



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Raimund Wagner

**Auslegung und Konstruktion stapelbarer Seetransport-  
gestelle für Rotorblätter von Windenergieanlagen**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Raimund Wagner**  
**Auslegung und Konstruktion stapelbarer**  
**Seetransportgestelle für Rotorblätter von**  
**Windenergieanlagen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Entwicklung und Konstruktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

AREVA Blades GmbH  
Abteilung F&E  
Johann-Rathje-Köser-Straße 7  
21683 Stade

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Stefan Wiesemann  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Fred Koch (AREVA Blades GmbH)

Abgabedatum: 2014-08-05

## **Zusammenfassung**

**Raimund Wagner**

### **Thema der Bachelorarbeit**

Auslegung und Konstruktion stapelbarer Seetransportgestelle für Rotorblätter von Windenergieanlagen

### **Stichworte**

Windenergie, Windenergieanlage, Rotorblatt, Seetransport

### **Kurzzusammenfassung**

Eine Möglichkeit einer effizienten Logistik von Rotorblättern für Windenergieanlagen ist die Verwendung von stapelbaren Transportgestellen für den Seeweg. In dieser Arbeit werden die aus den Randbedingungen ableitbaren Lasten ermittelt und Gestelle mit diesen nachgewiesen. In einem Entwurf eines Handbuchs wird auf die Besonderheiten der Gestelle hingewiesen.

**Raimund Wagner**

### **Bachelor Thesis Title**

Dimensioning and construction of stackable transport frames for wind turbine rotor blades

### **Keywords**

Wind energy, wind turbine, rotor blade, sea transport

### **Abstract**

For seaborne transportation of rotor-blades for wind-turbines, stackable transport-frames are an efficient solution. This document compiles the boundary conditions for the frames and calculates the resulting loads. With these loads a frame is designed and verified. A draft of a handling document points at certain characteristics of the frames.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Aufbau einer Windenergieanlage . . . . .	1
1.2. Errichtung von Windenergieanlagen auf See . . . . .	3
1.3. Motivation . . . . .	6
1.4. Aufbau des Dokumentes . . . . .	7
<b>2. Anforderungsliste</b>	<b>9</b>
<b>3. Konstruktion</b>	<b>11</b>
3.1. Beschreibung des Wurzelgestells . . . . .	13
3.2. Beschreibung des Tipgestells . . . . .	16
<b>4. Lastannahmen</b>	<b>19</b>
4.1. Aufteilung der Rotorblattmasse . . . . .	20
4.2. Windlasten . . . . .	21
4.2.1. Windlasten auf den Seitenflächen des Rotorblattes . . . . .	21
4.2.2. Windlasten auf der Flanschfläche . . . . .	25
4.3. Massenkräfte Nearshore . . . . .	27
4.3.1. Lasten für Roll + Heave . . . . .	28
4.3.2. Lasten durch Trägheit des Gestellpaares 1.1 für Bewegungen um die X-Achse . . . . .	31
4.3.3. Lasten für Pitch + Heave . . . . .	32
4.3.4. Lasten durch Trägheit der Gestelle für Bewegungen um die Y- Achse . . . . .	34
4.4. Massenkräfte Offshore . . . . .	35
4.5. Massenkräfte beim Kranhub . . . . .	38
4.5.1. Massenkräfte beim Kranhub der Einzelgestelle . . . . .	38
4.5.2. Massenkräfte beim Kranhub des Gestellstapels . . . . .	40
4.6. Sicherung durch Abspannung . . . . .	41
4.7. Lastverteilung der Rotorblattauflagen . . . . .	42
<b>5. Nachweise</b>	<b>45</b>
5.1. Zulässige Spannungen . . . . .	46
5.2. Stabmodell . . . . .	47
5.2.1. Kranhübe . . . . .	47
5.2.2. Einzelgestell Offshore . . . . .	48
5.2.3. Lagerung gestapelt an Land . . . . .	49

5.2.4. Transport Nearshore als Stapel . . . . .	49
5.3. Detailrechnung des Tipgestells . . . . .	51
5.3.1. Rechnung als Biegelinie . . . . .	51
5.3.2. Nachweis der höchstbelasteten Schweißnaht . . . . .	53
5.3.3. FEM-Rechnung am Tipgestell . . . . .	54
5.4. Zusammenfassung der Nachweise . . . . .	56
<b>6. Bedienungshinweise</b>	<b>57</b>
6.1. Positionierung der Rotorblätter in den Gestellen . . . . .	57
6.2. Innerbetrieblicher Transport . . . . .	58
6.3. Kranhub . . . . .	58
6.4. Seetransport . . . . .	59
6.5. Seetransport Offshore . . . . .	59
6.6. Entnahme aus den Gestellen . . . . .	60
6.7. Lagerung Onshore . . . . .	60
6.8. Personensicherung . . . . .	60
<b>7. Ausblick</b>	<b>61</b>
<b>A. Tabellen</b>	<b>63</b>
<b>B. Gestellberichte</b>	<b>65</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Vestas V15, Gesamtansicht und Maschinenträger . . . . .	1
1.2. Querschnitt des Rotorblattes M5000- 116 . . . . .	2
1.3. Sternmontage mit einer Jackup . . . . .	3
1.4. Mögliche Ladeaufteilung der Innovation . . . . .	4
1.5. Einzelblattmontage mit speziellem Hebemittel . . . . .	5
1.6. Kranhub des M5000- 116 mit Nearshoregestellen . . . . .	6
1.7. Stapelbare Transportgestelle mit teilbarem Rahmen . . . . .	7
1.8. Stapelbare Transportgestelle für kleine Rotorblätter . . . . .	8
2.1. Schematische Darstellung des Nearshoregestells als Einleger in einem Offshoregestell . . . . .	10
3.1. Gestellstapel im Schnitt an der größten Blatttiefe . . . . .	11
3.2. Wurzelgestell mit Rotorblatt . . . . .	12
3.3. Beschreibung des Wurzelgestells . . . . .	13
3.4. Ansicht des Wurzelgestells bei einer Verladung in Stade . . . . .	14
3.5. Schematische Darstellung des Tipgestells . . . . .	16
3.6. Beschreibung des Tipgestells . . . . .	17
3.7. Kranhub der Rotorblätter in den Gestellen . . . . .	18
4.1. Darstellung der Pitchwinkel . . . . .	22
4.2. Positionen der Massen- und Strömungswiderstandsschwerpunkte am Rotorblatt . . . . .	26
4.3. Koordinaten und Abmessungen der Barge . . . . .	27
4.4. Bezeichnung und Postion der Gestellpaare . . . . .	28
4.5. Massenträgheit des Rotorblattes bezogen auf die Schiffsbewegungen	31
4.6. Schematische Darstellung der Jack-Up-Barge mit den geladenen Rotorblättern . . . . .	35
4.7. Kranhub eines Rotorblattes unter Verwendung eines Gestellteiles als Spreiztraverse für ein Vierlingsgehänge . . . . .	38
4.8. Schematische Darstellung der seitlichen Abspannung . . . . .	41
4.9. Blattlastverteilung am Tipgestell . . . . .	43
4.10. Blattlastverteilung am Wurzelgestell . . . . .	44
5.1. Vergleichsspannung für den Lastfall „Kranhub des Wurzelgestellstapel“	48
5.2. Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Lagerung an Land im Stapel mit Anströmung aus $-47^\circ Pitch$ “ . . . . .	50

5.3.	Details am Tipgestell für die analytische Nachrechnung . . . . .	51
5.4.	Biegelinie des Balkens . . . . .	52
5.5.	Ergebnisse der FEM-Analyse des Tipgestells . . . . .	54
5.6.	. . . . .	55
6.1.	Mögliche Variationen des Endkantenschutzes für das Tipgestell . . . .	58
B.1.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Einzelkranhub des Tipgestells“ .	65
B.2.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Einzelkranhub des Wurzelgestells“	66
B.3.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Kranhub des Tipgestellstapel“ .	66
B.4.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Lagerung an Land im Stapel mit Anströmung aus $-47^\circ Pitch$ “ . . . . .	67
B.5.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Lagerung an Land im Stapel mit Anströmung aus $133^\circ Pitch$ “ . . . . .	67
B.6.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Lagerung an Land im Stapel mit Anströmung aus $133^\circ Pitch$ “ . . . . .	68
B.7.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Anströmung aus $-47^\circ Pitch$ “ . . . . .	68
B.8.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Near- shore im Stapel mit Anströmung aus $-47^\circ Pitch$ “ . . . . .	69
B.9.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Anströmung aus $133^\circ Pitch$ “ . . . . .	69
B.10.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Near- shore im Stapel mit Anströmung aus $133^\circ Pitch$ “ . . . . .	70
B.11.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Nickbeschleunigung“ . . . . .	70
B.12.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Near- shore im Stapel mit Nickbeschleunigung“ . . . . .	71
B.13.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Offshore mit Anströmung aus $-47^\circ Pitch$ “ . . . . .	71
B.14.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Off- shore mit Anströmung aus $-47^\circ Pitch$ “ . . . . .	72
B.15.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Offshore mit Anströmung aus $133^\circ Pitch$ “ . . . . .	72
B.16.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Off- shore mit Anströmung aus $133^\circ Pitch$ “ . . . . .	73
B.17.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Offshore mit Nickbeschleunigung“ . . . . .	73
B.18.	Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Off- shore mit Nickbeschleunigung“ . . . . .	74

# Tabellenverzeichnis

4.1. Zusammenfassung der Windlasten . . . . .	23
5.1. Zusammenfassung der maximalen Spannungen . . . . .	56
A.1. Tabelle mit Einheitswerten für Lift und Drag in Abhängigkeit des Pitchwinkels . . . . .	63
A.2. Koordinaten der Rotorblattschwerpunkte für den Nearshoretransport .	63
A.3. Lasten der Gestelle für den Nearshoretransport durch Schiffsbewegungen . . . . .	64
A.4. Maximale Beschleunigungen der BHO1 . . . . .	64
A.5. Koordinaten der transportierten Einzelteile auf der BHO1 . . . . .	64



# 1. Einleitung

Im Folgenden wird eine kurze Einführung in den Aufbau von Windenergieanlagen<sup>1</sup> und deren Rotorblättern gegeben. Danach wird auf den Transport von Einzelkomponenten sowie die Errichtung von Windenergieanlagen auf See und abschließend auf das Thema und den Aufbau der Arbeit eingegangen.

## 1.1. Aufbau einer Windenergieanlage

Der Aufbau verschiedener Windenergieanlagen ist vom Grundsatz ähnlich. Auf einem Fundament steht ein Turm. Das kann, wie in Abbildung 1.1 dargestellt ein Gittermastturm sein oder ein Rohrturm. Offshore sind Rohrtürme zu finden. Die Gondel ist über das Azimutlager mit dem Turm verbunden. Mit dem Azimutantrieb kann die Gondel dem Wind nachgeführt werden. Der Generator ist in diesem Beispiel mit der Nabe über ein Getriebe verbunden. Eine Bremse auf der Rotorwelle ermöglicht die Blockierung der Anlage bei Störungen. An der Nabe sind die Rotorblätter montiert. In dieser Abbildung ist noch eine aerodynamische Bremse dargestellt. Diese Form einer Leistungsbegrenzung kann für Anlagen ohne Veränderungsmöglichkeit des Anstellungswinkels (Pitchwinkel) eingesetzt werden. Aktuelle Anlagen werden durch die Verstellung des Pitchwinkels geregelt. Die Steuerung der Verdrehung der Rotorblät-

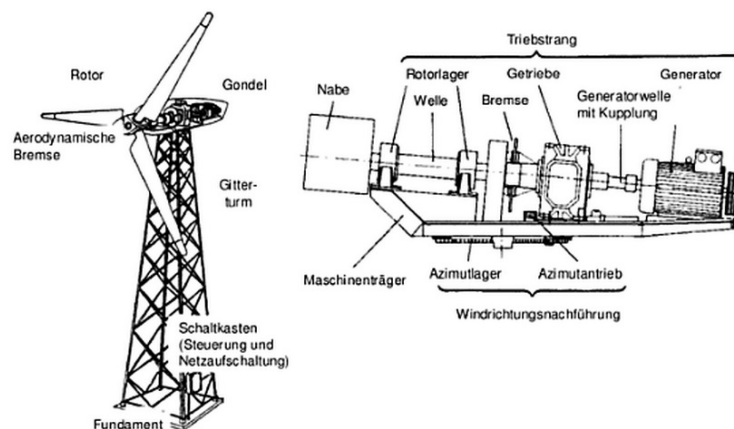


Abbildung 1.1.: Vestas V15, Gesamtansicht und Maschinenträger [8]

<sup>1</sup>Die Bauform von Windenergieanlagen (WEA) in diesem Dokument ist die Horizontalachsanlage. Diese zeichnen sich durch eine horizontale Drehachse des Rotors und meist drei Rotorblätter aus. Eine Windnachführung richtet die Gondel der Anlage zum Wind aus.

ter um deren Längsachse, das so genannte pitchen, befindet sich in der Nabe. Das Maß dieser Verdrehung ist der Pitchwinkel.

### Aufbau eines Rotorblattes

Der Aufbau von Rotorblättern für Windenergieanlagen wird anhand des Rotorblattes M5000- 116 erklärt. Abbildung 1.2 zeigt einen Querschnitt dieses Rotorblattes.

Der Teil eines Rotorblattes, der über das Rotorblattlager an der Nabe befestigt ist,

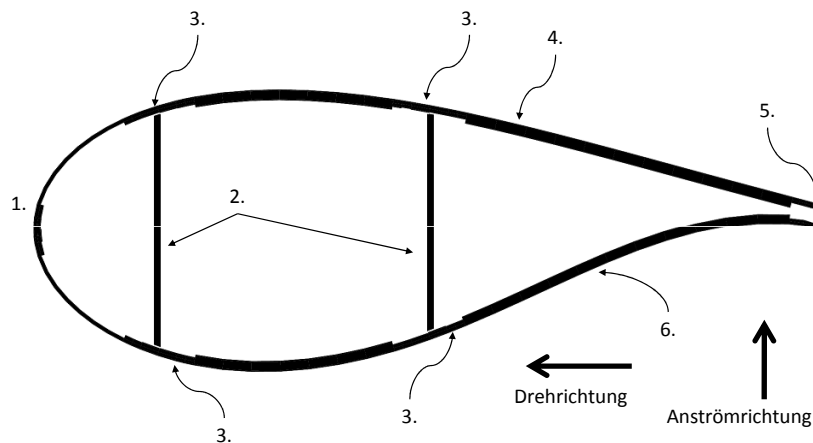


Abbildung 1.2.: Querschnitt des Rotorblattes M5000- 116

wird Wurzel genannt. Die Spitze des Rotorblattes wird als Tip bezeichnet. Die Abbildung zeigt einen Querschnitt mit Blick von der Wurzel in Richtung Tip.

Ein Rotorblatt kann man sich vereinfacht als ein sich verjüngender Kragbalken, der mit einer Linienlast (Windlast) beansprucht wird, vorstellen. Dieser Balken wird von einem Tragflächenprofil umhüllt, das ihm seine aerodynamischen Eigenschaften verleiht. Die das Profil umströmende Luft trifft auf die Nasenkante (Abb. 1.2: 1) und teilt sich in zwei Strömungen, die über die Saugseite (Abb. 1.2: 4) und die Druckseite (Abb. 1.2: 6) verlaufen. An der Endkante (Abb. 1.2: 5) treffen sich die Strömungen.

Die Zug- und Druckkräfte, die durch das Biegen des Rotorblattes entstehen, werden von den Gurten (Abb. 1.2: 3) bis zur Wurzel geführt. Dieses Rotorblatt weist vier Gurte auf. Die Anzahl ist je nach Auslegung des Rotorblatttyps verschieden. Die Gurte bestehen bei diesem Rotorblatt aus massivem unidirektionalem CFK<sup>2</sup>. Durch die Verwendung von CFK, ist dies ein sehr steifes Rotorblatt.

Die Scherkräfte werden von den zwei Stegen (Abb. 1.2: 2), die je zwei Gurte verbinden, aufgenommen. Dies sind, wie auch die Schalen (Abb. 1.2: 4, 6) Sandwichstrukturen aus GFK<sup>3</sup> und PVC-Schaum bzw. Balsaholz.

<sup>2</sup>Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff

<sup>3</sup>Glasfaserverstärkter Kunststoff

## 1.2. Errichtung von Windenergieanlagen auf See

Im Folgenden wird eine kurze Einführung in das Thema der Errichtung von Windenergieanlagen auf See gegeben.

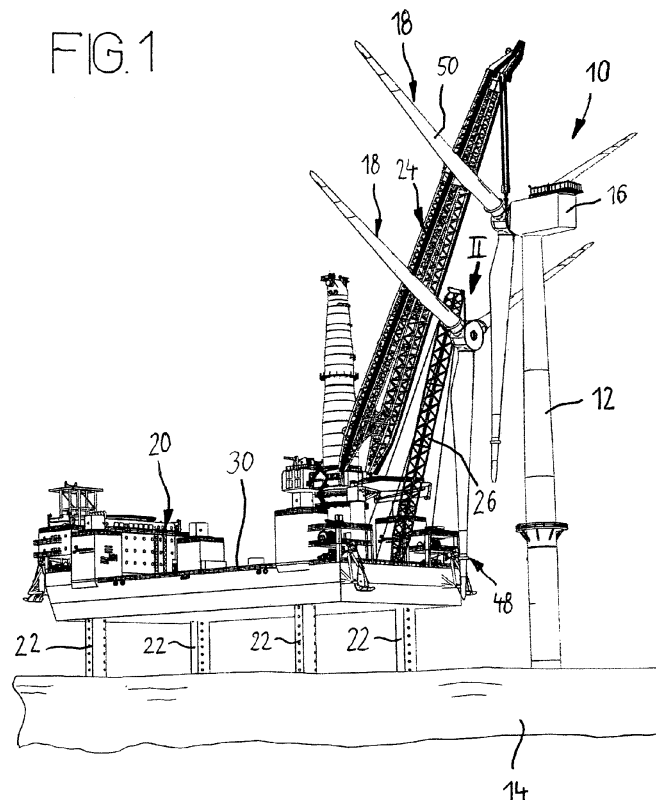


Abbildung 1.3.: Sternmontage mit einer Jack-Up Barge [4]

Windenergieanlagen können an Land und auf See errichtet werden. Die Windparks auf See bieten den großen Vorteil, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten höher sind als an Land. Auch ist die Anströmung aufgrund der geringeren Bodenrauigkeit gleichmäßiger<sup>4</sup>. Nachteilig sind der höhere Aufwand bei der Errichtung der Anlagen und bei der Netzanbindung gegenüber den an Land aufgestellten. Auch ist die Wartung der Offshoreanlagen sehr aufwändig.

Windenergieanlagen werden offshore von Errichterschiffen, so genannten Jack-Up Barges, aufgestellt. Dies ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Eine Jack-Up Barge transportiert die Einzelteile für eine oder mehrere Windenergieanlagen, hat einen Kran (Abb. 1.3, 24) und kann sich auf dem Meeresgrund aufstützen um von den Wellen weniger beeinflusst zu werden (Abb. 1.3, 22).

Die Beladung der Errichterschiffe für die Aufstellung auf See, erfolgt in einem Basis-

<sup>4</sup>Die Aufstellung der Windenergieanlagen zu großen Parks, hat zur Folge, dass die Anströmung der dritten oder vierten Reihe zunehmend turbulent wird.

## 1. EINLEITUNG 1.2. ERRICHTUNG VON WINDENERGIEANLAGEN AUF SEE

hafen zu dem die Einzelkomponenten geliefert werden. Rotorblätter sind die größten dieser Einzelkomponenten einer Windenergieanlage, jedoch mit einem vergleichsweise geringen Gewicht. Der Transport der Rotorblätter mit einem LKW ist durch die benötigten Sondergenehmigungen teuer und aufwändig. Eine effiziente Möglichkeit die Rotorblätter von der Fertigung zum Basishafen zu transportieren, ist der küstennahe Transport mit Frachtern. Auf den Frachtern können die Rotorblätter in Stapeln, ähnlich Containern, geladen werden. Das Stapeln ist durch das geringe Gewicht der Rotorblätter und die hohe Traglast von Transportschiffen möglich.

Je nach Errichtungsstrategie werden die Rotorblätter verschieden auf dem Errichterschiff transportiert. Die Errichtungsarten unterscheiden sich in der Reihenfolge und Art in der die Einzelkomponenten zur fertigen Anlage zusammengefügt werden.

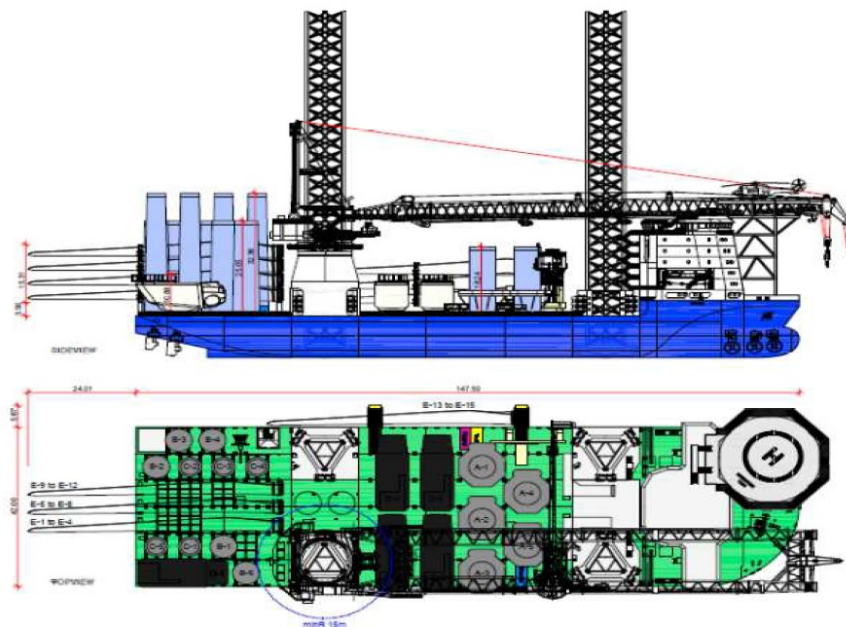


Abbildung 1.4.: Mögliche Ladeaufteilung der Jack-Up Barge „Innovation“ für den Windpark „Globaltech 1“ [11]

Abbildung 1.4 zeigt die geplante Beladung der Barge Innovation für den Windpark Globaltech 1. Durch die Verschachtelung der Einzelkomponenten lassen sich die Einzelteile mehrerer Anlagen transportieren und die Last gleichmäßiger auf der Barge verteilen. Es sind Komponenten für fünf Anlagen zu sehen. 12 Rotorblätter sind gestapelt im Heck, mit den Turmsegmenten auf beiden Seiten. Weitere drei Rotorblätter sind backbord, außenbords platziert. Mittschiffs stehen vier Gondeln; die fünfte ist steuerbordseitig am Heck.

Als erstes Teil einer Windenergieanlage wird der Fuß der Anlage auf ein Fundament gestellt. Als nächster Schritt folgt die Installation der Turmsegmente. Die Montage der Gondel ist abhängig von der Errichtungsart.



Abbildung 1.5.: Erprobung der Einzelblattmontage mit einem speziellem Hebemittel an einem Prototypen der M5000 in Bremerhaven [2]

### **Errichtungsarten**

Für die Einzelblattmontage (dargestellt in Abbildung 1.5) wird zunächst die Gondel mit der Nabe auf dem Turm platziert. Die Rotorblätter werden einzeln an die Nabe gesteckt und montiert. Diese Montageform benötigt aufwändige Hebemittel zur Montage der Rotorblätter. Der hohe Nutzungsgrad der Ladefläche eines Errichterschiffes und die Möglichkeit auch bei höheren Windgeschwindigkeiten montieren zu können, sind Argumente für dieses Konzept.

Oft werden Komponenten an Land vormontiert, um auf See Zeit und Montageschritte zu sparen. Es ist auch möglich, dass die komplette Anlage an Land vormontiert wird und an einem Kran hängend zum Bestimmungsort gefahren wird. Üblicher ist die Zusammenfassung von der Gondel mit der Nabe oder das Zusammenfassen von den Rotorblättern mit der Nabe zu einem Stern. Diese Montageform hat den Nachteil, dass sie nur bei geringeren Windgeschwindigkeiten durchführbar ist. Auch ist der enorme Platzbedarf am Basishafen und auf der Barge ungünstig. Reduktion der Kranhübe beim Errichten der Windenergieanlage kann die Nachteile rechtfertigen.

### 1.3. Motivation

Die Windenergieanlage Areva Multibrid M5000 ist eine Anlage, die für den Offshorebetrieb konzipiert ist und eine Nennleistung von  $5\text{MW}$  hat. Der Rotordurchmesser beträgt  $116\text{m}$ . Derzeit sind drei offshore Windparks mit diesen Turbinen bestückt<sup>5</sup>. Die Rotorblätter dieser Anlage sind die M5000-116 der Firma AREVA Blades. Es ist ein Rotorblatt mit einer Länge von  $56,5\text{m}$ .

Für das Rotorblatt M5000-116 gab es bisher nur Gestelle für den Transport per LKW, nicht stapelbare Gestelle für den küstennahen Transport sowie einfache (ebenfalls nicht stapelbare) Gestelle für die Lagerung auf dem Firmengelände. Die Gestelle für die erste Auslieferung per Schiff sind in Abbildung 1.6 zu sehen. Für den Offshoretransport auf der Barge gab es bereits einen Gestellentwurf. Diese Offshoregestelle sind bis zu einer Höhe von 4 stapelbar. Aufgrund der möglichen starken Schiffsbewegungen und hohen Windlasten im Offshorebetrieb fielen die Gestelle sehr aufwändig und kostenintensiv aus. Für den küstennahen Transport und die Zwischenlagerung an Land sind diese Gestelle deutlich überdimensioniert.



Abbildung 1.6.: Kranhub eines M5000-116 mit Nearshoregestellen bei der ersten Auslieferung auf dem Seeweg [14]

Für den effizienten küstennahen Transport eignen sich stapelbare Gestelle. Abbildung 1.7 zeigt eine mögliche Gestaltung. Bei diesem Gestell wurde das Rotorblatt geneigt und im Tipgestell geklammert, die Wurzel liegt in einer Schale. Abbildung 1.8 zeigt eine andere Bauweise, bei der das Rotorblatt tipseitig in einer Schale liegt und an der Wurzel mit dem Gestell an den Blattbolzen verschraubt wurde.

Die Rotorblätter verschiedener Hersteller unterscheiden sich deutlich in Geometrie und Gewicht, so dass es keine Standardtransportlösungen gibt. Die Gestelle sind meist auf einen Blatttyp ausgelegt.

<sup>5</sup>bzw. befinden sich zur Zeit noch im Bau



Abbildung 1.7.: Stapelbare Transportgestelle mit teilbarem Rahmen [12]

Wird eine Einzelblattmontage durchgeführt müssen die Rotorblätter von den Gestellen für den küstennahen Transport in die Gestelle für die Barge umgeladen werden. Um das Umladen der Rotorblätter von den Nearshoregestellen in die Offshoregestelle und die Konstruktion möglicher Offshoregestelle zu vereinfachen, könnten Nearshoregestelle als Einsatz für Offshoregestelle genutzt werden. Die Nearshoregestelle müssten so nur die Lasten eines Rotorblattes tragen; die Lasten des Gestellstapels würde ein größeres Gestell außen herum tragen.

