



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

# **Bachelorarbeit**

Mohamad Ihab Hammad

## **Optimierung von Transportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft- Fundamente (Monopiles)**



**Mohamad Ihab Hammal**

# **Optimierung von Transportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft-Fundamente (Monopiles)**

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:

United Engineering Solutions GmbH



Erstprüfer: Prof. Dr. Georgi Kolarov

Zweitprüfer: Constantin Bach, Head of Structural Engineering, United Engineering  
Solutions GmbH

Abgabedatum: 26.04.2023

Matrikelnummer: 

---

# Zusammenfassung

**Mohamad Ihab Hammal**

## Thema der Bachelorthesis

Optimierung von Transportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)

## Stichworte

Optimierung, Entwicklung, Konstruktionstechnik, Analyse, FEM-Berechnung, Offshore-Windkraftanlagen, Transportrahmen, Cradle

## Kurzzusammenfassung

Die Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Konstruktion von Transportrahmen (Cradles) für Monopiles, die als Fundament für Offshore-Windkraftanlagen dienen. Der Transport erfolgt in der Regel auf Schwergutschiffen, wobei die steigenden Dimensionen der Monopiles zunehmende Herausforderungen für den Transport darstellen. Die steigenden Kosten für den Transportrahmen erfordern eine Optimierung der bestehenden Lösungen. In der Bachelorarbeit sollen daher drei Aspekte behandelt werden: die Anpassung der Cradles an unterschiedliche Monopile-Durchmesser ohne strukturellen Umbau, die Wiederverwendbarkeit der Cradles für weitere Projekte und die gleichmäßige Lasteinleitung ins Deck, um Punktlasten und Kantenpressungen zu vermeiden. Zusätzlich soll in der Bachelorarbeit das Konzept der SPMT-Fähigkeit (Self-Propelled Modular Transporter) in die Konstruktion der Transportrahmen integriert werden, um den effizienten und sicheren Transport der Monopiles auf Schwergutschiffen zu gewährleisten.

## Title of the paper

Optimization of Transport Frames for Future Offshore Wind Power Foundations (Monopiles)

## Keywords

Optimization, Development, Construction engineering, Analysis, FEM calculation, Offshore wind turbines, Transport frames, Cradles

## Abstract

The bachelor's thesis deals with the construction of transport frames (cradles) for monopiles that serve as foundations for offshore wind turbines. The transport is usually carried out on heavy lift vessels, and the increasing dimensions of the monopiles pose increasing challenges for transportation. The rising costs of the cradles require optimization of existing solutions. The thesis will focus on three aspects: adapting the cradles to different monopile diameters without structural modifications, reusability of the cradles for other projects with different monopile parameters, and even load distribution onto the deck, avoiding point loads and/or edge pressures in SPMT-capable concepts.



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*  
**Department Maschinenbau und Produktion**

# Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

**von Herrn Mohamad Ihab Hammal**

Matrikel-Nummer: XXXXXXXXXX

**Thema:** Optimierung von Transportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)

## Schwerpunkte:

---

Monopiles dienen als ein mögliches Fundament für Offshore-Windkraftanlagen. Der Transport dieser Monopiles findet in der Regel auf Schwergutschiffen (Deck Carrier) in speziell hierfür ausgelegten und gefertigten Stahlvorrichtungen (Cradles) statt. Die Dimensionen heutiger und zukünftiger Anlagen (beispielhaft: Durchmesser 10 – 12 m, Länge 80 - 100 m, Gewicht über 2000 t) stellen hierbei eine zunehmende Herausforderung dar, wobei der groß angelegte Ausbau der Kapazitäten in den USA und die überwiegend in Europa stattfindende Fertigung die Überquerung des Nordatlantiks (ganzjährig und ohne Möglichkeit zum Abwettern) voraussetzt.

Aufgrund dadurch steigender Kosten für die Cradles besteht Entwicklungspotential hinsichtlich des Funktionsumfangs sowie der Optimierung bestehender Lösungen.

In der Bachelorarbeit soll vor allem auf drei Aspekte eingegangen werden:

- Anpassung der Cradles an unterschiedliche Monopile-Durchmesser im Bereich +/- 1 m (ohne strukturellen Umbau oder Tausch von größeren Bauteilen, ohne „schweres Gerät“ wie Gabelstapler, Kran, etc)
- Wiederverwendbarkeit des ganzen Cradles oder von Bauteilen für weitere Projekte mit anderen Monopile-Parametern
- Gleichmäßige Lasteinleitung ins Deck, z.B. Vermeidung von Punktlasten und/oder Kantenpressungen bei SPMT-fähigen Konzepten

Für jeden Aspekt sollen 2-3 Teillösungen entwickelt werden, aus denen durch geeignete Auswahl 1-2 neue Gesamtlösungen entstehen. Dabei ist auf eine technisch begründete Auswahl und klare Unterscheidbarkeit der Konzepte zu achten.

---

Je nach Umfang und Sinnhaftigkeit können technische Nachweise etwa durch Erläuterungen, Zeichnungen/Skizzen, Handrechnungen oder Finite-Elemente-Berechnungen erbracht werden.

Der Fokus soll, unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte, auf der Umsetzbarkeit (technisch, konstruktiv und operationell, Grenzfestigkeit) und den zu erwartenden Vor- und Nachteilen der einzelnen Lösungen liegen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abkürzungs-, Symbol- und Formelverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
Abkürzungen .....	XII
Lateinische Symbole .....	XII
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>14</b>
1.1 Problemdarstellung .....	16
1.2 Ziel der Arbeit.....	16
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>17</b>
2.1 Fundamente für Offshore-Windenergieanlagen .....	17
2.2 Transport von Monopile-Fundamenten.....	18
<b>3 Grundlagen</b> .....	<b>20</b>
3.1 DNVGL-ST-N001 .....	20
3.1.1 Standardkoordinatensystem .....	21
3.1.2 Lasten .....	22
3.1.3 Lastfälle.....	23
3.1.4 Lastkombinationen .....	23
3.2 Schiffstruktur .....	25
3.3 Schraubenverbindung .....	26
3.3.1 Bestimmung des Schraubendurchmessers .....	26
3.3.2 Abschertragfähigkeit.....	26
3.3.3 Lochleibung.....	27
3.3.4 Zugtragfähigkeit.....	27
3.3.5 Kombination von Scher-/ Lochleibung und Zug .....	28
3.4 Methodik.....	28
3.4.1 Bewertung der Verformung .....	28
3.4.2 Bewertung der Spannungen .....	28
<b>4 Umsetzung</b> .....	<b>29</b>
4.1 Annahmen und Randbedingungen .....	29
4.1.1 Software .....	29
4.1.2 Schiff .....	29
4.1.3 Monopile.....	31
4.1.4 Beschleunigungen.....	31
4.2 Anforderungen .....	32
4.2.1 Allgemeine Anforderungen .....	32

4.2.2	Anforderungen an die Durchmesseranpassung.....	32
4.2.3	Anforderungen an die gleichmäßige Lasteinteilung ins Deck.....	33
4.2.4	Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens .....	33
4.3	Funktionen .....	34
4.4	Morphologischer Kasten.....	35
4.4.1	Durchmesseranpassung.....	35
4.4.2	Lasteinteilung ins Deck.....	39
4.4.3	Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens .....	41
4.5	Vorstellung des Lösungsmodells .....	44
4.5.1	Durchmesseranpassung.....	45
4.5.2	Lasteinteilung ins Deck.....	46
4.5.3	Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens .....	47
<b>5</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse .....</b>	<b>49</b>
5.1	Finite-Elemente-Modellierung.....	49
5.1.1	Kontaktmodellierung von Monopile und Transportrahmen.....	49
5.1.2	Netz.....	50
5.1.3	Material .....	51
5.2	Lastkombination CO3: Rollen Backbord + negatives Tauchen .....	52
5.2.1	Konzept der Durchmesseranpassung.....	52
5.2.2	Transportrahmen.....	54
5.2.3	Monopile.....	56
5.2.4	Schiffstruktur .....	57
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>62</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>63</b>
	<b>Anhang A: Durchmesseranpassung.....</b>	<b>64</b>
	Ermittlung der Kräfte .....	64
	Untersuchung des Holzblocks .....	65
	Stützsystem.....	67
	Auslegung der Schrauben für Stützsystem.....	68
	<b>Anhang B: Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens .....</b>	<b>71</b>
	Ermittlung der Schraubenkräfte für die Füße.....	71
	Tragfähigkeit für die Füße .....	75
	Ermittlung der Schrauben für die dritte Stufe.....	76
	<b>Anhang C: Lastverteilungsstudie .....</b>	<b>80</b>
	Initialberechnung.....	80
	Optimiertes Modell .....	82
	<b>Anhang D.....</b>	<b>83</b>
	Lastkombination CO1: Stampfen voraus + negatives Tauchen .....	83

---

Transportrahmen.....	83
Monopile 85	
Schiffstruktur .....	86
Lastkombination CO2: Stampfen achtern + negatives Tauchen .....	87
Transportrahmen.....	87
Monopile 89	
Schiffstruktur .....	90
Lastkombination CO4: Rollen Steuerboard + negatives Tauchen.....	91
Transportrahmen.....	91
Monopile 92	
Schiffstruktur .....	94

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Verladen von Monopiles auf Schwergutschiff [8].....	15
Abbildung 2 Verteilung der verschiedenen Arten von Fundamenten in Offshore-Windparks in Europa [4].....	17
Abbildung 3 Arten von Fundamenten für Offshore-Windenergieanlagen [11] .....	17
Abbildung 4 Monopiles Transportrahmen [8] .....	18
Abbildung 5 Stauplan für den Transport von Monopile-Fundamenten auf einem Schwergutschiff [8].....	19
Abbildung 6 Schiffkoordinatensystem nach IMO MSC Circ. 920 / DIN 81209-1....	21
Abbildung 7 Darstellung der Lochabstände .....	27
Abbildung 8 Darstellung der Orientierung des Schiffs.....	30
Abbildung 9 Darstellung der Struktur des untersuchten Bereichs des Schiffs .....	30
Abbildung 10 Hierarchische Darstellung der Funktionen .....	34
Abbildung 11 Schematische Darstellung der Kräfte in Holzproben in paralleler und senkrechter Richtung zur Faserrichtung.....	36
Abbildung 12 vereinfachtes Holzblockmodell mit Stahlplatte .....	37
Abbildung 13 Beispiel für die Anordnung von Holzblöcken auf dem Transportrahmen .....	38
Abbildung 14 Jacton Getriebe für Wagenheber .....	39
Abbildung 15 mögliche Rohrkonstruktion .....	40
Abbildung 16 verzweigtes Balkenmodell .....	41
Abbildung 17 Sechskanteschraube mit Mutter im Bauteil [12] .....	42
Abbildung 18 Sechskanteschraube mit Flansch [12] .....	42
Abbildung 19 Schematische 2D-Skizze .....	43
Abbildung 20 3D Modell für die Lösungsvariante.....	44
Abbildung 21 Darstellung des Konzepts zur Durchmesseranpassung .....	45
Abbildung 22 Darstellung des Rahmenfuß mit vereinfachter Kraftverteilung .....	46
Abbildung 23 Darstellung der unteren Struktur des Rahmens .....	47
Abbildung 24 Darstellung des gesamten FE Modells.....	49
Abbildung 25 Darstellung der Kontaktmodellierung .....	50
Abbildung 26 Das Netz des gesamten Modells .....	51
Abbildung 27 CO3: Absolute Verschiebung des Holzblocks .....	52
Abbildung 28 Von-Mises Vergleichsspannung des Holzblocks.....	53
Abbildung 29 CO3: Absolute Verschiebung der Stützplatte .....	53
Abbildung 30 Von-Mises Vergleichsspannung der Stützplatte.....	54
Abbildung 31 CO3: Absolute Verschiebung des Rahmens .....	54
Abbildung 32 CO3: Von-Mises Vergleichsspannung des Rahmens.....	55
Abbildung 33 Darstellung der Singularität an der Rippe .....	55
Abbildung 34 Stabilität des Transportrahmens .....	56
Abbildung 35 CO3: Absolute Verschiebung des Monopiles .....	56
Abbildung 36 CO3: Von-Mises Vergleichsspannung des Monopiles.....	57
Abbildung 37 CO3: Von-Mises Vergleichsspannung des Schiffsdecks .....	57
Abbildung 38 CO3: Von-Mises Vergleichsspannung des untersuchten Bereichs des Schiffs .....	58
Abbildung 39 Darstellung der überlastete Stelle .....	58

Abbildung 40 Darstellung der untersuchten Stelle .....	64
Abbildung 41 Darstellung der Randbedingungen des Blocks .....	66
Abbildung 42 Darstellung des Netz von Holzblock .....	66
Abbildung 43 Darstellung der Kräfte auf dem Holzblock.....	67
Abbildung 44 Darstellung der Implementierung von den Randbedingungen.....	67
Abbildung 45 Darstellung der Wandstärke der Platten des Stützsystems mit der Flächenlast .....	68
Abbildung 46 Darstellung des vereinfachten Modell zur Ermittlung von Kräfte je Kontaktstelle .....	71
Abbildung 47 Besserer Ansicht auf die Starrbalken.....	72
Abbildung 48 Darstellung des Balkens mit den einwirkenden Kräfte .....	73
Abbildung 49 Theoretische Lastverteilung.....	80
Abbildung 50 Darstellung des Ergebniss vom initialen Modell .....	80
Abbildung 52 Darstellung der Verformung des Rahmens .....	81
Abbildung 52 Darstellung der Ergebnisse des optimierten Modells .....	82
Abbildung 53 Die Reaktionskräfte des optimierten Modells .....	82
Abbildung 56 CO1: Absolute Verschiebung des Rahmens.....	83
Abbildung 57 CO1: Von-Mises Vergleichsspannung des Rahmens.....	84
Abbildung 58 Stabilität des Transportrahmens $\lambda=1,67$ .....	84
Abbildung 59 CO1: Absolute Verschiebung des Monopiles.....	85
Abbildung 60 CO1: Von-Mises Vergleichsspannung des Monopiles.....	85
Abbildung 61 CO1: Von-Mises Vergleichsspannung des Schiffsdecks.....	86
Abbildung 62 CO1: Von-Mises Vergleichsspannung des untersuchten Bereichs des Schiffs .....	86
Abbildung 63 CO2: Absolute Verschiebung des Rahmens.....	87
Abbildung 64 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Rahmens.....	88
Abbildung 65 Stabilität des Transportrahmens $\lambda=1,66$ .....	88
Abbildung 66 CO2: Absolute Verschiebung des Monopiles .....	89
Abbildung 67 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Monopiles.....	89
Abbildung 68 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Schiffsdecks.....	90
Abbildung 69 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des untersuchten Bereichs des Schiffs .....	90
Abbildung 70 CO2: Absolute Verschiebung des Rahmens.....	91
Abbildung 71 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Rahmens.....	92
Abbildung 72 CO2: Absolute Verschiebung des Monopiles .....	92
Abbildung 73 Stabilität des Transportrahmens $\lambda = 1,28$ .....	93
Abbildung 74 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Monopiles.....	93
Abbildung 75 CO4: Von-Mises Vergleichsspannung des Schiffsdecks.....	94
Abbildung 76 CO4: Von-Mises Vergleichsspannung des untersuchten Bereichs des Schiffs .....	94

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Lastfaktoren $\gamma_f$ für ULS [6] .....	20
Tabelle 2 Ungewichteter Ladungsfaktor $\gamma_G$ [6] .....	21
Tabelle 3 berücksichtigende Lastfälle .....	23
Tabelle 4 Lastkombinationen .....	24
Tabelle 5 Schiffkennwerte [8] .....	29
Tabelle 6 Monopile-Spezifikationen .....	31
Tabelle 7 eingesetzte Beschleunigungen [8] .....	31
Tabelle 8 Morphologische Kästen .....	35
Tabelle 9 Werkstoffkennwerte nach DIN EN 1995-1-1:2010-12 .....	37
Tabelle 10 Kennwerte des Transportrahmens .....	44
Tabelle 11 Materialkennwerte für den Transportrahmen und Monopile .....	51
Tabelle 12 Zusammenfassung der Ergebnisse von CO3 .....	52
Tabelle 13 Reaktionskräfte auf dem Anpassungssystem .....	65
Tabelle 14 Reaktionskräfte/momente der Kontaktstellen .....	72
Tabelle 15 Schraubenkräfte .....	74
Tabelle 16 Reaktionskräfte/momente der Kontaktstellen an der dritten Stufe .....	76
Tabelle 17 Darstellung der Kräfte von Schrauben mit der Auslastung jeder Schraube .....	78
Tabelle 18 Die Reaktionskräfte des Backboards .....	81
Tabelle 19 Zusammenfassung der Ergebnisse von CO1 .....	83
Tabelle 20 Zusammenfassung der Ergebnisse von CO2 .....	87
Tabelle 21 Zusammenfassung der Ergebnisse von CO4 .....	91

## Abkürzungs-, Symbol- und Formelverzeichnis

### Abkürzungen

FKB	Freikörperbild
UES	United Engineering Solutions

### Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
$F$	$N$	Kraft
$M$	$N \cdot m$	Drehmoment
$g$	$m/s^2$	Gravitation
$m_{MP}$	$kg$	Masse des Monopiles
$L_{Mp}$	$m$	Gesamtlänge des Monopiles
$D_{MP,Max}$	$m$	maximale Außendurchmesser des Monopiles
$D_{MP,min}$	$m$	kleinste Außendurchmesser des Monopiles
$t_{MP}$	$m$	Wandstärke des Monopiles
LOA	$m$	Gesamtlänge des Schiffs
LPP	$m$	Länge zwischen den Lötten
$B_{Schiff}$	$m$	Schiffsbreite
$D_{Schiff}$	$m$	Tiefgang
$R_e$	$MPa$	Streckgrenze
$\nu$	-	Poissonzahl
$\gamma_f$	-	Lastfaktor für ULS
$\gamma_G$	-	ungewichteter Ladungsfaktor
$A_s$	$mm^2$	Spannungsquerschnitt
$\gamma_{M2}$	-	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten auf Zug gegenüber Bruchspannung
$d$	$mm$	Nennwert des Schraubendurchmessers
$d_0$	$mm$	Lochdurchmesser für eine Schraube
$e_1$	$mm$	Randabstand in Krafrichtung
$e_2$	$mm$	Randabstand quer zur Krafrichtung
$F_{b,Rd}$	$kN$	Lochleibungstragfähigkeit

---

$f_u$	<i>MPa</i>	Nennwert der Zugfestigkeit
$f_{ub}$	<i>MPa</i>	Nennwert der Zugfestigkeit einer Schraube
$k_m$	-	Werkstoffbezogener Abminderungsbeiwert
$F_{v,Rd}$	<i>kN</i>	Abschertragfähigkeit einer Schraube
$l_k$	<i>mm</i>	Klemmlänge
$p_1$	<i>mm</i>	Lochabstand von Schraube in Krafrichtung
$p_2$	<i>mm</i>	Lochabstand von Schraube quer zur Krafrichtung
$t$	<i>mm</i>	Blechdicke
$F_{t,Rd}$	<i>kN</i>	Zugtragfähigkeit einer Schraube
$F_{Kl}$	<i>kN</i>	Klemmkraft
$E_s$	<i>MPa</i>	Elastizitätsmodul einer Schraube
$f_z$	-	Setzbetrag
$k_A$	-	Anziehungsfaktor
$\beta$	-	Nachgiebigkeitsfaktor der Schraube
$\kappa$	-	Reduktionsfaktor
$\delta_{max}$	<i>mm</i>	Maximale Durchbiegung
$\sigma_{zul}$	<i>MPa</i>	Zulässige Spannung
$a_x$	<i>m/s<sup>2</sup></i>	Beschleunigung in Längsrichtung
$J_{xx}$	<i>deg/s<sup>2</sup></i>	Rotationsbeschleunigung um x Achse

---

# 1 Einleitung

Monopiles sind große Stahlrohre, die zur Fundamentierung von Offshore-Windturbinen verwendet werden. Da diese Turbinen häufig in Gewässern von bis zu 20 Metern Tiefe installiert werden, ist der Transport der Monopiles eine Herausforderung, die spezielle Schwergutschiffe erfordert [3]. Diese Schiffe sind darauf ausgelegt, schwere Lasten wie Monopiles sicher und effizient zu transportieren.

