35.

Somit ist die Festigkeit der Zwischenstücke für die Abspannseile auch in Extremlastfällen gewährleistet.

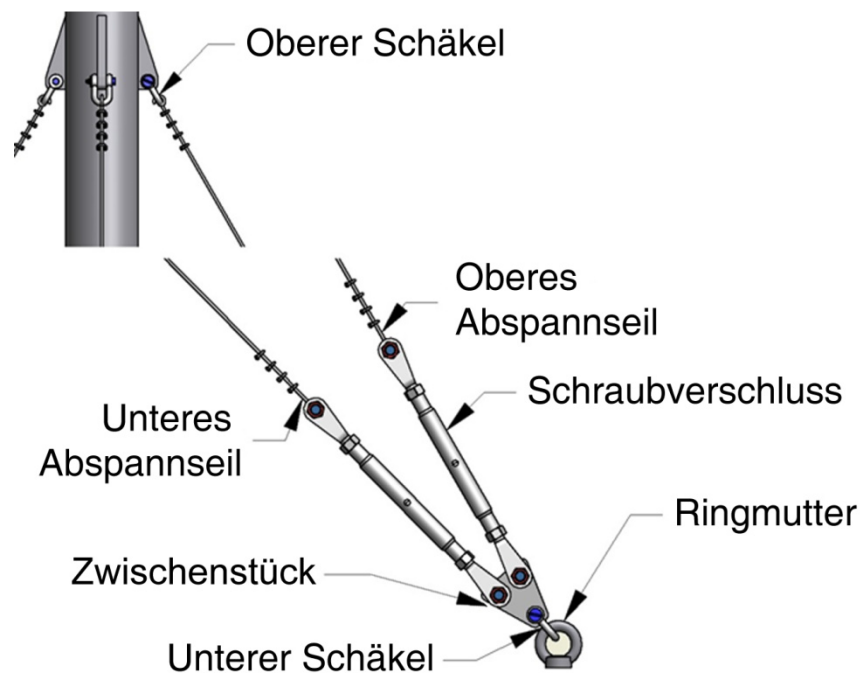


Zeichnung 13 – Belastungen an den Ösen für die Abspannkabel

5.4 Abspannseile und Zubehör

Die Berechnung der Abspannseile und deren Zubehörs erfolgt durch Anwendung analytischer Formeln der Hersteller. Da ausschließlich Standardkomponenten verwendet werden, haben die Ergebnisse auch Gültigkeit für Produkte aller anderen Hersteller, die nach den gleichen Standards produzieren. Für die Abspannausrüstung werden nur die Extrembelastungen betrachtet, und es wird davon ausgegangen, dass Abspannseile und ihre sämtlichen Zubehörteile diesen standhalten müssen. Da die oberen und unteren Abspannseile samt Zubehör identisch sind, werden nur die oberen Seile und ihr Zubehör betrachtet, da diese weitaus größeren Kräften ausgesetzt sind (siehe Zeichnungen 11 und 12).

Jedes Abspannseil ist befestigt über einen Schäkkel mit Schraubverschluss, ein Spannschloss, einen weiteren Schäkkel mit Schraubverschluss, ein Zwischenstück und eine Ringmutter (siehe Zeichnung 14). Das Zwischenstück verbindet die Enden beider Abspannseile mit der Ringmutter. Sicherheitshalber wird angenommen, dass alle Komponenten, an denen zwei Abspannseile zugleich angebracht sind, auch mit den summierten Maximalkräften beider Abspannseile belastet werden.



Zeichnung 14 – Abspannseile und Zubehör

Oberer Schäkel

Art: Schäkel mit Schraubbolzen, geschmiedet, M16

Standard: DIN 82016

Belastungsgrenze: 12 t; 117 720 N

Sicherheitsfaktor: 6

Maximale Zugkraft: 13 644 N

Bruchfestigkeit: $\frac{117\,720}{6} = 19\,620\text{ N} > 13\,644\text{ N (OK)}$

Abspannseil

Art: 6x19-FC Ordinary alt Seale, 8 mm

Standard: EN 12385-4

Belastungsgrenze: 37 400 N

Sicherheitsfaktor: 2

Maximale Zugkraft: 13 644 N

Bruchfestigkeit: $\frac{37\,400}{2} = 18\,700\text{ N} > 13\,644\text{ N (OK)}$

Schraubverschluss

Art: Gewinde/Gewinde, M22

Standard: DIN 1478

Belastungsgrenze: 11 t; 107 910 N

Sicherheitsfaktor: 5

Maximale Zugkraft: 13 644 N

Bruchfestigkeit: $\frac{107\,910}{5} = 21\,582\text{ N} > 13\,644\text{ N (OK)}$

Unterer Schäkel

Art: Schäkel mit Schraubbolzen, geschmiedet, M16

Standard: DIN 82016

Belastungsgrenze: 12 t; 117 720 N

Sicherheitsfaktor: 6

Maximale Zugkraft: 15 476 N (Vektorsumme)