Zur Kosteneinsparung wurden einfache und kompakte Gestelle angefragt, die für den küstennahen Transport und als Einsatz in Offshoregestelle des Rotorblattes M5000-116 nutzbar sind.

Die Auslegung und Konstruktion der kompakten Gestelle ist Inhalt dieser Arbeit.

## 1.4. Aufbau des Dokumentes

Aufgeteilt ist die Arbeit in die aufeinander folgenden Schritte der Konstruktion. Sie beginnt mit dem Zusammentragen der Randbedingungen in Abschnitt 2, die die zu beachtenden Lastfälle und besonderen Anforderungen beinhalten.

Auf Basis dieser Randbedingungen wird in Abschnitt 3 ein Gestell entworfen und auf die Besonderheiten hingewiesen.

Für diesen Gestellentwurf werden die für die rechnerischen Nachweise benötigten Lasten durch Windeinflüsse, Schiffsbewegungen oder andere Einwirkungen von Außen in Abschnitt 4 berechnet.

Die Nachweise beginnen in Kapitel 5.1 mit der Ermittlung der zulässigen Spannungen für das gewählte Gestellmaterial. Diese Spannungen sind mit den in den Nachweisen der folgenden Kapitel ermittelten Spannungen zu vergleichen.



Abbildung 1.8.: Stapelbare Transportgestelle für kleine Rotorblätter [13]

Der einfache Aufbau der Konstruktion ermöglicht die Verwendung eines Stabwerkmodells. Dies vereinfacht die Auslegung erheblich. Die Nachweise des Stabwerkmodells sind in Kapitel 5.2 zusammengetragen.

Abschnitt 5.3 beschäftigt sich mit der Nachrechnung eines Details des Tipgestells, das in der Stabwerkrechnung hoch belastet war. Dieser Träger wird zunächst in Kapitel 5.3.1 als Biegeträger analytisch betrachtet.

Die Schweißnaht in diesem nachgerechneten Detail ist die höchstbelastete der Konstruktion. Sie wird in Kapitel 5.3.2 analytisch nachgewiesen.

Eine Parallelrechnung mit Hilfe eines numerischen Modells in Kapitel 5.3.3 verifiziert das Ergebnis.

Um eine Abschätzung der Sicherheiten der Konstruktion zu ermöglichen, werden in Kapitel 5.4 die maximalen Spannungen der einzelnen Spannungsarten mit den jeweils zulässigen verglichen.

In Abschnitt 6 wird auf Besonderheiten der Gestelle hingewiesen, die für die Erstellung einer Bedienungsanweisung wichtig sind.



## 2. Anforderungsliste

Die Gestelle sind für verschiedene Einsatzbedingungen zu gestalten:

- Lagerung an Land als Block von  $3 \times 3$  Rotorblättern
- Lagerung an Land einzeln stehend auf weichem Untergrund
- Transport an Bord eines Schiffes im Block von  $3 \times 3$  Rotorblättern unter Near-shorebedingungen
- Einzeltransport an Bord eines Schiffes unter Offshorebedingungen
- Rücktransport der leeren Gestelle mit LKW

Das Rotorblatt M5000-116 ist  $L_{Rotorblatt} = 56,5m$  lang und wiegt  $m_{Rotorblatt} = 16,5t$ . Der Schwerpunkt liegt bei  $L_{Schwerpunkt} = 16,5m$  Blattlänge. Als Gestellgewicht für die Vorauslegung wird  $m_{Gestell} = 1t$  je Gestell angenommen.

Um mögliche Abweichungen zu berücksichtigen werden die folgenden Faktoren eingeführt, die üblicherweise Verwendung finden.

Ungenauigkeit Masse	$u_m =$	1,1
Ungenauigkeit der Schwerpunktlage in Z-Richtung	$u_z =$	1,05
Ungenauigkeit der Masseverteilung um Y-Achse	$u_y =$	1,3
Ungenauigkeit der Masseverteilung um X-Achse	$u_x =$	1,3

Für den küstennahen Transport werden die folgenden Schiffsbewegungen (nach [10] Tabelle 7-1: Lastfall 7) angenommen:

- Windgeschwindigkeit küstennah:  $10,7m/s$
- Bewegungsperiode:  $T = 10s$
- Rollwinkel:  $\varphi_{Roll} = 10^\circ$
- Nickwinkel:  $\varphi_{Pitch} = 5^\circ$
- Hubbeschleunigung:  $a_{heave} = 0,1 \cdot g$

Um Gestelle für den Offshoreeinsatz zu vereinfachen müssen die in diesem Dokument ausgelegten Gestelle auch als Einleger für die Offshoregestelle nutzbar sein. Abbildung 2.1 zeigt dies schematisch am Tipgestell. Das Rotorblatt (Abb.2.1; 1) liegt

## 2. ANFORDERUNGSLISTE

---

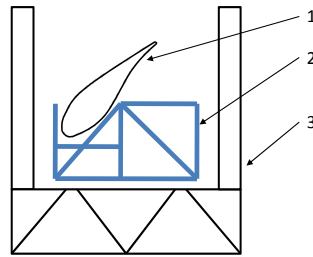


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung des Nearshoregestells als Einleger in einem Offshoregestell

in dem Nearshoregestell (Abb.2.1; 2), das wiederum im Offshoregestell (Abb.2.1; 3) befestigt ist.

Als Lasten werden hierfür die Daten der Messpunkte  $P_6$  und  $P_7$  aus Tabelle A.4 angesetzt. Die zu den Messpunkten gehörenden Koordinaten sind in Tabelle A.5 zu finden.

Die Lasten für den Kranhub sind nach GL 2007, Chapter IV-6-4, Section 10, Kapitel 2 [9] auszulegen. Gehoben werden soll ein Stapel von drei Gestellen.

Die Gestelle müssen stapelbar sein. Dabei ist die maximale Stapelhöhe auf See und an Land drei Gestelle. Der Gestellstapel muss dabei mindestens so breit wie hoch sein.

Die Windgeschwindigkeiten sind je nach Nutzung der Gestelle unterschiedlich. An Land wird eine Windgeschwindigkeit von  $30 \frac{m}{s}$  angenommen; Offshore von  $25 \frac{m}{s}$ . Die Windlastaufteilung erfolgt für alle Lastfälle nach DIN 1055 4:2005 [7].

Um ein Einsinken der Gestelle auf unbefestigtem Untergrund zu verhindern ist auf eine Flächenlast von maximal  $p_{Wiese} = 5 \frac{t}{m^2}$  zu achten. Für diesen Fall müssen die Gestelle nicht stapelbar ausgeführt werden.

Für die Dimensionierung der Auflagen des Rotorblattes sind maximale Flächenlasten nicht zu überschreiten. Im Bereich der Gurte liegen diese bei  $p_{Gurte} = 25 \frac{N}{mm^2}$  und im Bereich des Kernmaterials bei  $p_{PVC} = 0,5 \frac{N}{mm^2}$ .

Der Wurzelbereich kann mit den gleichen Flächenlasten, wie die Gurte belastet werden. Ein Nachweis der Linienlast ist hier nicht erforderlich.

Die Rotorblätter müssen mit dem Hebewerkzeug aus Abbildung 1.5 aus den Gestellen gehoben werden können. Dafür muss dies um mindestens  $60^\circ$  aus der Formlage, um die Pitchachse gedreht, in den Gestellen liegen.

Die Position des Tipgestells ist an der ersten Transportverstärkung des Rotorblattes, um eine ähnliche Gewichtsverteilung zwischen Tip- und Wurzelgestell zu gewährleisten. Die Lage des Wurzelgestells ist zwischen  $0m$  und  $5m$  Blattlänge frei wählbar.

Die Gestelle und Gestellteile müssen mit Flurförderfahrzeugen transportierbar sein.

### 3. Konstruktion

Unter der Beachtung der gegebenen Randbedingungen wurde ein Gestellpaar konstruiert. Jedes Gestellpaar besteht aus einem Tipgestell sowie einem Wurzelgestell und umschließt je ein Rotorblatt. Der erstellte Entwurf wird im Folgenden vorgestellt.

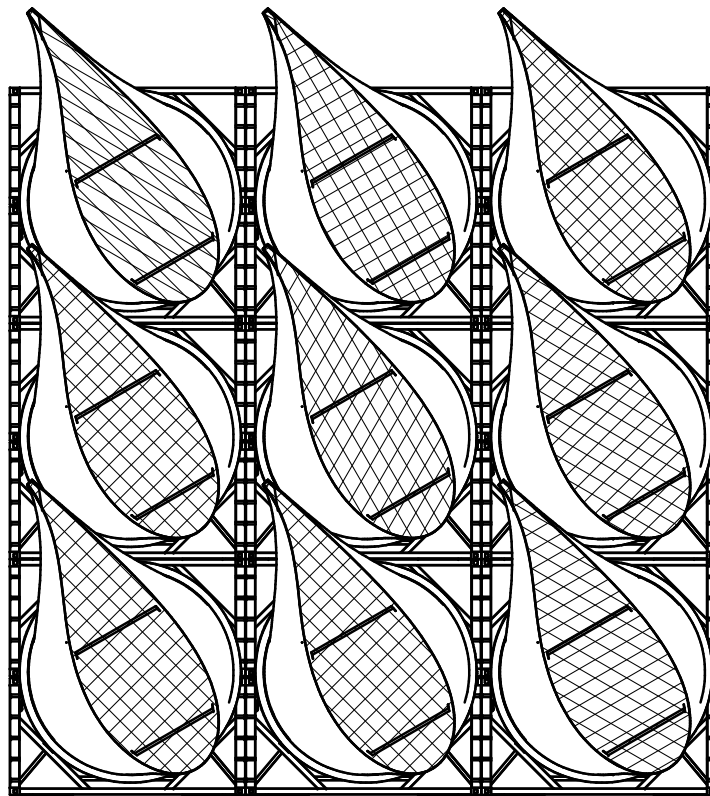


Abbildung 3.1.: Gestellstapel im Schnitt an der größten Blatattiefe; Blick Richtung Wurzel

Um eine hohe Nutzung des Platzes auf dem Frachter und der Jack-Up Barge zu ermöglichen, sollten die Blätter in den Gestellen dicht beieinander stehen. Erreichbar ist dies durch eine Abfolge von drei Drehungen des Rotorblattes aus der Formlage. Die kompakte Bauweise der Gestelle erlaubte auch eine materialsparende Konstruktion, da die Knicklängen der Profile kurz gehalten werden konnten. Die Schrägstellung der Rotorblätter reduziert auch die, auf die Rotorblätter wirkenden, Kräfte durch Seitenwinde.

Abbildung 3.1 zeigt den Gestellstapel im Schnitt. Die Verschachtelung ist nahezu

### 3. KONSTRUKTION

---

ideal schmal. An der Wurzel beträgt der Abstand an der engsten Stelle zwischen benachbarten Rotorblättern  $150\text{mm}$ ; die Endkante ist  $660\text{mm}$  bzw.  $760\text{mm}$  von den benachbarten Rotorblattflächen entfernt. Eine engere Stapelung würde die Gefahr, dass es beim Handhaben der Rotorblätter zu Berührungen zwischen den Rotorblättern kommt, unnötig erhöhen.

Durch die Verwendung der gleichen Obergestelle für Tip- und Wurzelgestell kann die Konstruktion und die Handhabung vereinfacht werden. Die Teilbarkeit der Gestelle ermöglicht einen kostengünstigen Transport der leeren Gestelle. Zerlegt sind sie als Ladung noch im zulässigen Abmaß für den Straßentransport. Ein aufwändiger Transport per Schiff oder mit Sondergenehmigung auf der Straße entfällt somit.

Auch der Verzicht auf Sonderteile und die geringe Zahl von unterschiedlichen Profilen macht die Konstruktion günstig in der Herstellung. Für alle Verbindungen wurde darauf geachtet, dass sie schweißbar sind.

Als Verbindungselemente der Gestelle untereinander wurden Containerecken gewählt. Diese stellen eine Verbindungslösung dar, die sehr gut erhaltlich und ausfallsicher ist. Für dieses System gibt es Standardlösungen zum Heben, Verbinden und Laschen, so dass diese Lösung aufwändigen Eigenbauten vorgezogen wurde. Auch entfällt so ein zusätzlicher Nachweis der Hebepunkte und Hebemittel.

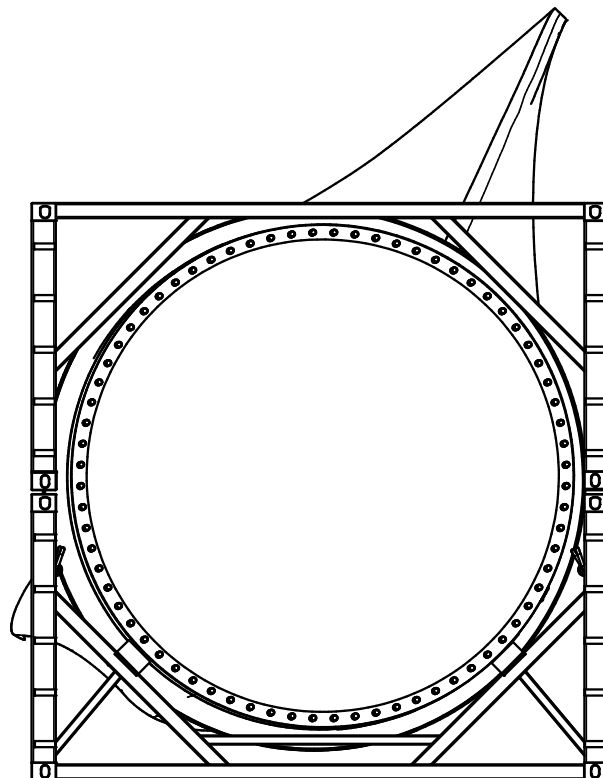


Abbildung 3.2.: Das Wurzelgestell mit Rotorblatt; Blick Richtung Tip

### 3.1. Beschreibung des Wurzelgestells

Abbildung 3.2 zeigt das untere Wurzelgestell mit schematisch dargestellter Rotorblattwurzel. Ohne Rotorblatt ist das Gestell in Abbildung 3.3 zu sehen. Die Diagonalstreben zur Versteifung in Querrichtung (Abb. 3.3; 1) wurden sehr eng zum Rotorblatt ausgeführt, um die Wirkung zu maximieren.

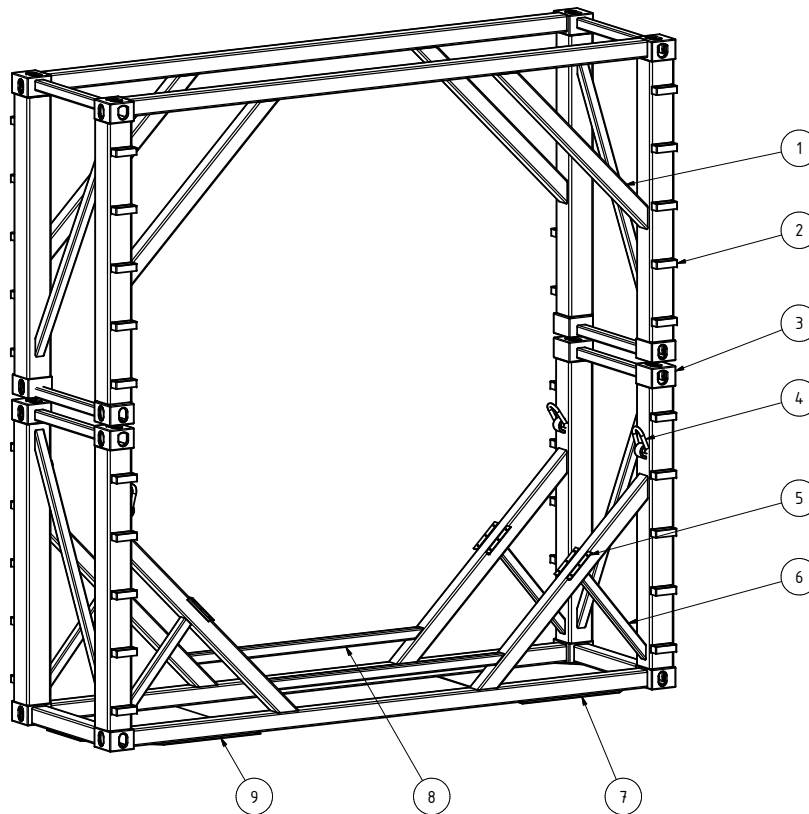


Abbildung 3.3.: Beschreibung des Wurzelgestells

Das Rotorblatt liegt mit dem massiven Laminat des Flanschbereiches auf zwei Auflagen (Abb. 3.3; 5) auf. Verspannt wird es von zwei Spanngurten, die an den D-Ringen (Abb. 3.3; 4) eingehakt werden.

Für die Befestigung des Wurzelgestells werden oft die Bolzen des Rotorblattes genutzt (vgl. Abbildung 1.8). Durch die feste Montage der Rotorblättern sind einfache Wurzelgestelle möglich, da die Blattwurzel zur Versteifung genutzt werden kann. Auch wird verhindert, dass die Oberflächenbeschichtung des Rotorblattes beschädigt werden kann. Diese Bauform hat vier entscheidende Nachteile. Die Zeit, die zum Lösen benötigt wird, die Beschädigung der Bolzenbeschichtung und bei unsachgemäßer Handhabung Schäden im Laminat<sup>1</sup>. Als weiterer Nachteil ist aufzuführen, dass das Rotorblatt überbestimmt gelagert ist; Tip- und Wurzelgestell halten das Rotorblatt torsionssteif zur Blattlängsachse. Tordiert sich das Transportschiff, kommt es

<sup>1</sup>Diese müssen nicht immer sichtbar sein.

durch die feste Einspannung zu unnötigen Belastungen für das Rotorblatt. Die Wurzel ist anfangs noch zylindrisch und weist, durch das sehr dicke Laminat, eine hohe Beanspruchung auf. Es bietet sich an, die Wurzel einfach in eine Schale zu legen und zu verspannen. Das Verspannen ist nötig, da das Rotorblatt gegen Verschieben in Blattlängsrichtung gesichert werden und das Gestell an dem Rotorblatt hängen können muss. In diesem Fall wurde die Schale auf zwei Auflagern reduziert, die 90° zueinander versetzt angeordnet sind. Hierdurch lassen sich die Auflagern mit wenig Material realisieren und die Ovalisierung der Wurzel verhindern.



Abbildung 3.4.: Ansicht des Wurzelgestells bei einer Verladung in Stade [14]

Die Verbindungen der Containerecken und die Spanngurte zur Befestigung der Rotorblätter müssen von Hand bedient werden. Leitern<sup>2</sup> an den Gestellen stellen eine einfache Lösung dar. Auch können sie das Gestell versteifen. Leitern stirnseitig anzubringen, widerspricht dem Ziel, möglichst schmale Gestelle zu haben. Seitliche Leitern können nur an den äußeren Gestellen im Stapel genutzt werden. Als Lösung für dieses Problem, wurden an den Stirnseiten des Gestells Steighilfen aus Recht-

<sup>2</sup>Eine Nutzung eines Mannkorbes mit einem Kran wäre auch denkbar.

eckrohren angebracht (3.3; 2). Zwei aneinander stehende Gestelle bilden so eine Leiter mit  $400\text{mm}$  Breite.

Abbildung 3.4 zeigt das Wurzelgestell bei der Verladung der Rotorblätter in Stade. Auf Kundenwunsch, wurden die Gestelle zusätzlich mit den erwähnten seitlichen Leitersprossen ausgeführt.

Auch für die Verbindung der beiden Gestellteile untereinander wurden Container-ecken (3.3; 3) genutzt. Zum einen, um nur eine Verbindungstechnik am Gestell zu verwenden und zum anderen um eine standardisierte Möglichkeit zu haben, die Gestelle in den Offshoregestellen zu fixieren.

Der Gestellstapel hat eine Höhe von ca.  $12\text{m}$ . Für Arbeiten in diesen Höhen ist eine Fallsicherung der Arbeiter erforderlich. Die Leitersprossen stellen Möglichkeiten zur Sicherung dar. Dedizierte Sicherungsösen sind vorzuziehen. Erkennbar sind diese im Abbildung 3.4 als silberne Ösen zwischen den Leitersprossen.

Die Diagonalstreben (Abb. 3.3; 5) versteifen das Gestell in Querrichtung. Um die Biegebelastung durch die Auflagen zu reduzieren, wurden sie mit kleinen Diagonalstreben (Abb. 3.3; 6) unterstützt.

Das Heben der oberen Hälfte des Wurzelgestells ist am Querbalken möglich. Für Gabelstaplertaschen ist wegen der minimierten Bauhöhe kein Platz. Für die untere Hälfte des Wurzelgestells wurde zum Heben eine weitere Querstrebe (Abb. 3.3; 8) eingefügt. Diese Strebe ist auch zur Reduzierung der Biegebeanspruchung des unteren Querbalkens beim Anheben des Gestells mit einem Kran erforderlich. Ein Anheben des Gestells, wenn ein Rotorblatt darin liegt, wurde nicht gefordert und ist auch nicht vorgesehen. Der Einbau für diese Möglichkeit, würde die Gestelle unnötig aufwändiger machen.

Eine Forderung aus Kapitel 2 an die Gestelle war, sie auf weichem Untergrund abstellen zu können. Dies ist durch die Bodenbleche (Abb. 3.3; 7) möglich. Zulässig sind  $p_{Wiese} = 5 \frac{\text{t}}{\text{m}^2}$ . Bei der in Abschnitt 4 ermittelten gleichen Lastverteilung zwischen Wurzel- und Tipgestell und der Masse für die Berechnung aus Kapitel 4.3, ergibt sich eine Fläche von:

$$A = \frac{m_{design} \cdot 0,5}{p_{Wiese}} = 2,035\text{m}^2$$

Diese wurde auf die beiden Seiten des Wurzelgestells aufgeteilt.

Die Auflagen des Rotorblattes in den Gestellen wurden beim Tipgestell mit je  $1300\text{mm} \times 200\text{mm}$  und beim Wurzelgestell mit je  $200\text{mm} \times 200\text{mm}$  ausgeführt. Die zulässige Flächenpressung für den Gurt beträgt  $p_{Gurte} = 25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ . Mit diesen Daten ergäbe sich sich für das Wurzelgestell mit  $n = 4$  Auflagen eine für das Laminat zulässige Belastung von etwa  $400\text{t}$ . Dieser Wert wird als Belastung nicht erreicht.

$$F_{zul,Wurzel} = A \cdot n \cdot p_{Gurte} = 200\text{mm} \cdot 200\text{mm} \cdot 4 \cdot 25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 4000\text{kN}$$

### 3.2. Beschreibung des Tipgestells

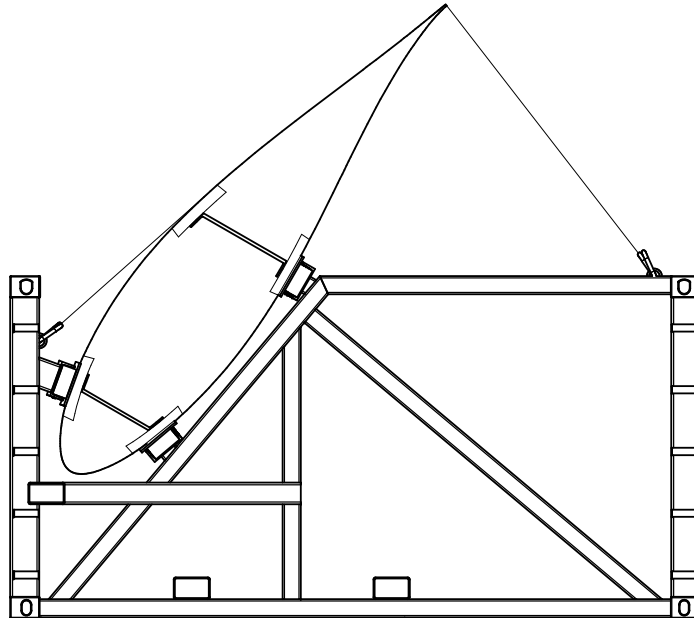


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung des Tipgestells mit Blick Richtung Tip

In Abbildung 3.5 ist der untere Teil des Tipgestells zu sehen. Der dargestellte Schnitt des Rotorblattes zeigt auch die beiden Stege mit den Gurten. Zu erkennen ist, dass die Auflagen nur auf den Gurten aufliegen. Die obere Auflage (Druckseite, Hinterkante) konnte nicht ganz mittig zum Gurt positioniert werden. Die Außermittigkeit stellt keine Gefahr für das Rotorblatt dar.

Auffällig ist auch die „Außermittigkeit“ des Rotorblattprofils in dem Gestell. Diese ist wegen der möglichst kompakten Stapelung notwendig. Eine Verdrehung des Rotorblattes, um die Längsachse mit anschließendem Schwenk zur Vorderkante und Absenkung des Tip, ergeben die dargestellte Lage. Diese Platzierung des Rotorblattes in dem Gestell ermöglicht eine für die Kräfteinleitung vorteilhafte Stabwerkkonstruktion.

Abbildung 3.6 zeigt das Tipgestell mit dem aufgesetzten Oberteil. Das Rotorblatt ist nur als Querschnittlinie dargestellt. Das Oberteil ist identisch mit dem des Wurzelgestells. Daher folgen die Versteifungsstreben (Abb. 3.6; 2) nicht eng der Rotorblattkontur. Der größere Abstand für das Tipgestell ist gut, da er das Aufsetzen des Oberteils auf das Unterteil vereinfacht. Das obere Gestell kann bei diesem Vorgang nicht so leicht mit dem Rotorblatt in Berührung kommen. Die Wurzel besteht aus dickem Laminat. Das Tipgestell steht in einem sensibleren Bereich.