Ein Schwergutschiff ist ein spezialisiertes Frachtschiff, das in der Lage ist, schwere und unhandliche Lasten zu transportieren, die aufgrund ihrer Größe, Form oder Gewicht nicht mit herkömmlichen Schiffen transportiert werden können. Die Anforderungen an Schwergutschiffe sind daher sehr spezifisch und erfordern eine Vielzahl von Faktoren, wie z.B. die Fähigkeit, schwere Lasten zu heben, zu transportieren und zu sichern, sowie die Fähigkeit, in flachen Gewässern und in engen Häfen zu manövrieren.

Eine Firma, die den Transport von Monopiles durchführt, ist die United Shipping Group. Das Unternehmen hat seinen Hauptsitz in Hamburg, Deutschland und ist im maritimen Sektor tätig. Die Gruppe besteht aus mehreren Tochterunternehmen, darunter United Engineering Solutions (UES). UES bietet Ingenieurs- und Beratungsdienstleistungen für den Schiff- und Offshore-Bereich an. Das Unternehmen bietet einen umfassenden Service für Schiffsprojekte sowie Schwergut- und Stückgut-Transporte sowie Beratung in nautischen Angelegenheiten an. [8]

UES ist auch für die Organisation des Transports von Monopiles für Vineyard Wind und Coastal Virginia Offshore Wind verantwortlich. Dies umfasst die Berechnung und Sicherung von Monopiles sowie die Entwicklung von Transportrahmen. Aufgrund der Tatsache, dass zukünftig größere Monopiles mit einem Gewicht von bis zu 3000 t und einem Durchmesser von bis zu 12 m transportiert werden müssen, stellt dies eine Herausforderung dar, da sie schwieriger zu handhaben sind. Die größeren Dimensionen erfordern spezielle Vorkehrungen, um die Sicherheit und Effizienz beim Transport zu gewährleisten. Diese Aufgabe wird daher in enger Zusammenarbeit mit der United Engineering Solutions GmbH durchgeführt, um eine fachgerechte Handhabung zu gewährleisten.



**Abbildung 1 Verladen von Monopiles auf Schwergutschiff [8]**

Abbildung 1 zeigt ein früheres Projekt von UES, bei dem der Transport von 20 Monopiles stattfand. Im Rahmen dieses Projekts wurden verschiedene Dienstleistungen angeboten, einschließlich hydrodynamischer und struktureller Ingenieurleistungen sowie Mobilisierung und Überwachung der Ausladung und Entladung. Das Projekt erstreckte sich über den Zeitraum von März 2018 bis Mai 2019 und umfasste den Transport der Monopiles von Rostock nach Taichung.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll untersucht werden, wie die Cradles optimiert werden können, um den steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Ziel dieser Arbeit ist es, neue Methoden und Technologien zu entwickeln, um die Kosten und den Zeitaufwand für den Transport von Monopiles auf Schwergutschiffen zu reduzieren. Dabei sollen verschiedene Ansätze zur Konstruktion und Optimierung von Cradles untersucht und bewertet werden. Die Ergebnisse der Arbeit sollen dazu beitragen, die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Monopile-Transporten zu verbessern und damit zur Förderung erneuerbarer Energien beizutragen.

## 1.1 Problemdarstellung

Früher hat UES die Betreuung von Projekten für den Transport von Monopiles in verschiedenen Größen bis zu 1850 t übernommen, indem sie spezielle Transportrahmen entworfen und hergestellt hat. Es gibt Anfragen für den Transport von Monopiles mit einem Gewicht von 3000 t und einem Durchmesser von bis zu 12 m. Diese Monopiles sind aufwendig zu transportieren und werden bei Verwendung des alten Transportrahmenkonzepts zahlreiche Probleme verursachen, wie zum Beispiel Spannungskonzentrationen, Beulen und Instabilität.

Darüber hinaus weisen die zu verschiffenden Monopiles unterschiedliche Größen und Durchmesser auf, was in alten Projekten den Einsatz von Holz zur Lastverteilung und zur Anpassung des Durchmessers erfordert. Durch diese Methode entsteht jedoch ein erheblicher Materialverbrauch und höhere Kosten, da das verwendete Holz am Ende weggeworfen werden muss und nicht mehr verwendet werden kann.

Auch die Transportrahmen können aufgrund der unterschiedlichen Größen und Eigenschaften der zu verschiffenden Monopiles oft nur einmal verwendet werden und müssen anschließend verschrottet werden. Dies führt zu hohen Herstellungs- und Verschiffungskosten.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Die Bachelorarbeit zielt darauf ab, das Entwicklungspotential von dem Transportrahmen (Cradle) zu optimieren, die speziell für den Transport von Monopiles auf Schwergutschiffen eingesetzt werden. Die steigenden Kosten für die Cradles aufgrund der zunehmenden Dimensionen der Monopiles stellen eine Herausforderung dar, die es zu bewältigen gilt. Konkret soll die Arbeit sich mit der Anpassung der Cradles an unterschiedliche Monopile-Durchmesser im Bereich  $\pm 1$  m, der Wiederverwendbarkeit des Cradles oder von Bauteilen für weitere Projekte mit anderen Monopile-Parametern und der gleichmäßigen Lasteinleitung ins Deck beschäftigen.

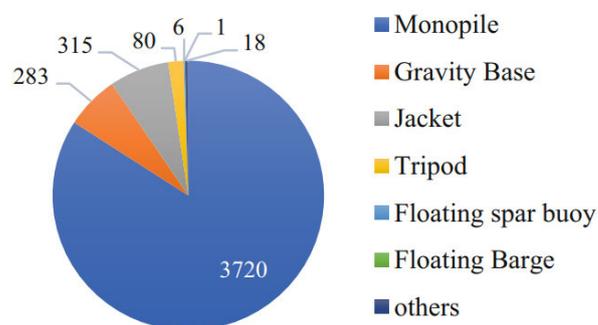
## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik im Hinblick auf die Monopile-Strukturen und deren Transport eingeführt. Zunächst wird erläutert, welche Funktionen Monopile-Strukturen erfüllen und wie sie derzeit transportiert werden können.

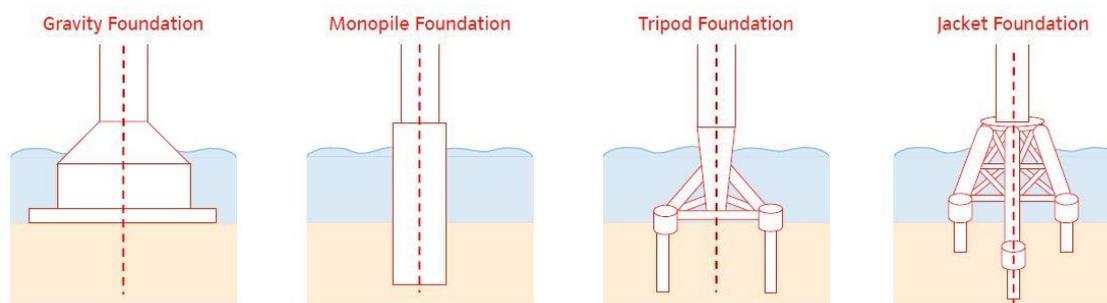
### 2.1 Fundamente für Offshore-Windenergieanlagen

Aufgrund der Energiekrise und der Luftverschmutzung durch herkömmliche Energiequellen besteht ein wachsender Bedarf an sauberen und erneuerbaren Energiequellen. Offshore-Windparks haben in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, da sie eine wichtige Quelle erneuerbarer Energie darstellen. Europa und die USA verfolgen politische Strategien zur Förderung des Ausbaus von Offshore-Windenergie, um die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren. Auch in China hat der Bau von Offshore-Windparks zugenommen, was zu einer Erhöhung der Kapazität an erneuerbarer Energie geführt hat. [4]

Zwischen 2012 und 2015 wurden allein in Deutschland 3131 neue Monopile-Fundamente aufgebaut, und im Jahr 2015 wurden 2282 Monopile-Fundamente errichtet. Monopile-Fundamente werden aufgrund ihrer Fähigkeit, extremen Belastungen standzuhalten und ihrer Vorteile wie geringeren Kosten und struktureller Einfachheit hauptsächlich in Europa eingesetzt, wie in Abbildung 2 dargestellt. [4]



**Abbildung 2** Verteilung der verschiedenen Arten von Fundamenten in Offshore-Windparks in Europa [4]



**Abbildung 3** Arten von Fundamenten für Offshore-Windenergieanlagen [11]

Monopiles (Abbildung 3) sind tragende Strukturen, die in der Offshore-Windindustrie verwendet werden, um Windturbinen auf dem Meeresboden zu verankern. Diese Strukturen bestehen in der Regel aus einer langen, zylindrischen Stahlsäule, die in den Meeresboden gerammt wird. Der obere Teil des Monopiles ist mit einer Turmstruktur "(Transition Piece") verbunden, auf der die Windturbine installiert wird. Monopiles sind aufgrund ihrer hohen Tragfähigkeit und ihres relativ einfachen Designs eine beliebte Wahl für die Offshore-Windenergie.

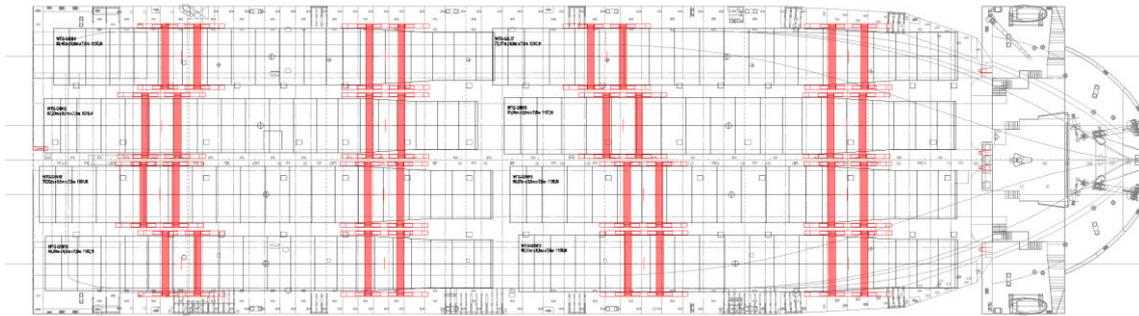
Der Stand der Technik in Bezug auf Monopiles hat sich in den letzten Jahren weiterentwickelt, um den Anforderungen der schnell wachsenden Offshore-Windindustrie gerecht zu werden. Fortschritte in der Materialwissenschaft und der Fertigungstechnologie haben dazu geführt, dass Monopiles mit höherer Tragfähigkeit und Steifigkeit hergestellt werden können, was die Effizienz und die Leistung der Windturbinen verbessert. Gleichzeitig wurden Transportrahmen weiter optimiert, um den Transport von größeren und schwereren Monopiles zu ermöglichen, was zu einer höheren Installationsgeschwindigkeit und geringeren Kosten führt. [7]

## 2.2 Transport von Monopile-Fundamenten

Wie bereits im Abschnitt 1 erwähnt wurde, werden Monopile-Fundamente in der Regel mit Schwergutschiffen transportiert. Der Transport von Monopiles erfordert spezielle Transportrahmen (Cradle), die eine sichere und effiziente Handhabung ermöglichen. Ein Cradle besteht in der Regel aus einem Stahlrahmen, der so konstruiert ist, dass er die spezifische Form des Monopiles genau widerspiegelt und somit eine sichere Befestigung während des Transports gewährleistet.



Abbildung 4 Monopiles Transportrahmen [8]



**Abbildung 5 Stauplan für den Transport von Monopile-Fundamenten auf einem Schwergutschiff [8]**

Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, werden die Monopile-Fundamente in der Regel in vertikaler Position auf dem Schwergutschiff transportiert und in einer Reihe platziert. Diese Positionierung ist aufgrund der Form der Fundamente und der Begrenzungen der Länge und Breite des Schiffes am besten geeignet. Ein entsprechender Stauplan wird verwendet, um die optimale Platzierung der Monopiles auf dem Schiff zu gewährleisten.

Die Transportrahmen mit Monopiles können mithilfe von sogenannten Self-Propelled Modular Transportern (SPMTs), was auf Deutsch selbstfahrende modulare Transporter bedeutet, auf dem Schiff positioniert werden, wie in Abbildung 1 deutlich erkennbar ist. Sie bestehen aus Modulen mit 4, 5, 6 oder 8 Achslinien. Die Achslinien sind die imaginären Linien, entlang derer die Achsen der einzelnen Module in einer Reihe angeordnet sind. Sie dienen als Bezugspunkt für die Lenkung und Steuerung des SPMTs während des Transports. Die Ladekapazität hängt von der jeweiligen Version ab. Jedes Modul kann mit einem eigenen Motor und Steuerungssystem (Lenksystem) ausgestattet werden. Die Module können seitlich und/oder in Längsrichtung gekoppelt werden. Die Räder der SPMTs sind in der Lage, sich um 360 Grad zu drehen, was Rotations- und Seitwärtsbewegungen ermöglicht. Die Höhe der SPMTs kann hydraulisch um ca. 60 cm angepasst werden, um die Last vertikal anzuheben oder zu senken. [10]

Die Vorrichtung wird entweder vorab auf dem Schiff positioniert, und das Monopile wird anschließend mithilfe eines Krans darauf gehoben. Alternativ dazu kann das Monopile auch an Land in die Cradle gehoben werden, und beides wird dann zusammen mit SPMTs auf das Schiff transportiert. Die Anforderungen für die Cradle hängen von der Größe und Form des Monopiles ab und müssen für jeden Transport individuell berechnet werden. Durch die Verwendung von Cradles wird sichergestellt, dass die Monopiles während des Transports stabilisiert sind und keine Beschädigungen auftreten. Ein Beispiel dafür könnte eine plastische Verformung sein, bei der das Monopile unter der Belastung durch die Vorrichtung oder andere Transportausrüstung verformt wird und dadurch dauerhafte Veränderungen an seiner Form oder Struktur aufweist. Dies kann zu einer Beeinträchtigung der Funktion und Leistungsfähigkeit des Monopiles führen. Ein weiterer Aspekt beim Transport von Monopiles ist zu beachten, dass das Cradle die Lasten gleichmäßig auf das Deck überträgt, um potenzielle Beschädigungen an der Schiffstruktur zu vermeiden. Hierbei sollten keine Spannungskonzentrationen auf der Schiffstruktur entstehen oder Instabilität verursacht werden.

## 3 Grundlagen

Im nächsten Kapitel werden die grundlegenden Konzepte erläutert, die für die Berechnungen in dieser Arbeit benötigt werden. Hierzu gehören die erforderlichen Grenzzustände der Struktur sowie eine Erklärung der LRFD-Methode. Es wird auch auf die möglichen Ausprägungen der Struktur eingegangen, die während des Transports per Seeweg auftretenden Lasten beschrieben und mechanische Modelle vorgestellt, die zur Erläuterung herangezogen werden können.

### 3.1 DNVGL-ST-N001

DNVGL-ST-N001 ist ein technischer Standard der DNV GL, einer internationalen Klassifikationsgesellschaft und Zertifizierungsstelle für die Schifffahrts- und Offshore-Industrie. Der Titel des Standards lautet "Design of Offshore Steel Structures" und er enthält technische Anforderungen und Richtlinien für das Design von Stahlstrukturen, die in Offshore-Anwendungen verwendet werden, wie zum Beispiel Plattformen, Bohrtürme und Windenergieanlagen.

Der Standard behandelt verschiedene Aspekte des Designs von Offshore-Stahlstrukturen, einschließlich der Lastannahmen und -kombinationen während des Entwurfsprozesses. Insbesondere beschreibt er die Lastfaktoren nach ULS (Ultimate Limit State) für die Bemessung von Offshore-Stahlstrukturen. Die Lastfaktoren sind Faktoren, die auf die angenommenen Lasten angewendet werden, um sicherzustellen, dass die Strukturen ausreichend stark sind, um den erwarteten Lasten standzuhalten. Diese Lastfaktoren berücksichtigen verschiedene Arten von Lasten wie z.B. Dauerlasten und usw.

Er wird in der Regel in der Offshore-Industrie verwendet, die mit dem Entwurf von Offshore-Stahlstrukturen befasst sind. Sie dient als Referenz für die Einhaltung von Designanforderungen und Sicherheitsstandards für Offshore-Stahlstrukturen und trägt dazu bei, dass diese Strukturen den erforderlichen Sicherheits- und Leistungsstandards entsprechen. [6]

Da diese Bachelorarbeit sich mit dem Transport von Fundamenten für Offshore-Windkraftanlagen befasst, wird dieser Standard verwendet, um die Lasten gemäß den Anforderungen des ULS (Ultimate Limit State) zu berücksichtigen.

Belastungszustand	Lastkategorien			
	G	Q	D	E
ULS-a	1,3	1,3	1,0	0,7
ULS-b	1,0	1,0	1,0	1,3

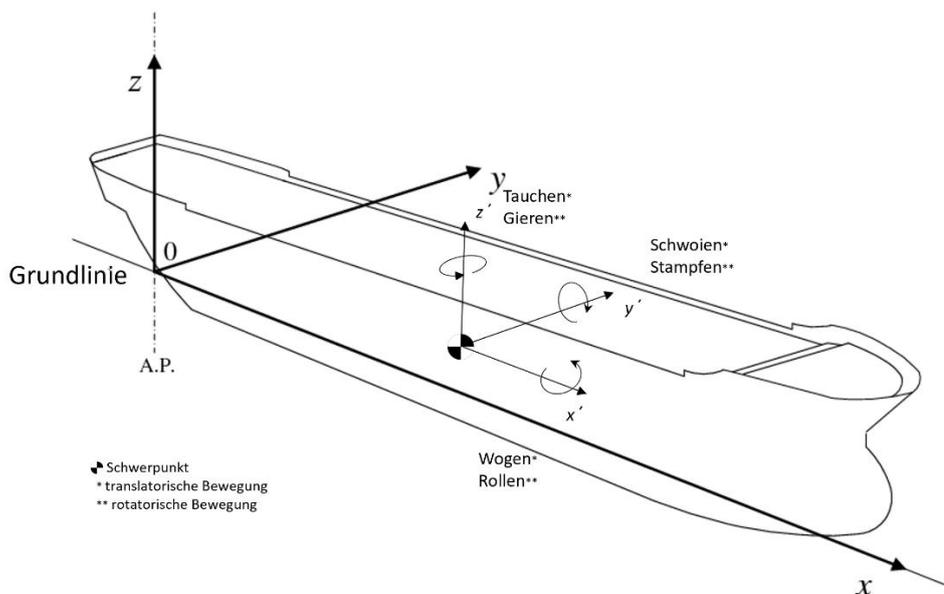
**Tabelle 1 Lastfaktoren  $\gamma_f$  für ULS [6]**

Gewichtsklasse	$\gamma_G$
A	1,05
B und C	1,10

**Tabelle 2 Ungewichteter Ladungsfaktor  $\gamma_G$  [6]**

### 3.1.1 Standardkoordinatensystem

Das Standardkoordinatensystem nach DNV und IMO wird auch zur Beschreibung von Kräften und Momenten verwendet, die auf die Struktur oder das Schiff wirken. Die Kräfte und Momente werden in der Regel in den drei Koordinatenrichtungen ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) angegeben. Positive Kräfte und Momente in der  $x$ -Richtung wirken in Längsrichtung des Schiffes oder der Struktur nach vorn, positive Kräfte und Momente in der  $y$ -Richtung wirken quer zur Längsrichtung nach Steuerbord, und positive Kräfte und Momente in der  $z$ -Richtung wirken nach oben.