Bruchfestigkeit: $\frac{117\,720}{6} = 19\,620\text{ N} > 15\,476\text{ N (OK)}$

Ringmutter

Art: Stahl SS 1370 oder äquivalent, M27

Standard: DIN 582

Belastungsgrenze: 7,2 t; 70 632 N (abgewinkelt belastet)

Sicherheitsfaktor: 4

Maximale Zugkraft: 15 476 N (Vektorsumme)

Bruchfestigkeit: $\frac{70\,632}{4} = 17\,658\text{ N} > 15\,476\text{ N (OK)}$

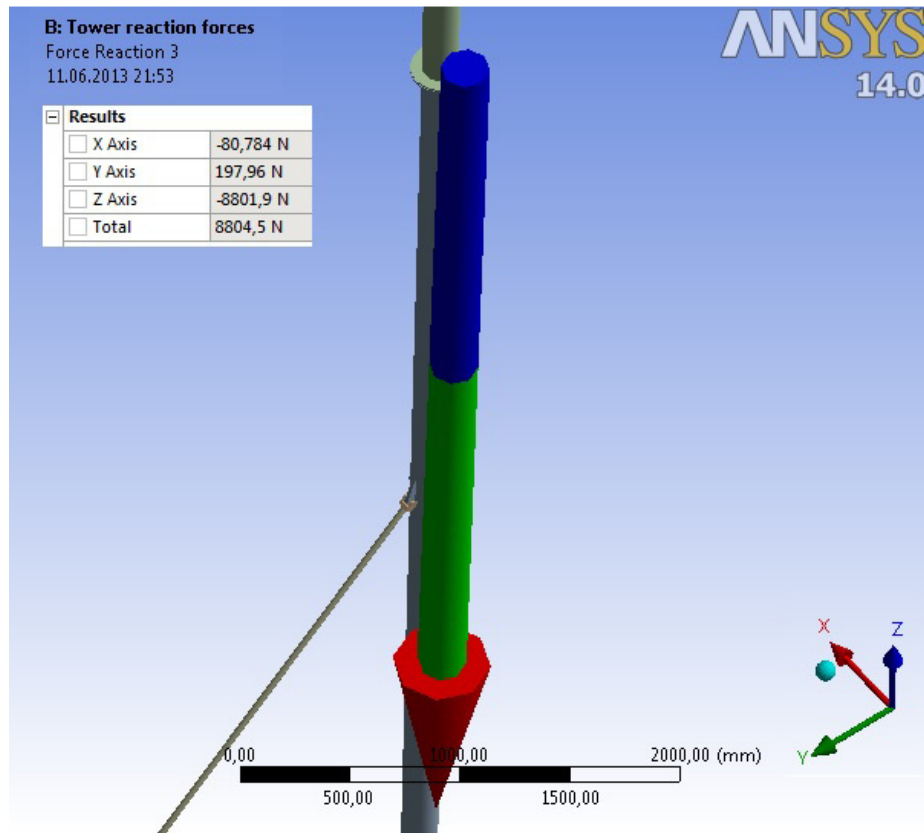
Somit ist die Festigkeit der Abspannseile und ihrer Verbindungsteile (Zubehör) auch in Extremlastfällen gewährleistet.

5.5 Schraubverbindungen

Schraubverbindungen wurden gemäß Anlage 05 berechnet. Die Einwirkkräfte auf Schrauben sind anhand des FEM Models ermittelt worden. Für jeden Verbindungsflansch wurden die jeweils höchsten auftretenden Kräfte für eine Schraube analysiert, da davon auszugehen ist, dass alle Schrauben des Flansches dieser Belastung standhalten müssen wegen der kreisförmigen Wirkrichtung eintreffender Windlasten.