Die Befestigung der Rotorblattes im Tipgestell wird oft über Schalenaufgaben oder umschließende Schalen gelöst. Die Gestelle in den Abbildungen 1.7 und 1.8 wurden so gefertigt. Solche Schalenteile sind Sonderteile und sollten für diese Konstrukti-



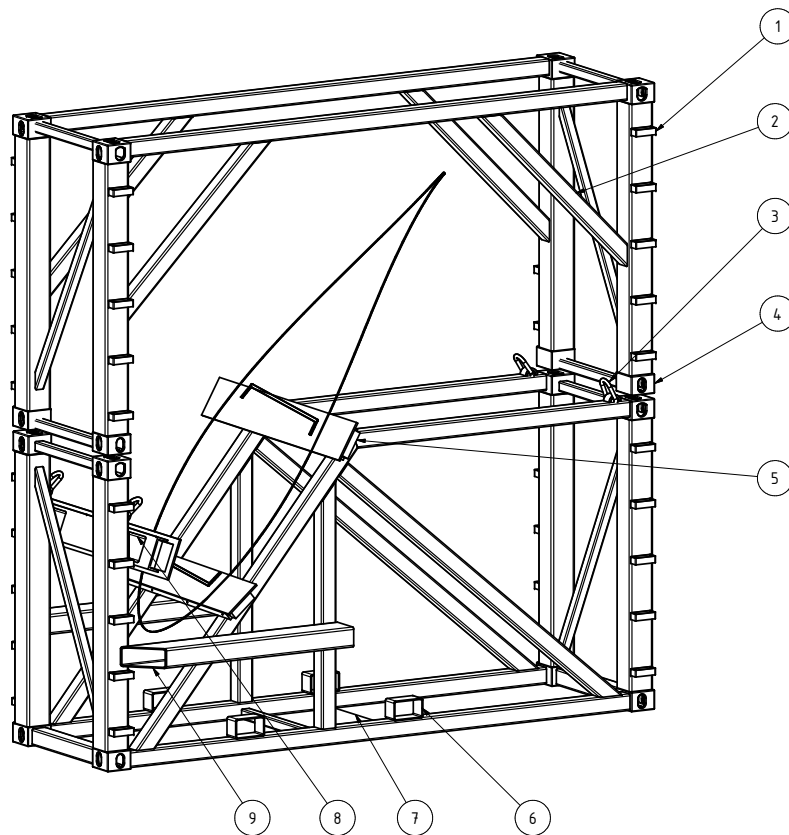


Abbildung 3.6.: Beschreibung des Tipgestells

on vermieden werden. Vermutlich haben die Rotorblätter in den beiden genannten Abbildungen, nur einen Gurt je Seite. So sind durchgehende Schalenauflagen möglich. Das Rotorblatt M5000-56.5 hat vier Gurte je Seite. Eine zusammenhängende Schale würde bedeuten, dass auch der sensiblere Bereich zwischen den Gurten belastet werden würde.

In dieser Konstruktion wird eine Auflage (Abb. 3.6; 5) vorgeschlagen, die nur die Gurte des Rotorblattes belastet. Diese weisen sehr hohe zulässige Flächenpressungen und hohe Linienlasten auf. Über die kurze, abzustützende Länge sind die Außenflächen dort auch plan genug, dass auf aufwändig gekrümmte Profile verzichtet werden kann und mit geraden Balken eine konturfolgende Abstützung realisiert werden kann. Diese Art der Auflage ist nur möglich, da das Rotorblatt vier Gurte aufweist. Bei einem breiten Gurt je Schalenhälfte, würde die Stützwirkung nicht ausreichen. Als Abmessungen der Auflagen wurden  $1300\text{mm} \times 200\text{mm}$  gewählt. Die zulässige Flächenpressung im Gurt wird so eingehalten. Die Auflagen können deutlich kleiner ausfallen. Wären sie kleiner, besteht die Gefahr, dass sie bei der Herstellung des Gestells falsch plaziert wurden. Daher bleibt es bei den überdimensionierten Auflagen.

Beim Tipgestell wurde, wie auch beim Wurzelgestell, die Fixierung des Rotorblattes im Gestell mit Spanngurten gelöst. Die D-Ringe (Abb. 3.6; 3) wurden nah an Fachwerkknoten plaziert, um eine gute Kräfteinleitung in die Stäbe zu gewährleisten. An



Abbildung 3.7.: Kranhub der Rotorblätter in den Gestellen [14]

den senkrechten Profilen sind die Spanngurte auch gut zu erreichen, wenn sie gelöst werden sollen.

Die Möglichkeit, das Gestell mit einem Gabelstapler zu bewegen, wird durch zwei Paare Gabelstaplertaschen realisiert. Die Gabelstaplertaschen (Abb. 3.6; 6) sind nutzbar, wenn das Gestell stirnseitig gefahren werden soll. Mit den Gabeln des Gabelstaplers in das Gestell zu gehen, ist nicht möglich, da der Schwerpunkt des leeren Gestells, etwa bei dem senkrechten Profil, in der Mitte ist. Die Gabelstaplertaschen sind mittig zum Gestellschwerpunkt angeordnet.

Die Gabelstaplertaschen (Abb. 3.6; 9) sind für den seitlichen Transport des Gestells nutzbar. Sie wurden so eng ausgeführt, dass die Gefahr reduziert wird, das Gestell und das Rotorblatt mit einem Gabelstapler zu heben. Die schrägen Enden der Gabelstaplertaschen sind erforderlich, wenn die Leitersprossen (Abb. 3.6; 1) nutzbar bleiben sollen. Die genutzten Profile hätten für ihre Anwendung des Hebens auch kürzer ausgeführt werden können. Indem sie das vorderkantenseitige Profil mit dem mittleren verbinden, wird eine Biegebeanspruchung der vorderkantenseitigen, unteren Containerecken vermieden.

Das Bodenblech (Abb. 3.6; 7) hat die gleiche Fläche, wie beim Wurzelgestell. Auch hier ist es mittig zum Schwerpunkt des Gestelles mit dem Rotorblatt angeordnet. Beim Tipgestell ist dieser deutlich Richtung Vorderkante gelegen.

Abbildung 3.7 zeigt den Kranhub der Rotorblätter in den Gestellen. Durch das Anheben an den oberen Containerecken, hängen sie sehr stabil.

## 4. Lastannahmen

Die Lastfälle lassen sich in vier Gruppen unterteilen:

### **Kranhub**

Ein Stapel aus drei Rotorblättern wird mit zwei Kranen gehoben. Dabei werden die Rotorblätter an den oberen Containerecken des obersten Gestells gehoben.

### **Onshore**

Die Rotorblätter stehen einzeln oder im Block gestapelt auf einer freien Fläche und sind starken Seitenwinden ausgesetzt. Das statische Blattgewicht und die Windlast sind die einzigen angreifenden Kräfte.

### **Nearshore**

Ein kleines Schiff transportiert einen Block Rotorblätter küstennah. Dabei sind die Fahrbedingungen auf geringe Windgeschwindigkeiten und wenig Seegang beschränkt.

### **Offshore**

Ein großes Schiff transportiert einen Block Rotorblätter offshore ohne Beschränkung der Fahrbedingungen.

Die Berechnung der Lasten, die aus den Beschleunigungen beim Seetransport resultieren, erfolgt auf Basis von Simulationsdaten [10]. Dabei werden die beiden folgenden Lastfälle betrachtet:

- Überlagerung von Roll, Heave und Wind
- Überlagerung von Pitch, Heave und Wind

Die Rollbewegung des Schiffes wird mit zwei Rechnungen für die zwei Bewegungsorientierungen berechnet. Für die Beschleunigung durch Pitchbewegungen wird nur die Aufwärtsbewegung der Schwingung betrachtet, da hier Kräfte durch Beschleunigung und Erdanziehungskräfte addiert werden.

### 4.1. Aufteilung der Rotorblattmasse auf Tip- und Wurzelgestell

Für alle Lasten werden die folgenden Gestellpositionen verwendet. Das führende „ $R$ “ gibt dabei an, dass es sich um eine Bemaßung zum Nabenmittelpunkt handelt. Ein Maß mit einem führenden „ $L$ “ bezieht sich auf den Rotorblattanfang. Das Rotorblatt beginnt bei  $L_{0m} = R_{1,5m}$ .

$$\begin{aligned} \text{Lage Wurzelgestell: } R_{Wurzel} &= R_{2,4m} \\ L_{Wurzel} &= L_{0,9m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lage Tipgestell: } R_{Tip} &= R_{33m} \\ L_{Tip} &= L_{31,5m} \end{aligned}$$

$$\text{Schwerpunktlage: } L_{Schwerpunkt} = 16,5m$$

Mit diesen Gestellpositionen und der Lage des Rotorblattschwerpunktes lassen sich die Massenkräfte auf Tip- und Wurzelgestell verteilen:

$$\begin{aligned} F_{Tip,Masse} \cdot (L_{Tip} - L_{Wurzel}) &= F_{Masse} \cdot (L_{Schwerpunkt} - L_{Wurzel}) \\ F_{Tip,Masse} &= F_{Masse} \cdot \frac{L_{Schwerpunkt} - L_{Wurzel}}{L_{Tip} - L_{Wurzel}} \\ &= F_{Masse} \cdot \frac{L_{16,5m} - L_{0,9m}}{L_{31,5m} - L_{0,9m}} \\ &= F_{Masse} \cdot 0,510 \\ &\approx F_{Masse} \cdot 0,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{Wurzel,Masse} + F_{Tip,Masse} &= F_{Masse} \\ F_{Wurzel,Masse} &= F_{Masse} - F_{Tip,Masse} \\ &= F_{Masse} - F_{Masse} \cdot 0,5 \\ &= F_{Masse} \cdot 0,5 \end{aligned}$$

Tip- und Wurzelgestell sind demnach mit den gleichen Massenkräften belastet.

## 4.2. Windlasten

Die Windgeschwindigkeit ist für die Lastfälle verschieden. Für den Kranhub wird keine Windlast angenommen.

### Nearshore:

In Tabelle 7-1, Lastfall 7 [10] ist die Windlast auf eine Windstärke von 5 beschränkt. Dies entspricht einer maximalen Windgeschwindigkeit von  $v_{nearshore} = 10,7m/s$ .

### Onshore:

Für die Lagerung an Land wird eine Windgeschwindigkeit von  $v_{onshore} = 30m/s$  angenommen.

### Offshore:

Als Inlay der Offshore-Transportgestelle wird mit einer Windgeschwindigkeit von  $v_{offshore} = 25m/s$  gerechnet.

### 4.2.1. Windlasten auf den Seitenflächen des Rotorblattes

Der Wind wird horizontal auf die Seitenflächen angenommen. Die Verdrehung der Endkante zur Druckseite um die Längsachse aus der Mould-Lage beträgt  $60^\circ$ . Dies entspricht einem Pitchwinkel von  $-47^\circ$  bzw  $133^\circ$ . Für die Berechnung wird das Blatt gedreht und die Windrichtung konstant gehalten. Die Drehung der Windrichtung ist in Abbildung 4.1 zu erkennen.

Für ein Rotorblatt ändert sich der Strömungswiderstandskoeffizient  $c_W$  abhängig vom Anströmwinkel und vom Profil. Für das hier besprochene Rotorblatt gibt es eine Tabelle mit einem Skript, das die Strömungswiderstände für die gewünschten Randbedingungen ausgibt. Alternativ können die Werte auch durch Interpolation aus einer anderen Tabelle entnommen werden.

In Tabelle A.1 sind die auf das Rotorblatt wirkenden Kräfte und Angriffspositionen aufgeführt. Die Größen „Aerodynamic Center Lift“ und „Aerodynamic Center Drag“ ( $ACL$ ,  $ACD$ ) geben den Abstand zum Blattanfang an. Es ist ein Auszug der Daten aufgeführt.

Für die Pitchwinkel von  $-47^\circ$  bzw  $133^\circ$  werden die Strömungswiderstände durch Interpolation der Tabellenwerte berechnet. Abbildung 4.2 zeigt die Position der Massen- und Strömungswiderstände, die im Folgenden berechnet werden.

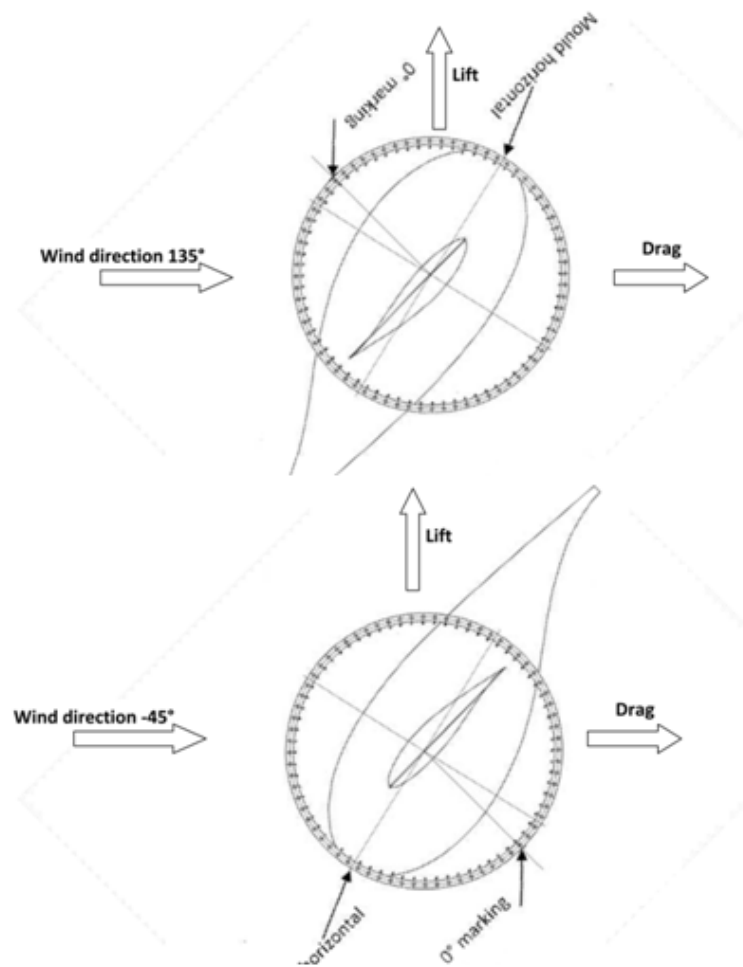


Abbildung 4.1.: Darstellung der Pitchwinkel

**Pitchwinkel  $133^\circ$  bei  $1 \frac{m}{s}$  Wind**

$$\begin{aligned} \text{Lift: } F_{L,133^\circ,1 \frac{m}{s}} &= -0,0627 \frac{kN}{m^2/s^2} \\ \text{Center of Lift: } ACL_{133^\circ,1 \frac{m}{s}} &= L25,395m \\ \text{Drag: } F_{D,133^\circ,1 \frac{m}{s}} &= 0,1175 \frac{kN}{m^2/s^2} \\ \text{Center of Drag: } ACD_{133^\circ,1 \frac{m}{s}} &= L22,489m \end{aligned}$$

**Pitchwinkel  $-47^\circ$  bei  $1 \frac{m}{s}$  Wind**

$$\begin{aligned} \text{Lift: } F_{L,-47^\circ,1 \frac{m}{s}} &= -0,0792 \frac{kN}{m^2/s^2} \\ \text{Center of Lift: } ACL_{-47^\circ,1 \frac{m}{s}} &= L25,542m \\ \text{Drag: } F_{D,-47^\circ,1 \frac{m}{s}} &= 0,1133 \frac{kN}{m^2/s^2} \\ \text{Center of Drag: } ACD_{-47^\circ,1 \frac{m}{s}} &= L22,496m \end{aligned}$$

Die Angriffspunkte der Lasten ( $ACL$  und  $ACD$ ) ändern sich für die verschiedenen Windgeschwindigkeiten nicht. Die Einheitswindlasten werden mit den Windgeschwindigkeiten der Lastfälle umgerechnet. Ein negativer Wert für  $F_L$  bedeutet, dass das Rotorblatt in die negative Richtung von *Lift* aus Abbildung 4.1 gedrückt wird. Da sich für die Berechnung das Rotorblatt dreht und die Anströmung konstant bleibt, wirkt für den Pitchwinkel  $133^\circ$  die berechnete Auftriebskraft in positiver  $Z$ -Richtung aus Abbildung 4.4.

#### Pitchwinkel $-47^\circ$ bei $10,7 \frac{m}{s}$ Wind

$$\begin{aligned} \text{Lift: } F_{L,-47^\circ,10,7 \frac{m}{s}} &= F_{L,-47^\circ,1 \frac{m}{s}} \cdot v^2 \\ &= -0,0792 \frac{kN}{m^2/s^2} \cdot (10,7 m/s)^2 \\ &= -9,1 kN \text{ (Abtrieb)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Drag: } F_{D,-47^\circ,10,7 \frac{m}{s}} &= F_{D,-47^\circ,1 \frac{m}{s}} \cdot v^2 \\ &= 0,1133 \frac{kN}{m^2/s^2} \cdot (10,7 m/s)^2 \\ &= 13,0 kN \end{aligned}$$

Die weiteren Windlasten berechnen sich für den zweiten Winkel und die anderen Windgeschwindigkeiten analog. Sie sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Die Auftriebswerte für den Pitchwinkel  $133^\circ$  wurden im Vorzeichen geändert, um sie einfacher mit den in den folgenden Kapiteln berechneten Lasten zu überlagern.

Tabelle 4.1.: Zusammenfassung der Windlasten *Lift* und *Drag* in Abhängigkeit des Pitchwinkels und der Windgeschwindigkeit

Pitchwinkel	$v_{Wind}$	$F_{Lift}$	$F_{Drag}$
$-47^\circ$	$10,7 \frac{m}{s}$	$-9,1 kN$	$13,0 kN$
	$25 \frac{m}{s}$	$-49,5 kN$	$64,5 kN$
	$30 \frac{m}{s}$	$-71,3 kN$	$102,0 kN$
$133^\circ$	$10,7 \frac{m}{s}$	$7,2 kN$	$13,5 kN$
	$25 \frac{m}{s}$	$39,2 kN$	$73,4 kN$
	$30 \frac{m}{s}$	$56,4 kN$	$105,8 kN$

Die Lage von  $ACL$  und  $ACD$  im Verhältnis zu den Gestellpositionen gibt die Aufteilung der Windlasten auf die Gestelle vor. Diese ist für alle Windgeschwindigkeiten gleich. Die Veränderung des Pitchwinkels verändert auch die Lage von  $ACL$  und  $ACD$  in sehr geringen Maßen. Diese Veränderung wird vernachlässigt und es wird

im Folgenden mit konstanten Werten gerechnet.

Center of Lift:	$ACL = L_{25,4m}$
Center of Drag:	$ACD = L_{22,5m}$
Lage Wurzelgestell:	$L_{Wurzel} = L_{0,9m}$
Lage Tipgestell:	$L_{Tip} = L_{31,5m}$

Die Verteilung Strömungswiderstandskräfte eines Gestellpaares auf Tip- und Wurzelgestell erfolgt durch Aufstellung der Kräfte- und Momentengleichgewichte.

$$\begin{aligned}
 F_{Tip,Lift} \cdot (L_{Tip} - L_{Wurzel}) &= F_{Lift} \cdot (ACL - L_{Wurzel}) \\
 F_{Tip,Lift} &= F_{Lift} \cdot \frac{ACL - L_{Wurzel}}{L_{Tip} - L_{Wurzel}} \\
 &= F_{Lift} \cdot \frac{L_{25,4m} - L_{0,9m}}{L_{31,5m} - L_{0,9m}} \\
 &= F_{Lift} \cdot 0,8
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{Wurzel,Lift} + F_{Tip,Lift} &= F_{Lift} \\
 F_{Wurzel,Lift} &= F_{Lift} - F_{Tip,Lift} \\
 &= F_{Lift} - F_{Lift} \cdot 0,8 \\
 &= F_{Lift} \cdot 0,2
 \end{aligned}$$

Für die Windlasten in *Drag*-Richtung ergeben sich mit dem gleichen Rechenweg:

$$\begin{aligned}
 F_{Tip,Drag} &= F_{Drag} \cdot 0,7 \\
 F_{Wurzel,Drag} &= F_{Drag} \cdot 0,3
 \end{aligned}$$

Der errechneten Aufteilung nach, trägt das Tipgestell, anders als bei der Masseverteilung, deutlich mehr Windlast als das Wurzelgestell. Abbildung 4.2 verdeutlicht die Windlastverteilung durch die Positionierung von ACL und ACD im Verhältnis zu den Gestellen..

Die Windlasten in einer Reihe der Gestelle teilt sich nach DIN1055 [7] wie folgt auf: Das erste Gestell trägt die volle Windlast. Die nachfolgenden Gestelle tragen je  $\frac{2}{3}$  des vorhergehenden.

Damit trägt die erste Spalte die volle errechnete Last, die zweite  $\frac{2}{3}$  und die dritte  $\frac{4}{9}$  der errechneten Last.



### 4.2.2. Windlasten auf der Flanschfläche

Für die Flanschfläche wird eine vereinfachende Rechnung angestellt. Die Flanschfläche wird als konvexe offene Halbkugel vereinfacht.

Der Strömungswiderstand  $F_W$  lässt sich mit der Fläche  $A$ , dem Strömungswiderstandskoeffizient  $c_w$ , der Dichte des Mediums  $\rho$  und der Geschwindigkeit  $v$  berechnen.

$$F_w = c_w \cdot \frac{A}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [ [8], \text{Gleichung 2.6}]$$

Die Querschnittsfläche der Wurzel ergibt sich aus deren Durchmesser  $d_{Wurzel} \approx 3300\text{mm}$ .

$$A_{Wurzel} = \frac{d_{Wurzel}^2 \cdot \pi}{4} = \frac{3300\text{mm}^2 \cdot \pi}{4} = 8.552.986\text{mm}^2 \approx 8,6\text{m}^2$$

Der Strömungswiderstandskoeffizient wird mit  $c_w = 1,33$  für eine konvexe offene Halbkugel angenommen [ [8], Seite 38].

Die Dichte der Luft wird mit  $\rho = 1,225\text{kg/m}^3$  (bei  $15\text{C}^\circ$ ) angenommen [1].

Damit ergeben sich für die verschiedenen Windgeschwindigkeiten die folgenden Strömungswiderstände:

$$\begin{aligned} F_{w,10,7\text{m/s}} &= \frac{A}{2} \cdot \rho \cdot v_{nearshore}^2 \\ &= 1,33 \cdot \frac{8,6\text{m}^2}{2} \cdot 1,225\text{kg/m}^3 \cdot (10,7\text{m/s})^2 \\ &= 0,802\text{kN} \\ F_{w,25\text{m/s}} &= 4,379\text{kN} \\ F_{w,30\text{m/s}} &= 6,305\text{kN} \end{aligned}$$

Es kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden wie sich die Kräfte auf die Gestelle verteilen. Daher werden Wurzel und Tip-Gestell je mit der vollen Windlast aus der Anströmung der Flanschfläche beaufschlagt. Dies sollte eine konservative Auslegung sicher stellen.

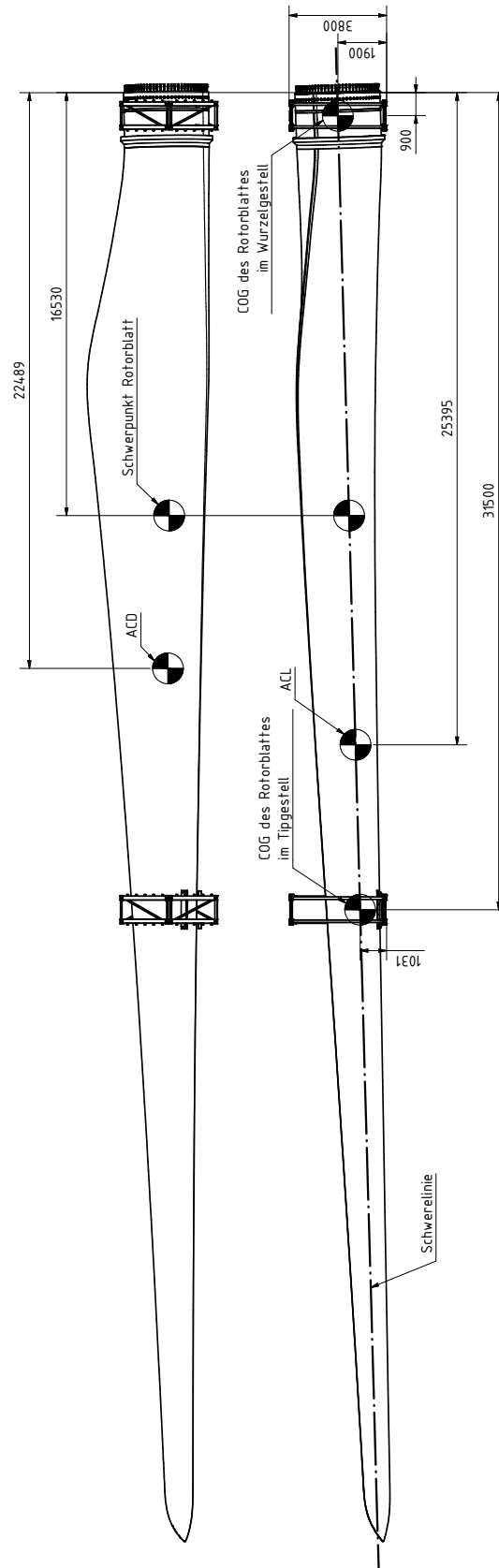


Abbildung 4.2.: Positionen der Massen- und Strömungswiderstandsschwerpunkte am Rotorblatt

### 4.3. Massenkräfte beim Schiffstransport (Nearshore)

Für den küstennahen Transport per Schiff wird mit einem Bock aus  $3 \times 3$  Rotorblättern gerechnet, der längs auf dem Schiff steht. Abbildung 4.4 zeigt den Aufbau des Stapels und die Gestellbezeichnungen im Stapel. Auch die, im Folgenden verwendeten, Koordinaten sind dargestellt. Um die maximalen Lasten zu erreichen, wird der Block außermittig angenommen. Für den real durchgeführten Transport sollten die Gestelle mittig platziert werden, um eine ungleichmäßige Last für das Schiff zu vermeiden.

In 4.3 ist die Barge schematisch dargestellt. Sie hat die folgenden Hauptabmaße:

$Length\ o.a.$	$=$	$75m$
$LPP$	$=$	$74m$
$AFT\ to\ APP$	$=$	$1m$
$Beam$	$=$	$18m$
$Depth$	$=$	$5m$
$Draft$	$=$	$2,5m$
$X_{COR}$	$=$	$38m$
$Y_{COR}$	$=$	$0m$
$Z_{COR}$	$=$	$-2,5m$

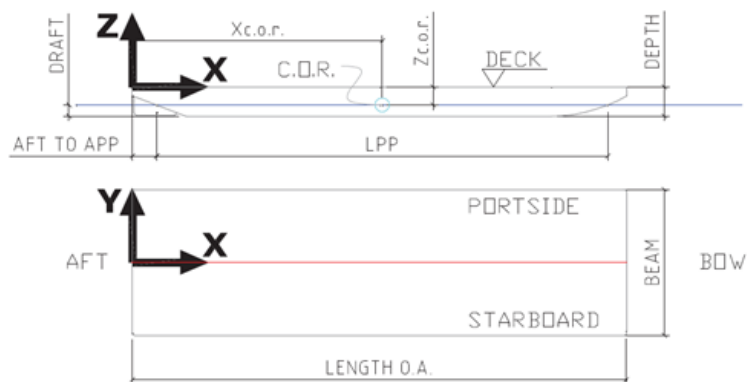


Abbildung 4.3.: Koordinaten und Abmessungen der Barge [6]

#### Eigenschaften des Blattes und den Gestellen

Breite:	$W_o =$	$3,8m$
Länge:	$L_o =$	$56,5m$
Höhe:	$H_o =$	$3,8m$

In Abschnitt 2 sind die Gestell- und Rotorblattmassen angegeben. Mit dem Sicherheitsfaktor für die Masse, ergibt sich die Masse  $m_{design}$ , mit der im Weiteren gerech-

net wird.

$$\begin{aligned}
 m_{design} &= u_m \cdot m_{gesamt} \\
 &= u_m \cdot (m_{Rotorblatt} + 2 \cdot m_{Gestell}) \\
 &= 1,1 \cdot (16,5t + 2 \cdot 1t) \\
 &= 20,35t
 \end{aligned}$$

### Lage der Schwerpunkte für die Gestellpaare mit den Rotorblättern

Um die Lasten homogener in das Schiffsdeck einleiten zu können, wird angenommen, dass eine Tragstruktur mit einer Höhe von  $0,5m$  auf dem Deck unter den Gestellen liegt. Zwischen den Gestellen sitzen in Z-Richtung Twistlocks. Diese werden mit einer Höhe von  $30mm$  abgeschätzt. Diese zusätzliche Höhe verlängert den Hebelarm der Bewegung und erhöht so auch die Lasten.