**Abbildung 6 Schiffkoordinatensystem nach IMO MSC Circ. 920 / DIN 81209-1.**

Bei der Fahrt von den Schiffe auf See müssen sie sich verschiedenen Arten von Bewegungen aussetzen, die sich aufgrund von Wellen, Wind und der Strömung ergeben.

- Tauchen: Tauchen ist die vertikale Bewegung eines Schiffes unter Wasser. Wenn ein Schiff untertaucht, bewegt es sich vertikal und ändert seine Position in Bezug auf die Wasseroberfläche. Dies kann durch Wind, Wellen oder die Geschwindigkeit des Schiffes verursacht werden. Tauchen kann manchmal plötzlich sein und die Ladung beschädigen, wenn sie nicht ordnungsgemäß gesichert ist. Es ist möglich, die Ladung mit Hilfe von Ladungssicherungsmitteln wie Stahlseilen, Ketten, Gurten oder Keilen zu sichern.
- Gieren: Gieren ist die Drehbewegung eines Schiffes um seine vertikale Achse, die von vorne nach hinten verläuft. Es handelt sich um eine seitliche Bewegung,

bei der das Schiff um die senkrechte Achse rotiert. Diese Bewegung kann sowohl durch Wind und Wellen als auch durch die Beladung des Schiffes verursacht werden. Wenn die Ladung nicht ausgewogen ist, also das Gewicht nicht gleichmäßig auf das Schiff verteilt ist, kann das Gieren unangenehm sein und die Stabilität des Schiffes beeinträchtigen.

- **Schwoien:** Schwoien ist eine seitliche Bewegung, bei der das Schiff sich von einer Seite zur anderen neigt. Diese Bewegung kann durch Wellen, Wind oder den Kurs des Schiffes verursacht werden. Schwoien kann dazu führen, dass sich die Ladung auf dem Schiff verschiebt. Dies kann zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Lasten führen und die Stabilität des Schiffes beeinträchtigen.
- **Stampfen:** Stampfen ist die rotatorische Bewegung eines Schiffes um seine Querachse. Diese Bewegung kann durch schwere See und Wind verursacht werden.
- **Wogen:** Wogen ist eine Bewegung, bei der das Schiff in einer langen Welle auf und ab schwankt. Diese Bewegung kann ebenfalls durch Wellen und Wind verursacht werden.
- **Rollen:** Rollen ist eine Bewegung, bei der das Schiff von einer Seite zur anderen rollt. Diese Bewegung kann durch schwere See und Wind verursacht werden.

### 3.1.2 Lasten

Die Ladung, die auf ein Schiff einwirkt, kann unterschiedliche Ursachen haben, wie zum Beispiel die Erdbeschleunigung, Windkräfte oder die Beschleunigungen durch die Bewegung des Schiffes. Diese Einwirkungen, die späteren mechanischen Modellen zugrunde liegen, werden als Lasten bezeichnet.

#### **Eigengewicht**

Das Eigengewicht des Monopiles ist die einfachste Form einer Last und wird nach der LRFD-Methode als permanente Last betrachtet. Die Entstehung dieser Belastung resultiert aus der Gravitationsbeschleunigung der Erde.

#### **Windkraft**

Die zweite Belastung bezieht sich auf die Windkraft, die nach dem Standard IMO CSS Code bestimmt werden kann. Hierbei wird die projizierte Fläche eines geometrischen Modells berechnet, um die Flächenbelastung durch den Wind zu ermitteln. Sobald die projizierte Fläche ermittelt wurde, kann die Windkraft abgeschätzt werden. Unter Verwendung der zuvor genannten Normierung wird ein dynamischer Druck von  $1 \text{ kN/m}^2$  als Normwert für die Berechnung der Windlast angenommen. Bei einer Luftdichte von  $1,204 \text{ kg/m}^3$  entspricht der angenommene dynamische Druck von  $1 \text{ kN/m}^2$  einer Windgeschwindigkeit von  $40,8 \text{ m/s}$ . [9]

## Lasten aus auftretenden Beschleunigungen

Die Lasten aus auftretenden Beschleunigungen, die in der DNVGL-OS-C101 behandelt werden, sind die resultierenden Kräfte und Momente, die durch Beschleunigungen von Massen auf der Struktur verursacht werden. Diese Lasten treten bei der Bewegung des Schiffs.

### 3.1.3 Lastfälle

Die Lastfälle, die in der Berechnung berücksichtigt werden, sind wie folgt:

Lastfall	Beschreibung	Faktor
LC1	Eigengewicht aus der Erdbeschleunigung	$\gamma_G$
LC2	Längskräfte aus auftretenden Beschleunigung	$\gamma_f$
LC3	Querkkräfte aus auftretenden Beschleunigung	$\gamma_f$
LC4	Vertikale Kräfte aus auftretenden Beschleunigung	$\gamma_f$
LC5	Querkkräfte aus Windwirkung	$\gamma_f$
LC6	Gieren	$\gamma_f$

**Tabelle 3 berücksichtigende Lastfälle**

Da die projizierte Fläche in Längsrichtung bei einem Monopile aufgrund seiner röhrenförmigen Geometrie im Vergleich zur projizierten Fläche in Querrichtung vergleichsweise klein ist, werden die Längskräfte aus Windwirkungen vernachlässigt.

### 3.1.4 Lastkombinationen

Bei der Deckfestigkeitsanalyse von Schiffen werden Lastkombinationen erstellt, um die Belastungen auf die Deckstruktur zu modellieren und zu berechnen, die aus verschiedenen Betriebsbedingungen resultieren können. Dazu gehören die Lasten, die im Abschnitt 3.1.3 genannt wurden.

Durch die Erstellung von Lastkombinationen kann man die Strukturbelastungen auf der Deckstruktur modellieren und berechnen, die sich aus der Kombination von verschiedenen Lastfällen ergeben können. Diese Lastfälle können unterschiedliche Auswirkungen auf die Struktur haben und können sich gegenseitig verstärken, wenn sie gleichzeitig auftreten.

Durch die Berücksichtigung der verschiedenen Lastkombinationen kann sichergestellt werden, dass die Deckstruktur in der Lage ist, den Anforderungen des Schiffsbetriebs standzuhalten und dass das Schiff sicher und zuverlässig ist.

In diesem Projekt werden die nachfolgend aufgeführten Lastkombinationen in Betracht gezogen:

Lastkombination	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6
CO1: Stampfen voraus + negatives Tauchen	$\gamma_G$	$\gamma_f$	0	$-\gamma_f$	0	$\gamma_f$
CO2: Stampfen voraus + positives Tauchen	$\gamma_p$	$\gamma_f$	0	$\gamma_f$	0	$\gamma_f$
CO3: Stampfen achtern + negatives Tauchen	$\gamma_G$	$-\gamma_f$	0	$-\gamma_f$	0	$-\gamma_f$
CO4: Stampfen achtern + positives Tauchen	$\gamma_p$	$-\gamma_f$	0	$\gamma_f$	0	$-\gamma_f$
CO5: Rollen Backbord + negatives Tauchen	$\gamma_G$	0	$\gamma_f$	$-\gamma_f$	$\gamma_f$	0
CO6: Rollen Backbord + positives Tauchen	$\gamma_p$	0	$\gamma_f$	$\gamma_f$	$\gamma_f$	0
CO7: Rollen Steuerboard + negatives Tauchen	$\gamma_G$	0	$-\gamma_f$	$-\gamma_f$	$-\gamma_f$	0
CO8: Rollen Steuerboard + positives Tauchen	$\gamma_p$	0	$-\gamma_f$	$\gamma_f$	$-\gamma_f$	0
CO9: Seitliche See voraus und Backboard + negatives Tauchen	$\gamma_G$	$\gamma_r$	$\gamma_r$	$-\gamma_f$	$\gamma_f$	$\gamma_f$
CO10: Seitliche See voraus und Backboard + positives Tauchen	$\gamma_p$	$\gamma_r$	$\gamma_r$	$\gamma_f$	$\gamma_f$	$\gamma_f$
CO11: Seitliche See achtern und Backboard + negatives Tauchen	$\gamma_G$	$-\gamma_r$	$\gamma_r$	$-\gamma_f$	$\gamma_f$	$-\gamma_f$
CO12: Seitliche See achtern und Backboard + positives Tauchen	$\gamma_p$	$-\gamma_r$	$\gamma_r$	$\gamma_f$	$\gamma_f$	$-\gamma_f$
CO13: Seitliche See voraus und Steuerboard + negatives Tauchen	$\gamma_G$	$\gamma_r$	$-\gamma_r$	$-\gamma_f$	$-\gamma_f$	$\gamma_f$
CO14: Seitliche See voraus und Steuerboard + positives Tauchen	$\gamma_p$	$\gamma_r$	$-\gamma_r$	$\gamma_f$	$-\gamma_f$	$\gamma_f$
CO15: Seitliche See achtern und Steuerboard + negatives Tauchen	$\gamma_G$	$-\gamma_r$	$-\gamma_r$	$-\gamma_f$	$-\gamma_f$	$-\gamma_f$
CO16: Seitliche See achtern und Steuerboard + positives Tauchen	$\gamma_p$	$-\gamma_r$	$-\gamma_r$	$\gamma_f$	$-\gamma_f$	$-\gamma_f$

**Tabelle 4 Lastkombinationen**

Wobei:

- $\gamma_r$  ist der reduzierte Faktor für die seitliche See Lastkombinationen verwendet und kann durch die folgende Formel berechnet werden:

$$\gamma_r = \gamma_f \cdot 0,6$$

[1]

- Der reduzierte Faktor  $\gamma_p$  mit einem Wert von 0,95 wird für das Eigengewicht verwendet und kommt bei positivem Tauchen zur Anwendung.

Die Lastkombination Stampfen + negatives Tauchen bezieht sich auf das gleichzeitige Auftreten von Stampf- und Tauch-Bewegungen eines Schiffes, die dynamische Kräfte auf die Deckstruktur erzeugen. Stampfen ist die Winkelbewegung des Schiffes um seine Querachse, während Tauchen die vertikale Bewegung des Schiffes ist. Wenn das Schiff eine gleichzeitige Stampf- und Tauch-Bewegung erfährt, erzeugt es eine dynamische Kraft auf die Deckstruktur, die während der Deckfestigkeitsanalyse berücksichtigt werden muss.

Die Kombination aus Belastungen durch Roll- und Tauch-Bewegungen eines Schiffes wird als Rollen + negatives Tauchen bezeichnet und erzeugt dynamische Kräfte auf die Deckstruktur. Rollen bezeichnet die Drehbewegung des Schiffes um die Längsachse, während Tauchen die vertikale Bewegung beschreibt. Wenn das Schiff gleichzeitig Roll- und Tauch-Bewegungen nach unten ausführt, führt dies zu dynamischen Kräften auf die Deckstruktur, die bei der Planung und Analyse berücksichtigt werden müssen. Die beschriebene Lastkombination wird als die kritischste betrachtet, da sie aufgrund von höheren Querschleunigungen im Vergleich zur Längsbeschleunigung als besonders herausfordernd gilt. Zudem werden in dieser Lastkombination auch die Windkräfte berücksichtigt, während dies bei der Kombination von Stampfen und negativem Tauchen nicht der Fall ist.

Die Lastkombination "Seitliche See voraus und Backbord + positives Tauchen" bezieht sich auf eine Situation, in der ein Schiff oder eine andere schwimmende Struktur seitlich von einer Welle oder einem See getroffen wird, die von der Steuerbordseite kommt (also von der rechten Seite des Schiffes, wenn man in Fahrtrichtung schaut), während das Schiff auch in Tauchbewegung ist.

### 3.2 Schiffstruktur

Eine wesentliche Komponente der Schiffstruktur sind die Rahmen, die eine wichtige Rolle bei der Unterstützung und Verstärkung der Schiffshülle spielen.

Es gibt verschiedene Arten von Rahmen, die in der Schiffstruktur verwendet werden, um die Struktur des Schiffes zu unterstützen und zu stärken. Hier sind die wichtigsten Rahmenarten für diese Arbeit:

Längsrahmen: Diese Rahmen erstrecken sich entlang der Länge des Schiffes und sind in der Regel parallel zur Kiellinie angeordnet. Sie unterstützen die Längsstabilität des Schiffes und helfen, die auftretenden Kräfte während des Betriebs zu verteilen.

Querrahmen (Spanrahmen) sind vertikale Elemente, die quer zur Längsrichtung des Schiffes angeordnet sind und die Hauptlasten aufnehmen. Sie erstrecken sich von der

Kiellinie bis zur Schiffsaußenhaut und sind in regelmäßigen Abständen entlang der Schiffslänge angeordnet.

Schotten sind horizontale Elemente, die dazu dienen, das Innere des Schiffes in separate Räume oder Abteile zu unterteilen. Schotten dienen dazu, die strukturelle Integrität des Schiffes zu verbessern, indem sie die Ausbreitung von Wasser im Falle einer Leckage begrenzen und die Sicherheit an Bord gewährleisten. Sie können auch zur Verbesserung der Stabilität und zur Optimierung der Ladungssicherung verwendet werden.

### 3.3 Schraubenverbindung

Eine Schraubenverbindung ist eine Art der Verbindung, bei der zwei oder mehrere Bauteile miteinander verbunden werden, indem Schrauben verwendet werden. Es gibt verschiedene Arten von Schraubenverbindungen, wie zum Beispiel Bolzen- oder Gewindestangenverbindungen, die je nach Anwendungsfall unterschiedliche Anforderungen an Festigkeit, Steifigkeit, Korrosionsschutz und Montage haben können.

Die DIN EN 1993-1-8 ist eine europäische Norm, die die Bemessung von Schraubenverbindungen in Stahlkonstruktionen behandelt. Diese Norm enthält Anforderungen an die Festigkeit von Schrauben, Unterlegscheiben und Muttern sowie an die Tragfähigkeit von Schraubenverbindungen unter verschiedenen Lastarten wie Zug-, Scher- und Querkraften.

Diese Norm wird in dieser Bachelorarbeit verwendet, um die Tragfähigkeit der Schraubenverbindungen zu berechnen und um sicherzustellen, dass die Schraubenverbindung den Anforderungen der Norm entspricht. Die Berechnungen nach DIN EN 1993-1-8 sind ein wichtiger Teil der Bemessung von Schraubenverbindungen und ermöglichen es, eine sichere und zuverlässige Verbindung zu gewährleisten, die den Lasten standhält, denen sie ausgesetzt ist.

#### 3.3.1 Bestimmung des Schraubendurchmessers

Zur Bestimmung des Spannungsquerschnitts wird die folgende Formel verwendet:

$$A_s \geq \frac{F_{kl}}{\frac{R_{p,0,2}}{\kappa \cdot k_A} - \beta \cdot E \cdot \frac{f_z}{l_k}} \quad [2]$$

Nach der Bestimmung des Querschnitts wird der geeignete Schraube aus der Tabelle nach DIN 13 T1 ausgewählt.

#### 3.3.2 Abschertragfähigkeit

Die Abschertragfähigkeit ist eine der wichtigsten Tragfähigkeitskennwerte für Schraubenverbindungen und beschreibt die maximale Belastung, die eine Schraubenverbindung unter Scherbeanspruchung aufnehmen kann, bevor es zum Versagen kommt.

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_S}{\gamma_{M2}} \quad [3]$$

Die Abschertragfähigkeit ist abhängig von der Festigkeit des verwendeten Materials, der Größe der Schraube, dem Gewindeprofil und der Art der Belastung.

### 3.3.3 Lochleibung

Die Lochleibungstragfähigkeit ist ein weiterer wichtiger Kennwert für Schraubenverbindungen, der beschreibt, welche maximale Belastung eine Verbindung aus einem Bauteil mit einem oder mehreren Löchern und einem Bauteil mit einer Schraubenverbindung aufnehmen kann, bevor es zum Versagen kommt.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_m \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad [4]$$

Für am Rand liegende Schrauben:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{d_0}; \frac{3f_{ub}}{f_u}; 3\right) \quad [5]$$

Für innen liegende Schrauben:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; \frac{3f_{ub}}{f_u}; 3\right) \quad [6]$$

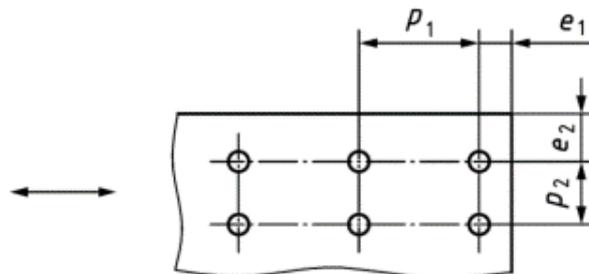


Abbildung 7 Darstellung der Lochabstände

### 3.3.4 Zugtragfähigkeit

Die Zugtragfähigkeit ist ein weiterer wichtiger Kennwert für Schraubenverbindungen, der beschreibt, welche maximale Zugbelastung die Schraubenverbindung aufnehmen kann, bevor es zum Versagen kommt.

$$F_{t,d} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_S}{\gamma_{M2}} \quad [7]$$

Die Zugtragfähigkeit hängt ebenfalls von verschiedenen Faktoren ab, wie der Festigkeit des Materials, der Größe und Geometrie der Schraube, der Art der Belastung und der Umgebungsbedingungen. Es ist wichtig zu beachten, dass die Zugtragfähigkeit auch von

der Verbindungsmethode abhängt, z.B. ob die Schraubenverbindung in gesteckter oder gestauchter Ausführung vorliegt.