Verbindung zwischen dem zweiten und dritten Mastsegment

Schraubengröße und Festigkeitsklasse:	M16x55 – 8.8
Montagedrehmoment:	222 Nm
Schrauben-Zugbelastungsflächen:	200 mm ² (brutto), 157 mm ² (netto)
Bemessungsschlupf vorgespannter Schrauben:	0,4
Scherfestigkeit bezogen auf Scherfläche:	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 200}{1,1 \cdot 1,35} = 64\ 646\ \text{N}$
Zugfestigkeit:	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 157}{1,1 \cdot 1,35} = 76\ 121\ \text{N}$
Vorspannung:	$F_{p,c} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87\ 920\ \text{N}$
Maximale Einwirkkräfte (siehe Zeichnung 15):	x: 81 N (Scherung) y: 198 N (Scherung) z: 8 802 N (Zug)
Scherfestigkeit:	213 N < 64 646 N (OK)
Zugfestigkeit:	8 802 N < 76 121 N (OK)
Kombinierte Scher- und Zugfestigkeit:	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{213}{64\ 646} + \frac{8\ 802}{1,4 \cdot 76\ 121} = 0,09 < 1\ \text{(OK)}$
Rutschfestigkeit:	$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,c} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0,4 (87\ 920 - 0,8 \cdot 8802)}{1,1 \cdot 1,35} = 43\ 570\ \text{N} > 213\ \text{N (OK)}$



Zeichnung 15 – Höchste Einwirkkräfte zwischen zweiten und dritten Mastsegment

Verbindung zwischen dem ersten und zweiten Mastsegment

Schraubengröße und Festigkeitsklasse: M16x55 – 8.8

Montagedrehmoment: 222 Nm

Schrauben-Zugbelastungsflächen: 200 mm² (brutto), 157 mm² (netto)

Bemessungsschlupf vorgespannter Schrauben: 0,4

Scherfestigkeit bezogen auf Scherfläche: $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 200}{1,1 \cdot 1,35} = 64\ 646\ \text{N}$

Zugfestigkeit: $F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 157}{1,1 \cdot 1,35} = 76\ 121\ \text{N}$

Vorspannung: $F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87\ 920\ \text{N}$

Maximale Einwirkkräfte (siehe Zeichnung 16): x: 0 N (Scherung)

y: 7 N (Scherung)

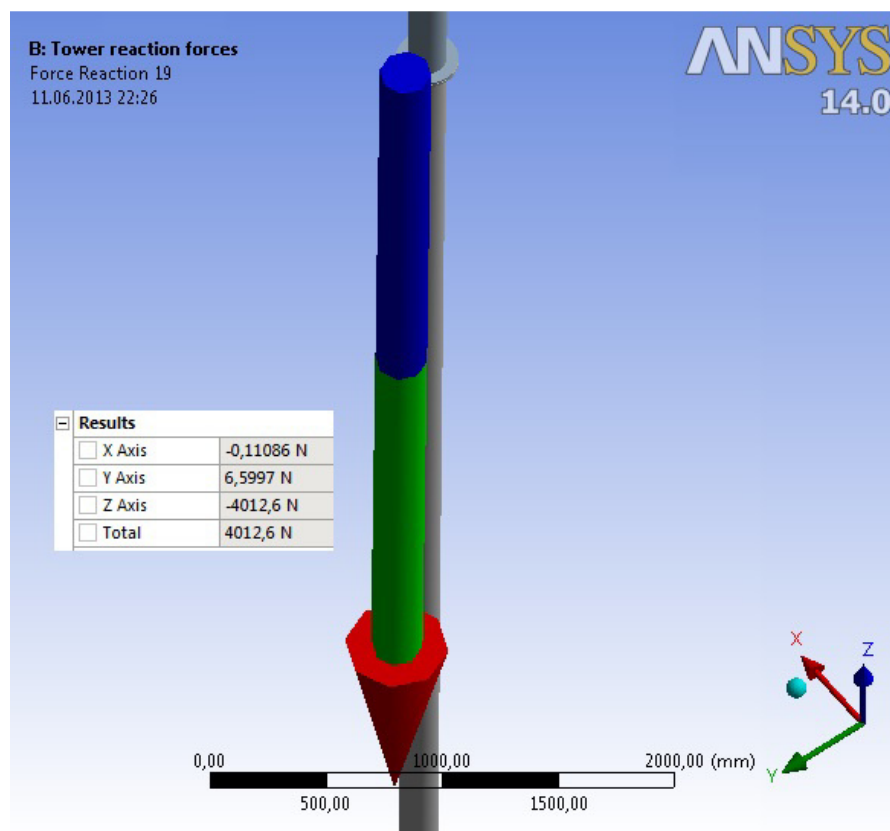
z: 4 013 N (Zug)

Scherfestigkeit: 7 N < 64 646 N (OK)