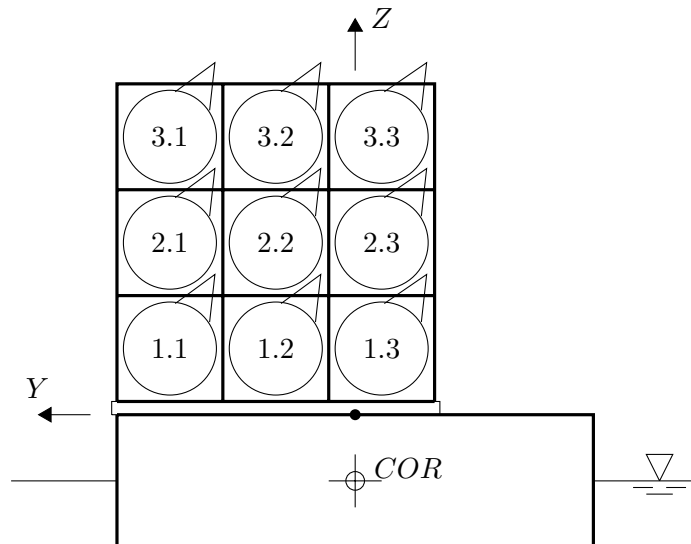


Abbildung 4.4.: Bezeichnung und Position der Gestellpaare

Die Schwerpunkte der Gestelle ergeben sich zu den in Tabelle A.2 angegebenen Koordinaten (die X-Koordinate ist bei allen Gestellen gleich).

#### 4.3.1. Lasten für Roll + Heave

Dieser Lastfall überlagert die Beschleunigungen der Rollbewegung des Schiffes um die X-Achse mit den Stampfbeschleunigungen in Z-Richtung.

Die statischen Lasten im Umkehrpunkt der Schwingung sind von der Lage der Gestelle unabhängig und so für alle Gestelle gleich. Die Lasten durch die Rotation um  $COR^1$  unterscheiden sich nach der Lage der Gestelle und müssen einzeln berechnet werden.

<sup>1</sup>Center of rotation

Die Lasten werden für das Gestell 1.1 ausführlich gerechnet. Für die weiteren Gestelle sind die nach dem gleichen Schema errechneten Lasten in Tabelle A.3 zu finden.

### Ortsunabhängige Lasten

Die ortunabhängigen Lasten ergeben sich aus der gegebenen Beschleunigung in  $Z$ -Richtung und dem Neigungswinkel. Die Lasten  $F_{y,heave}$  und  $F_{z,heave}$  entstehen durch Hubbewegungen des Schiffes und können sich in der Wirkrichtung umkehren. Dies wird in der Überlagerung betrachtet.

$$\begin{aligned} F_{y,heave} &= m_{design} \cdot a_{heave} \cdot \sin(\varphi_{Roll}) \\ &= 20,35t \cdot \left( \pm 0,1 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \sin(10^\circ) \right) \\ &= 3,467kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{z,heave} &= m_{design} \cdot a_{heave} \\ &= 20,35t \cdot \left( \pm 0,1 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \right) \\ &= 19,963kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{y,static} &= m_{design} \cdot g \cdot \sin(\varphi_{Roll}) \\ &= 20,35t \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \sin(10^\circ) \\ &= 34,666kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{z,static} &= m_{design} \cdot g \cdot \cos(\varphi_{Roll}) \\ &= 20,35t \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \cos(10^\circ) \\ &= 196,601kN \end{aligned}$$

### Dynamische Lasten durch Schiffsbewegungen für Gestellpaar 1.1

Es werden die aus den Schiffsbewegungen entstehenden Lasten für das Gestellpaar 1.1 berechnet.

Die Winkelbeschleunigung um die  $X$ -Achse  $\ddot{\varphi}_{max,Roll}$  ergibt sich aus den in Abschnitt 2 gegebenen Größen für die Schwingungsperiode  $T_{Roll}$  und den Rollwinkel  $\varphi_{Roll}$ .

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_{max} &= \varphi_0 \cdot \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \\ \ddot{\varphi}_{max,Roll} &= \varphi_{Roll} \cdot \left( \frac{2\pi}{T_{Roll}} \right)^2 = 10^\circ \cdot \left( \frac{2\pi}{10s} \right)^2 = 0,06891 \frac{1}{s^2} \end{aligned}$$

Die ortsabhängigen Lasten ergeben sich aus der maximalen Winkelbeschleunigung  $\ddot{\varphi}_{max, Roll}$  und dem Abstand zu  $COR$ .

$$\begin{aligned} F_{y, Roll1.1} &= m_{design} \cdot (Z_{COG,1.1} \cdot u_z - Z_{COR}) \cdot \ddot{\varphi}_{max, Roll} \\ &= 20,35t \cdot (2,40m \cdot 1,1 + 2,5m) \cdot 0,0689 \frac{1}{s^2} \\ &= 7,207kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{z, Roll1.1} &= m_{design} \cdot Y_{COG,1.1} \cdot \ddot{\varphi}_{max, Roll} \cdot \cos(\varphi_{Roll}) \\ &= 20,35t \cdot 7,10m \cdot 0,0689 \frac{1}{s^2} \cdot \cos(10^\circ) \\ &= 9,804kN \end{aligned}$$

### Überlagerung der Lasten

Die statischen und dynamischen Lasten werden überlagert. In  $Z$ -Richtung kann durch die Hubbewegung des Schiffes zusammen mit der Rollbewegung, die Last auch entgegen der Schwerkraft wirken.

$$\begin{aligned} F_{Y, Roll1.1} &= F_{y, Roll1.1} + F_{y, heave} + F_{y, static} \\ &= 7,207kN + 3,467kN + 34,666kN \\ &= 45,340kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{Z, Roll, max1.1} &= F_{z, Roll1.1} + F_{z, heave} + F_{z, static} \\ &= 9,804kN + 19,963kN + 196,601kN \\ &= 226,368kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{Z, Roll, min1.1} &= -F_{z, Roll1.1} - F_{z, heave} + F_{z, static} \\ &= -9,804kN - 19,963kN + 196,601kN \\ &= 166,834kN \end{aligned}$$

Da  $F_{Z, Roll, min1.1} > 0$ , wird kein Abheben der Gestelle erfolgen. Für die anderen Gestelle wird  $F_{Z, Roll, min}$  nicht ermittelt.

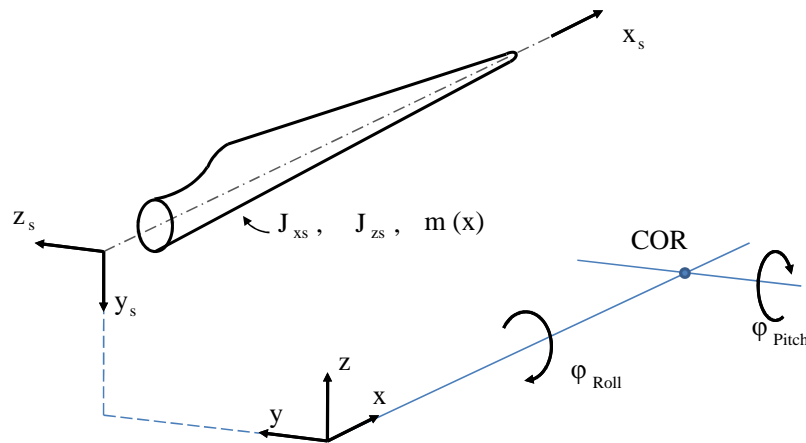


Abbildung 4.5.: Massenträgheit des Rotorblattes bezogen auf die Schiffsbewegungen

### 4.3.2. Lasten durch Trägheit des Gestellpaares 1.1 für Bewegungen um die X-Achse

Die Gestelle werden durch die Schiffsbewegungen auch um ihren eigenen Schwerpunkt gedreht. Die daraus resultierenden Kräfte werden im Folgendem abgeschätzt. Die Massenträgheiten des Rotorblattes, bezogen auf den Nabenmittelpunkt,  $J_{x_s}$  und  $J_{z_s}$  wurden der Berechnungsunterlage des Rotorblattes entnommen.

$$\begin{aligned} J_{x_s} &= 27966,8 \text{ kgm}^2 \\ J_{z_s} &= 8855016,4 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Die Massenträgheiten, bezogen auf die Schiffsbewegungsachsen, ergeben sich mit dem Steinerschen Satz.

$$\begin{aligned} J_X &= J_{x_s} + \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2} \cdot m \\ J_{X,1.1} &= J_{x_s} + \sqrt{(Y_{COG,1.1} - Y_{COR})^2 + (Z_{COG,1.1} - Z_{COR})^2} \cdot m_{design} \\ &= 27966,8 \text{ kgm}^2 + \sqrt{(7,1 \text{ m} - 0 \text{ m})^2 + (2,4 \text{ m} + 2,5 \text{ m})^2} \cdot 20350 \text{ kg} \\ &= 203520 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Aus den Trägheiten werden mit den Winkelbeschleunigungen Trägheitsmomente. Um Ungenauigkeiten in der Masseverteilung zu berücksichtigen, werden diese mit Sicherheitsbeiwerten ( $u_x = 1,3$ ) erhöht.

$$\begin{aligned} M_{X,Roll} &= J_X \cdot \varphi''_{max,Roll} \cdot u_x \\ M_{X,Roll,1.1} &= J_{X,1.1} \cdot \varphi''_{max,Roll} \cdot u_x \\ &= 203520 \text{ kgm}^2 \cdot 0,0689 \frac{1}{s^2} \cdot 1,3 \\ &= 18,229 \text{ kNm} \end{aligned}$$

### 4.3.3. Lasten für Pitch + Heave

Dieser Lastfall überlagert die Beschleunigungen der Nickbewegung des Schiffes um die  $Y$ -Achse mit den Stampfbeschleunigungen in  $Z$ -Richtung.

Die Lasten werden für das Gestellpaar 1.1 berechnet. Für die weiteren Gestelle sind die Ergebnisse in Tabelle A.3 aufgeführt.

Es erfolgt eine Aufteilung der Lasten in ortsunabhängig und ortabhängig (dynamisch).

#### Ortsunabhängige Lasten

Die ortsunabhängigen Lasten ergeben sich aus der gegebenen Beschleunigung in  $Z$ -Richtung und dem Neigungswinkel. Die Lasten  $F_{y,heave}$  und  $F_{z,heave}$  entstehen durch Hubbewegungen des Schiffes und können sich in der Wirkrichtung umkehren. Dies wird in der Überlagerung betrachtet.

Die ortsunabhängigen Lasten ergeben sich aus der gegebenen Beschleunigung in  $Z$ -Richtung und dem Neigungswinkel. Die Lasten  $F_{x,heave}$  und  $F_{z,heave}$  entstehen durch Hubbewegungen des Schiffes und können sich in der Wirkrichtung umkehren. Dies wird in der Überlagerung betrachtet.

$$\begin{aligned}
 F_{x,heave} &= m_{design} \cdot a_{heave} \cdot \sin(\varphi_{Pitch}) \\
 &= 20,35t \cdot 0,1 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \sin(5^\circ) \\
 &= 1,740kN
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{z,heave} &= m_{design} \cdot a_{heave} \\
 &= 20,35t \cdot 0,1 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \\
 &= 19,963kN
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{x,static} &= m_{design} \cdot g \cdot \sin(\varphi_{Pitch}) \\
 &= 20,35t \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \sin(5^\circ) \\
 &= 17,339kN
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{z,static} &= m_{design} \cdot g \cdot \cos(\varphi_{Pitch}) \\
 &= 20,35t \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \cos(5^\circ) \\
 &= 198,874kN
 \end{aligned}$$



**Lasten durch Schiffsbewegungen für Gestellpaar 1.1:**

Die maximale Winkelbeschleunigung um die  $Y$ -Achse  $\ddot{\varphi}_{max,Pitch}$  ergibt sich aus den in Abschnitt 2 gegebenen Größen für die Schwingungsperiode  $T_{Pitch}$  und den Nickwinkel  $\varphi_{Pitch}$ .

$$\ddot{\varphi}_{max,Pitch} = \varphi_{Pitch} \cdot \left( \frac{2\pi}{T_{Pitch}} \right)^2 = 5^\circ \cdot \left( \frac{2\pi}{10s} \right)^2 = 0,0345 \frac{1}{s^2}$$

Die ortsabhängigen Lasten ergeben sich aus der maximalen Winkelbeschleunigung  $\ddot{\varphi}_{max,Pitch}$  und dem Abstand zu  $COR$ .

$$\begin{aligned} F_{x,Pitch1.1} &= m_{design} \cdot (Z_{COG,1.1} \cdot u_z - Z_{COR}) \cdot \ddot{\varphi}_{max,Pitch} \\ &= 20,35t \cdot (2,40m \cdot 1,1 + 2,5m) \cdot 0,0345 \frac{1}{s^2} \\ &= 3,609kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{z,Pitch1.1} &= m_{design} \cdot (X_{COR} - X_{COG,1.1}) \cdot \ddot{\varphi}_{max,Pitch} \cdot \cos(\varphi_{Pitch}) \\ &= 20,35t \cdot (38m - 15,24m) \cdot 0,0345 \frac{1}{s^2} \cdot \cos(5^\circ) \\ &= 15,918kN \end{aligned}$$

Die statischen und dynamischen Lasten werden überlagert. In  $Z$ -Richtung kann durch die Hubbewegung des Schiffes zusammen mit der Rollbewegung, die Last auch entgegen der Schwerkraft wirken.

$$\begin{aligned} F_{X,Pitch1.1} &= F_{x,Pitch1.1} + F_{x,heave} + F_{x,static} \\ &= 3,609kN + 1,740kN + 17,339kN \\ &= 22,688kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{Z,Pitch,max1.1} &= F_{z,Pitch1.1} + F_{z,heave} + F_{z,static} \\ &= 15,895kN + 19,963kN + 198,874kN \\ &= 234,755kN \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{Z,Pitch,min1.1} &= -F_{z,Pitch1.1} - F_{z,heave} + F_{z,static} \\ &= -15,918kN - 19,963kN + 198,874kN \\ &= 162,993kN \end{aligned}$$

Da  $F_{Z,Pitch,min1.1} > 0$ , wird kein Abheben der Gestelle erfolgen. Für die anderen Gestelle wird  $F_{Z,Pitch,min}$  nicht ermittelt.

#### 4.3.4. Lasten durch Trägheit der Gestelle für Bewegungen um die Y-Achse

Die Gestelle werden durch die Schiffsbewegungen auch um ihren eigenen Schwerpunkt gedreht. Die daraus resultierenden Kräfte werden im Folgendem abgeschätzt.

Das Schiff schwingt nicht um den Ursprung des Koordinatensystems sondern um den Punkt  $COR$ . Es wird die, parallel zur  $Y$ -Achse verlaufende, Achse  $Y_{COR}$  eingeführt. Diese schneidet den Punkt  $COR$ . Die Massenträgheit  $J_{Y,COR}$  ist bezogen auf diese Achse.

Es wird der oben genannte Wert für die Massenträgheit  $J_{zs} = 8855016, 4kgm^2$  verwendet.

Die Massenträgheiten, bezogen auf die Schiffsbewegungsachsen, ergeben sich mit dem Steinerschen Satz. Als Abstand zum Rotationszentrum in  $X$ -Richtung wird der Wert  $\Delta x = X_{COR} = 38m$  verwendet. Dieser Abstand ist für alle Gestelle identisch.

$$\begin{aligned}
 J_{Y,COR} &= J_{zs} + \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2} \cdot m \\
 J_{Y,COR,1.1} &= J_{zs} + \sqrt{(X_{COR})^2 + (Z_{COG,1.1} - Z_{COR})^2} \cdot m_{design} \\
 &= 8855016, 4kgm^2 + \sqrt{(38m)^2 + (2, 4m + 2, 5m)^2} \cdot 20350kg \\
 &= 9634719kgm^2
 \end{aligned}$$

Aus den Trägheiten werden mit den Winkelbeschleunigungen Trägheitsmomente. Um Ungenauigkeiten in der Masseverteilung zu berücksichtigen, werden diese mit Sicherheitsbeiwerten ( $u_x = 1, 3$ ) erhöht.

$$\begin{aligned}
 M_{Y,Pitch} &= J_{Y,COR} \cdot \ddot{\varphi}_{max,Pitch} \cdot u_x \\
 M_{Y,Pitch,1.1} &= J_{Y,COR,1.1} \cdot \ddot{\varphi}_{max,Pitch} \cdot u_x \\
 &= 9634719kgm^2 \cdot 0, 0345 \frac{1}{s^2} \cdot 1, 3 \\
 &= 432, 117kNm
 \end{aligned}$$

Das Moment  $M_{Y,Pitch,1.1}$  wird in ein Kräftepaar überführt, das entgegengesetzt in Tip- und Wurzelgestell eingeleitet wird. Der Hebelarm hierfür ist der halbe Gestellabstand  $\frac{1}{2} \cdot l_{Gestellabstand} = \frac{1}{2} \cdot 30, 6m$ .

$$F_{z,J,Pitch,1.1} = \pm \frac{M_{Y,Pitch}/2}{l_{Gestellabstand}/2} = \pm \frac{432, 117kNm}{30, 6m} = \pm 14, 121kN$$

Für den Nachweis wird diese Kraft als mit der Schwerkraft wirkend betrachtet. Ein Abheben der Gestelle würde nicht erfolgen, wenn die Kraft entgegen der Schwerkraft wirken würde.

#### 4.4. Massenkräfte beim Schifftransport (Offshore)

Für die BHO1 sind die Beschleunigungen gegeben und in Tabelle A.4 aufgeführt. Die dazu gehörenden Koordinaten sind in Tabelle A.5. Die Beladungssituation ist in Abbildung 1.4 dargestellt. Schematisch ist die Beladung in Abbildung 4.6 wiederholt und mit den Koordinatenachsen versehen.

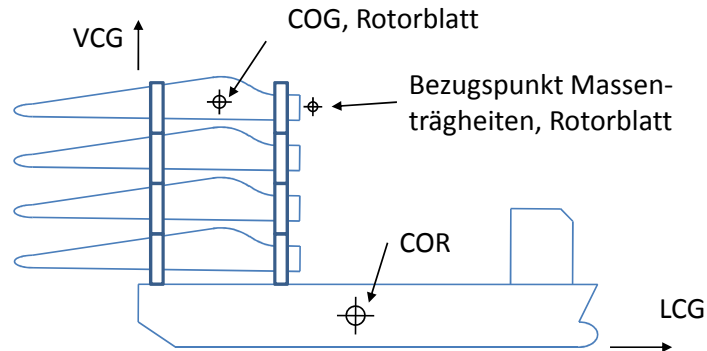


Abbildung 4.6.: Schematische Darstellung der Jack-Up-Barge mit den geladenen Rotorblättern

Als konservative Auslegung werden die Maxima jeder Lastrichtung überlagert. Es wird dabei angenommen, dass die Gestelle in Längsrichtung auf dem Schiff stehen. Als Masse des Rotorblattes mit dem Gestellpaar wird  $m_{design} = 20,35t$  angenommen. Für diesen Transportfall können die Oberteile der Transportrahmen entfernt werden. Dies würde eine Reduktion des Gewichtes bedeuten. Da sie in das Gesamtgewicht mit einfließen, sollte die Auslegung so konservativ ausfallen.

Es werden die Maxima beider Messstellen für die Auslegung verwendet. Da sie nur gering von einander abweichen, wird diese Rechenvereinfachung nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis haben.

- $a_x = 1,7 \frac{m}{s^2}$
- $a_y = 4,5 \frac{m}{s^2}$
- $a_z = 12,7 \frac{m}{s^2} \approx 1,3 \cdot g$
- $\ddot{\varphi}_{Roll} = 3,3 \frac{^\circ}{s^2} \approx 0,0576$
- $\ddot{\varphi}_{Pitch} = 2,8 \frac{^\circ}{s^2} \approx 0,0489$

Das Vorgehen bei der Berechnung der Beschleunigungen ist ähnlich dessen aus Abschnitt 4.3. Abweichend hierzu sind die lateralen und vertikalen Beschleunigungen sind bereits bekannt.

Mit den Beschleunigungen und der gegebenen Masse lassen sich die vom Rotorblatt

auf die Gestellpaare wirkenden Kräfte berechnen.

$$\begin{aligned}
 F_{ax,Offshore} &= m_{design} \cdot a_x \\
 &= 20,35t \cdot 1,7 \frac{m}{s^2} \\
 &= 34,595kN \\
 F_{ay,Offshore} &= m_{design} \cdot a_y \\
 &= 20,35t \cdot 4,5 \frac{m}{s^2} \\
 &= 91,575kN \\
 F_{az,Offshore} &= m_{design} \cdot a_z \\
 &= 20,35t \cdot 12,7 \frac{m}{s^2} \\
 &= 258,445kN
 \end{aligned}$$

Die Gestellpaare mit dem Rotorblatt werden durch die Schiffsbewegungen auch um ihren eigenen Schwerpunkt gedreht. Die daraus resultierenden Kräfte werden im Folgenden berechnet. Es werden die Massenträgheitsmomente  $J_{xs}$  und  $J_{zs}$  aus 4.3.2 verwendet.

Es liegen keine genauen Daten für die Position des  $COR$  vor. Eine Abschätzung aus Abbildung 1.4 ergibt die Koordinaten  $X_{COR} = 73,5m$ ,  $Y_{COR} = 0m$  und  $Z_{COR} = 5m$ .

Die Gestelle im Heck der Jack-Up-Barge (Tabelle A.5; P6) und die Gestelle seitlich am Schiff (Tabelle A.5; P7) werden separat betrachtet. Die Massenträgheiten, bezogen auf die Schiffsbewegungsachsen, ergeben sich mit dem Steinerschen Satz.

$$\begin{aligned}
 J_{Y,COR} &= J_{zs} + \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2} \cdot m \\
 J_{Y,COR,P6} &= J_{zs} + \sqrt{(X_{COR} - LCG_{P6} - R_{COG,Rotorblatt})^2 + (VCG_{P6} - Z_{COR})^2} \cdot m_{design} \\
 &= 8855016,4kgm^2 + \sqrt{(73,5m - 15,9m - 18m)^2 + (27,943m - 5m)^2} \cdot 20350kg \\
 &= 9786357kgm^2 \\
 J_{Y,COR,P7} &= \dots = 9332137kgm^2
 \end{aligned}$$

Es ergibt sich:  $J_{Y,COR,P6} > J_{Y,COR,P7}$ , es wird daher mit  $J_{Y,COR,P6}$  weiter gerechnet.

Aus den Trägheiten werden mit den Winkelbeschleunigungen Trägheitsmomente. Um Ungenauigkeiten in der Masseverteilung zu berücksichtigen, werden diese mit Sicherheitsbeiwerten ( $u_x = 1,3$ ) erhöht.

$$\begin{aligned}
 M_{Y,Pitch} &= J_{Y,COR} \cdot \ddot{\varphi}_{Pitch} \cdot u_x \\
 M_{Y,Pitch,P6} &= J_{Y,COR,P6} \cdot \ddot{\varphi}_{Pitch} \cdot u_x \\
 &= 9786357kgm^2 \cdot 0,0489 \frac{1}{s^2} \cdot 1,3 \\
 &= 622,119kNm
 \end{aligned}$$

Das Moment  $M_{Y,Pitch,P6}$  wird in ein Kräftepaar überführt, das entgegengesetzt in Tip- und Wurzelgestell eingeleitet wird. Der Hebelarm hierfür ist der halbe Gestellabstand  $\frac{1}{2} \cdot l_{Gestellabstand} = \frac{1}{2} \cdot 30,6m$ .

$$\begin{aligned}
 F_{z,J,Pitch} &= \pm \frac{M_{Y,Pitch}/2}{l_{Gestellabstand}/2} \\
 F_{z,J,Pitch,P6} &= \pm \frac{622,119kNm}{30,6m} \\
 &= \pm 20,331kN
 \end{aligned}$$

Für den Nachweis wird diese Kraft als mit der Schwerkraft wirkend betrachtet. Ein Abheben der Gestelle erfolgt, wenn die Kraft entgegen der Schwerkraft wirkt.

Die Rechnung für die Bewegung in Rollrichtung ist der in Pitchrichtung ähnlich.

$$\begin{aligned}
 J_{X,COR} &= J_{zs} + \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2} \cdot m \\
 J_{X,COR,P6} &= J_{xs} + \sqrt{(Y_{COR} - TCG_{P6})^2 + (VCG_{P6} - Z_{COR})^2} \cdot m_{design} \\
 &= 27966,8kgm^2 + \sqrt{(0m + 5,170m)^2 + (27,943m - 5m)^2} \cdot 20350kg \\
 &= 506782kgm^2 \\
 J_{X,COR,P7} &= \dots = 637511kgm^2
 \end{aligned}$$

Es ergibt sich:  $J_{X,COR,P6} < J_{X,COR,P7}$ , es wird daher mit  $J_{X,COR,P7}$  weiter gerechnet.

$$\begin{aligned}
 M_{X,Roll} &= J_{X,COR} \cdot \ddot{\varphi}_{Roll} \cdot u_x \\
 M_{X,Roll,P7} &= J_{X,COR,P7} \cdot \ddot{\varphi}_{Roll} \cdot u_x \\
 &= 637511kgm^2 \cdot 0,0576 \frac{1}{s^2} \cdot 1,3 \\
 &= 47,737kNm
 \end{aligned}$$

## 4.5. Massenkräfte beim Kranhub



Abbildung 4.7.: Kranhub eines Rotorblattes unter Verwendung eines Gestellteiles als Spreiztraverse für ein Vierlingsgehänge [14]

Abbildung 4.7 zeigt eine Möglichkeit das Rotorblatt in den Gestellen mit zwei Kranen zu heben. Ein Gestelloberteil wird in diesem Bild als Spreiztraverse genutzt, um das Heben zu vereinfachen.

### 4.5.1. Massenkräfte beim Kranhub der Einzelgestelle

Dieser Lastfall tritt ein, wenn ein einzelnes Rotorblatt mit einem Vierlingsgehänge an den Gestellen gehoben wird, ohne die oberen Gestellteile zu verwenden. Die Verwendung des oberen Gestellteiles reduziert die Querkräfte im unteren Gestellteil. Das obere Gestellteil ist durch seinen horizontalen Querbalken in Querrichtung sehr steif.