### 3.3.5 Kombination von Scher-/ Lochleibung und Zug

Die Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug ist ein wichtiger Aspekt bei der Berechnung der Tragfähigkeit von Schraubenverbindungen nach DIN EN 1993-1-8. Dabei geht es darum, die maximale Belastung zu ermitteln, die die Schraubenverbindung unter einer Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug aufnehmen kann, bevor es zum Versagen kommt. Es kann wie folgend berechnet werden:

$$\left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right) + \left(\frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}}\right) \leq 1 \text{ aber } \left(\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}}\right) \leq 1 \quad [8]$$

## 3.4 Methodik

### 3.4.1 Bewertung der Verformung

Die Verformung von Bauteilen wird gemäß der Norm DIN 1993-1-1 Eurocode 3 bewertet. [1]

$$\delta_{max} = \frac{L}{200} \quad [9]$$

### 3.4.2 Bewertung der Spannungen

In dieser Arbeit werden die Spannungen mit einem Materialfaktor von  $\gamma_m = 1,15$  bewertet. [6]

D.h. bei dem Material: S235:  $\sigma_{zul,S235} = \frac{235 \text{ MPa}}{1,15} = 204 \text{ MPa}$

bei dem Material S355:  $\sigma_{zul,355} = \frac{355 \text{ MPa}}{1,15} = 308 \text{ MPa}$

bei dem Material GL24c:  $\sigma_{zul,GL24c} = \frac{21,5 \text{ MPa}}{1,15} = 18,7 \text{ MPa}$

## 4 Umsetzung

In diesem Abschnitt wird die Umsetzung der Konstruktion eines Transportrahmens für Monopiles beschrieben. Dabei wird auf die Anforderungen an den Transportrahmen und die Herangehensweise bei der Konstruktion eingegangen. Zudem werden die Materialien und Komponenten, die für den Bau des Transportrahmens verwendet wurden, sowie der Bauablauf beschrieben.

### 4.1 Annahmen und Randbedingungen

Im folgenden Abschnitt werden die Annahmen und Randbedingungen aufgeführt, die bei der Konstruktion des Transportrahmens für Monopile berücksichtigt wurden. Diese Annahmen und Randbedingungen stellen die Grundlage für die gesamte Arbeit dar und sind von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit und Validität der Ergebnisse.

#### 4.1.1 Software

Zur Durchführung der FEM-Analyse wird die Software RFEM 5.29.01 verwendet, die umfassende Funktionen für die Modellierung, Analyse und Visualisierung von Ergebnissen bietet. In diesem Zusammenhang wird in dieser Arbeit die Anwendung von RFEM zur Durchführung der FEM-Analyse des Transportrahmens und zur Bestimmung der Deckfestigkeit des Schiffs untersucht. Darüber hinaus wird die Festigkeit des Holzes mittels Ansys Workbench analysiert.

#### 4.1.2 Schiff

Das Modell und die Struktur des Schiffes spielt eine entscheidende Rolle bei der Analyse des Verhaltens des Transportrahmens und des Monopiles während des Transports.

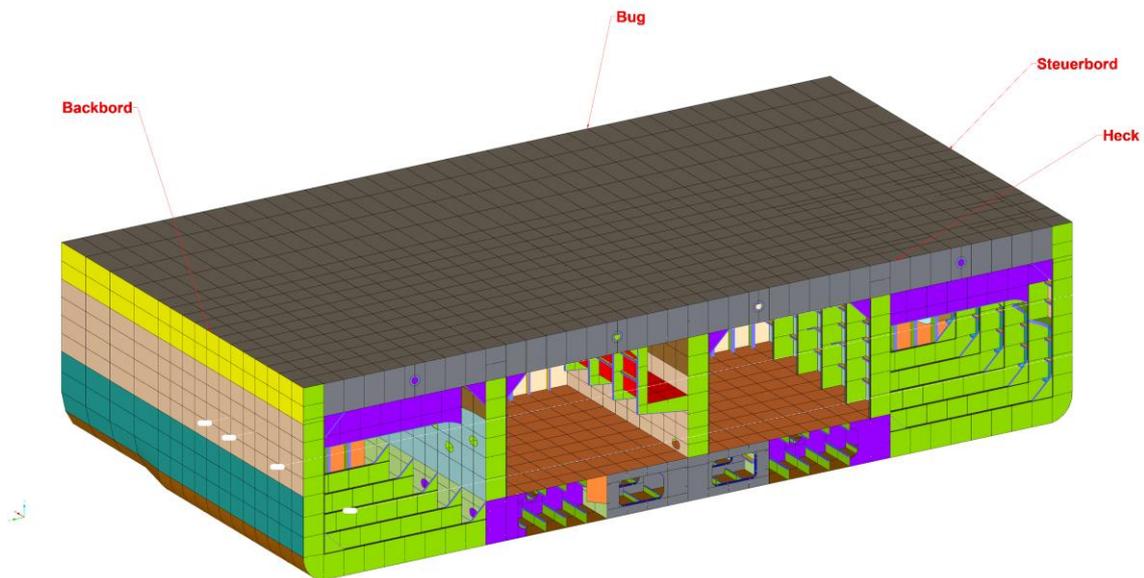
Das Schiff trägt den Transportrahmen mit dem Monopile und ist daher das primäre System, das bei der FEM-Simulation berücksichtigt werden muss. Die Modellierung der Struktur des Schiffes in der FEM-Simulation ist wichtig, um sicherzustellen, dass die Lasten, die auf den Transportrahmen übertragen werden.

Eingesetzter Schiff	
LOA	162,00 m
$B_{\text{Schiff}}$	38,00 m
$D_{\text{Schiff}}$	9,00 m
Tragfähigkeit	10.19 t

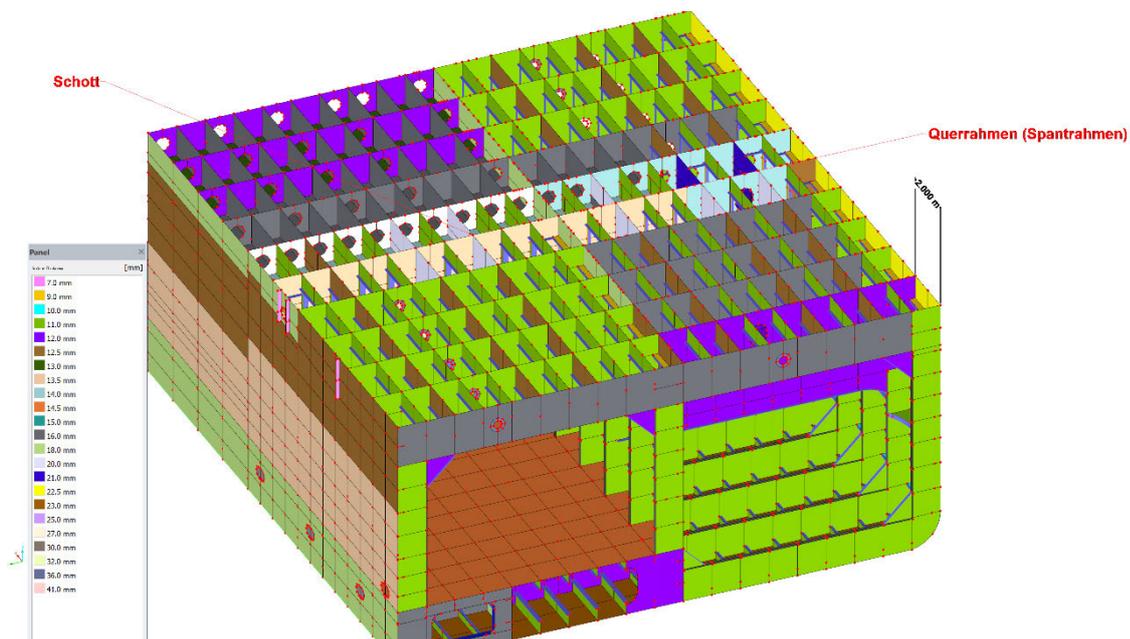
**Tabelle 5 Schiffkennwerte [8]**

In dieser Arbeit wird der Schiffrahmen von Rahmennummer 38 bis 47 untersucht. Diese Rahmen weisen manchmal unterschiedliche Strukturen auf, wie z.B. unterschiedliche Wandstärken der Träger, unterschiedliches Material und unterschiedliche Größen. Die

verschiedenen Wandstärken können auch die Spannungswerte bei der Darstellung der Ergebnisse beeinflussen.



**Abbildung 8 Darstellung der Orientierung des Schiffs**



**Abbildung 9 Darstellung der Struktur des untersuchten Bereichs des Schiffs**

In der obigen Abbildung ist die Struktur des untersuchten Bereichs des Schiffes dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass der Abstand zwischen den Spantrahmen 2000mm beträgt, was für die Konstruktion des Transportrahmens von Bedeutung ist.

### 4.1.3 Monopile

Das Modell beschreibt das physikalische System und seine Geometrie, während die Be-maßungen die Abmessungen und Eigenschaften des Monopiles darstellen.

Das Modell wird in der FEM-Simulation verwendet, um das Verhalten des Monopiles und des Transportrahmens unter verschiedenen Lastbedingungen zu analysieren. Die Be-maßungen des Monopiles beeinflussen direkt die Ergebnisse der Simulation, da sie die Material- und Geometrieigenschaften des Monopiles bestimmen.

Daten von Monopile	
$L_{MP}$	83,20 m
$D_{MP,max}$	12,00 m
$D_{MP,min}$	10,50 m
$t_{MP}$	105,00 mm
$m_{MP}$	2528,00 t

**Tabelle 6 Monopile-Spezifikationen**

Um realistische Werte für diese Arbeit zu erhalten, wurden die Abmessungen von bereits vorhandenen Monopiles aus vergangenen Projekten übernommen und angepasst, um den Anforderungen der aktuellen Aufgabenstellung sowie zukünftigen Transporten gerecht zu werden.

### 4.1.4 Beschleunigungen

Während der Arbeit wird verschiedene FEM-Berechnungen durchgeführt und dafür wird die folgenden Beschleunigungen angenommen:

Beschleunigung	Einheit	Wert
$a_x$	$m/s^2$	0,50
$a_y$	$m/s^2$	3,00
$a_z$	$m/s^2$	2,50
$J_{xx}$	$deg/s^2$	11,00
$J_{yy}$	$deg/s^2$	3,00
$J_{zz}$	$deg/s^2$	1,20

**Tabelle 7 eingesetzte Beschleunigungen [8]**

Die beschriebenen Beschleunigungen wurden mithilfe einer Bewegungsanalyse des Schiffs ermittelt, die mit der Software Octopus-Office durchgeführt wurde. Diese Software bietet Funktionen zur Vorhersage von Schiffsbewegungen, indem sie Wetterbedin-gungen, Seegang und historische Schiffsbewegungsdaten berücksichtigt.

## 4.2 Anforderungen

Für die Konstruktion eines Transportrahmens für den maritimen Einsatz müssen in dieser Arbeit verschiedene Anforderungen gemäß DNVGL-ST-N001 berücksichtigt werden.

### 4.2.1 Allgemeine Anforderungen

Der Transportrahmen muss in der Lage sein, die maximal erwarteten Lasten zu tragen, welche durch das Gewicht des Monopiles, die Bewegungen des Schiffes während der Seefahrt und die Wetterbedingungen verursacht werden.

Um das Monopile sicher aufzunehmen, muss der Rahmen die richtigen Abmessungen haben. Die Größe des Rahmens sollte entsprechend den Anforderungen sein, jedoch nicht größer, um unnötig Platz auf dem Schiff einzunehmen.

Ein wichtiger Aspekt ist auch die Festigkeit der Konstruktion, welche sicherstellen muss, dass das Monopile gehalten und gestützt wird, ohne dass Teile versagen oder das Monopile und der Rahmen sich stark verformen.

Darüber hinaus ist auch die Stabilität des Bauteils von großer Bedeutung. Während der Seefahrt muss der Transportrahmen am Schiff befestigt sein, um ein Verrutschen, Gleiten oder Kippen des Monopiles zu verhindern.

Das Gewicht des Transportrahmens für Monopiles hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der Größe, des Designs und der Materialien, die bei der Konstruktion verwendet werden. Im Allgemeinen sollte der Transportrahmen jedoch so konstruiert sein, dass er das Gewicht des Monopiles sicher tragen kann, ohne die Grenzen der zulässigen Gewichtskapazität zu überschreiten.

Der Transportrahmen muss so konstruiert sein, dass er mit einem Self-Propelled Modular Transporter (SPMT) gehoben und positioniert werden kann.

Bei der Gestaltung des Rahmens sollte der wirtschaftliche Aspekt berücksichtigt werden, indem Material eingespart und die Wandstärke so gering wie möglich gehalten wird.

Der Transportrahmen muss den geltenden Normen und Vorschriften entsprechen, die für den Transport von Offshore-Windkraftanlagen gelten.

### 4.2.2 Anforderungen an die Durchmesseranpassung

Da der Lagerungsbereich des Monopiles aus verschiedenen schrägen Platten besteht, ist es von großer Bedeutung, die Stabilität des Anpassungswerkzeugs zu gewährleisten und sicherzustellen, dass das verwendete Konzept nicht kippt oder verrutscht.

Das für die Durchmesseranpassung verwendete Material muss über ausreichende Festigkeitseigenschaften verfügen, um den Belastungen während des Transports standzuhalten.

Das Gewicht des verwendeten Konzepts sollte von einer oder zwei Personen tragbar sein und darf nicht 50 kg überschreiten. Das Konzept sollte so gestaltet sein, dass es mit handelsüblichen oder speziellen, aber leichteren Werkzeugen durchgeführt werden

kann, um die Arbeitsabläufe zu optimieren und die Abhängigkeit von schweren und komplexen Werkzeugen zu minimieren.

### **4.2.3 Anforderungen an die gleichmäßige Lastenteilung ins Deck**

Es ist wichtig, Punktlasten zu vermeiden, um lokale Belastungen auf das Deck zu minimieren. Punktlasten können zu übermäßigen Spannungen oder Verformungen des Decks führen, insbesondere wenn sie an empfindlichen oder schwachen Bereichen des Decks platziert werden. Daher sollte die Konstruktion des Transportrahmens so gestaltet sein, dass die Lasten über eine größere Fläche verteilt werden, um lokale Spannungsspitzen oder Verformungen zu verhindern.

Die Abstände zwischen den Querrahmen des Schiffes, auf dem der Transportrahmen positioniert wird, können von Schiff zu Schiff variieren. Daher ist es wichtig, dass die Lastenteilung des Transportrahmens so gestaltet ist, dass sie den spezifischen Abständen zwischen Querrahmen des jeweiligen Schiffes entspricht.

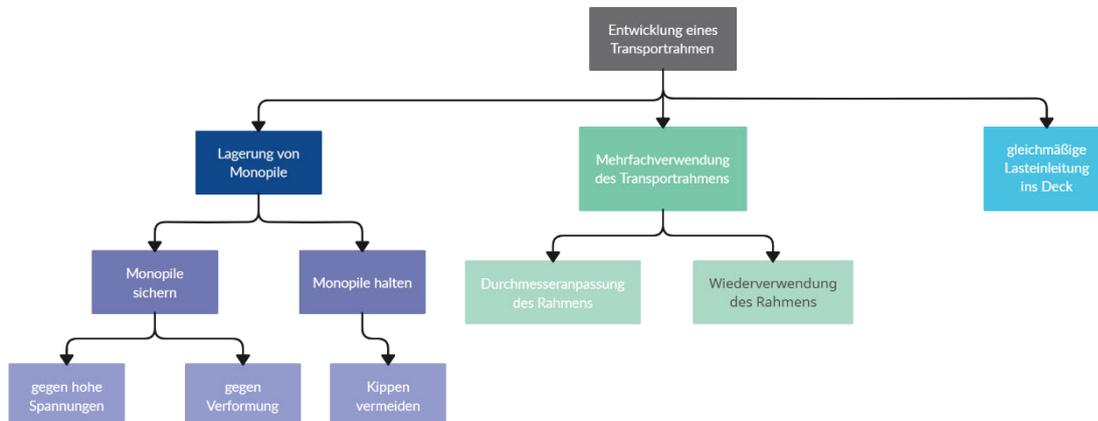
### **4.2.4 Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens**

Um die Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens zu gewährleisten, sollten bestimmte Teile so konstruiert sein, dass sie austauschbar sind, wenn der Rahmen auf verschiedenen Schiffen mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Querrahmen verwendet wird.

Die Verbindungsmethode und die Anzahl der Schrauben für die Montage des Transportrahmens sollten so gestaltet sein, dass sie sowohl die erforderliche Stabilität und Festigkeit für den sicheren Transport der Monopiles gewährleisten als auch eine einfache Montage und Demontage ermöglichen, um die Wiederverwendbarkeit des Rahmens zu erleichtern.

## 4.3 Funktionen

In diesem Abschnitt werden die drei Hauptfunktionen, die aus Abschnitt 1.1 abgeleitet wurden, detailliert erläutert.



**Abbildung 10 Hierarchische Darstellung der Funktionen**

Während des Transports auf See ist es wichtig, dass das Monopile sicher auf einem Transportrahmen gelagert wird. Der Rahmen muss stabil sein, um Bewegungen und Belastungen des Monopiles zu vermeiden. Es ist besonders wichtig, dass der Rahmen das Verrutschen oder Herunterfallen des Monopiles verhindert und sicher auf dem Deck befestigt wird, um Schäden zu vermeiden. Bei der Konstruktion und Simulation des Rahmens müssen diese Aspekte besonders beachtet werden, da das Schiff in rauen Seegebieten fährt und dadurch eine große Belastung auf den Rahmen und das Monopile ausgeübt wird.

Ein wichtiger wirtschaftlicher Aspekt ist die Mehrfachverwendung des Transportrahmens, da die Transportkosten von Monopiles dadurch erheblich reduziert werden können. Es gibt verschiedene Lösungen für die Durchmesseranpassung, aber sie müssen einsatzbereit sein.

Die Struktur des Rahmens muss so konstruiert sein, dass die Lasten gleichmäßig auf dem Rahmen verteilt werden, um eine ungleichmäßige Verteilung der Lasten und Spannungskonzentrationen auf dem Deck des Schiffes zu vermeiden. Die Struktur des Rahmens hängt von der Struktur des Schiffes und den Abständen zwischen den Querrahmen des Schiffes ab. Es ist auch wichtig, dass der Rahmen für größere Monopiles oder bei Verwendung eines anderen Schiffes mit unterschiedlicher Struktur wiederverwendbar ist. Die Kräfte und Lasten müssen daher berücksichtigt und austauschbare Bauteile ausgewählt werden. Schließlich muss die Verbindungsmethode unter Berücksichtigung von Kriterien wie Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Montagezeit ausgewählt werden.

## 4.4 Morphologischer Kasten

In diesem Abschnitt werden jeweils zwei Lösungsvorschläge für jede Hauptfunktion präsentiert und bewertet, um letztendlich zu einer möglichen Lösung für den Transportrahmen zu gelangen.