Zugfestigkeit: 4 013 N < 76 121 N (OK)

Kombinierte Scher- und Zugfestigkeit: $\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{7}{64\,646} + \frac{4\,013}{1,4 \cdot 76\,121} = 0,04 < 1$ (OK)

Rutschfestigkeit: $F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,c} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0,4 (87\,920 - 0,8 \cdot 4013)}{1,1 \cdot 1,35} = 45\,634 \text{ N} > 7 \text{ N}$ (OK)



Zeichnung 16 – Höchste Einwirkkräfte zwischen ersten und zweiten Mastsegment

Verbindung zwischen dem ersten Mastsegment und dem Winkelstück der Bodenplatte

Schraubengröße und Festigkeitsklasse: M20x240 – 8.8

Montagedrehmoment: 434 Nm

Schrauben-Zugbelastungsflächen: 314 mm² (brutto), 245 mm² (netto)

Bemessungsschlupf vorgespannter Schrauben: 0,4

Scherfestigkeit bezogen auf Scherfläche:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 314}{1,1 \cdot 1,35} = 101\,494 \text{ N}$$

Zugfestigkeit:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 245}{1,1 \cdot 1,35} = 118\,787 \text{ N}$$

Vorspannung:

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 245 = 137\,200 \text{ N}$$

Maximale Einwirkkräfte (siehe Zeichnung 17):

x: 19 239 N (Scherung)

y: 741 N (Scherung)

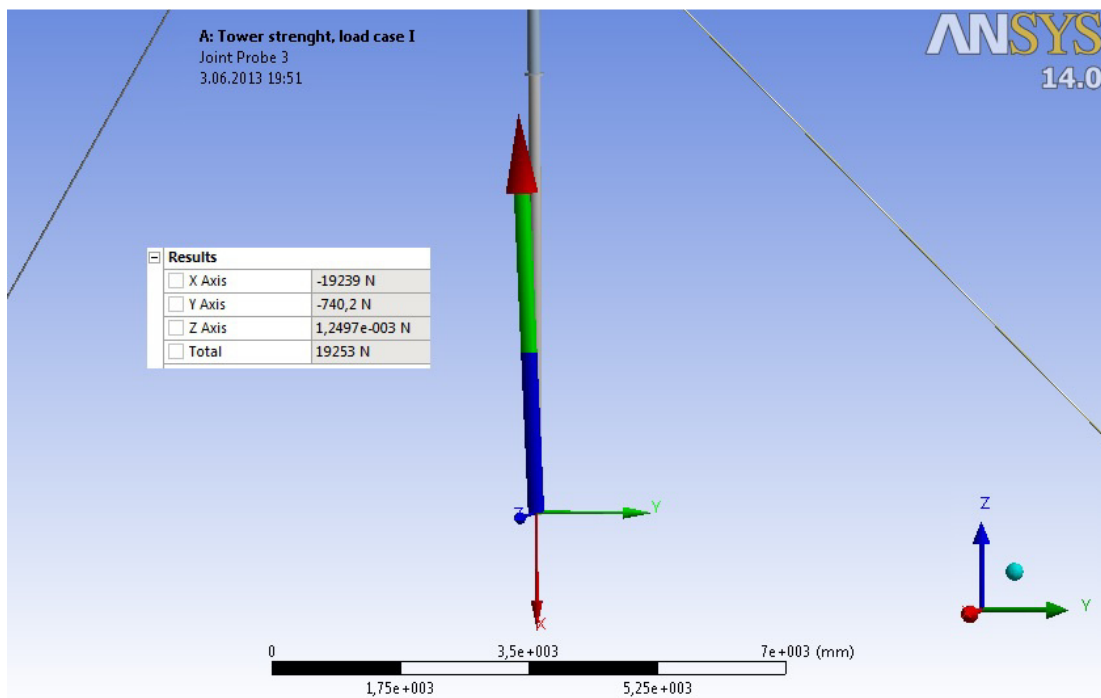
z: 0 (Zug)

Scherfestigkeit:

19 254 N < 101 494 N (OK)

Zugfestigkeit:

0 N < 118 787 N (OK)



Zeichnung 17 – Max. Einwirkkräfte zwischen ersten Mastsegment und der Winkelstück

Verbindung zwischen der Bodenplatte und dem Winkelstück

Schraubengröße und Festigkeitsklasse: M20x45 – 8.8

Montagedrehmoment: 434 Nm

Schrauben-Zugbelastungsflächen: 314 mm² (brutto), 245 mm² (netto)