Die gehobene Masse  $W_L$  wird nach [ [9], Kapitel 2] ausgelegt. In der folgenden Rechnung wird entgegen der Quelle mit der erhöhten Masse  $m_{design}$  gerechnet, um die Sicherheit zu erhöhen. Es wird zudem mit den Sicherheitsfaktoren  $f_{CONT} = 1,10$  für berechnete Gewichte und  $f_{DAF} = 1,298$  für Massen unter  $1000t$  im ungeschützten Offshoreeinsatz gerechnet.

$$\begin{aligned}
 f_{DAF} &= 1,15 + 0,15 \cdot \left(1 - \frac{m_{design}/2}{1000}\right) \\
 &= 1,15 + 0,15 \cdot \left(1 - \frac{20,35t/2}{1000}\right) \\
 &= 1,298
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_L &= \frac{m_{design}}{2} \cdot g \cdot f_{CONT} \cdot f_{DAF} \\
 &= \frac{20,35t}{2} \cdot 9,81m/s^2 \cdot 1,10 \cdot 1,298 \\
 &= 142,5kN
 \end{aligned}$$

Für die Seilkraft des Kranseiles  $W'_L$  wird mit einem Sicherheitsfaktor  $f_{cons} = 1,35$  für Hebemittel gerechnet.

$$\begin{aligned}
 W'_L &= W_L \cdot f_{cons} \\
 &= 142,5kN \cdot 1,35 \\
 &= 192,4kN
 \end{aligned}$$

Die Seilkräfte werden wegen der asymmetrischen Öffnungswinkel der Vierlingsgehänge für Tip- und Wurzelgestell separat gerechnet.

#### Wurzelgestell

Der Schwerpunkt des Wurzelgestells liegt mittig, so dass die Seile symmetrisch zur Senkrechten sind. Angeschlagen werden die Gestellunterteile an den vier oberen Containerecken. Als Vierlingsgehänge ergibt sich ein Asymmetriesicherheitsfaktor von  $f_{SKL} = 1,25$  für die Seilkräfte und eine Ausgangslast je Seil von  $P_{RLW,Wurzel} = \frac{W'_L}{4} = 48kN$ . Zusätzlich kommt ein Sicherheitsfaktor von  $f_{COG} = 1,1$  hinzu, um mögliche Abweichungen des Schwerpunktes zu berücksichtigen. Für die Seilkräfte des Wurzelgestells  $P_{S,Wurzel}$ , wird mit einem Öffnungswinkel zwischen den Seilen zur Horizontalen von  $\alpha_{Wurzel} = 72^\circ$  gerechnet. Dieser ergibt sich für eine Seillänge von  $6m$ .

$$\begin{aligned}
 P_{S,Wurzel} &= \frac{P_{RLW,Wurzel} \cdot f_{COG} \cdot f_{SKL}}{\sin(\alpha_{Wurzel})} \\
 &= \frac{48kN \cdot 1,1 \cdot 1,25}{\sin(72^\circ)} \\
 &= 69,4kN
 \end{aligned}$$

#### Tipgestell

Der Schwerpunkt des Tipgestells mit dem Blattschnitt liegt, wie in Bild 4.2 dargestellt,  $l_1 = 1031mm$  zur Containerecke an der Vorderkante und  $l_2 = 2769mm$  zur Containerecke an der Hinterkante. Über das Aufstellen von Kräfte- und Momentengleichgewicht lassen sich die Ausgangslasten je Seil des Tipgestells  $P_{RLW,Tip,VK}$

und  $P_{RLW,Tip,HK}$  berechnen.

$$\begin{aligned}
 P_{RLW,Tip,VK} &= \frac{\frac{W'_L}{2} \cdot l_2}{l_1 + l_2} \\
 &= \frac{192,4kN}{2} \cdot \frac{2769mm}{1031mm + 2769mm} \\
 &= 70,1kN
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{RLW,Tip,HK} &= \frac{W'_L}{2} - P_{RLW,Tip,VK} \\
 &= \frac{192,4kN}{2} - 70,1kN \\
 &= 26,1kN
 \end{aligned}$$

Der Sicherheitsfaktoren  $f_{SKL} = 1,25$  und  $f_{COG} = 1,1$  werden auch hier genutzt. Die Öffnungswinkel betragen  $\alpha_{Tip,VK} = 80^\circ$  und  $\alpha_{Tip,HK} = 64,7^\circ$ . Dieser ergibt sich für eine Seillänge von  $6m$  an den vorderkantenseitigen Containerecken.

$$\begin{aligned}
 P_{S,Tip,VK} &= \frac{P_{RLW,Tip,VK} \cdot f_{COG} \cdot f_{SKL}}{\sin(\alpha_{Tip,VK})} \\
 &= \frac{70,1kN \cdot 1,1 \cdot 1,25}{\sin(80^\circ)} \\
 &= 97,9kN
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{S,Tip,HK} &= \frac{P_{RLW,Tip,HK} \cdot f_{COG} \cdot f_{SKL}}{\sin(\alpha_{Tip,HK})} \\
 &= \frac{26,1kN \cdot 1,1 \cdot 1,25}{\sin(64,7^\circ)} \\
 &= 39,7kN
 \end{aligned}$$

#### 4.5.2. Massenkräfte beim Kranhub des Gestellstapels

Als Stapel, mit einer maximalen Höhe von  $n = 3$ , dürfen die Rotorblätter in den Gestellen nur mit montierten oberen Gestellhälften unter der Verwendung einer Spreiztraverse gehoben werden. Diese verhindert die Einleitung von Querkraften in die Gestelle.

Die vier Hebepunkte des obersten Gestells werden für den Nachweis als verdrehbare und horizontal verschiebbare Lager angenommen. Die Rotorblätter werden durch senkrechte Kräfte  $P_{RLW}$  ersetzt.



## 4.6. Sicherung durch Abspannung

Um die Querkräfte besser ableiten zu können, bietet sich das seitliche Abspannen an. Abgespannt werden soll nach dem Schema in Abbildung 4.8. Diese gilt für die Einsatzfälle Lagerung an Land und Nearshore-Transport. Um diese Abspannung in dem rechnerischen Nachweis zu berücksichtigen, wird die Steifigkeit und die Raumrichtung der Abspannung benötigt.

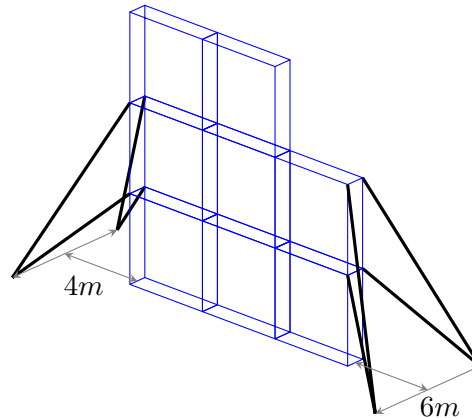


Abbildung 4.8.: Schematische Darstellung der seitlichen Abspannung für die Lagerung an Land und Nearshore-Transport

Bei dieser Abspannung haben die kurzen Abspannungen eine Länge von  $l_1 = 6m$  und die längeren eine Länge von  $l_2 = 9m$ . Unter der Annahme, dass dies als Kette oder Stange aus Stahl mit einem Durchmesser von  $d = 25mm$  und einem E-Modul von  $E_{Stahl} = 210 \frac{kN}{mm^2}$  ausgeführt ist, ergibt sich die folgende Federsteifigkeit:

$$c_1 = \frac{A_1 \cdot E}{l_1} \quad \approx 17,18 kN/mm$$

$$c_2 = \frac{A_2 \cdot E}{l_2} \quad \approx 11,45 kN/mm$$

Bei einer Höhe von  $4m$  bzw.  $8m$  der angeschlagenen Containerreihen, ergeben sich die Öffnungswinkel:

$$\begin{aligned} \alpha_{horizontal} &= 16,23^\circ \\ \alpha_{vertikal,4m} &= 38,85^\circ \\ \alpha_{vertikal,8m} &= 58,17^\circ \end{aligned}$$

Die berechneten Steifigkeiten und Winkel der Abspannungen lassen sich in die Berechnungsmodelle der Lastfälle einbringen, in denen eine Abspannung erforderlich ist.

## 4.7. Lastverteilung der Rotorblattauflagen

Die auftretenden Lasten wurden in Abschnitt 4 ermittelt. Für die Auslegung der Gestelle wird zusätzlich eine Lastverteilung zwischen den Gestellen und zwischen den Auflagen eines Gestells benötigt.

Genau lässt sich die Position der Windlast in Blattsehnenrichtung nicht bestimmen. Sie liegt in den meisten Fällen zwischen 25% und 50% Sehnenlänge. In dem Bereich liegt auch der Schwerpunkt des Rotorblattes. Zur Vereinfachung des Modells werden daher Wind- und Massenkräfte als auf den gleichen Punkt im Rotorblattschnitt wirkend angenommen.

Als weitere Vereinfachungen, da die realen Größen schwer abschätzbar sind, wird folgendes angenommen:

- Es wird Haftung zwischen Rotorblatt und den Auflagen angenommen.
- Die Auflagen nehmen nur Druckkräfte auf.
- Das Rotorblatt hat keine geometrischen Abweichungen zur Sollform durch Wärmedehnungen oder Bauabweichungen.
- Das Rotorblatt liegt in der Sollraumlage.
- Das Einlegen des Rotorblattes erfolgt ohne Stoß, der ein Verklemmen des Rotorblattes zur Folge haben könnte.
- Die Last, die in den Steg eingeleitet wird, wird nicht vom Gurt verteilt und wird auch nicht von der Schale mit getragen.

Zunächst wird die Lastverteilung am Tipgestell, für die getroffenen Annahmen, berechnet. In Abbildung 4.9 ist das freigeschnittene Rotorblatt aus Abbildung 3.5 zu sehen. Die Seilkräfte der Spanngurte werden vernachlässigt, da sie deutlich geringer sind als die wirkenden Massen- und Windkräfte. Die Kräfte  $F_Y$  und  $F_Z$  sind bekannte Größen, die anderen Unbekannte. Wie in Bild 4.2 zu sehen war, ist der Schwerpunkt im Tipgestell in Richtung der Vorderkante verschoben.

Kräfte in positiver  $Y$ -Richtung werden voll vom Auflager  $SS, VK$  aufgenommen. Ein Abheben des Rotorblattes tritt nicht ein. Daher kann das Auflager  $SS, VK$  keine Kräfte in  $Z$ -Richtung aufnehmen.

Für die Kräfte in negativer  $Y$ -Richtung ergibt sich:

$$\begin{aligned} \sum M_s \circlearrowleft : & \quad F_{DS, HK; Y} \cdot 306 \text{ mm} = F_{DS, VK; Y} \cdot 580 \text{ mm} \\ \sum Y \rightarrow : & \quad F_{DS, HK; Y} + F_{DS, VK; Y} = F_Y \end{aligned}$$

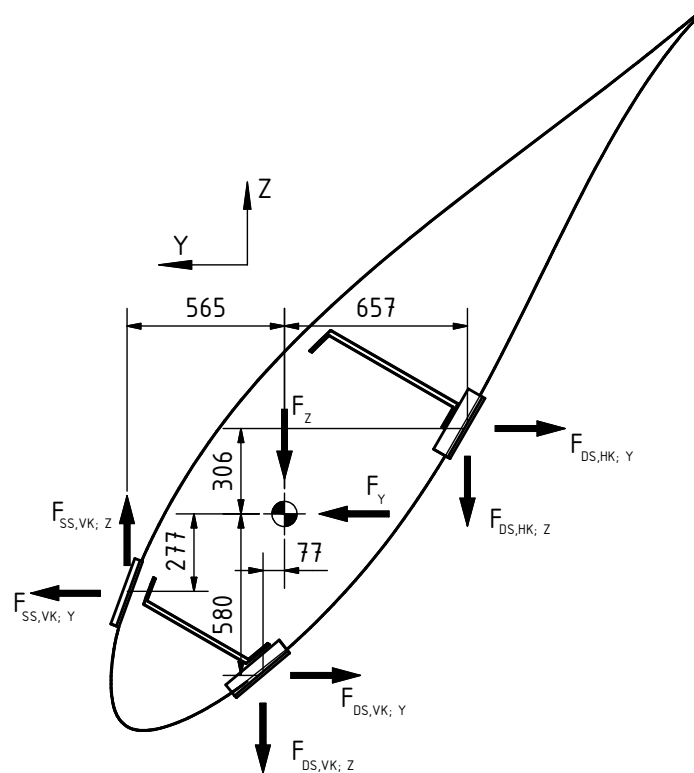


Abbildung 4.9.: Blattlastverteilung auf die Auflagen am Tipgestell

Für die Kräfte in negativer  $Z$ -Richtung ergibt sich:

$$\begin{aligned} \sum M_s \odot : & \quad F_{DS,HK;Z} \cdot 657\text{mm} = F_{DS,VK;Z} \cdot 77\text{mm} \\ \sum Z \uparrow : & \quad F_{DS,HK;Z} + F_{DS,VK;Z} = -F_Z \end{aligned}$$

Aufgelöst ergibt sich für die gesuchten Größen in Abhängigkeit der Gegebenen:

$$\begin{aligned} F_{DS,HK;Y} &= F_Y \cdot 0,656 \\ F_{DS,HK;Z} &= F_Z \cdot 0,105 \\ F_{DS,VK;Y} &= F_Y \cdot 0,345 \\ F_{DS,VK;Z} &= F_Z \cdot 0,895 \end{aligned}$$

Das freigeschnittene Rotorblatt im Wurzelgestell ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Schnittkräfte in  $Z$ -Richtung werden wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned} \sum Z \uparrow : & \quad F_{A1;Z} + F_{A2;Z} = -F_Z \\ \sum M_{A1} \odot : & \quad F_{A2;Z} \cdot 2338\text{mm} = F_Y \cdot 1169\text{mm} - F_Z \cdot 1169\text{mm} \end{aligned}$$

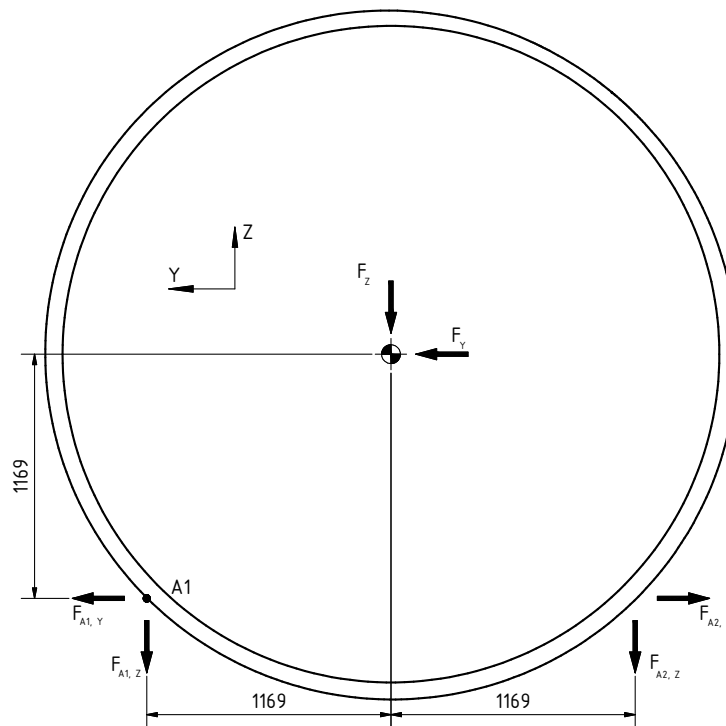


Abbildung 4.10.: Blattlastverteilung auf die Auflagen am Wurzelgestell

Da die Auflager nur Druckkräfte aufnehmen können, muss die Richtung von  $F_Y$  getrennt betrachtet werden. Für die Kräfte in negativer  $Y$ -Richtung ergibt sich:

$$\sum Y \rightarrow : \quad F_{A1,Y} = F_Y$$

Für die Kräfte in positiver  $Y$ -Richtung ergibt sich:

$$\sum Y \leftarrow : \quad F_{A2,Y} = F_Y$$

Aufgelöst berechnen sich die Schnittgrößen, für Kräfte in positiver  $Y$ -Richtung, zu:

$$\begin{aligned} F_{A1,Y} &= F_Y \\ F_{A1;Z} &= \frac{F_Z + F_Y}{2} \\ F_{A2;Z} &= \frac{F_Z - F_Y}{2} \end{aligned}$$

Für Kräfte in negativer  $Y$ -Richtung berechnen sich die Schnittkräfte zu:

$$\begin{aligned} F_{A2,Y} &= F_Y \\ F_{A2;Z} &= \frac{F_Z + F_Y}{2} \\ F_{A1;Z} &= \frac{F_Z - F_Y}{2} \end{aligned}$$

## 5. Nachweise

In Abschnitt 4 wurden die Lasten, die in die Gestelle geleitet werden, berechnet. Dieser Abschnitt wendet diese in den Berechnungsmodellen an.

Die Stabwerksberechnung der stapelbaren Transportgestelle erfolgt in dem Programm Inventor2013 mit den, in den vorherigen Kapiteln, ermittelten Lasten. Die betragsmäßig größte Spannung ist für jeden Lastfall gekennzeichnet.

Es werden die folgenden Lastfälle betrachtet. Dabei werden die Nachweise für Tip- und Wurzelgestell separat geführt.

- Kranhub am Untergestell
- Einzelgestell Offshore bei Rollbewegungen und Wind bei Pitchwinkel  $-47^\circ$
- Einzelgestell Offshore bei Rollbewegungen und Wind bei Pitchwinkel  $133^\circ$
- Einzelgestell Offshore bei Nickbewegungen und Wind auf die Flanschfläche
- Lagerung als Gestellstapel 3x3 an Land mit Wind bei Pitchwinkel  $-47^\circ$
- Lagerung als Gestellstapel 3x3 an Land mit Wind bei Pitchwinkel  $133^\circ$
- Gestellstapel 3x3 Nearshore bei Nickbewegungen und Wind auf die Flanschfläche
- Gestellstapel 3x3 Nearshore bei Rollbewegungen mit Wind bei Pitchwinkel  $-47^\circ$
- Gestellstapel 3x3 Nearshore bei Rollbewegungen mit Wind bei Pitchwinkel  $133^\circ$
- Kranhub Gestellstapel

Die Lastfälle der 3x3 Stapelung Nearshore und Lagerung an Land resultieren in höheren Lasten für die höchstbelasteten Gestelle, so dass die Lastfälle mit 2x2 Stapelung nicht nötig sind.

Bei der Stabwerksberechnung fiel auf, dass das Tipgestell für den Offshoretransport eine geringe Restsicherheit hat. Um die Rechnung besser einschätzen zu können, wird der hoch beanspruchte Teil als vereinfachter Balken analytisch nachgerechnet. Eine FEM-Rechnung des Gestellausschnittes und ein Nachweis der belasteten Schweißnaht ergänzen den Nachweis. Die FEM-Rechnung wird ebenfalls mit dem Programm Inventor2013 durchgeführt.

Für alle folgenden Nachweise werden zulässige Spannungen benötigt, die mit den berechneten verglichen werden können. Diese werden in Kapitel 5.1 berechnet. Der Vergleich erfolgt in Kapitel 5.4.

## 5.1. Zulässige Spannungen

Mit den aus GL 2007, Chapter IV-6-4, Section 10, Kapitel 3 [9] entnommen Werten für die Sicherheitsbeiwerte  $\gamma_g$  ergeben sich die zulässigen Spannungen für den Werkstoff 1.0045 mit einer Zugfestigkeit von  $R_e = 355 \frac{N}{mm^2}$ .

$$\text{Axialspannung: } \frac{R_e}{\gamma_{g,axial}} = \frac{355 \frac{N}{mm^2}}{1,45} = 245 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Biegespannung: } \frac{R_e}{\gamma_{g,bending}} = \frac{355 \frac{N}{mm^2}}{1,45} = 245 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Scherspannung: } \frac{R_e}{\gamma_{g,shear}} = \frac{355 \frac{N}{mm^2}}{2,16} = 164 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Vergleichsspannung: } \frac{R_e}{\gamma_{g,ivalent}} = \frac{355 \frac{N}{mm^2}}{1,25} = 284 \frac{N}{mm^2}$$

## 5.2. Stabmodell

Die Rechnung der Gestelle als Stabwerk stellt eine Möglichkeit der numerischen Nachrechnung dar, die mit geringem Rechenaufwand auskommt. Dies stellt eine Zeitersparnis für die große Zahl an verschiedenen Lastfällen dar.

Kleinere Details gehen bei der Gestellanalyse unter. Besonders die Übergänge zwischen den Profilen werden vereinfacht. Auch können nur Profile und keine Volumenkörper abgebildet werden.

Durch die kurzen Rechenzeiten der Gestellanalyse, sind auch häufige Modell Anpassungen möglich.

Alle Verbindungen in den folgenden Modellen, die mit Containerecken gelöst sind, werden als verdrehbare Verbindungen behandelt.

Die Auflagen der Rotorblätter werden nicht mit in das Stabwerk übernommen. Die Wirkpunkte der Auflagerkräfte sind auf den Schnittpunkten der Profilachsen.

Die Profile der Gestelle wurden nicht wie üblich mit Gehrungsschnitten aneinander gesetzt, sondern verlaufen entlang ihrer Stabwerkachsen. Diese Ungenauigkeit ist zu vernachlässigen, vielmehr erzeugt eine Stabwerkanalyse eines auskonstruierten Gestells viele fehleranfällige Sonderverbindungsknoten.

### 5.2.1. Kranhübe

#### Kranhub am Untergestell

In diesem Lastfall wird ein Rotorblatt mit zwei Kranen an den Untergestellen gehoben. Zum Anschlagen des Untergestells werden Seile verwendet.

In den Modellen werden die Auflagen des Rotorblattes mit verdrehbaren Lagern abgebildet. Am Wurzelgestell ziehen vier Kräfte  $P_{S,Wurzel}$  mit einem Winkel von  $72^\circ$  zur Horizontalen. Als maximale Spannung wird  $\sigma_{Wurzel,Kranhub,einzel} = 152,8 MPa$  ermittelt. Abbildung B.2 zeigt die vollständige Spannungsverteilung.

Der Modellaufbau des Tipgestells ist ähnlich dem des Wurzelgestells. Wie in Kapitel 4.5 berechnet wurde, sind die Zugkräfte nicht symmetrisch. Ihr Schnittpunkt liegt über dem außermittig liegenden Schwerpunkt des Gestells.

Abbildung B.1 zeigt die vollständige Spannungsverteilung. Als maximale Spannung wird  $\sigma_{Tip,Kranhub,einzel} = 230,4 MPa$  ermittelt.

#### Kranhub des Gestellstapels

In diesem Lastfall wird ein Stapel Rotorblätter mit zwei Kranen gehoben. Zum Anschlagen werden Spreiztraversen verwendet, die an den oberen Containerecken angeschlagen sind.

Die Anschlagpunkte der Kranseile am Gestell werden drehbar und verschiebbar behandelt. Die Lasten sind Kapitel 4.5 zu entnehmen.

Abbildung 5.1 zeigt die maximale Vergleichsspannung für den Lastfall, dass ein Sta-

pel Rotorblätter am Wurzelgestell gehoben wird. Eine Spannung von  $\sigma_{Wurzel,Kranhub,stapel} = 282,1 \text{ MPa}$  wird abgelesen.

Abbildung B.3 zeigt die maximale Vergleichsspannung für den Lastfall, dass ein Stapel Rotorblätter am Wurzelgestell gehoben wird. Eine Spannung von  $\sigma_{Tip,Kranhub,stapel} = 207,3 \text{ MPa}$  wird abgelesen.

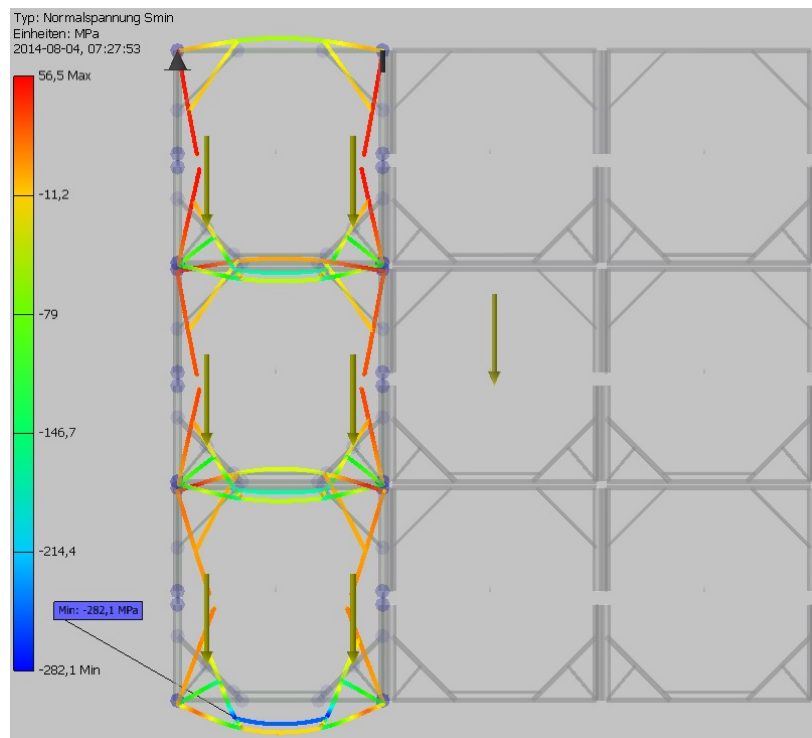


Abbildung 5.1.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Kranhub des Wurzelgestellstapel“

### 5.2.2. Einzelgestell Offshore

Die Nearshoregestelle müssen auch als Einsätze für Offshoregestelle ausgelegt sein. Dieser Einsatzfall wird in diesem Kapitel nachgerechnet. Die Kräfte und das Lastmoment werden in Kapitel 4.4 berechnet. Die Windlasten werden in Kapitel 4.2 ermittelt. Die seitlichen Windlasten werden mit den Kräften aus den Roll- und Hubbeschleunigungen überlagert. Die Beschleunigung durch Nickbewegungen wird mit der Windlast auf die Flanschfläche überlagert.

Die Spannungsarten mit den maximalen Spannungen für die einzelnen Lastfälle des Offshoretransportes sind in den Abbildungen B.15, B.13, B.16, B.14, B.17 und B.18 zu finden.

Aus den Abbildungen lassen sich die betragsmäßig maximalen Spannungen ablesen:

- $\sigma_{Tip,Offshore,133^\circ} = 243,8 \text{ MPa}$



- $\sigma_{Tip,Offshore,-47^\circ} = 229,6MPa$
- $\sigma_{Wurzel,Offshore,133^\circ} = 54,03MPa$
- $\sigma_{Wurzel,Offshore,-47^\circ} = 78,91MPa$
- $\sigma_{Tip,Offshore,Pitch} = 234,3MPa$
- $\sigma_{Wurzel,Offshore,Pitch} = 108,3MPa$

### 5.2.3. Lagerung gestapelt an Land

An Land lagernd sind die Belastungen für die Gestelle die statische Rotorblattmasse und die Windlasten. Die seitliche Abspannung wurde durch einachsige Lager mit einer Nachgiebigkeit definiert. Zusätzlich können diese nachgiebigen Lager nur Zugkräfte aufnehmen.

Die Spannungsarten mit den maximalen Spannungen für die einzelnen Lastfälle der Lagerung an Land sind in den Abbildungen 5.2, B.4, B.5 und B.6 zu finden.