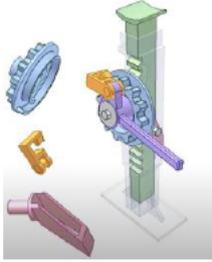
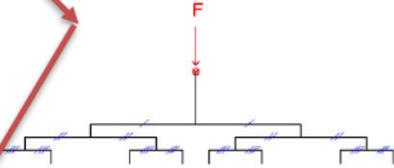
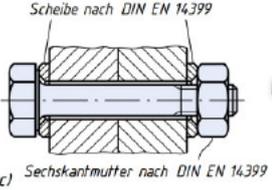
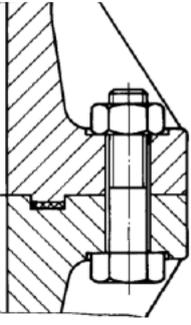
Kriterium	Mögliche Lösungsalternativen	
Durchmesseranpassung	<b>Holzblock</b> 	<b>Mechanische Getriebe</b> 
Untere Struktur des Transportrahmens	<b>Rohrkonstruktion</b> 	<b>Verzweigtes Balkensystem mit Plattenkonstruktion</b> 
Verbindungsmethode	<b>Schrauben direkt im Bauteil</b>  <p>[12]</p>	<b>Schrauben mit Flansch</b>  <p>[12]</p>

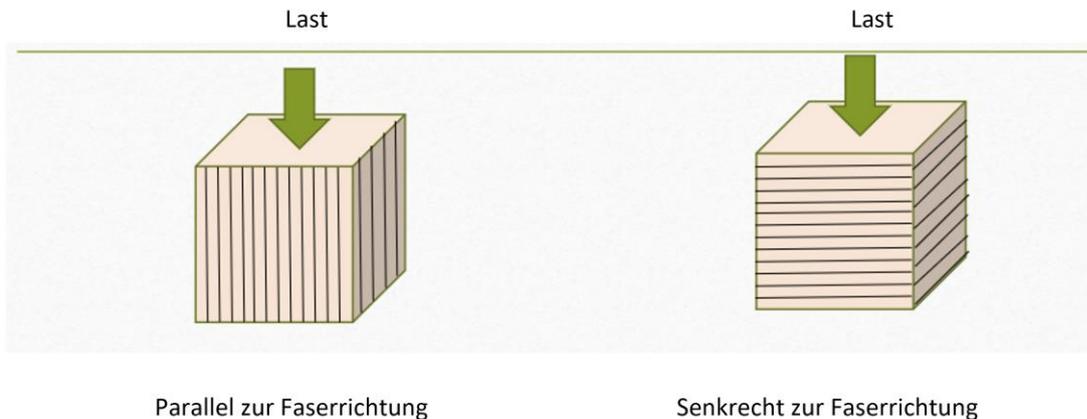
Tabelle 8 Morphologische Kasten

### 4.4.1 Durchmesseranpassung

#### Holzblöcke

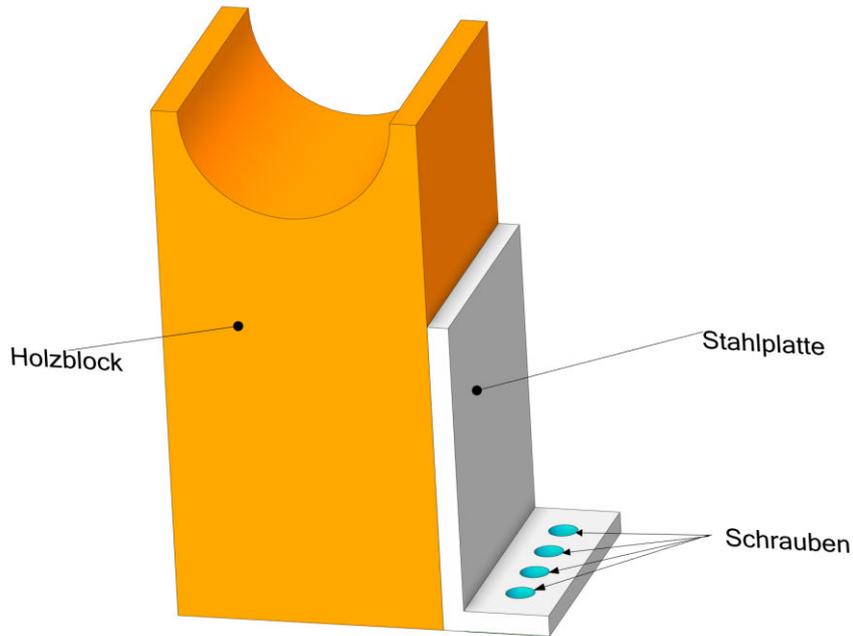
Holzblöcke sind eine geeignete Option für die Durchmesseranpassung und werden im maritimen Bereich oft verwendet, um das Gewicht von Ladungen gleichmäßig zu verteilen. Holz bietet eine hohe Festigkeit und geringes Gewicht, aber diese Festigkeit hängt von der Richtung ab, aufgrund der Anisotropie des Holzes. Die Druckfestigkeit von Holz ist entlang der Längsrichtung der Holzfasern am höchsten, da die Fasern in dieser Richtung ununterbrochen verlaufen und große Lasten aufnehmen können. Diese Richtung wird auch als "Faserrichtung" bezeichnet. Im Gegensatz dazu ist die Druckfestigkeit von

Holz in der Querrichtung, also senkrecht zur Faserrichtung, deutlich geringer, wie in Tabelle 6 dargestellt. Die Zellwände des Holzes sind in dieser Richtung weniger stabil und können daher weniger Last aufnehmen. Aus diesem Grund ist es wichtig, die anisotropen Eigenschaften des Materials zu berücksichtigen und das Holz entsprechend zu orientieren, um maximale Festigkeit und Stabilität zu gewährleisten.



#### **Abbildung 11 Schematische Darstellung der Kräfte in Holzproben in paralleler und senkrechter Richtung zur Faserrichtung**

Die Idee hier ist, kleine Holzstücke zu verwenden und sie am Ende mit Schrauben zu verbinden. Das für die Holzstücke verwendete Material ist GL24c, eine Festigkeitsklasse für Brettschichtholz (BSH), auch bekannt als "Glued Laminated Timber" (Brettschichtholz). Es besteht aus faserparallel lamellierten Holzschichten und hat eine gehobelte Oberflächenqualität. Die Holzstücke werden an zehn verschiedenen Stellen auf dem Transportrahmen positioniert. Der Holzblock wird oben bearbeitet und besitzt den gleichen Umfang wie das Monopile. Die Blöcke werden durch eine Stahlplatte in Querrichtung gestützt, die auf dem Transportrahmen festgeschraubt wird. Diese Platte verhindert ein Verrutschen und Kippen des Holzblocks. Da die Kräfte in Längsrichtung viel kleiner sind, werden die Blöcke durch einen integrierten Absatz auf der Transportrahmenstruktur gehalten und gestützt. In diesem Fall werden die Schrauben nach Berechnung der Reaktionskräfte des Holzblocks bestimmt. Die verwendeten Holzstücke können auch für weitere Projekte wiederverwendet werden, was die Kosten erheblich reduziert.

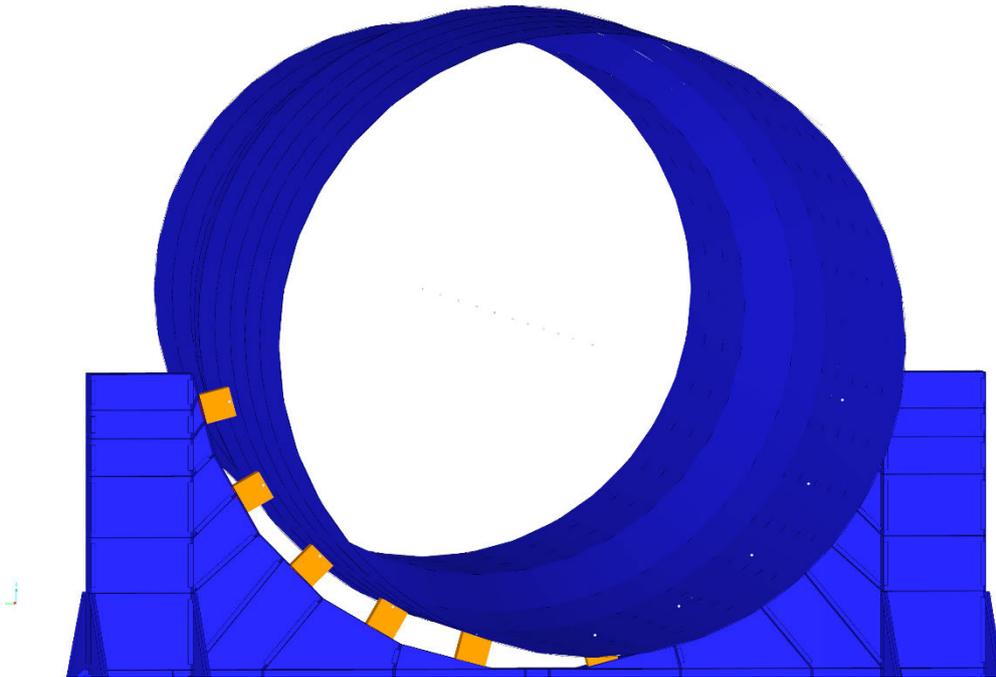


**Abbildung 12 vereinfachtes Holzblockmodell mit Stahlplatte**

Um die beste Festigkeit des Holzes zu erreichen, werden die Holzstücke parallel zur Faserrichtung verwendet. In der folgenden Tabelle ist ein Vergleich der Materialeigenschaften zwischen beiden Fällen dargestellt.

Eigenschaften	GL 24c parallel zur Faserrichtung	GL24c senkrecht zur Faserrichtung
E-Modul [MPa]	11000,00	300,00
Schubmodul [MPa]	650,00	650,00
Zugfestigkeit [MPa]	17,00	0,50
Druckfestigkeitswert $f_c$ [MPa]	21,50	2,50
Biegefestigkeit $f_{m,g,k}$ [MPa]	24,00	24,00

**Tabelle 9 Werkstoffkennwerte nach DIN EN 1995-1-1:2010-12**



**Abbildung 13 Beispiel für die Anordnung von Holzblöcken auf dem Transportrahmen**

Der Lagerungsbereich des Monopile besteht aus verschiedenen schrägen Platten, wodurch Holzstücke mit unterschiedlichen Längen erforderlich sind, um den Durchmesser des neuen Monopile anzupassen. Die Schritte umfassen Ermitteln des Durchmesserunterschieds zwischen dem vorhandenen Lagerungsbereich des Monopile und dem neuen Monopile, Zuschneiden von Holzstücken entsprechend den schrägen Platten, Befestigen der Holzstücke am Lagerungsbereich.

### **Mechanische Getriebe**

Mechanische Getriebe sind in vielen Anwendungen im Maschinenbau unverzichtbar, da sie die Energie und das Drehmoment von einem Antrieb auf eine Ausgangswelle übertragen. Um den Durchmesser anzupassen, kann ein Schneckengetriebe mit einer Gewindestange verwendet werden. Dabei greift die Gewindestange in das Schneckenrad

ein und wird durch die Drehung der Schnecke angetrieben. Üblicherweise wird die Gewindestange durch Drehen einer Kurbel bewegt, die direkt an der Schnecke befestigt ist.



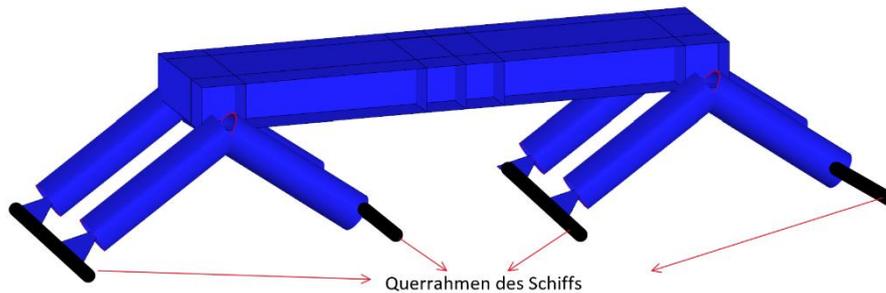
**Abbildung 14 Jacton Getriebe für Wagenheber**

Als Beispiel sind am Markt Schneckengetriebe mit einer maximalen Kapazität von 100 Tonnen erhältlich. Jedoch reicht dies nicht aus, um ein Monopile mit einem Gewicht von 2200 Tonnen und einem Durchmesser von 10,50 Metern zu transportieren. Nach Durchführung von Initialberechnungen für die kritischsten Lastkombinationen CO5 und CO7 mit zehn Kontaktstellen wurde festgestellt, dass die obere linke Kontaktstelle eine Drucklast von 5950 kN bzw. 606 t aufweist, wie im Anhang A zu sehen. Um dieses Problem zu lösen, könnten mehrere Getriebe sowohl in x- als auch in y-Richtung verwendet werden, was jedoch zu einem höheren Platzbedarf führt. Alternativ könnte das Schneckengetriebe optimiert und anstelle des Kaufs modelliert werden. Zudem müsste das Design des Transportrahmens angepasst werden, um das Schneckengetriebe in den Rahmen zu integrieren. Die Getriebe könnten auf der Schrägplatte eingesetzt und mit Schrauben verbunden werden. Die Lasten würden von den Getrieben auf das Fundament des Getriebes übertragen und am Ende auf dem Transportrahmen verteilt.

#### **4.4.2 Lastenteilung ins Deck**

##### **Rohrkonstruktion**

In den letzten Jahrzehnten haben Rohrkonstruktionen aufgrund ihrer vielen Vorteile in verschiedenen Bereichen der Konstruktion an Beliebtheit gewonnen, insbesondere im Maschinenbau. Die Verwendung von Rohren als primärem Baumaterial ermöglicht es, Konstruktionen zu schaffen, die leicht und robust sind.



### Abbildung 15 mögliche Rohrkonstruktion

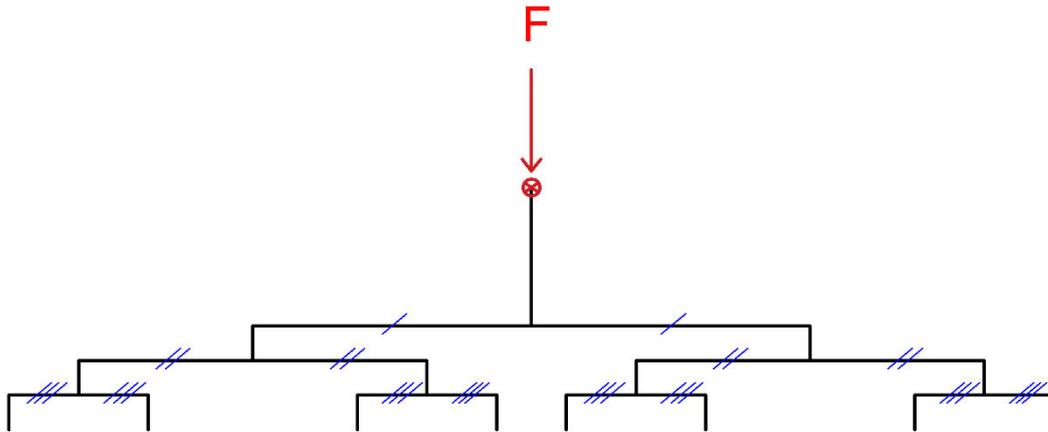
Für die Konstruktion des Transportrahmens können vier Rohre pro Seite verwendet werden, die jeweils den gleichen Winkel haben. Jedes Rohr wird auf einer der starken Stellen des Schiffes positioniert, um eine gleichmäßige Verteilung der Lasten des Monopiles auf die Rohre und das Schiff zu gewährleisten.

Diese Lösungsvariante birgt bei sehr hohen Lasten, wie sie in diesem Projekt auftreten, viele Probleme. Durch den Einsatz langer Rohre kann es zu Instabilitätsproblemen kommen und eine Durchbiegung kann unerwünschte Verformungen verursachen. Um diese Probleme zu vermeiden, müssen größere Querschnitte verwendet werden, was zu einem höheren Gewicht des Transportrahmens führt.

Neben den mechanischen Problemen gibt es auch ein wirtschaftliches Problem bei dieser Konstruktion. Rohre haben oft komplexe Formen und Abmessungen, die spezielle Bearbeitung erfordern. Um die gewünschten Formen und Abmessungen zu erreichen, sind spezielle Werkzeuge und Techniken wie Schneiden, Biegen und Schweißen erforderlich, die spezifisches Fachwissen und Erfahrung erfordern. Größere Rohre können zudem schwerer und schwieriger zu handhaben sein als Platten, was die Bearbeitungskosten weiter erhöht.

### Verzweigtes Balkensystem

Ein verzweigtes Balkensystem ist eine Struktur, die aus einem Hauptbalken besteht, der in mehrere kleinere Balken verzweigt ist. Jeder dieser kleineren Balken kann wiederum in weitere kleinere Balken verzweigt werden, um ein komplexes und robustes Trägersystem zu schaffen. Die Idee hinter einem verzweigten Balkensystem ist es, Lasten gleichmäßig auf mehrere Balken zu verteilen, um die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Struktur zu verbessern.



**Abbildung 16 verzweigtes Balkenmodell**

Ein verzweigtes Trägersystem wird hier verwendet, um Lasten von Monopiles gleichmäßig auf mehrere Träger zu verteilen, um sicherzustellen, dass das Gewicht gleichmäßig auf dem Schiff verteilt wird und die Struktur stabil bleibt. Das System besteht aus einem Hauptträger, der in zwei Verzweigungen aufgeteilt wird, wobei jede Verzweigung dann wieder in zwei weitere Verzweigungen aufgeteilt wird, bis am Ende vier Verzweigungen entstehen.

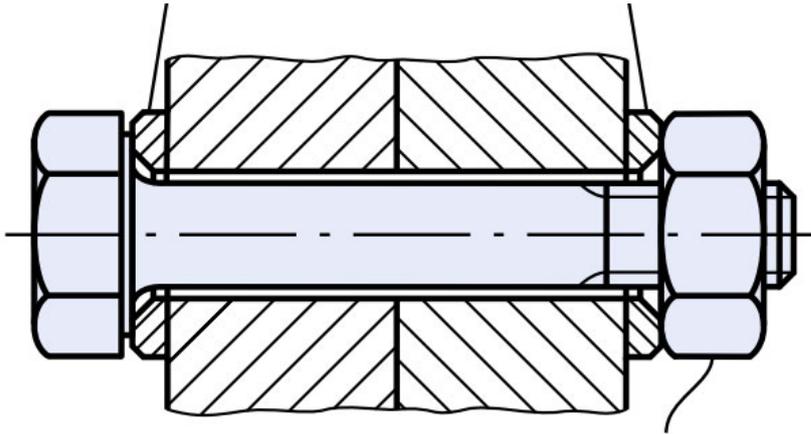
In diesem Modell wird eine Plattenkonstruktion verwendet. Die Platten sind einfach herzustellen, da im Vergleich zur Rohrkonstruktion komplexe Bearbeitungen vermieden werden können, was zu günstigeren Herstellungskosten führt. Der wichtigste Punkt ist die gleichmäßige Verteilung der Last auf die gesamte Fläche der Platten. Darüber hinaus sind die Platten einfach zu schweißen.

#### **4.4.3 Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens**

Um die Nachhaltigkeit dieser Konstruktion zu erreichen, müssen mehrere Bauteile lösbar und tauschbar sein. Aus diesem Grund wird als erstens die Verbindungsmethode ausgewählt. Nach dem muss eine Entscheidung getroffen, welche Bauteile des Rahmens werden als tauschbare Teile bezeichnet.

##### **Schraubenverbindung direkt im Bauteil**

Eine Methode dafür ist die Schraubenverbindung. Die Schraubenverbindung ist eine der häufigsten Methoden zur Verbindung von Bauteilen in der Mechanik und im Maschinenbau. Sie besteht aus einer Schraube, einer Mutter und einem zu verbindenden Werkstück. Die Schraubenverbindung ist eine Form der lösbaren Verbindung, die es ermöglicht, die Bauteile bei Bedarf auseinanderzunehmen.