Bemessungsschlupf vorgespannter Schrauben: 0,4

Scherfestigkeit bezogen auf Scherfläche: $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 314}{1,1 \cdot 1,35} = 101\,494\text{ N}$

Zugfestigkeit: $F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 245}{1,1 \cdot 1,35} = 118\,787\text{ N}$

Vorspannung: $F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 245 = 137\,200\text{ N}$

Maximale Einwirkkräfte (siehe Zeichnung 18): x: 4 014 N (Scherung)

y: 1 603 N (Scherung)

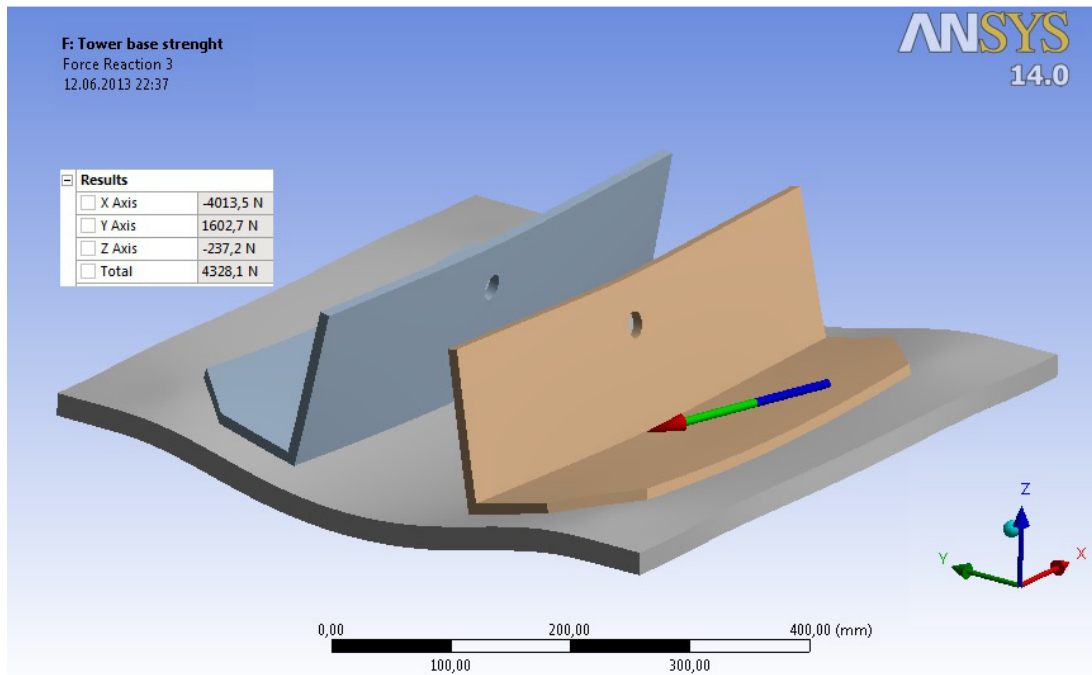
z: 238 N (Zug)

Scherfestigkeit: 4 322 N < 101 494 N (OK)

Zugfestigkeit: 238 N < 118 787 N (OK)

Kombinierte Scher- und Zugfestigkeit: $\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{4322}{101\,494} + \frac{238}{1,4 \cdot 118\,787} = 0,05 < 1\text{ (OK)}$

Rutschfestigkeit: $F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} = \frac{1,2 \cdot 0,4 (137\,200 - 0,8 \cdot 238)}{1,1 \cdot 1,35} = 73\,810\text{ N} > 4\,014\text{ N (OK)}$



Zeichnung 18 – Max. Einwirkkräfte auf Verbindung zwischen Bodenplatte und Winkelstück

Verbindung zwischen Bodenplatte und Fundament

Schraubengröße und Festigkeitsklasse: M27x550 – 8.8

Montagedrehmoment: 1080 Nm

Schrauben-Zugbelastungsflächen: 572 mm² (brutto), 459 mm² (netto)

Bemessungsschlupf vorgespannter Schrauben: 0,4

Scherfestigkeit bezogen auf Scherfläche: $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 572}{1,1 \cdot 1,35} = 184\ 888\ \text{N}$

Zugfestigkeit: $F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 459}{1,1 \cdot 1,35} = 222\ 545\ \text{N}$

Ausreißfestigkeit: $B_{p,Rd} = \frac{\alpha_v \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 3,14 \cdot 44,1 \cdot 10 \cdot 640}{1,1 \cdot 1,35} = 358\ 074\ \text{N}$