Die Lastfälle, in denen der Gestellstapel an Land von der Wurzel angeströmt wird, entfallen. Die wirkenden Kräfte sind die statische Rotorblattmasse und die Windlast  $F_{w,30m/s} = 6,305kN$  auf die Flanschfläche. Diese Kräfte sind geringer als die für den Lastfall „Transport Nearshore als Stapel“. Hier beträgt die kleinste Kraft in  $X$ -Richtung  $F_{X,Pitch} = 22,688kN$ . Auch die Kräfte in  $Z$ -Richtung sind hier größer. Die Auswirkungen einer seitlichen Abspannung werden beim Nearshore Transport ebenso betrachtet.

Aus den Abbildungen lassen sich die betragsmäßig maximalen Spannungen ablesen:

- $\sigma_{Tip,Land,133^\circ} = 209,2MPa$
- $\sigma_{Tip,Land,-47^\circ} = 139,7MPa$
- $\sigma_{Wurzel,Land,133^\circ} = 122,6MPa$
- $\sigma_{Wurzel,Land,-47^\circ} = 88,04MPa$

### 5.2.4. Transport Nearshore als Stapel

In diesem Lastfall werden, ähnlich wie für den Lastfall Offshoretransport, die Lasten aus Windanströmung und Schiffsbewegungen überlagert. Der Unterschied besteht darin, dass jedes Gestell anders belastet ist. Die Windlasten nehmen mit zunehmender Gestelltiefe ab, die Lasten durch Rollbewegungen nehmen mit Entfernung zum  $COR$  zu. Die Momente, die durch die Winkelbeschleunigung gegen das Massenträgheitsmoment entstehen, werden auf den Rotorblattaufgaben verteilt.

Die Spannungsarten mit den maximalen Spannungen für die einzelnen Lastfälle des

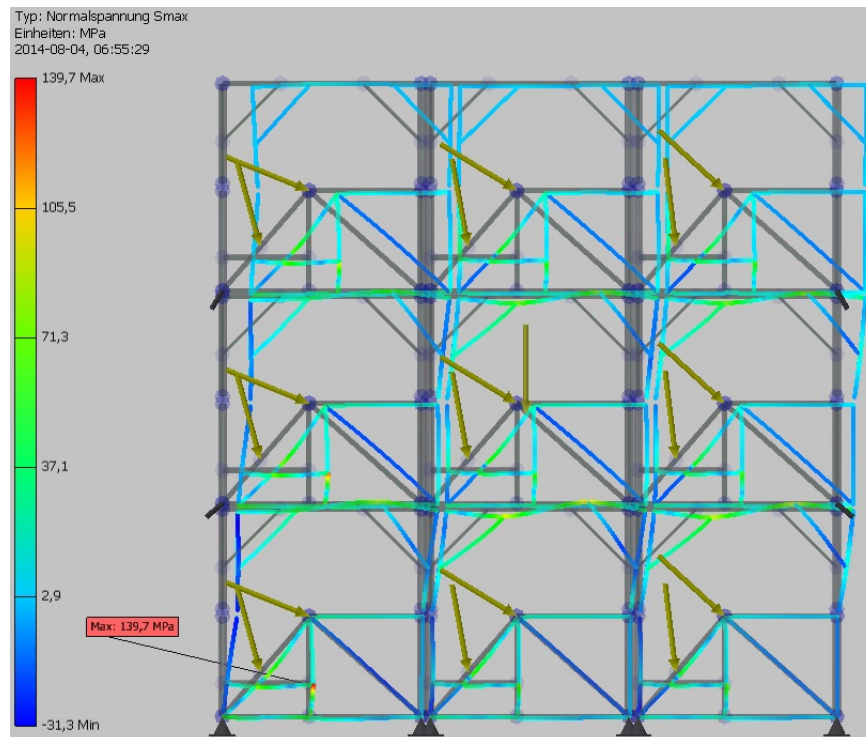


Abbildung 5.2.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Lagerung an Land im Stapel mit Anströmung aus  $-47^\circ$  Pitch“

Offshoretransportes sind in den Abbildungen B.7, B.8, B.9, B.10, B.11 und B.12 zu finden.

Aus den Abbildungen lassen sich die betragsmäßig maximalen Spannungen ablesen:

- $\sigma_{Tip,Nearshore,133^\circ} = 163,1MPa$
- $\sigma_{Tip,Nearshore,-47^\circ} = 174,4MPa$
- $\sigma_{Wurzel,Nearshore,133^\circ} = 164,1MPa$
- $\sigma_{Wurzel,Nearshore,-47^\circ} = 62,08MPa$
- $\sigma_{Tip,Nearshore,Pitch} = 240,5MPa$
- $\sigma_{Wurzel,Nearshore,Pitch} = 75,8MPa$

### 5.3. Detailrechnung des Tipgestells

Die vorderkantenseitigen senkrechten Profile des Tipgestells waren in der Nachrechnung mit dem Stabwerkprogramm hoch belastet. Um die Größenordnung der Rechnung besser einschätzen zu können, wird dieses Detail gesondert nachgerechnet.

Abbildung 5.3 zeigt die genannten Träger. Von links nach rechts sind die Einbaulage, die Bemaßung von für die Rechnung wichtiger Längen und rechts das Detail „C“, das die Schweißnaht zeigt, zu erkennen.

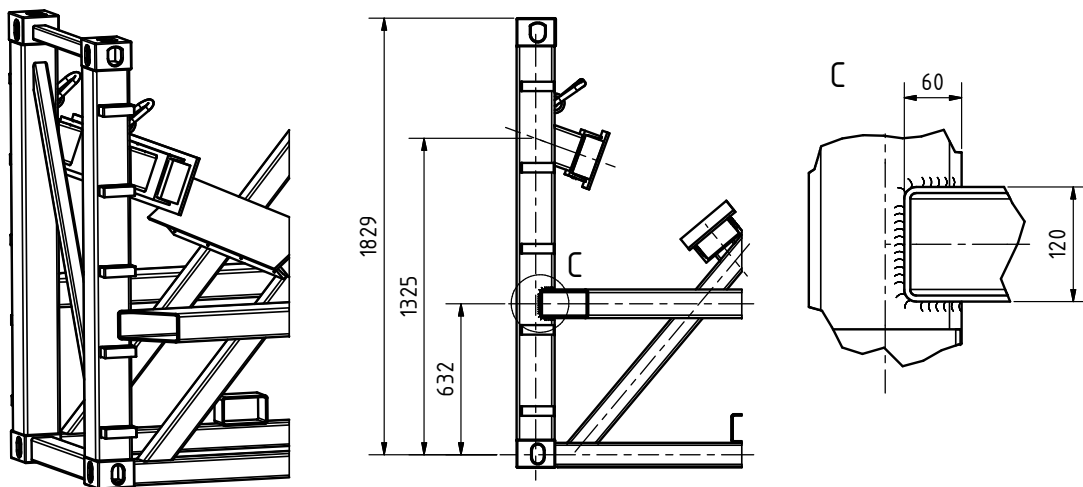


Abbildung 5.3.: Details am Tipgestell für die analytische Nachrechnung

Die erste Detailrechnung ist die Abschätzung der Verformung über eine Biegelinie.

#### 5.3.1. Rechnung als Biegelinie

Das verwendete Profil ist ein warmgefertigtes Vierkanthohlprofil nach EN 10 210 mit den Abmessungen  $160 \times 160 \times 6,3\text{mm}$ .

Mit diesen Abmessungen ergibt sich ein Flächenträgheitsmoment von  $I = 1500\text{cm}^4$ . Der verwendete Werkstoff ist ein Stahl, dessen E-Modul mit  $E_{\text{Stahl}} = 210\text{GPa}$  angenommen wird.

Die angreifende Kraft  $F_{VK,Offshore}$  setzt sich zusammen aus der Windlast und den Kräften durch Schiffsbewegungen.

$$\begin{aligned}
 F_{VK,Offshore} &= (F_{D,133^\circ,25\frac{m}{s}} \cdot 0,7 + F_{ay,Offshore} \cdot 0,5) \cdot 0,5 \\
 &= (73,4\text{kN} \cdot 0,7 + 91,575\text{kN} \cdot 0,5) \cdot 0,5 \\
 &= 48,584\text{kN}
 \end{aligned}$$

Abbildung 5.4 zeigt das als beidseitig gelenkig gelagerten Balken vereinfachte Profil.

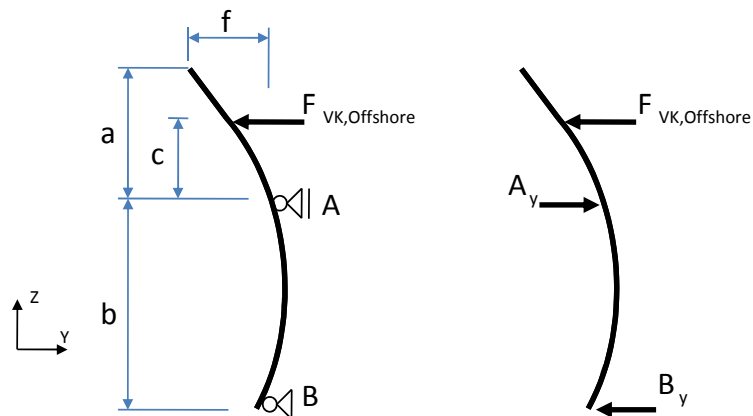


Abbildung 5.4.: Biegelinie des Balkens

Die Werte für die Abmessungen  $a, b, c$  sind Abbildung 5.3 zu entnehmen. Zunächst wird die Durchbiegung am Kraftangriffspunkt des Balkens  $f_c$  bestimmt.

$$\begin{aligned}
 f_c &= \frac{F_{VK,Offshore} \cdot c^2 \cdot (c + b)}{3 \cdot E \cdot I} \\
 &= \frac{48,584kN \cdot (69,3cm)^2 \cdot 132,5cm}{3 \cdot 210Gpa \cdot 1500cm^4} \\
 &= 3,27mm
 \end{aligned}$$

Die Auslenkung zur Vertikalen  $\alpha_c$  am Kraftangriff wird für die Extrapolation der Biegelinie benötigt.

$$\begin{aligned}
 \tan(\alpha_c) &= \frac{F_{VK,Offshore} \cdot a \cdot (2b + 3c)}{6 \cdot E \cdot I} \\
 &= \frac{48,584kN \cdot 50,4cm \cdot (63,2cm \cdot 2 + 69,3cm \cdot 3)}{6 \cdot 210Gpa \cdot 1500cm^4} \\
 &= 0,00433
 \end{aligned}$$

Die Verschiebung der Containerecke am Ende des Profils  $f_a$  ergibt sich aus der Fortführung der Auslenkung  $\alpha_c$  zusammen mit der Verschiebung  $f_c$ .

$$\begin{aligned}
 f_a &= f_c + (a - c) \cdot \sin(\alpha_c) \\
 &= 3,27mm + (1829mm - 1325mm) \cdot \sin(0,248^\circ) \\
 &= 5,45mm
 \end{aligned}$$

Die Auslegung als gelenkig gelagerter Balken erzeugt eine größere Auslenkung als die drehsteife Einspannung. Als Überprüfung der Größenordnung reicht sie aus.

### 5.3.2. Nachweis der höchstbelasteten Schweißnaht

Die Gabelstaplertasche am Tipgestell ist mit dem senkrechten Profil verschweißt. Diese Schweißnaht ist hohen Schubkräften ausgesetzt und wird genauer nachgerechnet.

Zunächst wird die Kraft  $F_y$  berechnet, die die Naht halten können muss. Rechts in Abbildung 5.4 ist das Freikörperbild des Trägers zu sehen.

Ein Momentengleichgewicht um den Punkt  $B$  ergibt die gesuchte Kraft  $A_y$ .

$$A_y = \frac{F \cdot (c + b)}{b} = \frac{48,584kN \cdot 1325mm}{632mm} = 101,85kN$$

Es wird vereinfacht mit einer gleichmäßigen Schubspannung über die Schweißnahtlänge gerechnet [5]. Mit einer Schweißnahtdicke von  $a = 0,7 \cdot 6,3mm = 4,41mm$  und den in Abbildung 5.3 angegebenen Schweißnahtlängen kann die Schweißnahtfläche  $A_{Naht}$  berechnet werden.

$$\begin{aligned} A_{Naht} &= a \cdot 2 \cdot (60mm + 120mm) \\ &= 4,41mm \cdot 2 \cdot (60mm + 120mm) \\ &= 1587,6mm^2 \end{aligned}$$

Aus dieser Fläche ergibt sich mit der Schubbelastung  $A_y$  so eine Schubspannung  $\tau$ .

$$\tau = \frac{A_y}{A_{Naht}} = \frac{101,85kN}{1587,6mm^2} = 64,15 \frac{N}{mm^2}$$

In diesem Lastfall tritt neben der Schubspannung keine weitere Spannung auf, so dass auf die Überlagerung verschiedener Spannungen verzichtet werden kann und daher die Schweißnahtspannung  $\sigma_w = \tau$  direkt mit der zulässigen Spannung verglichen werden kann.

Für den Werkstoff  $S355$ , Ausführung als Kehlnaht und Schubbelastung ergibt sich eine zulässige Spannung  $\sigma_{w,zul} = 95 \frac{N}{mm^2}$  [3].

Die Restsicherheit  $S$  berechnet sich aus dem Verhältnis von  $\sigma_{w,zul}$  zu  $\sigma_w$ .

$$S = \frac{\sigma_{w,zul}}{\sigma_w} = \frac{95 \frac{N}{mm^2}}{64,15 \frac{N}{mm^2}} = 1,48 \quad (5.1)$$

Diese Restsicherheit ist klein. In Kapitel 5.3.3 wird eine Möglichkeit vorgestellt, die Spannung in der Schweißnaht zu reduzieren.

### 5.3.3. FEM-Rechnung am Tipgestell

Die Verschiebung eines Profil am Tipgestell wurde mit einer analytischen Rechnung berechnet und dessen Verbindung zu einem anderen Profil wurde nachgewiesen. Eine FEM-Rechnung vereint beides zu einer Rechnung.

Es wurde ein vereinfachtes Berechnungsmodell erstellt. Die unteren Containerecken und die gekürzten Gabelstaplertaschen wurden an ihren Enden fest eingespannt. Das Auflager des Rotorblattes wurde entfernt, da es nicht zur Stabilität des Profils beiträgt.

Als Last wurden die kurzen Profilstücke mit der in 5.3.1 ausgerechneten Last der VK-Auflage  $F_{VK,Offshore}$  beaufschlagt.

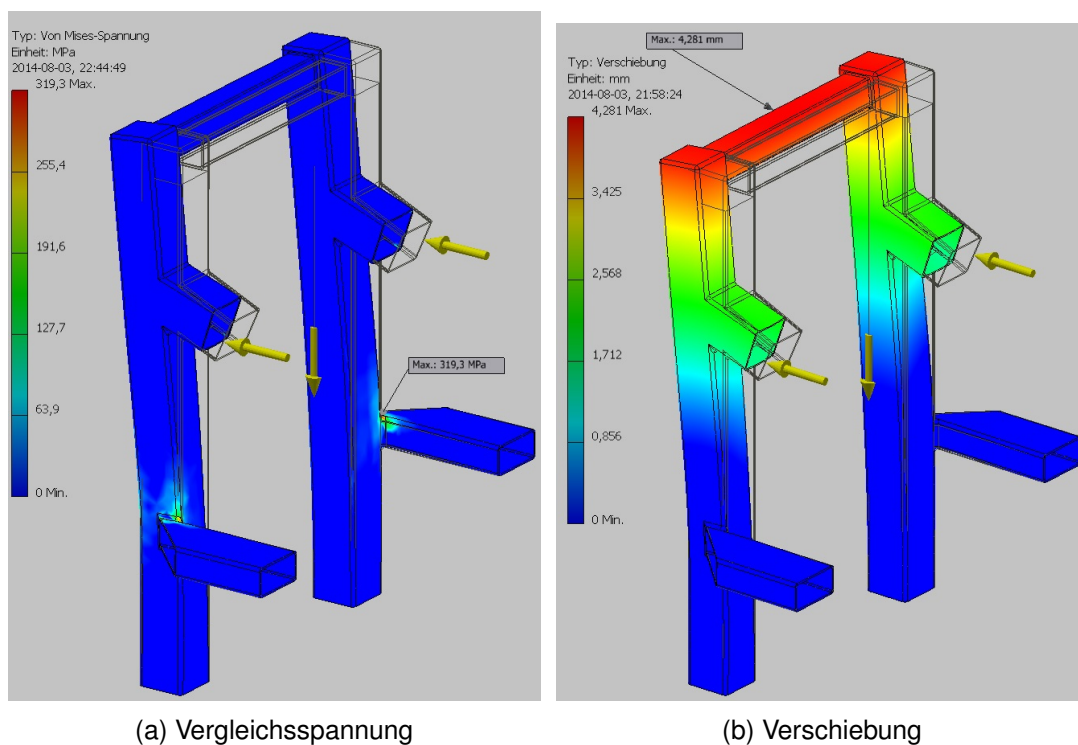


Abbildung 5.5.: Ergebnisse der FEM-Analyse des Tipgestells

Abbildung 5.5b zeigt die Verschiebung im FEM-Modell. Die in diesem Modell berechnete Verschiebung liegt nah an der analytische Verformung.

Abbildung 5.5a zeigt die Vergleichsspannung im FEM-Modell. Dieses Ergebnis weicht von dem analytischen ab. Das FEM-Modell berechnet eine maximale Vergleichsspannung von  $319,3 \frac{N}{mm^2}$ . Nach den zulässigen Spannungen aus Kapitel 5.1 ist eine Vergleichsspannung von  $284 \frac{N}{mm^2}$  zulässig. Demnach wäre die errechnete Spannung nicht zulässig.

Die Berechnung erfolgte für den Fall des Offshoretransportes ohne die Verwendung des oberen Gestellteiles. Soll der obere Gestellteil auch weiterhin nicht verwendet werden und das Gestell nicht angepasst werden, müssen weitere Stützstellen ge-

schaffen werden.

In Abschnitt 3 wurde bereits über die Containerecken als Möglichkeit, die Nearshoregestelle in den Offshoregestellen zu fixieren gesprochen. In einer neuen Rechnung wurden die oberen Containerecken drehbar gelagert. Abbildung 5.6 zeigt die neuen Vergleichspannungen. Diese liegen im zulässigen Bereich. Auch ist die Schweißnaht so nur schwach belastet.

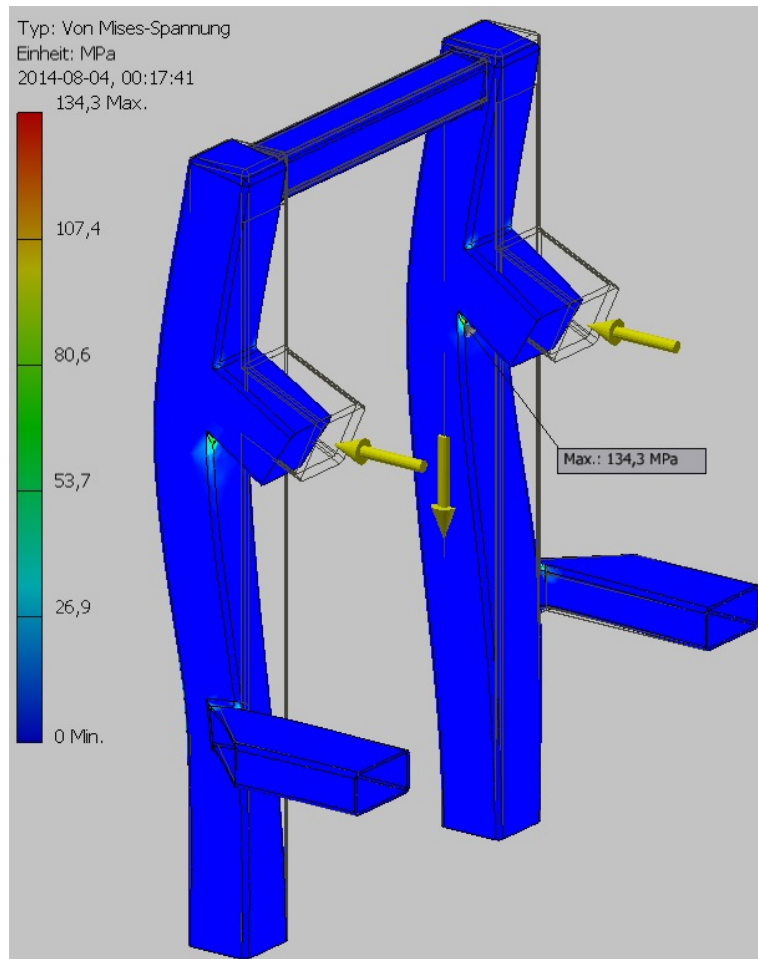


Abbildung 5.6.

## 5.4. Zusammenfassung der Nachweise

Dieses Dokument umfasst verschiedene Methoden des Nachweises der Gestellfestigkeit. Diese Methoden weisen alle Modellierungsvereinfachungen auf. Die Konstruktion anhand der ihr von den Methoden zugesprochenen Restsicherheiten einzuschätzen ist ein wichtiger Schritt. Da nur die Stabwerkmodellierung für alle Lastfälle durchgeführt wurde, wird diese als Optimierungsindikator der Konstruktion verwendet.

In Kapitel 5.1 werden die zulässigen Spannungen aufgeführt. Der Vergleich mit den maximalen Spannungen die in Tabelle 5.1 für Tip- und Wurzelgestell zusammengetragen sind, ergibt die Restsicherheit.

Die Tabelle zeigt, dass das Wurzelgestell beim Kranhub im Stapel hoch belastet ist. Die Spannungen sind geringer als die Zulässigen. Die Vergleichsspannung hat dabei fast keine Restsicherheit.

Auch für das Tipgestell ist der Kranhub im Stapel eine hohe Belastung. Für den Kranhub sind die Sicherheitsbeiwerte in der Rechnung hoch angesetzt, so dass die Gestelle für den geplanten Zweck eingesetzt werden können.

Die Gestelle gelten als Hebemittel. Als solche muss jedes Gestell vor Inbetriebnahme mit einer Prüfkraft belastet werden.

Tabelle 5.1.: Zusammenfassung der maximalen Spannungen

Gestell	Spannungsart	maximale Spannung $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Lastfall	Sicherheit
Wurzel	Axialspannung	185	Kranhub im Stapel	1,32
	Biegespannung	230,1	Kranhub im Stapel	1,06
	Scherspannung	101	Kranhub im Stapel	1,62
	Vergleichsspannung	282,1	Kranhub im Stapel	1,01
Tip	Axialspannung	95,13	Nearshore mit Nickbewegung	2,58
	Biegespannung	203,8	Kranhub im Stapel	1,20
	Scherspannung	74,49	Kranhub im Stapel	2,20
	Vergleichsspannung	243,8	Offshore, Wind 133° <i>Pitch</i>	1,16



## 6. Bedienungshinweise

Der Inhalt dieses Abschnittes ist keine vollständige Bedienungsanweisung. Er fasst einige Hinweise zusammen, die für die sichere Verwendung der Gestelle, erforderlich sind. Die Hinweise sind als Ergänzung zum Abschnitt 2 zu sehen, in dem die zulässigen Randbedingungen für den Einsatz der Transportgestelle aufgeführt sind.

### 6.1. Positionierung der Rotorblätter in den Gestellen

Das Gestellpaar besteht aus einem Tip- und einem Wurzelgestell, deren Abstand zu einander und am Rotorblatt möglichst genau eingehalten werden sollte, um die Stapelbarkeit der Gestelle und die Unversehrtheit des Rotorblattes sicher zu stellen.

- Lage Wurzelgestell: Abstand Anfang Gestell bis Anfang Blatt =  $400mm \pm 5mm$
- Lage Tipgestell: Abstand Mitte zu Mitte der beiden Gestelle =  $30950mm \pm 5mm$
- Sollen die Gestelle nicht gestapelt werden, ändert sich die Toleranz des Tipgestells auf  $30950mm \pm 300mm$

Die Verspannung der Rotorblätter in den Gestellen erfolgt mit Spanngurten.

- Am Tipgestell ist ein Endkantenschutz zu verwenden. Dieser kann als gekantetes Blech mit einer Gesamtlänge von  $1000mm$  und einer Blechdicke von  $3mm$  ausgeführt werden. Die Geometrie kann wie in Abbildung 6.1 dargestellt ausgeführt werden. Zwischen Rotorblatt und Endkantenschutz ist eine  $20mm$  dicke  $0,75m \times 1,1m$  Neoprenmatte zu legen.
- An den Gestellen sind die D-Ringe mit einer Nennlast von  $3t$  zu verbauen
- Die Spanngurte müssen eine Nennlast von mindestens  $1,5t$  haben.
- Beim Lösen des Blattes ist darauf zu achten, dass weder der Kantenschutz noch die Spanngurte herunter fallen und Personen oder andere Rotorblätter zu Schaden kommen.

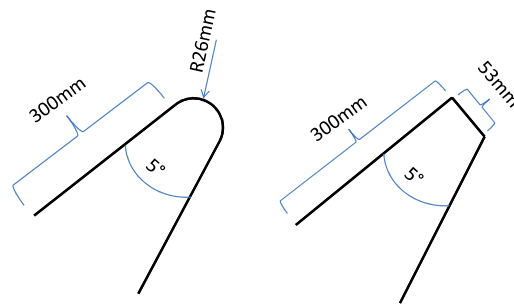


Abbildung 6.1.: Mögliche Variationen des Endkantenschutzes für das Tipgestell

## 6.2. Innerbetrieblicher Transport

Der innerbetriebliche Transport erfolgt mit einem Flurförderfahrzeug und einem Tipfahrgewagen bei angeschnallten Gestellen. Der Tipfahrgewagen hält das Blatt an der Transportverstärkung bei Radius  $48m$  (dieser ist mit einem Kettensymbolauf dem Rotorblatt markiert). Das Flurförderfahrzeug hebt die Wurzel von innen mit einem speziellen Hebewerkzeug, so dass das Tipgestell sich vom Boden löst. Beim Fahren hängen die Gestelle am Rotorblatt.

Alternativ kann das Tipgestell mit den Containerecken auf einem Fahrgestell befestigt werden. Die innerbetrieblichen Transportmöglichkeiten sind Vorschläge. Alternative Transporte sind möglich.

## 6.3. Kranhub

Der Kranhub erfolgt über die oberen Containerecken des unteren Gestellteiles oder über die oberen Containerecken des oberen Gestellteiles. Wird an dem oberen Gestellteil gehoben, müssen für die Verbindung zwischen den Gestellteilen geeignete Twistlocks verwendet. Gehoben werden können die Gestelle einzeln oder als Stapel von bis zu drei Gestellen zusammen mit den Blättern.

Der Schwerpunkt des Wurzelgestells liegt mittig. Beim Heben des Wurzelgestells darf ein Öffnungswinkel der Hebesaile von  $72^\circ$  zur Horizontalen nicht unterschritten werden. Dieser Winkel stellt sich bei der Verwendung von Gurten mit einer Länge von  $6m$  ein.

Der Schwerpunkt des Tipgestells (mit Blatt) liegt ca.  $1030mm$  von der Außenkante der nasenseitigen Containerecken. Der Mindestwinkel der nasenseitigen Saile ist  $80^\circ$ . Die Saile an der Hinterkante des Wurzelgestells müssen mindestens einen Öffnungswinkel von  $64,7^\circ$  zur Horizontalen haben.