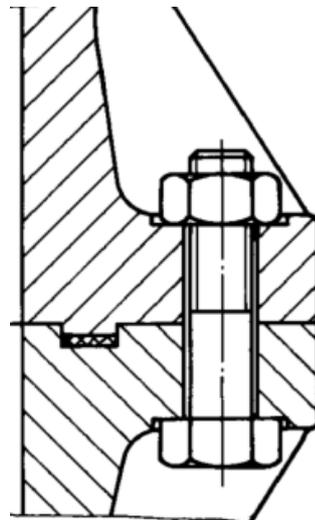


**Abbildung 17 Sechskanteschraube mit Mutter im Bauteil [12]**

Diese Lösung bietet eine kompakteren und leichteren Bauweise. Außerdem ist diese Methode einfacher herzustellen und braucht keine zusätzliche Teile. Aber wegen der kleineren Auflagefläche der Schrauben kann die Schraubenverbindung zu höheren Spannungen und damit zu einer geringeren Belastbarkeit führen.

### **Schraubenverbindung mit Flansch**

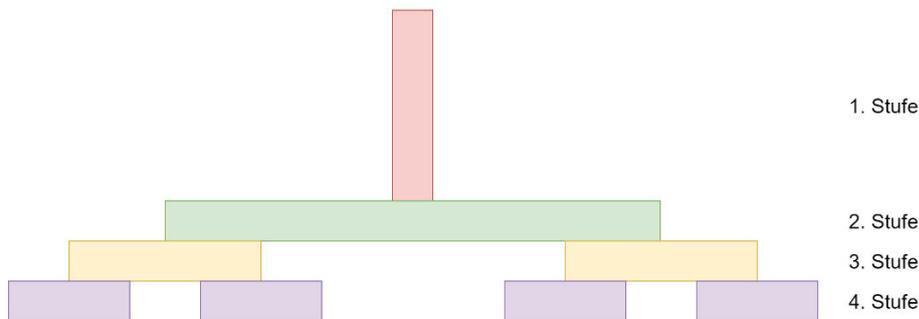
Der Flansch erhöht die Auflagefläche der Schraubverbindung und verteilt somit die Belastung auf eine größere Fläche. Eine Schraubverbindung mit Flansch ermöglicht eine einfachere Demontage und Wartung, da der Flansch als fester Ankerpunkt für die Schrauben dient. Aber Die Verwendung eines Flansches erfordert zusätzliche Materialien und Arbeitsschritte bei der Herstellung, was zu höheren Kosten führen kann.



**Abbildung 18 Sechskanteschraube mit Flansch [12]**

### **Auswahl von tauschbare Teile des Transportrahmens**

Es stehen mehrere Optionen zur Verfügung, um die austauschbaren Teile des Transportrahmens auszuwählen. Das Rahmendesign basiert im Wesentlichen auf einem verzweigten Balkenmodell mit vier verschiedenen Stufen, wie in Abbildung 19 dargestellt.



**Abbildung 19 Schematische 2D-Skizze**

Der Austausch der ersten Stufe könnte helfen, die Größe des Monopiles anzupassen, da das Monopile auf der ersten Stufe gelagert wird. Allerdings treten in diesem Fall Lasten von 6556 kN in Querrichtung auf, was eine größere Herausforderung für die Verbindungsmethode darstellt.

Die zweite Stufe ist dafür verantwortlich, die Lasten des Hauptteils des Rahmens auf die beiden Seiten zu verteilen, wobei jede Seite 50% der Lasten übernimmt. Es ergibt jedoch keinen Sinn, nur diesen Teil austauschbar zu machen, da auch die erste Stufe in diesem Fall austauschbar sein sollte, da sie voneinander abhängig sind. Eine Änderung der zweiten Stufe hat den Vorteil, dass sie die Verteilungslänge auf dem Schiff bestimmt.

Die dritte Stufe ist eine gute Wahl, aber sie ist abhängig von den Längen der vierten Stufe. Wenn die Längen der Teile der dritten Stufe verkürzt werden, stoßen sie mit den Teilen der vierten Stufe zusammen. Zudem wird die Anpassung der Teile der vierten Stufe an die Positionen der Querrahmen des Schiffs schwieriger, da die Abstände zwischen den Querrahmen variieren.

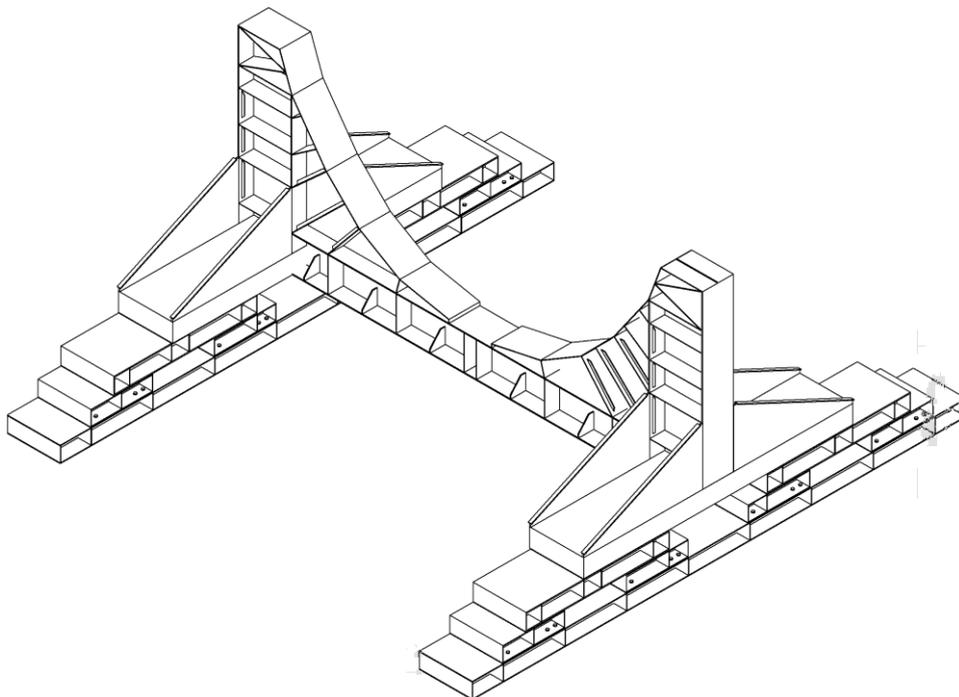
Aus diesen Gründen wurde die vierte Stufe als austauschbares Teil ausgewählt. Wenn diese Stufe flexibel ist, kann sie so eingestellt werden, dass die Teile sich den Querrahmen des Schiffs nähern und in diesem Fall kann entschieden werden, wie lang sie sein müssen und wo sie positioniert werden sollen, um eine gleichmäßige Lasteinleitung ins Deck zu ermöglichen. Zudem übernimmt jede untere Kontaktstelle dieser Stufe etwa 12,5% der Lasten und die oberen Kontaktstellen etwa 25% der Lasten, was im Vergleich zu den anderen Stufen weniger Herausforderungen mit sich bringt.

## 4.5 Vorstellung des Lösungsmodells

In diesem Teil wird das vorgeschlagene Modell zur Lösung des identifizierten Problems detailliert präsentiert und werden die verschiedenen Komponenten des Lösungsmodells detailliert beschrieben.

Beschreibung	Wert	Einheit
$L_{TR}$	16,00	m
$B_{TR}$	15,06	m
$H_{TR}$	7,80	m
$H_{SP,TR}$	1,90	m
$G_{TR}$	126,60	t

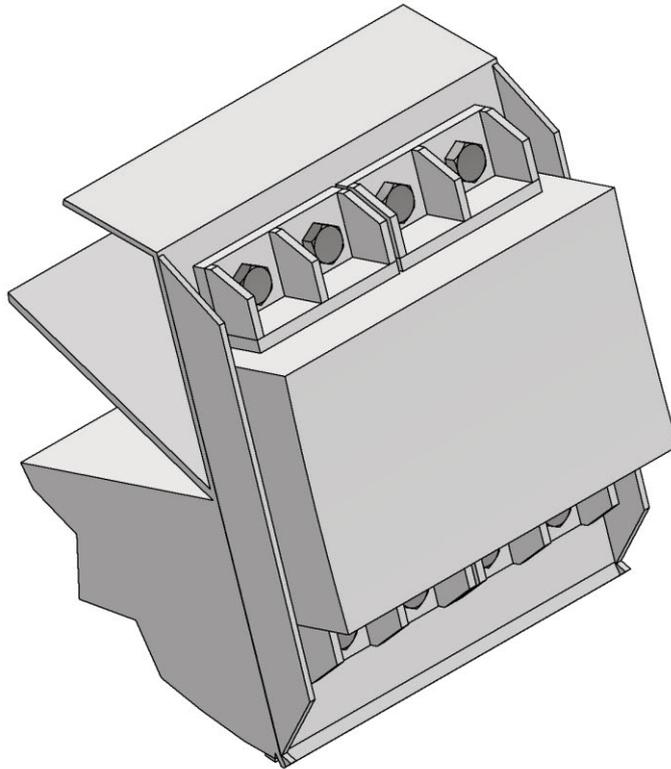
**Tabelle 10 Kennwerte des Transportrahmens**



**Abbildung 20 3D Modell für die Lösungsvariante**

Der Transportrahmen wurde entworfen, um ein Monopile mit einem Gewicht von 2528t zu tragen. Die Breite des Rahmens spielt eine wichtige Rolle, um ein Kippen des Rahmens bei seitlichen Kräften zu verhindern. Daher wurde die Breite der Seiten des Rahmens großzügig dimensioniert. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Breite zu reduzieren, indem geeignete Verzurrungen und Befestigungsmittel verwendet werden.

## 4.5.1 Durchmesseranpassung



### Abbildung 21 Darstellung des Konzepts zur Durchmesseranpassung

Wie im Abschnitt 4.4.1 erläutert wurde, ist das Konzept darauf ausgelegt, Holzstücke zur Durchmesseranpassung zu nutzen. Um ein Kippen der Holzstücke zu vermeiden, werden Stahlstützen verwendet, die mit Schrauben am Rahmen befestigt sind. Die Höhe der Stahlstütze muss mindestens der Höhe des Schwerpunkts des Holzblocks entsprechen, um Stabilität zu gewährleisten.

Im ungünstigsten Fall werden die höchsten Kräfte in der oberen linken Kontaktstelle übertragen, da die Querbewegung und die Windkraft in dieser Richtung wirken. Die Längskraft beträgt nur 25 kN, während die Druckkraft bei 5949 kN liegt. Die Querkraft beträgt 2687 kN, was eine Herausforderung für die Stahlstütze und die Verbindungsmethode darstellt und das Konzeptentwurf erschwert. Nach Berechnungen wurde jedoch festgestellt, dass die Verwendung von Holzstücken akzeptabel ist.

Aufgrund der höheren Querkraft mussten vier Schrauben verwendet werden. Diese Schrauben haben die Größe M60 und die Festigkeitsklasse 8.8. Die Berechnungen zeigen, dass die Schrauben zu 97% ausgelastet sind, daher wird empfohlen, stattdessen M64-Schrauben zu verwenden. Die Verwendung von dieser Schrauben hat jedoch Nachteile in Bezug auf Montagewerkzeuge und Montagezeit, da ein Anziehmoment von 12219 Nm für M60 erforderlich ist, um dieses Moment zu erreichen, was den Einsatz

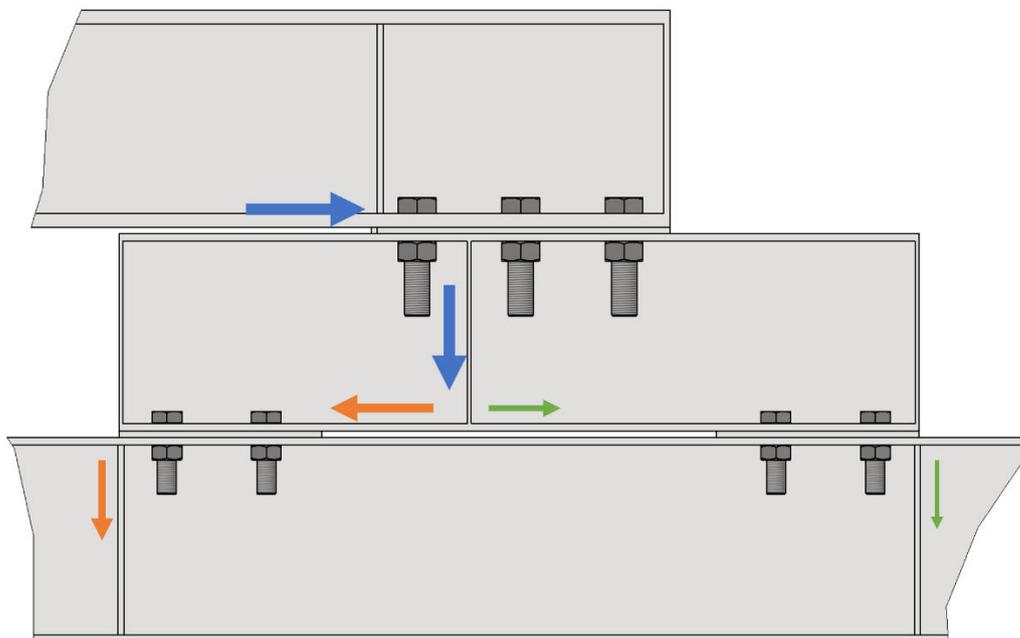
von pneumatischen oder hydraulischen Drehmomentschlüsseln erfordert. Eine Alternative könnte die Erhöhung der Festigkeitsklasse auf 10.9 sein, um kleinere Durchmesser auswählen zu können.

Da das Gewicht der Platte eine wichtige Überlegung ist, wie im Abschnitt 4.2.2 erwähnt, wurde die Platte in zwei Teilen hergestellt, um das Gewicht zu reduzieren. Jeder Teil wiegt 45 kg, was leicht von zwei Personen getragen und bewegt werden kann. Um die Steifigkeit der Stütze zu erhöhen, wurden drei Rippen für jeden Teil verwendet.

Für Bereiche, in denen längere Holzstücke nicht erforderlich sind, wird diese Stahlstütze nicht verwendet, da sie zu groß ist, und stattdessen wird eine flache Stahlplatte eingesetzt. Die Schraubengröße und die Anzahl der Schrauben können hier reduziert werden, da die Lasten geringer sind, wie im Anhang A gezeigt wird.

#### 4.5.2 Lastenteilung ins Deck

Die Basis des Rahmens besteht aus geschweißten doppel-T Profilen mit verschiedenen Wandstärken. Stahlplatten werden verwendet, um die Steifigkeit der Träger zu erhöhen und das Auftreten von großen Biegungen zu verhindern. Diese Platten werden beispielsweise unter den äußeren Kanten der Füße platziert und leiten die Kräfte auf den Schiff weiter. Auf das Basis werden pro Seite acht Füße platziert, die den gleichen Abstand zwischen den Querrahmen des Schiffs haben. Um den Kontakt über die gesamte Länge des Fußes zu verhindern, wird zwischen den verschiedenen Teilen der genannten Stufen im Abschnitt 4.4.3 eine Stahlplatte verwendet.



**Abbildung 22 Darstellung des Rahmenfuß mit vereinfachter Kraftverteilung**

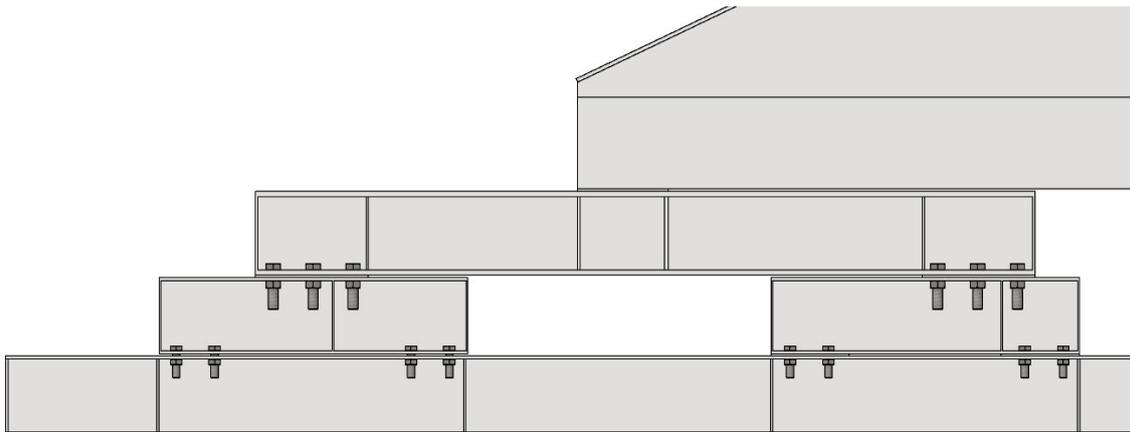
Durch die Verwendung einer Stahlplatte zwischen dem Fuß und der Basis wird sichergestellt, dass die Lasten gleichmäßig auf bestimmte Stellen verteilt werden, sowohl auf der einen als auch auf der anderen Seite. Ohne die Verwendung der Stahlplatte würden

die Kräfte nur an der ersten Kontaktstelle verteilt, wodurch die inneren Träger des Schiffs im Vergleich zu den äußeren Trägern die größten Kräfte übernehmen würden. In Abbildung 22 ist eine vereinfachte Darstellung der Verteilung der Hauptkräfte mithilfe dieses Konzepts dargestellt.

Bei der anfänglichen Berechnung werden alle Füße symmetrisch positioniert, sodass theoretisch die Kräfte gleichmäßig verteilt sind und jeder Rahmen des Schiffs 12,5% der Gesamtkraft übernimmt, wie im Anhang C erklärt.

Bei der Konstruktion des Rahmens wurde auch der freie Raum in der Mitte berücksichtigt, um den Transport mit SPMT (Selbstfahrende Plattformwagen) gemäß Abschnitt 4.3 zu ermöglichen. Der Abstand in dieser Konstruktion beträgt 1645 mm, was mit dem SPMT von MAMMOET, das eine Höhe von 1500 mm  $\pm$ 300 mm hat, kompatibel ist. Um Verformungen der Rahmenstruktur zu verhindern, wurden Beulsteifen auf den größeren Stahlplatten angebracht, um ihre Stabilität zu erhöhen.

### 4.5.3 Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens



**Abbildung 23 Darstellung der unteren Struktur des Rahmens**

Wie im Abschnitt 4.4.3 beschrieben, wurde die Verbindung zwischen der dritten und vierten Stufe mit Sechskantschrauben hergestellt. Es wurden drei Schrauben in Längsrichtung und zwei Schrauben in Querrichtung verwendet. Diese Schrauben sind vom Typ M64 mit einer Festigkeitsklasse von 10.9. Für die Verbindung zwischen der vierten Stufe und der Basis wurden zwei Schrauben in Längsrichtung und zwei Schrauben in Querrichtung verwendet. Diese Schrauben waren vom Typ M48 mit einer Festigkeitsklasse von 8.8.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt wurde, erfordern größere Schrauben in der Regel die Verwendung von pneumatischen oder hydraulischen Drehmomentschlüsseln, um sie anzuziehen. Dies ist auch im vorliegenden Fall der Fall. Die Schrauben können mit einem hydraulischen Drehmomentschlüssel sowie pneumatischen Drehmomentschlüsseln angezogen werden, aufgrund des erforderlichen Anzugsmoments von 20759

Nm für diese Schrauben. Pneumatische Drehmomentschlüssel sind in der Regel einfacher zu handhaben, ermöglichen eine größere Mobilität und Flexibilität bei der Anwendung und arbeiten oft schneller. Zudem erfordern sie im Vergleich zu hydraulischen Drehmomentschlüsseln weniger Wartungsaufwand.