Vorspannung: $F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 459 = 257\ 040\ \text{N}$

Maximale Einwirkkräfte (siehe Zeichnung 19): x: 2 907 N (Scherung)

y: 4 370 N (Scherung)

z: 4 813 N (Zug)

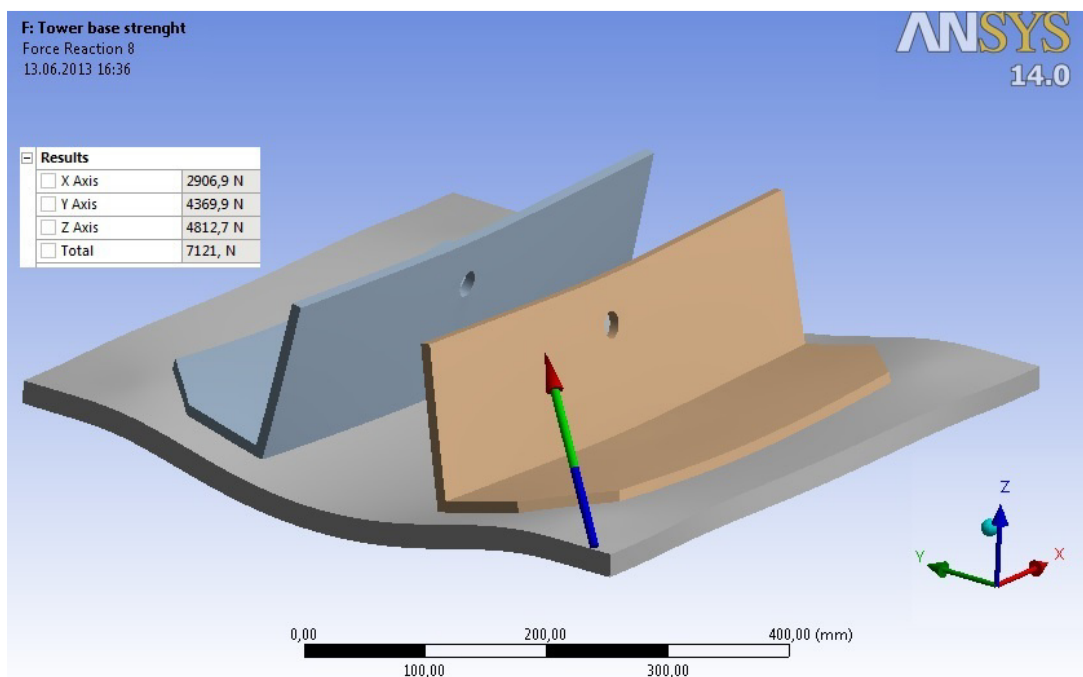
Scherfestigkeit: 5 249 N < 184 888 N (OK)

Zugfestigkeit: 4 813 N < 222 545 N (OK)

Ausreißfestigkeit: 4 813 N < 304 363 N (OK)

Kombinierte Scher- und Zugfestigkeit: $\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{5\,249}{184\,888} + \frac{4\,813}{1,4 \cdot 222\,545} = 0,04 < 1$ (OK)

Rutschfestigkeit: $F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,c} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0,4 (257\,040 - 0,8 \cdot 4\,813)}{1,1 \cdot 1,35} = 136\,399 \text{ N} > 5\,249 \text{ N}$ (OK)



Zeichnung 19 – Max. Einwirkkräfte auf Verbindung zwischen Bodenplatte und Fundament

Verbindung zwischen Fundament (d.h. Ringmutter) und Zwischenstück

Schraubengröße und Festigkeitsklasse: M27x550 – 8.8

Montagedrehmoment: 1080 Nm

Schrauben-Zugbelastungsflächen: 572 mm² (brutto), 459 mm² (netto)

Bemessungsschlupf vorgespannter Schrauben: 0,4

Scherfestigkeit bezogen auf Scherfläche: $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 572}{1,1 \cdot 1,35} = 184\,888 \text{ N}$

Zugfestigkeit:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 459}{1,1 \cdot 1,35} = 222\,545 \text{ N}$$

Ausreißfestigkeit:

$$B_{p,Rd} = \frac{\alpha_v \pi d_m t p f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 3,14 \cdot 44,1 \cdot 10 \cdot 640}{1,1 \cdot 1,35} = 358\,074 \text{ N}$$

Vorspannung:

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 459 = 257\,040 \text{ N}$$

Maximale Einwirkkräfte (siehe Zeichnung 20):

x: 12 840 N (Zug)

y: 0 N (Scherung)

z: 9 100 N (Scherung)