Als Last kann an den Tip- und den Wurzelgestellen von einer Last von je  $10t$  pro Gestell mit Blatt ausgegangen werden.

Bei der Verwendung einer dafür ausgelegten Traverse und den folgenden Randbe-

dingungen kann der Blattstapel auch im Ganzen angehoben werden:

- Verwendung von Twistlocks mit ausreichender Zugtragfähigkeit
- Kein Einleiten von Querkräften
- Lagetoleranz der Gestelle untereinander sind eingehalten
- Kein Zug an den Gestellen in Blattachsrichtung
- Keine Schiffsbewegung

## 6.4. Seetransport

Der Seetransport kann als gestapeltes, verspanntes Paket oder einzeln erfolgen. In der gestapelten Variante ist darauf zu achten, dass eine maximale Stapelhöhe von drei nicht überschritten wird. Die Anzahl der Gestelle in der Stapelbreite muss dabei mindestens der Stapelhöhe entsprechen. Dies gilt auch für das Aufbrechen des Stapels durch Entnahme von Rotorblättern.

Um starken Querkräften entgegen zu wirken, wird empfohlen den Gestellstapel abzuspannen. Dafür sind sowohl die Tip- als auch die Wurzelgestelle beidseitig abzuspannen. Es sind zum Abspannen die vier äußeren Containerecken der äußeren Gestelle in der zweiten Lage zu verwenden. Das Abspannschema ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

Abspannung: Horizontal:	<i>4000mm</i>
Von der Mitte zu beiden Seiten:	<i>3000mm</i>
Kraft pro Abspannung:	<i>4t</i>
Art der Abspannung: Ketten oder Stangen	
Lasten an den Containerecken: Senkrecht	<i>24t</i>
Quer	<i>6t</i>

## 6.5. Seetransport Offshore

Die Gestelle sind im Offshorebetrieb nicht gestapelt vorgesehen. Einzeln können sie genutzt werden. Alternativ können die Gestelle als Inlay in größeren Gestellen verwendet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Containerecken fest eingespannt werden und keine Kräfte vom äußeren Gestell auf das innere übertragen werden.

Die Auslegungslasten sind in Abschnitt 2 zu finden.

## 6.6. Entnahme aus den Gestellen

Die Entnahme der Rotorblätter aus den Gestellen darf nur mit geeigneten Hebewerkzeugen erfolgen.

Die Wurzel kann mit einem C-Haken mit ausreichender Traglast an der Innenseite der Wurzel oder einem, um das Blatt geschlagenen, Gurt angehoben werden.

An Radius  $48m$  (Markierung mit Kettensymbol) kann das Blatt mit einer passenden Nasenschale und einem Endkantenschutz angehoben werden. Der verstärkte Bereich ist  $2500mm$  breit ( $1250mm$  beidseitig der Kettenmarkierung).

Die Endkante ist sehr empfindlich. Bei Kraffteinleitung ohne Schutz kann diese brechen.

## 6.7. Lagerung Onshore

Die Rotorblätter können an Land in den Gestellen liegend gelagert werden. Die Lagerung kann als gestapeltes und verspanntes Paket oder einzeln erfolgen. In der gestapelten Variante ist darauf zu achten, dass eine maximale Stapelhöhe von drei nicht überschritten und eine Stapelbreite von mindestens Stapelhöhe eingehalten wird. Dies gilt auch für das Aufbrechen des Stapels durch Entnahme von Rotorblättern.

Um starken Seitenwinden entgegen zu wirken, wird empfohlen den Gestellstapel abzuspannen. Das Abspannschema entspricht dem Nearshore Transport und ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Statt eine Abspannung zu verwenden, kann der Stapel auch aufgebrochen werden und die Gestelle einzeln gelagert werden.

Als maximale Windgeschwindigkeit wurde für die Auslegung mit  $30m/s$  gerechnet.

## 6.8. Personensicherung

Für die Entnahme von Blättern kann es möglich sein, dass Personen auf die Gestelle oder Gestellstapel steigen müssen. Beim Besteigen der Gestelle ist ab einer Höhe von  $2,5m$  zum Boden eine Absturzsicherung zu verwenden.

## 7. Ausblick

Die Gestelle werden mit großem Erfolg für die Auslieferung eingesetzt. Mit Abschluss des Baus der Windparks „Global Tech I“ und „Trianel Windpark Borkum“ werden sie nur für einen möglichen Tausch der Rotorblätter an den Windenergieanlagen als Transporthilfe benötigt.

Als nächstes Projekt wird der Blatttyp „M5000-135“ anlaufen. Eine Anpassung der Gestelle an den neuen Blatttyp wird Ressourcen schonen. Das neue Rotorblatt ist mit einer Länge von  $66m$  und einem Gewicht von etwa  $25t$  bedeutend länger und schwerer als das Rotorblatt, für das diese Gestelle entwickelt wurden. Als weitere Änderungen, die den Umbau beeinflussen, sind die starke Vorbiegung<sup>1</sup> von  $4m$  und die geringe Steifigkeit des Rotorblattes zu nennen. Auch ist die Wurzel beim neuen Blatt um ca.  $200mm$  breiter.

Das Wurzelgestell lässt sich mit einer Verbreiterung und Erhöhung anpassen. Zusammen mit höheren Auflagen der Wurzel könnten diese Gestelle für die weitere Nutzung umgebaut werden.

Das Tipgestell ist, wenn es mit einem ähnlichen inneren Stabwerk versteift werden soll, um die Vertikalachse zu drehen. Das Rotorblatt wird so auf der Druckseite liegen und der vorgebogene Tip nach oben zeigen. Tip- und Wurzelgestell gleich groß zu gestalten macht das Stapeln und das Ausrichten des Stapels einfach und sollte beibehalten werden. Das neue Tipgestell muss so dem Wurzelgestell in der Größe angepasst werden.

Eine andere Drehung um die Längsachse ist auch denkbar. Das Drehen des Rotorblattes ist aufwändig und es kann durch Unachtsamkeit leicht zu Beschädigungen des Rotorblattes kommen. Das Rotorblatt auf der Saugseite zu lagern und zu transportieren reduziert die Höhe und ist für den Straßentransport interessant. Auch sollte darauf geachtet werden, dass die Lagergestelle auf dem Betriebsgelände und die Transportgestelle die gleichen Verdrehwinkel vom Rotorblatt vorsehen.

Haben Lager- und Transportgestelle die gleichen Verdrehwinkel, kann über ein Kassetensystem<sup>2</sup>, in dem das Rotorblatt an definierten Stellen liegt, nachgedacht werden. Als Hebe- und Haltepunkte würden sie die Logistik vereinfachen.

---

<sup>1</sup>Vorbiegung eines Rotorblattes bedeutet, dass der Tip nicht mittig zur Flanschfläche, sondern zur Druckseite verschoben positioniert ist. Dies vergrößert den Abstand zwischen Turm und Blattspitze. So kann das Rotorblatt weicher ausgelegt werden. Die besseren Dämpfungseigenschaften reduziert die Lasten für die Gondel und die Rotorblätter.

<sup>2</sup>Dies ist eine auf die Rotorblattkontur angepasste, zweiteilige Schale, die verspannt wird. An der Außenseite lassen sich Ösen für verschiedene Aufgaben anbringen.

## 7. AUSBLICK

---

Das Rotorblatt so flach gedreht zu lagern und zu transportieren hat den Nachteil, dass es deutlich breiter wird. Auch nehmen die Windlasten für *Lift* deutlich zu; die Windlasten in Windrichtung nehmen dabei ab.

Wird das Rotorblatt flach transportiert, sind auch andere Verschachtelungen möglich. Ein Möglichkeit ist es die Rotorblätter in sich abwechselnden Ausrichtungen auf einander zu stapeln. Dies würde eine sehr hohe Flächennutzung des Stapels bedeuten. Diese Form der Verschachtelung war für dieses Rotorblatt nicht möglich, da eine Forderung in Abschnitt 2 die Verdrehung aus der Formlage war.

Die Wahl zwischen den Gestellformen für das neue Rotorblatt ist eine finanzielle Entscheidung. Zu bedenken ist zudem: Sind die alten Gestelle an das neue Rotorblatt anpassbar und mit welchem Aufwand? Welche Stapelhöhe ist so erreichbar? Welche Kosten entstehen durch die Entwicklung der benötigten, neuen Hebe- und Logistikmittel?

Die gewonnenen Erfahrungen bei der Auslegung und der Handhabung der bestehenden Transportgestelle werden sich positiv auf die Entwicklung der neuen Transportgestelle auswirken.

## A. Tabellen

Tabelle A.1.: Tabelle mit Einheitswerten für Lift und Drag in Abhängigkeit des Pitchwinkels.  $ACL$  und  $ACD$  geben die aerodynamischen Schwerpunkte an.

Pitch	$F_{Lift}$	$ACL$	$F_{Drag}$	$ACD$
[°]	$[\frac{kN}{m^2/s^2}]$	[m]	$[\frac{kN}{m^2/s^2}]$	[m]
-173	-0,018	-5,531	0,010	8,322
-150	0,084	25,282	0,045	24,823
-100	0,040	21,590	0,132	23,671
-50	-0,072	25,776	0,120	22,632
-20	-0,093	24,436	0,053	19,720
-10	-0,091	25,866	0,026	14,865
2	-0,022	-3,721	0,011	7,365
20	0,142	26,007	0,015	20,839
40	0,116	24,441	0,055	24,046
70	0,079	23,203	0,123	23,823
100	0,010	12,745	0,152	23,327
150	-0,077	25,090	0,084	21,941
170	-0,085	24,824	0,045	19,903
187	-0,018	-5,531	0,010	8,322
200	0,075	26,825	0,022	25,487
240	0,072	23,698	0,101	24,130

Tabelle A.2.: Koordinaten der Rotorblattschwerpunkte für den Nearshoretransport

$X_{COG} = 15,24m$	$Y_{COG,1.1} = 7,10m$	$Z_{COG,1.1} = 2,40m$	Gestell 1.1
	$Y_{COG,2.1} = 7,10m$	$Z_{COG,2.1} = 6,23m$	Gestell 2.1
	$Y_{COG,3.1} = 7,10m$	$Z_{COG,3.1} = 10,06m$	Gestell 3.1
	$Y_{COG,1.2} = 3,30m$	$Z_{COG,1.2} = 2,40m$	Gestell 1.2
	$Y_{COG,2.2} = 3,30m$	$Z_{COG,2.2} = 6,23m$	Gestell 2.2
	$Y_{COG,3.2} = 3,30m$	$Z_{COG,3.2} = 10,06m$	Gestell 3.2
	$Y_{COG,1.3} = -0,50m$	$Z_{COG,1.3} = 2,40m$	Gestell 1.3
	$Y_{COG,2.3} = -0,50m$	$Z_{COG,2.3} = 6,23m$	Gestell 2.3
	$Y_{COG,3.3} = -0,50m$	$Z_{COG,3.3} = 10,06m$	Gestell 3.3

Tabelle A.3.: Lasten der Gestelle für den Nearshoretransport durch Schiffsbewegungen

Gestellnummer	$F_{Y,Roll}$ [kN]	$F_{Z,Roll}$ [kN]	$M_{J,Roll}$ [kNm]	$F_{X,Pitch}$ [kN]	$F_{Z,Pitch}$ [kN]	$F_{z,J,Pitch}$ [kN]
1.1	45,340	226,368	18,229	22,688	234,755	±14,121
2.1	51,247	226,368	23,016	25,646	234,755	±14,142
3.1	57,154	226,368	28,803	28,603	234,755	±14,172
1.2	45,340	221,121	13,273	22,688	234,755	±14,121
2.2	51,247	221,121	19,517	25,646	234,755	±14,142
3.2	57,154	221,121	26,176	28,603	234,755	±14,172
1.3	45,340	215,874	11,183	22,688	234,755	±14,121
2.3	51,247	215,874	18,444	25,646	234,755	±14,142
3.3	57,154	215,874	25,417	28,603	234,755	±14,172

Tabelle A.4.: Gemessene Beschleunigungen der BHO1 [11]

POINT	Max Accelerations					
	derived from 0kn, 5kn, and 10 kn					
	horizontal [m/s <sup>2</sup> ]	horiz. X [m/s <sup>2</sup> ]	horiz. Y [m/s <sup>2</sup> ]	vertical [m/s <sup>2</sup> ]	roll [°/s <sup>2</sup> ]	pitch [°/s <sup>2</sup> ]
A-3 (P1)	4,2	1,3	4,2	11,9	3,3	2,8
B-2 (P2)	4,3	1,6	4,3	12,9	3,3	2,8
B-4 (P3)	4,3	1,7	4,3	12,5	3,3	2,8
C-5 (P4)	4,4	1,6	4,4	13,1	3,3	2,8
D-1 (P5)	3,9	1,3	3,9	13,0	3,3	2,8
E-1 (P6)	4,5	1,7	4,5	12,7	3,3	2,8
E-13 (P7)	4,4	1,7	4,4	11,8	3,3	2,8

Tabelle A.5.: Koordinaten der transportierten Einzelteile auf der BHO1 [11]

POINT	ITEM	LCG*	TCG*	VCG*
A-3 (P1)	Tower Section 3 (180t) + Hebebalken&Deckel (12,5t) + Transport Frame (18t)	77,000	-17,500	18,780
B-2 (P2)	Tower Section 2 (90t) + Hebebalken&Deckel (11,5t) + Transport Frame (18t)	4,500	10,500	24,005
B-4 (P3)	Tower Section 2 (90t) + Hebebalken&Deckel (11,5t) + Transport Frame (18t)	17,000	17,500	24,005
C-5 (P4)	Tower Section 1 (90t) + Hebebalken&Deckel (9t) + Transport Frame (18t)	4,500	-10,500	27,381
D-1 (P5)	Nacelle incl. Hub (300t) + TG01(Optimiert) (~32t)	10,500	-17,500	15,373
E-1 (P6)	Blade - Layer 1 (17t) + Stackable Frame (2t)	15,900	-5,170	27,943
E-13 (P7)	Blade - Layer 1 (17t) + Stackable Frame (2t)	69,075	23,060	24,116

\* Koordinaten im schiffsfesten Koordinatensystem mit Ursprung MS, BL, AP (Mittelschiff, Baseline und Aft Perpendicular)



## B. Gestellberichte

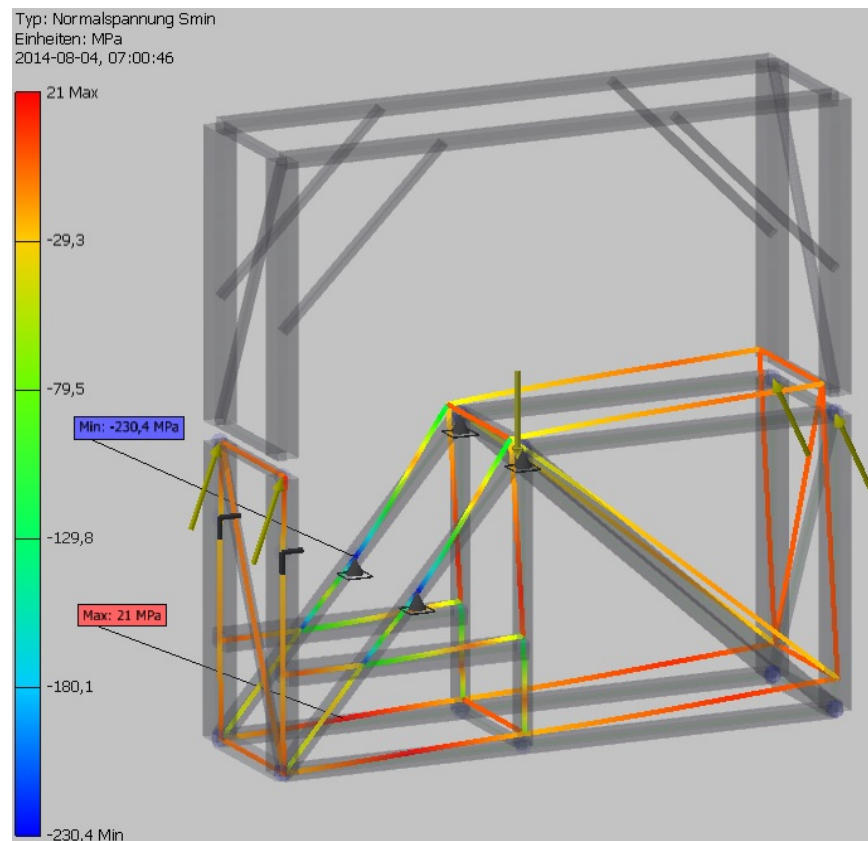


Abbildung B.1.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Einzelkranhub des Tipgestells“

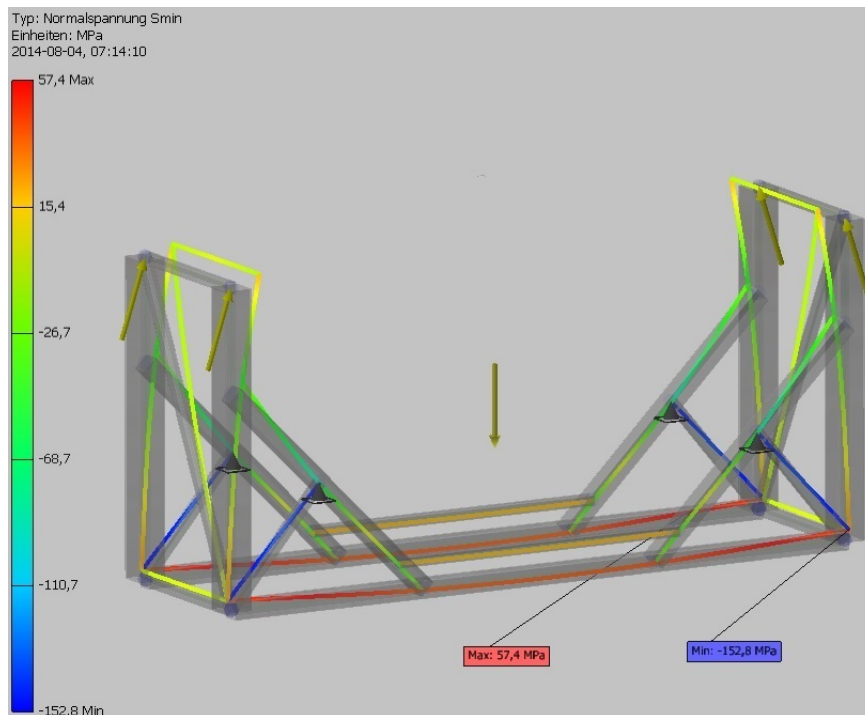


Abbildung B.2.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Einzelkranhub des Wurzelgestells“

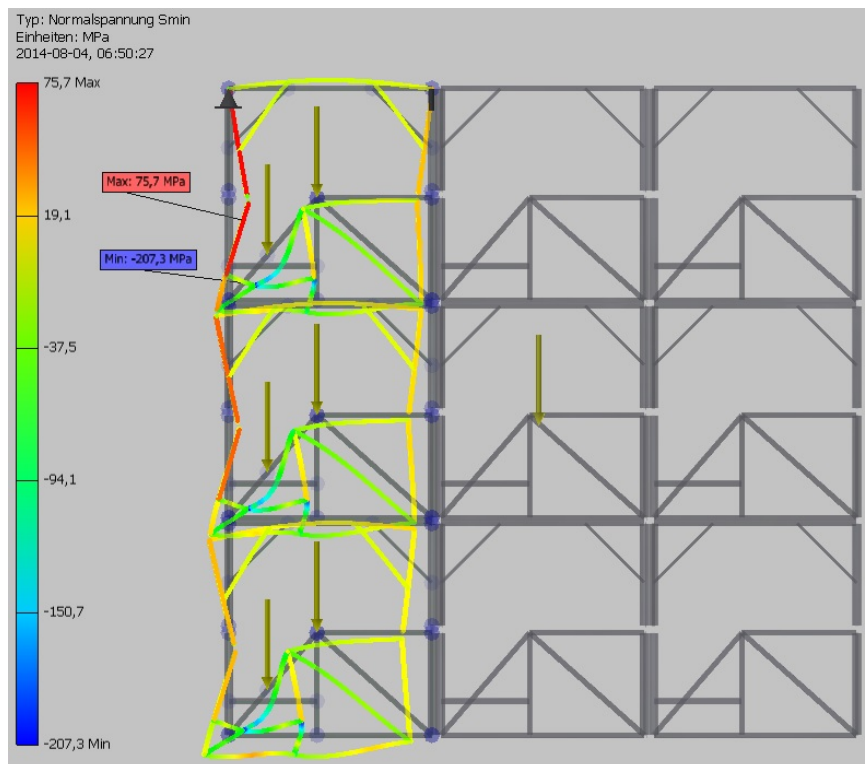


Abbildung B.3.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Kranhub des Tipgestellstapel“

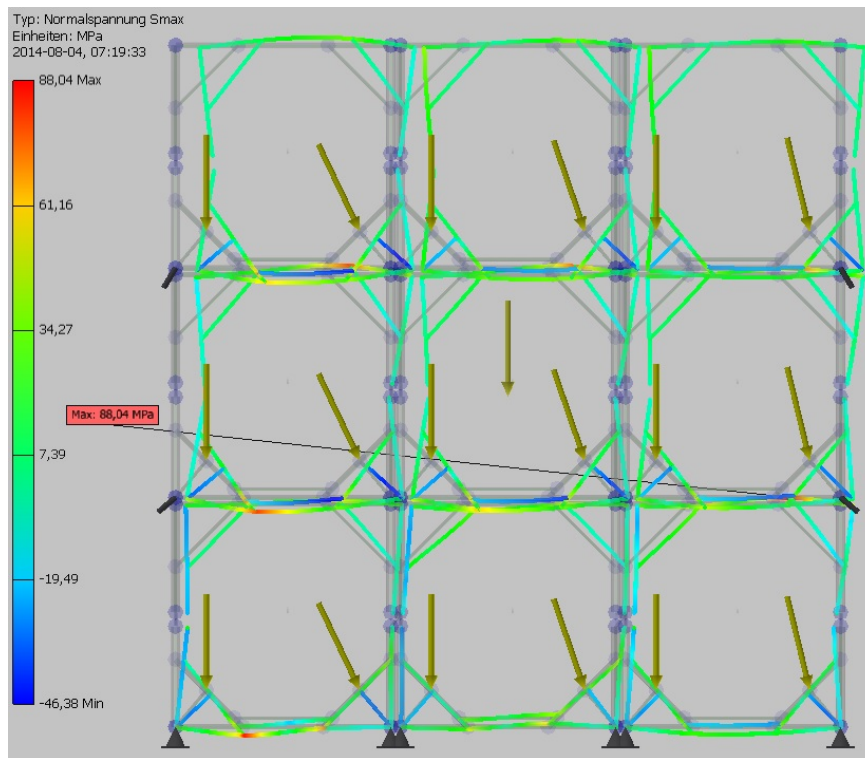


Abbildung B.4.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Lagerung an Land im Stapel mit Anströmung aus  $-47^\circ$  Pitch“

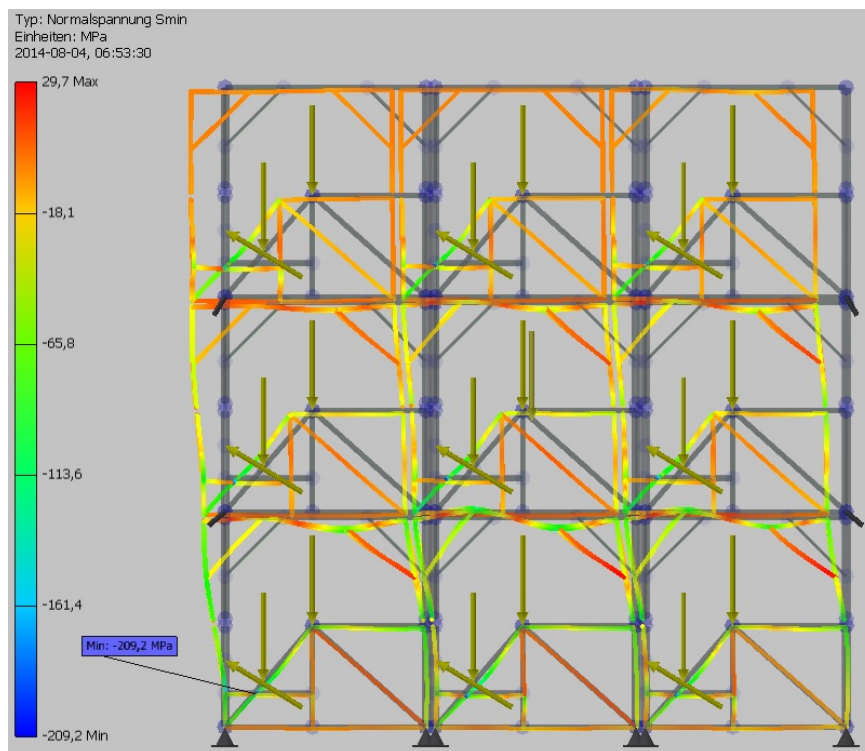


Abbildung B.5.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Lagerung an Land im Stapel mit Anströmung aus  $133^\circ$  Pitch“

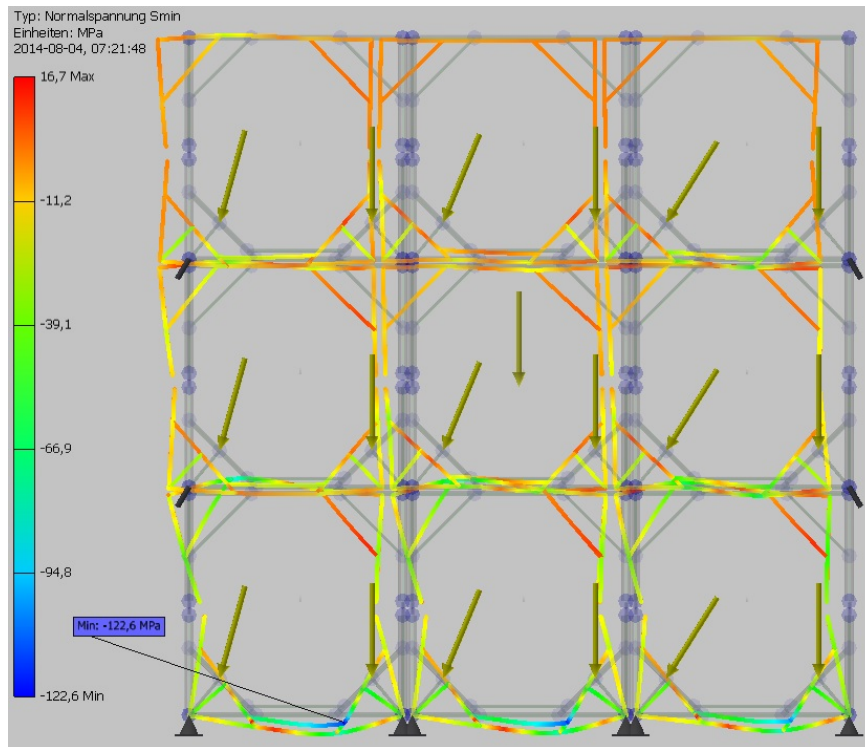


Abbildung B.6.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Lagerung an Land im Stapel mit Anströmung aus 133° Pitch“