Mit diesem Konzept wird die vierte Stufe austauschbar, sodass sie an verschiedene Querabstände verschiedener Schiffe angepasst werden kann.

## 5 Darstellung der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung detailliert dargestellt. Dabei werden die Spannungswerte, Verformungen und andere relevante Parameter präsentiert und analysiert. Es werden die Unterschiede in den Ergebnissen für verschiedene Bereiche des Schiffrahmens, insbesondere für die Rahmennummern 38 bis 47, aufgezeigt. Zudem werden mögliche Einflüsse von variierenden Strukturen, wie unterschiedlichen Wandstärken der Träger und Materialien, berücksichtigt. Die Darstellung der Ergebnisse liefert wichtige Erkenntnisse, um die Belastbarkeit und Stabilität des Schiffrahmens zu bewerten und die Konstruktion des Transportrahmens für Monopile zu optimieren. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung für die kritischsten Lastkombination CO3, detailliert präsentiert. Die Ergebnisse für die drei weiteren Lastkombinationen werden im Anhang D präsentiert.

### 5.1 Finite-Elemente-Modellierung

Das Modell wurde mit Flächen konstruiert und dann die Dicken der Flächen eingegeben, wie in Abbildung 22 erläutert.

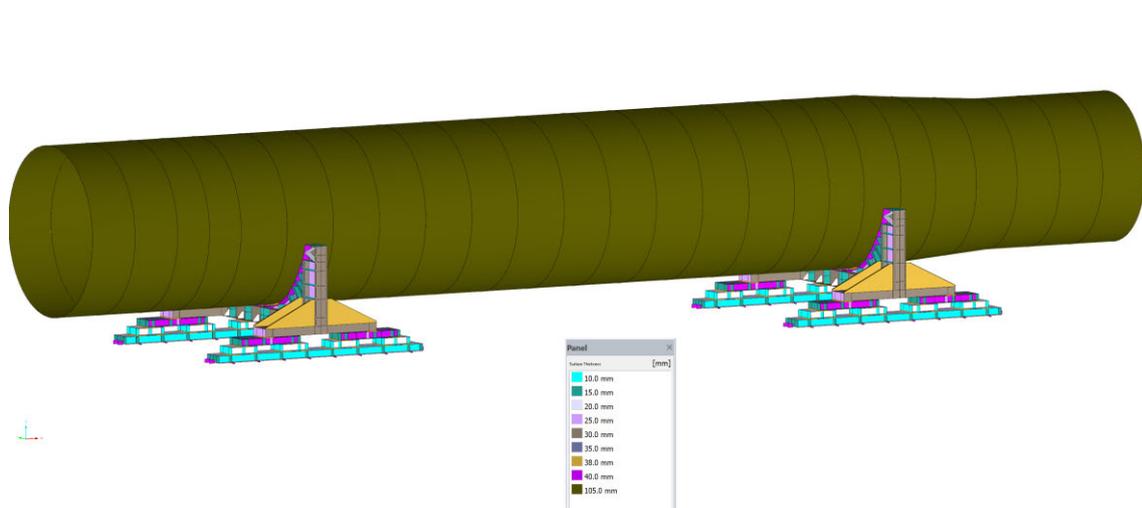


Abbildung 24 Darstellung des gesamten FE Modells

#### 5.1.1 Kontaktmodellierung von Monopile und Transportrahmen

RFEM bietet verschiedene Arten von Stäben an, die in dieser Arbeit verwendet werden, um den Kontakt zwischen zwei Flächen zu implementieren. Eine davon ist der Balkenstab, der alle Schnittgrößen übertragen kann. Der Starrstab wird eingesetzt, um die Verschiebungen zweier Knoten zu koppeln. [5]

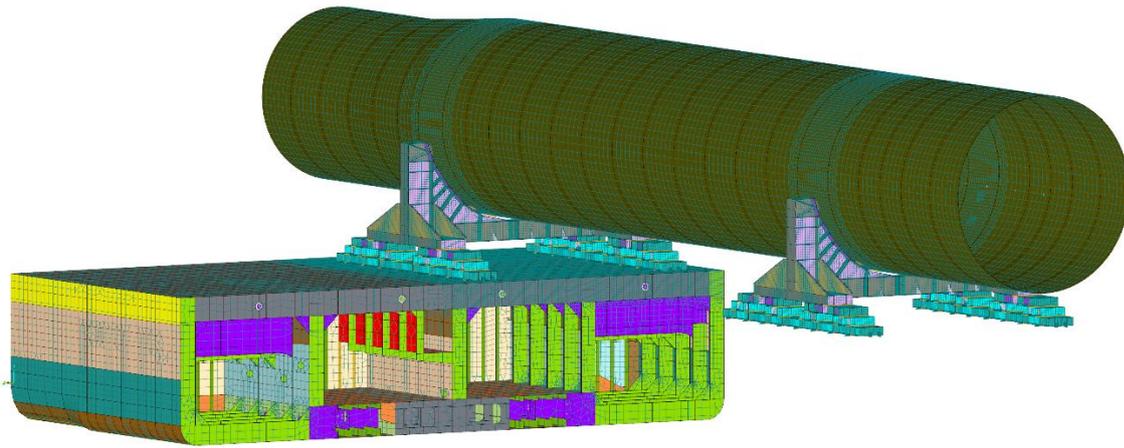


### Abbildung 25 Darstellung der Kontaktmodellierung

Um die Realität möglichst genau abzubilden, wurde für den Kontakt zwischen dem Monopile und dem Transportrahmen eine spezielle Konstruktion verwendet. Dabei wurden Balkenstäbe mit Nichtlinearität eingesetzt, die keine Zugkräfte übernimmt, und über Starrstäbe mit dem Transportrahmen verbunden. Da das Monopile in der Realität auf dem Rahmen aufliegt und nur Druckkräfte auf den Rahmen wirken, soll die Konstruktion dies möglichst realitätsgetreu abbilden.

#### 5.1.2 Netz

Für die analysierten Bereiche des Schiffs und die Kontaktstellen zwischen dem Rahmen und dem Monopile wurde eine Netzgröße von 100 mm festgelegt. Die freien Bereiche des Monopiles verwenden eine Netzgröße von 500 mm, da sie einen geringeren Einfluss auf die Ergebnisse haben. Die linke unbesetzte Seite und die Unterseite des Schiffs wurden mit einer Netzgröße von 500 mm modelliert. Der Innenboden des Schiffs verwendet ebenfalls eine Netzgröße von 500 mm. Der Bereich zwischen dem Innenboden des Schiffs und den analysierten Bereichen verwendet eine Netzgröße von 300 mm, wobei die Verfeinerung in Stufen erfolgt, um größere Unterschiede in den Netzgrößen zu vermeiden, die zu verfälschten Ergebnissen führen könnten. Die inneren und äußeren Stopper verwenden eine Netzgröße von 25 mm, da sie im Vergleich zum Deck und Rahmen eine kleinere Geometrie aufweisen.



**Abbildung 26 Das Netz des gesamten Modells**

In der Darstellung der Ergebnisse können erhöhte Spannungskonzentrationen auftreten, da kleine Balken verwendet werden, um die Kontaktflächen zu modellieren. Dies kann zu punktueller Lastübertragung und infolgedessen zu Spannungskonzentrationen an bestimmten Stellen führen. Aus diesem Grund werden diese überlasteten Bereiche untersucht, um festzustellen, ob sie aufgrund von Modellannahmen auftreten oder ob sie realistisch sind und potenziell Probleme verursachen könnten.

### 5.1.3 Material

Im FE-Modell werden verschiedene Komponenten, wie der Transportrahmen, das Monopile und das Schiff, berücksichtigt. Das Monopile und der Transportrahmen bestehen aus dem Material S355, während die untersuchten Teile des Schiffs aus dem Material S235 besteht, wie im Abschnitt 4.1.2 erwähnt wurde.

Beschreibung	Wert	Einheit
Material	S355	-
$R_e$	355	MPa
E-Modul	210	GPa
$\nu$	0,3	-
G	80	GPa

**Tabelle 11 Materialkennwerte für den Transportrahmen und Monopile**

## 5.2 Lastkombination CO3: Rollen Backbord + negatives Tauchen

Beschreibung	Wert	Einheit
Summe die Lasten in x	0	kN
Summe die Lasten in y	16160,90	kN
Summe die Lasten in z	-52898,20	kN
Maximale Verformung in x	-2,40	mm
Maximale Verformung in y	88,40	mm
Maximale Verformung in z	-42,40	mm
Maximale Resultierende Verformung	89,80	mm

Tabelle 12 Zusammenfassung der Ergebnisse von CO3

### 5.2.1 Konzept der Durchmesseranpassung

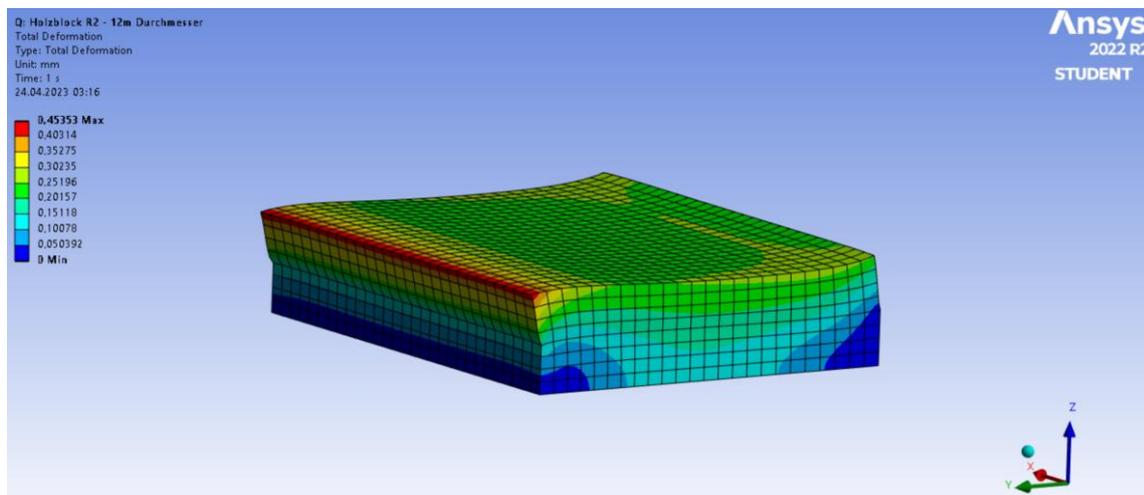
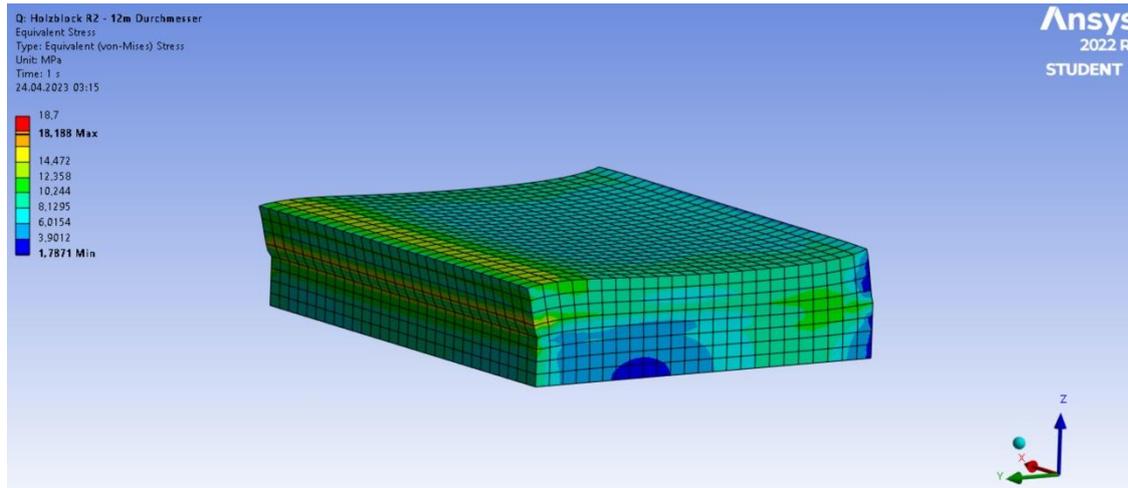


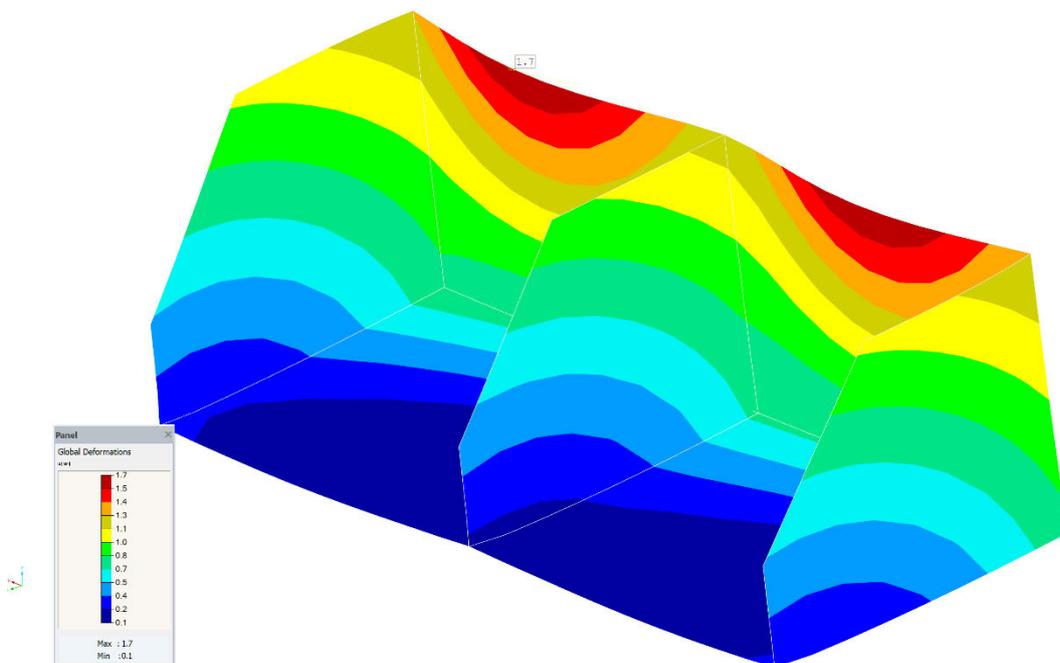
Abbildung 27 CO3: Absolute Verschiebung des Holzblocks

In der obenstehenden Abbildung ist die absolute Verschiebung des Holzblocks dargestellt. Es wurde eine Verformung in der Höhe von 0,45 mm gemessen, was als akzeptabel betrachtet wird.



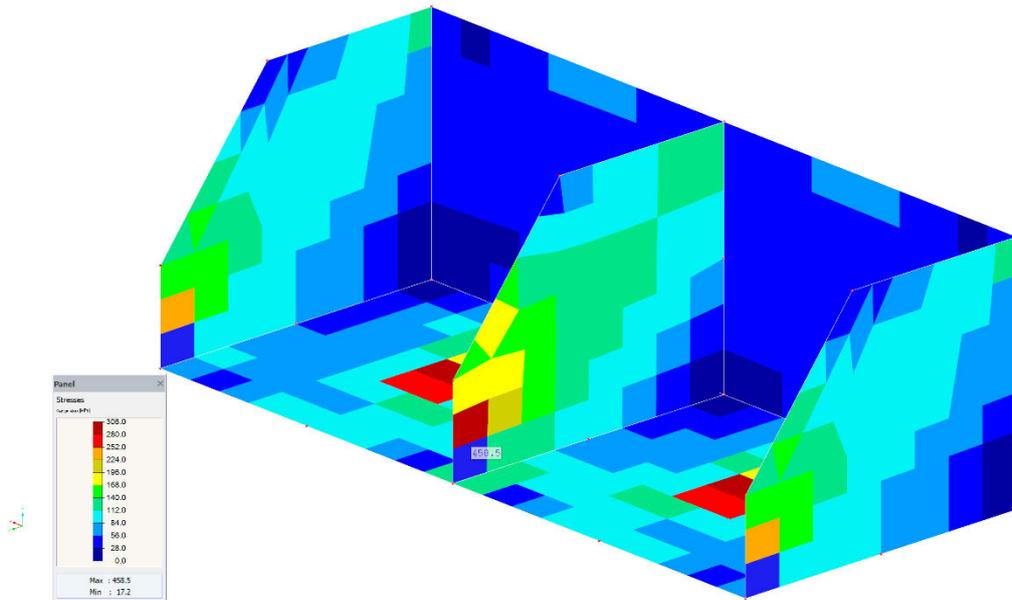
**Abbildung 28 Von-Mises Vergleichsspannung des Holzblocks**

Die maximale von Mises berechnete Vergleichsspannung beträgt 18,18 MPa, was nahe an der Materialgrenze liegt, wie im Abschnitt 3.4.2 erläutert wurde.



**Abbildung 29 CO3: Absolute Verschiebung der Stützplatte**

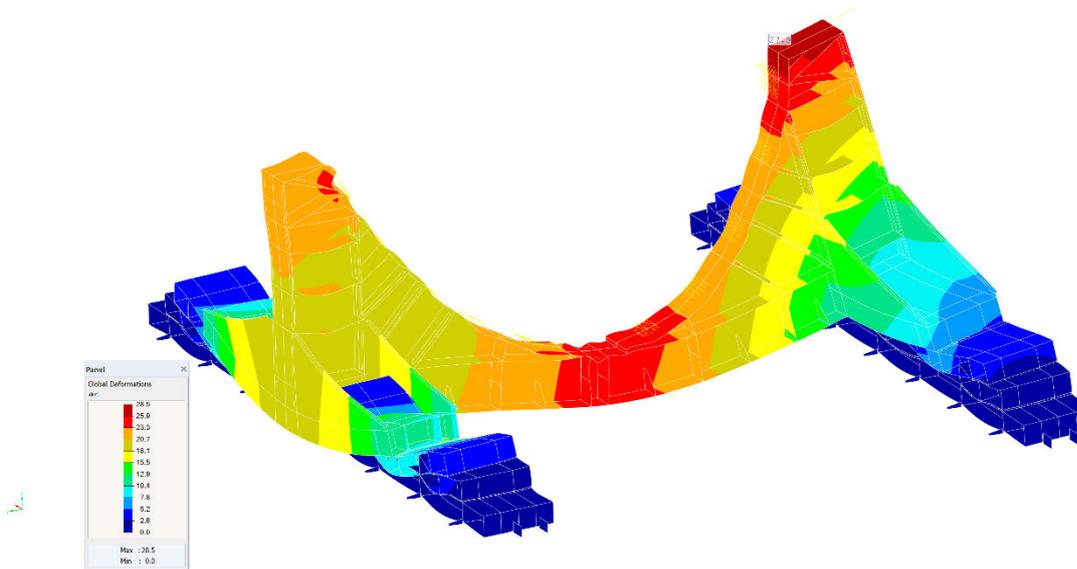
Das Stützsystem wird aufgrund der Verringerung der Steifigkeit an die leere Stelle verformt. Die Verformungen liegt innerhalb der zulässigen Grenzwerte gemäß den anwendbaren Normen und Standards, wie im Abschnitt 3.4.1 erläutert wurde. Wobei die Grenzwert ist 2 mm.