Scherfestigkeit:

9 100 N < 184 888 N (OK)

Zugfestigkeit:

12 840 N < 222 545 N (OK)

Ausreißfestigkeit:

12 840 N < 304 363 N (OK)

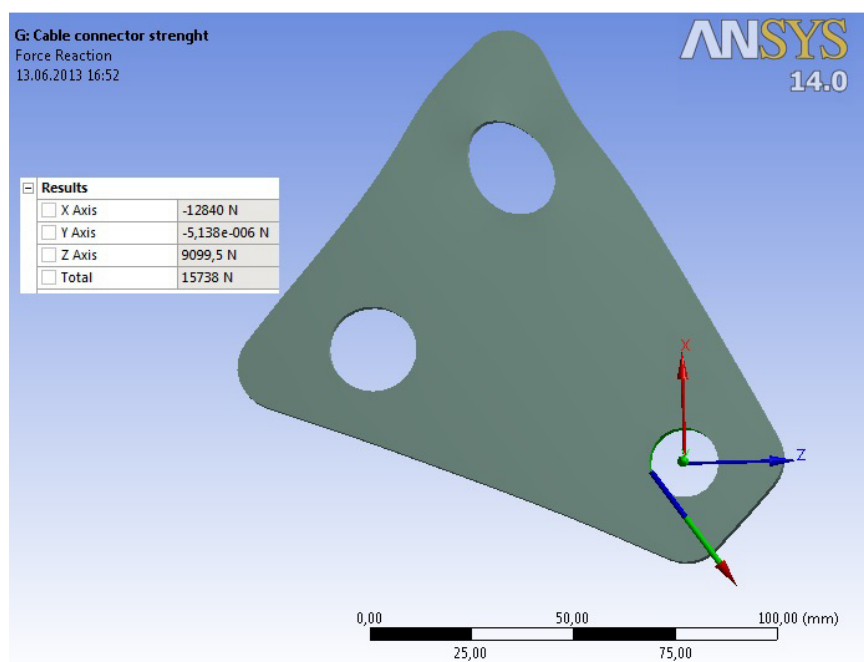
Kombinierte Scher- und Zugfestigkeit:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{9\,100}{184\,888} + \frac{12\,840}{1,4 \cdot 222\,545} = 0,09 < 1 \text{ (OK)}$$

Rutschfestigkeit:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 0,4 (257\,040 - 0,8 \cdot 12\,840)}{1,1 \cdot 1,35} = 132\,939 \text{ N} > 9\,100 \text{ N (OK)}$$

Somit ist die (Rutsch-)Festigkeit der Schraubverbindungen in Extremlastfällen gewährleistet.



Zeichnung 20 – Max. Einwirkkräfte zwischen Fundament und Zwischenstück

5.6 Fundament

Die Aufgabe der seitlichen Betonblöcke besteht ausschließlich darin, als Gegengewichte gegenüber Zugkräften zu dienen, die aufgrund von Windlasten in den Abspannseilen auftreten. Sie sind einander identisch, und jeder Block muss die maximal auftretenden Zugkräfte aus beiden Abspannseilen zugleich aufnehmen können. Die Fundamente sind so ausgelegt, dass alle unmittelbar wirkenden Kräfte von den eingegossenen Stahlarmierungen aufgenommen werden. Auf diesem Grund werden nur die Stabilitätsanforderungen des Fundaments gegenüber Ausreißen, Kippen und Wegziehen durch den Boden, jedoch keine Festigkeitswerte berücksichtigt. Die Wirklasten werden Tabelle 1 entnommen und hinsichtlich Eigenart und Richtung betrachtet.

Der zentrale Fundamentblock dient einerseits als Basis beim Aufstellen und nimmt andererseits Kompressionskräfte auf, die durch Windlasten verursacht werden. Der zentrale Fundamentblock ist so ausgelegt, dass alle unmittelbar wirkenden Kräfte von der eingegossenen Stahlarmierung aufgenommen werden. Auf diesem Grund werden nur die Stabilitätsanforderungen des Fundaments ohne Festigkeitswerte berücksichtigt. Die Wirklasten werden Tabelle 1 entnommen und hinsichtlich Eigenart und Richtung betrachtet.

Nur Lastfall I "Parkposition mit maximaler Windlast" wird in diesem Report betrachtet, da hieraus die höchsten Belastungen für die seitlichen Fundamentblöcke resultieren.