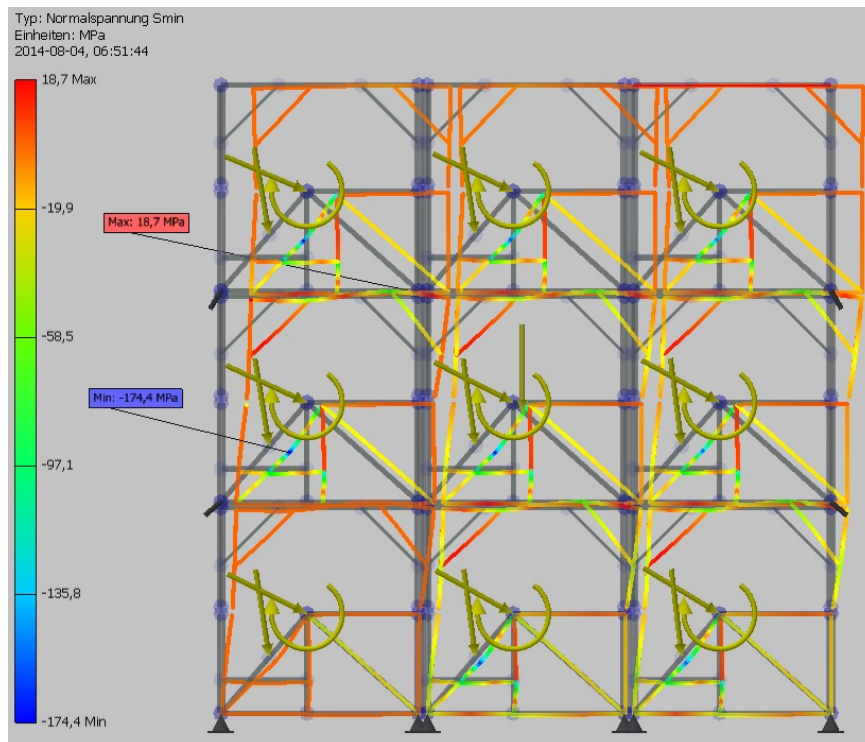


Abbildung B.7.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Anströmung aus -47° Pitch“

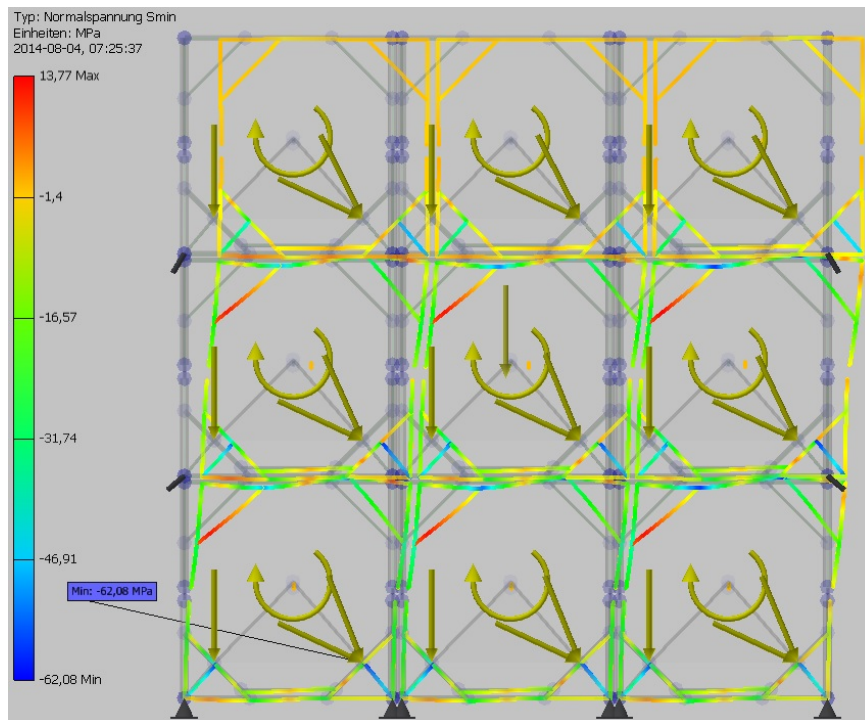


Abbildung B.8.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Anströmung aus  $-47^\circ$  Pitch“

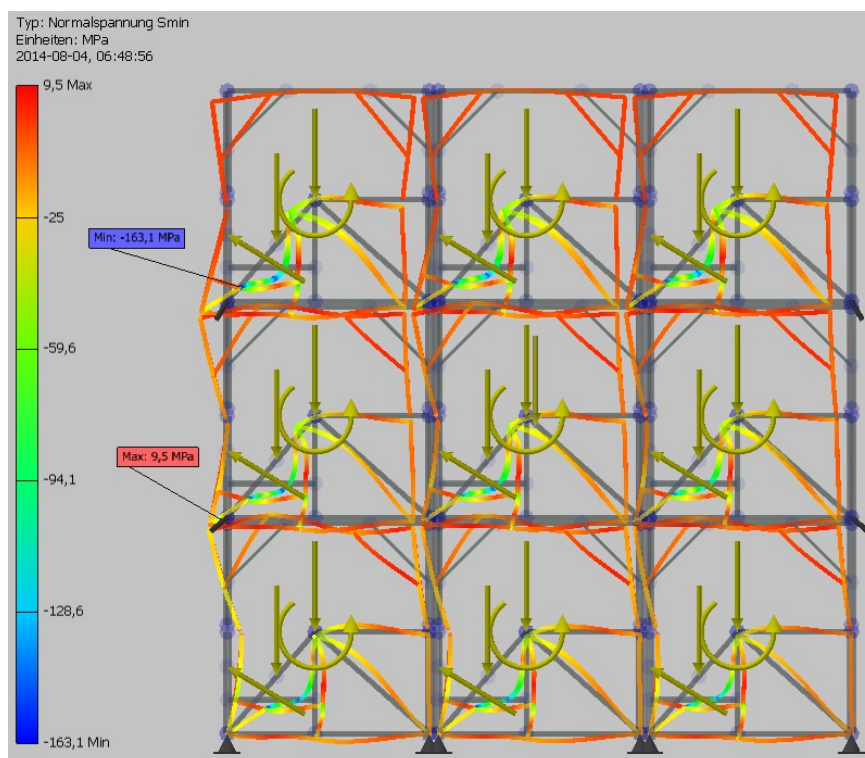


Abbildung B.9.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Anströmung aus  $133^\circ$  Pitch“

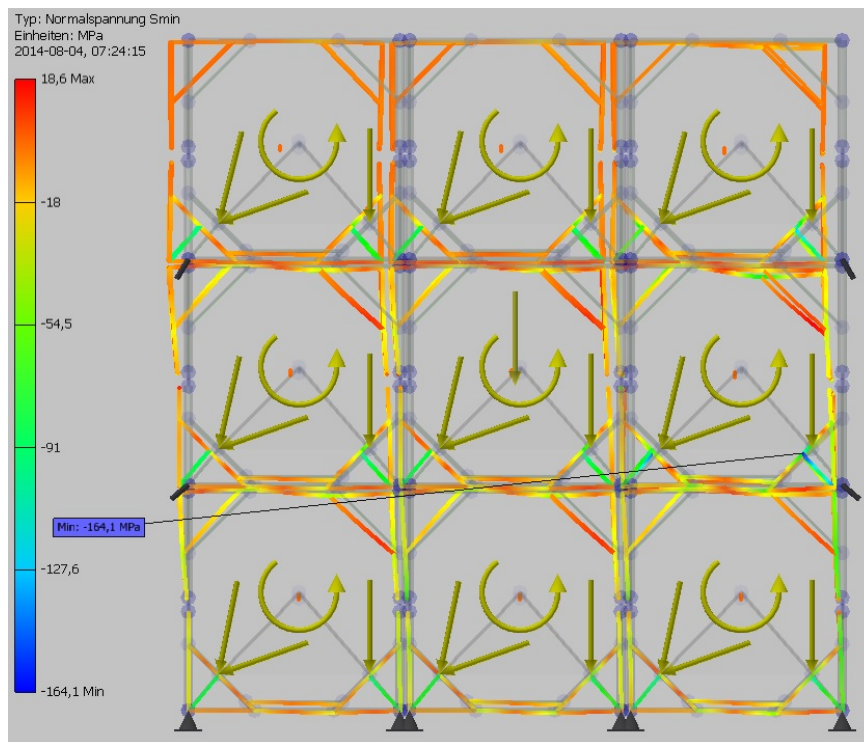


Abbildung B.10.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Anströmung aus 133° Pitch“

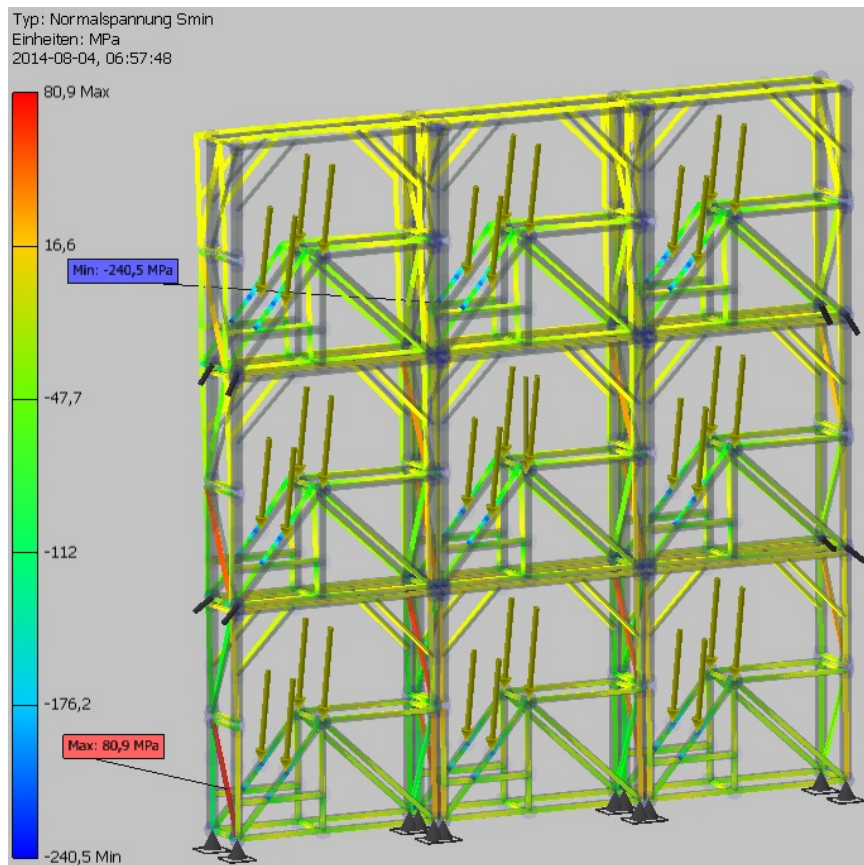


Abbildung B.11.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Nickbeschleunigung“

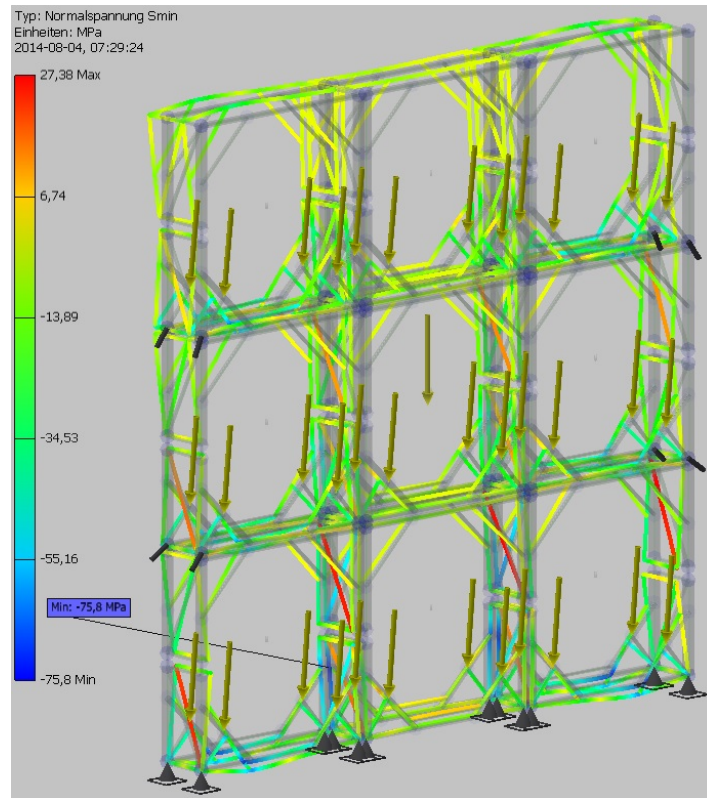


Abbildung B.12.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Nearshore im Stapel mit Nickbeschleunigung“

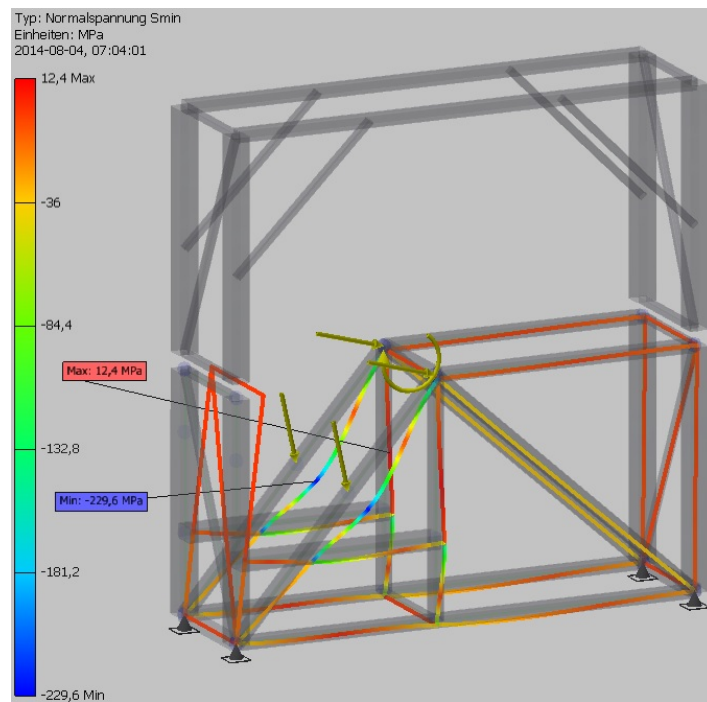


Abbildung B.13.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Offshore mit Anströmung aus  $-47^\circ$  Pitch“

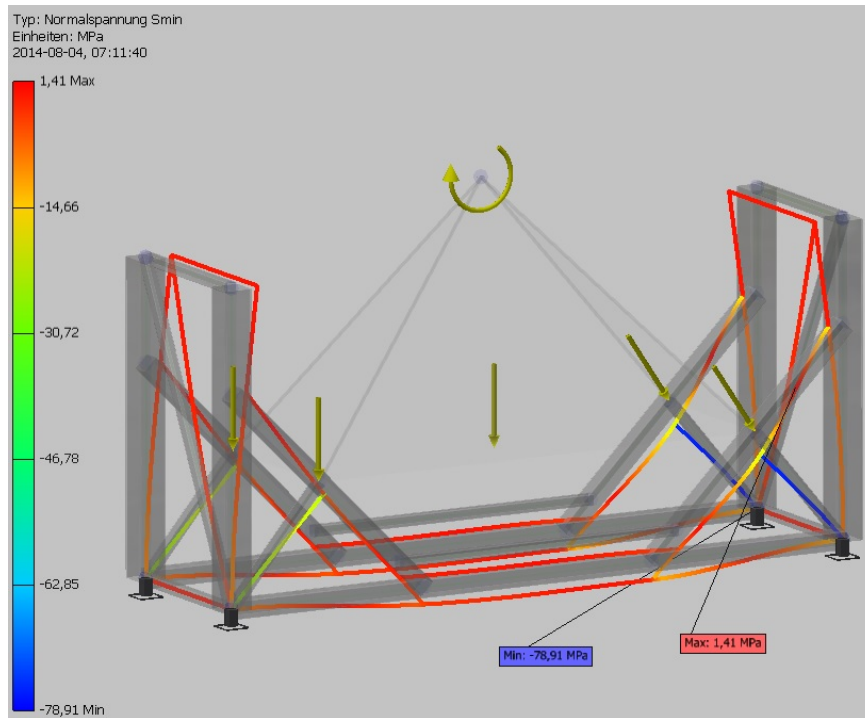


Abbildung B.14.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Offshore mit Anströmung aus  $-47^\circ$  Pitch“

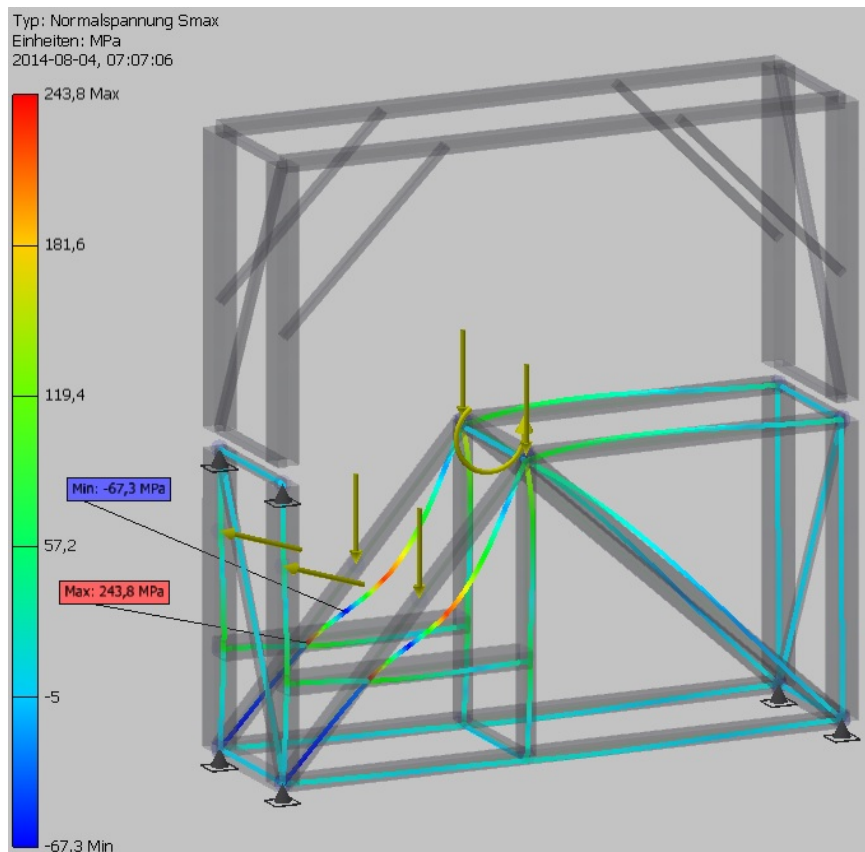


Abbildung B.15.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Offshore mit Anströmung aus  $133^\circ$  Pitch“



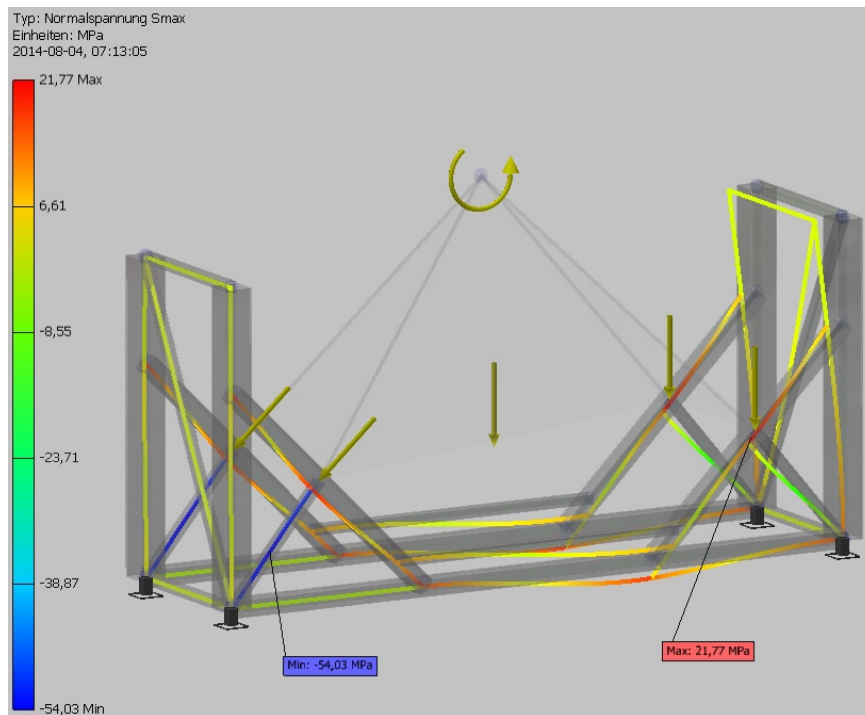


Abbildung B.16.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Off-shore mit Anströmung aus 133° Pitch“

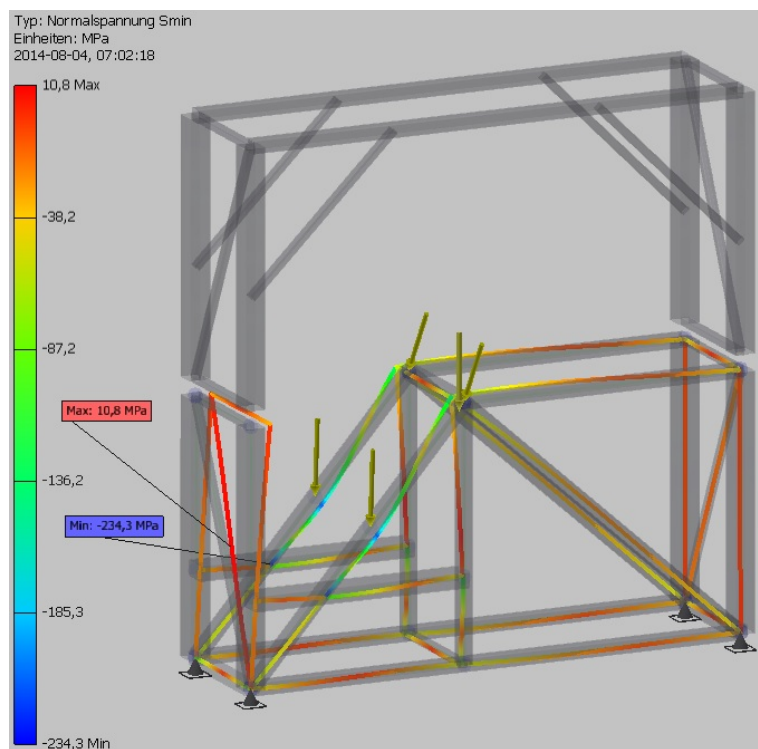


Abbildung B.17.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Tipgestell - Transport Offshore mit Nickbeschleunigung“

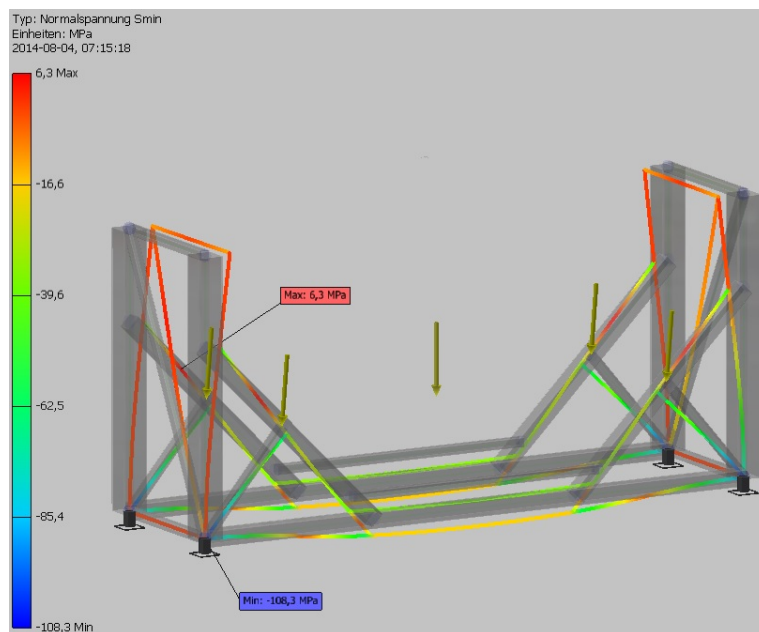


Abbildung B.18.: Vergleichsspannung für den Lastfall „Wurzelgestell - Transport Off-shore mit Nickbeschleunigung“

# Literaturverzeichnis

- [1] *Luftdichte*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte>. Version:2014-06-13
- [2] AD-LIFTRA ; AD-LIFTRA (Hrsg.): *Blade Dragon, Installing a single blade, Liftra*. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blade\\_Dragon,\\_Installing\\_a\\_single\\_blade,\\_Liftra.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blade_Dragon,_Installing_a_single_blade,_Liftra.jpg). Version:2014-07-20
- [3] BÖGE, A.: *Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik ; mit 441 Tabellen*. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007 (Studium und Praxis). – ISBN 9783834890924
- [4] DE BUHR, I. ; GLUBRECHT, H.L. ; HOPPMAN, G.: *Method for carrying out work on a wind farm*. September 14 2011. – EP Patent App. EP20,100,002,383
- [5] DECKER, K.H. ; RIEG, F. ; ENGELKEN, G. ; WEIDERMANN, F. ; HACKENSCHMIDT, R.: *Decker Maschinenelemente: Funktion, Gestaltung und Berechnung*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2014. – ISBN 9783446437395
- [6] DHLC - DUTCH HEAVY LIFT CONSULTANTS: *2011-004-DB-041-00 NacelleSmallCoaster+HubTransversal.pdf*
- [7] *DIN 1055-4:2005-03, Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten*
- [8] GASCH, R. ; TWELE, J.: *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*. Teubner, 2007 (Lehrbuch : Maschinenbau). – ISBN 9783835101364
- [9] GERMANISCHER LLOYD: *GL 2007, Chapter IV-6-4, Section 10 Marine Operations, E. Lifting Operations*
- [10] GL NOBLE DENTON: *Guidelines for Marine Transportations 0030/ND rev 5*
- [11] HOCHTIEF: *GT1\_Innovation\_LC-5WTG\_max\_acceleration\_summary.xlsx*. 11 2011
- [12] KOSTIBAS, Alexi: *Wind turbine blade transport I-35*. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind\\_turbine\\_blade\\_transport\\_I-35.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_blade_transport_I-35.jpg). Version:2014-07-23. – Windmill Blade on I-35. Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 via Wikimedia Commons
- [13] VANCOUVER USA, Port of: *Windmill blades, September 2007*.

<http://www.portvanusa.com/centennial/timeline/wind-energy-arrives>.  
Version: 2014-07-23

[14] WAGNER, Raimund: *AREVA Blades*