Als Grundlage wird von der schwierigsten Bodenart ausgegangen, da die Fundamente so auch in allen stärkeren Boden stabil sein werden.

Bodenmaterial: Ton, Tonsand, schluffiger Ton, lehmiger Schluff. Schluff und sandiger Schluff

Seitensteifigkeit (unter Bodenoberfläche): 15 710 Pa/m

Seitliche Rutschfestigkeit: 6 220 Pa

Max. Zugkraft oberes Abspannseil: 13 644 N

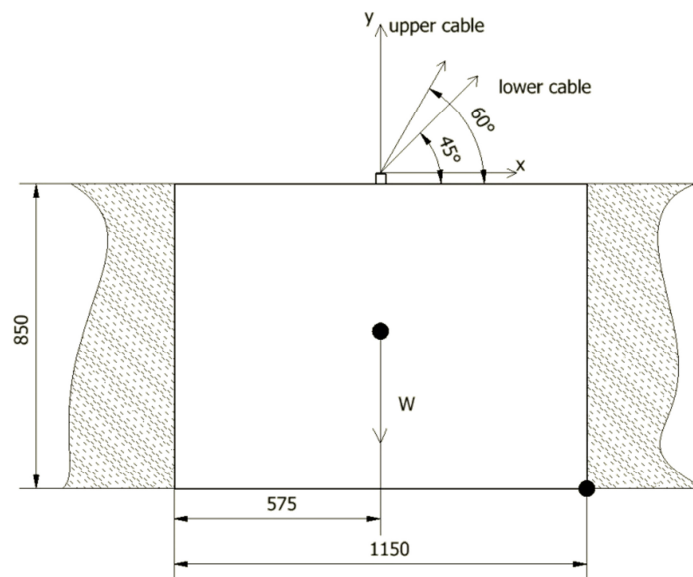
Max. Zugkraft unteres Abspannseil: 1890 N

Maximale Einwirkkräfte (siehe Zeichnung 21): x: 8159 N (horizontal)

y: 13152 N (vertikal)

Hubwiderstand: $\frac{W \cdot g}{\gamma_{M3}} = \frac{2365 \cdot 9,81}{1,1 \cdot 1,35} = 15\,623 > 13\,152$ (OK)

Rutschfestigkeit: $\frac{h/3 \cdot S_1 \cdot wh + \mu wl}{1,1 \cdot 1,35} = \frac{\frac{0,85}{3} \cdot 15\,710 \cdot 1,15 \cdot 0,85 + 6220 \cdot 1,15 \cdot 1,15}{1,1 \cdot 1,35} = 8468 \text{ N} > 8159 \text{ N}$ (OK)



Zeichnung 21 – Stabilitätsberechnung für seitlichen Fundamentblock

Bodenmaterial: Ton, Tonsand, schluffiger Ton, lehmiger Schluff. Schluff und sandiger Schluff

Zulässige Bodenpressung: 71 820 Pa

Maximale Einwirkkräfte (siehe Zeichnung 8): x: 19 239 N (vertikal)

y: 740,2 N (horizontal)

z: 0 N (horizontal)

Druckfestigkeit: $\frac{Plw}{\gamma_{M3}} = \frac{71\,820 \cdot 1,15 \cdot 1,15}{1,1 \cdot 1,35} = 64\,405 > 13\,152$ (OK)

Demzufolge ist die Stabilität der Fundamente auch in Extremlastfällen gewährleistet.

6. Schlussfolgerung

Gemäß der Windkraftanlagen-Spezifikation erfüllen die vorliegenden Berechnungen und Randbedingungen alle statischen Stabilitätsanforderungen aufgrund von Anlage 01.

Mindestsicherheitsfaktor für kombinierte Belastungen der Maststruktur: $\frac{355}{236} = 1,50$ (Lastfall „I: Parkposition mit maximaler Windlast“).

Mindestsicherheitsfaktor für Riss der Abspannseile: $\frac{37\,400}{13\,644} = 2,74$ (Lastfall „I: Parkposition mit maximaler Windlast“).

Mindestsicherheitsfaktor von Schraubverbindungen zwischen dem unteren Mastsegment und dem Winkelstück (Bodenplatte) für kombinierte Scherfestigkeit: $\frac{150\,719}{19\,254} = 7,8$ (Lastfall „I: Parkposition mit maximaler Windlast“).

Mindestsicherheitsfaktor für Rutschneigung des Fundaments: $\frac{12\,574}{8159} = 1,54$ (Lastfall „I: Parkposition mit maximaler Windlast“).