**Abbildung 30 Von-Mises Vergleichsspannung der Stützplatte**

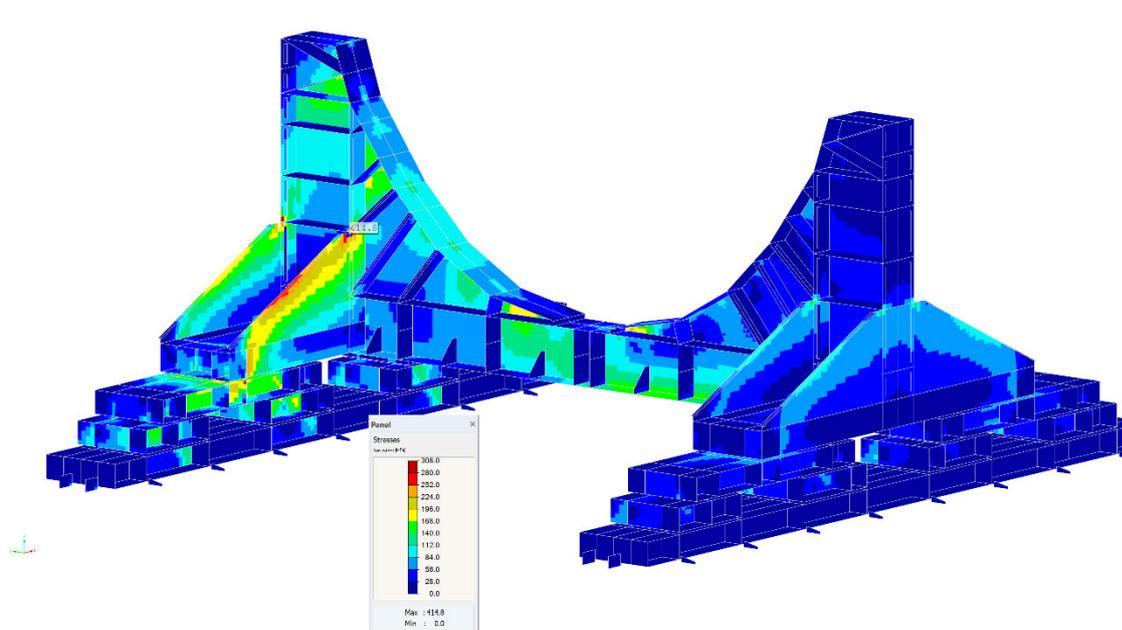
Die Spannungen auf der Stützplatte haben die zulässige Grenze überschritten und sind an der Kontaktstelle wegen der Verwendung von den Druckbalken aufgetreten.

## 5.2.2 Transportrahmen



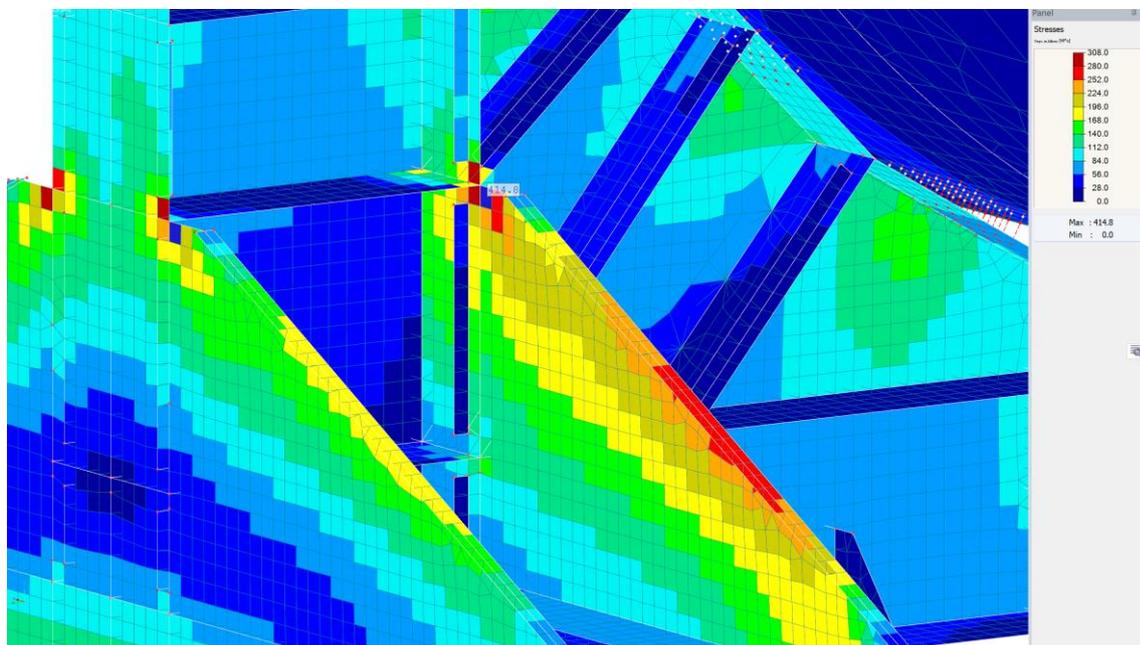
**Abbildung 31 CO3: Absolute Verschiebung des Rahmens**

Der Transportrahmen zeigt eine Verformung in der Mitte mit einer maximalen Verschiebung von 28,5 mm. Diese Verformung kann durch das größere Gewicht des Monopiles erklärt werden, was zu einer lokalen Biegung führt und somit auch zu größeren Verformungen an den oberen Spitzen des Rahmens. Trotzdem bleibt die absolute Verschiebung unterhalb der zulässigen Grenzwerte und wird daher als akzeptabel betrachtet.

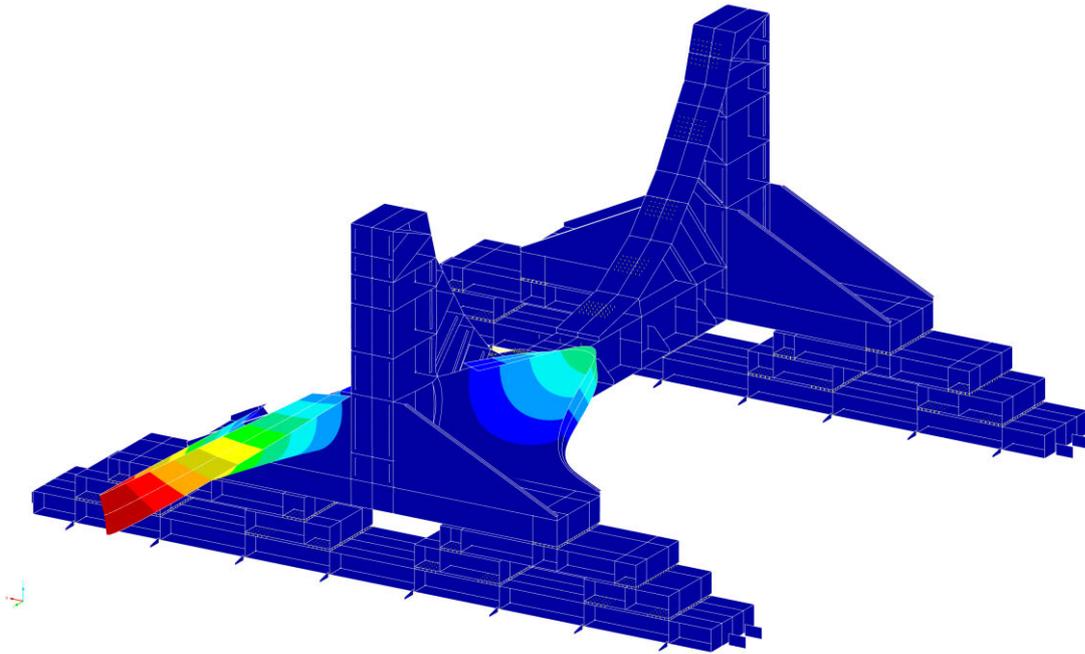


**Abbildung 32 CO3: Von-Mises Vergleichsspannung des Rahmens**

Die Spannungen auf dem Transportrahmen liegen größtenteils unterhalb der zulässigen Grenze, mit Ausnahme von zwei Elementen an den Rippen. Dies ist auf die Singularität aufgrund der einspringenden Ecke zurückzuführen, wie in Abbildung 34 dargestellt. Um dies zu vermeiden, kann der Einsatz von Rundungen in den Ecken in Betracht gezogen werden.



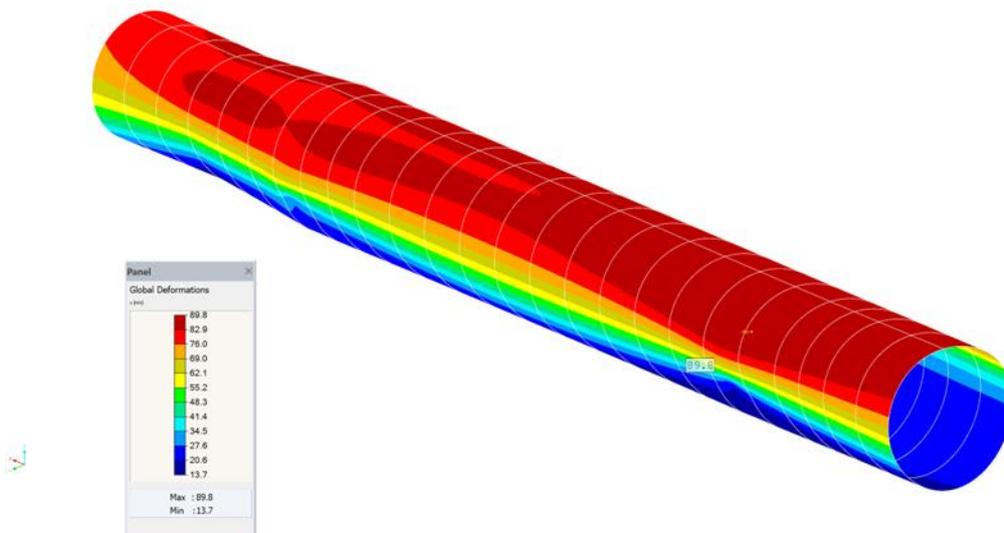
**Abbildung 33 Darstellung der Singularität an der Rippe**



**Abbildung 34 Stabilität des Transportrahmens**

Der erste kritische Eigenwert des Modells tritt bei einer Höhe von 1,3 auf, was nahe an der Grenze liegt. Es wurde festgestellt, dass ein Eigenwert von 1,2 aus Erfahrung als sicher betrachtet wird. Daher gibt es kein Stabilitätsproblem.

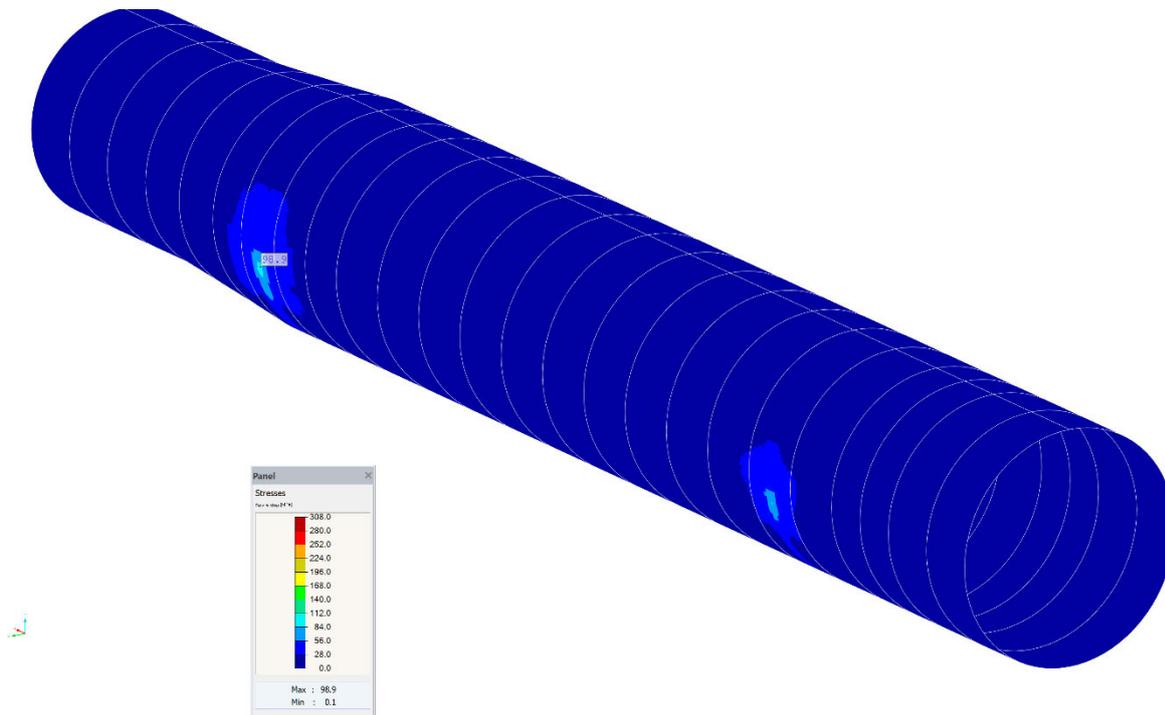
### 5.2.3 Monopile



**Abbildung 35 CO3: Absolute Verschiebung des Monopiles**

Die Verformung des Monopiles liegt über der zulässigen Grenze, da die Ausnutzung mit einem Wert von 1,5 zu hoch ist. Eine mögliche Lösung zur Reduzierung der Verformung

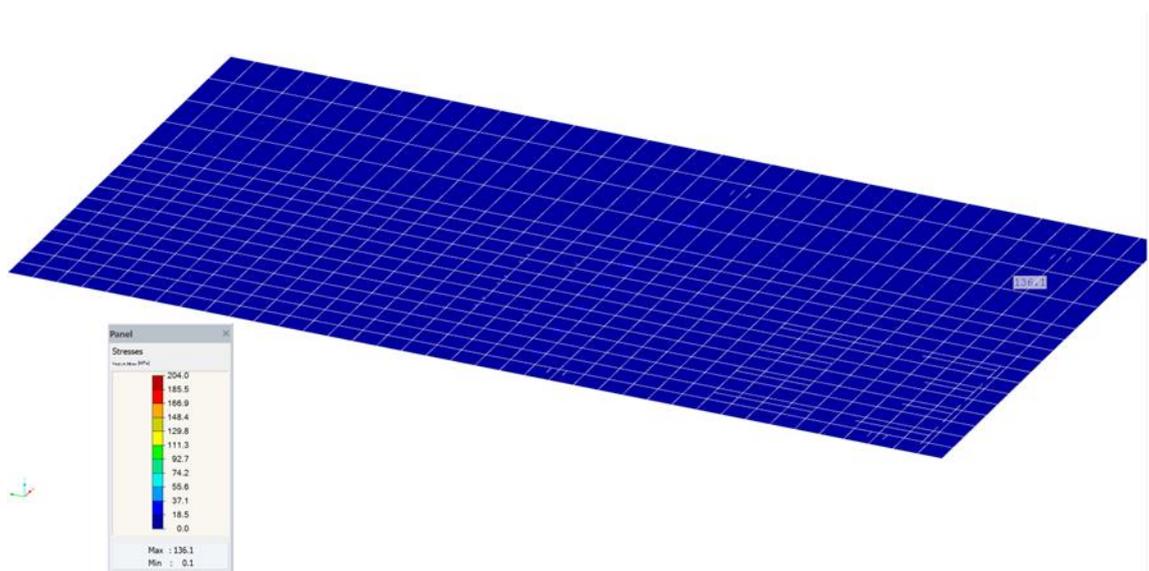
besteht darin, den vertikalen Hebelarm zwischen dem Holz und dem Monopile zu vergrößern.



**Abbildung 36 CO3: Von-Mises Vergleichsspannung des Monopiles**

Die maximale Spannung auf dem Monopile beträgt 87,2 MPa, was unterhalb der zulässigen Spannung liegt und somit keine Gefahr für das Monopile selbst darstellt.

## 5.2.4 Schiffstruktur



**Abbildung 37 CO3: Von-Mises Vergleichsspannung des Schiffsdecks**

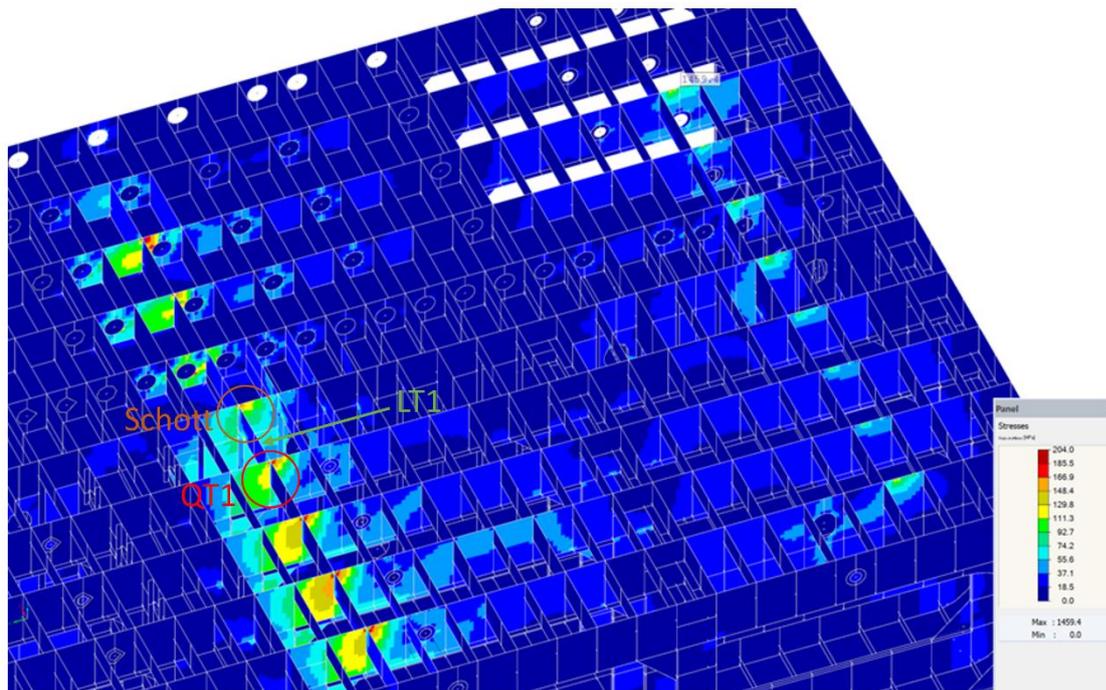


Abbildung 38 CO3: Von-Mises Vergleichsspannung des untersuchten Bereichs des Schiffs

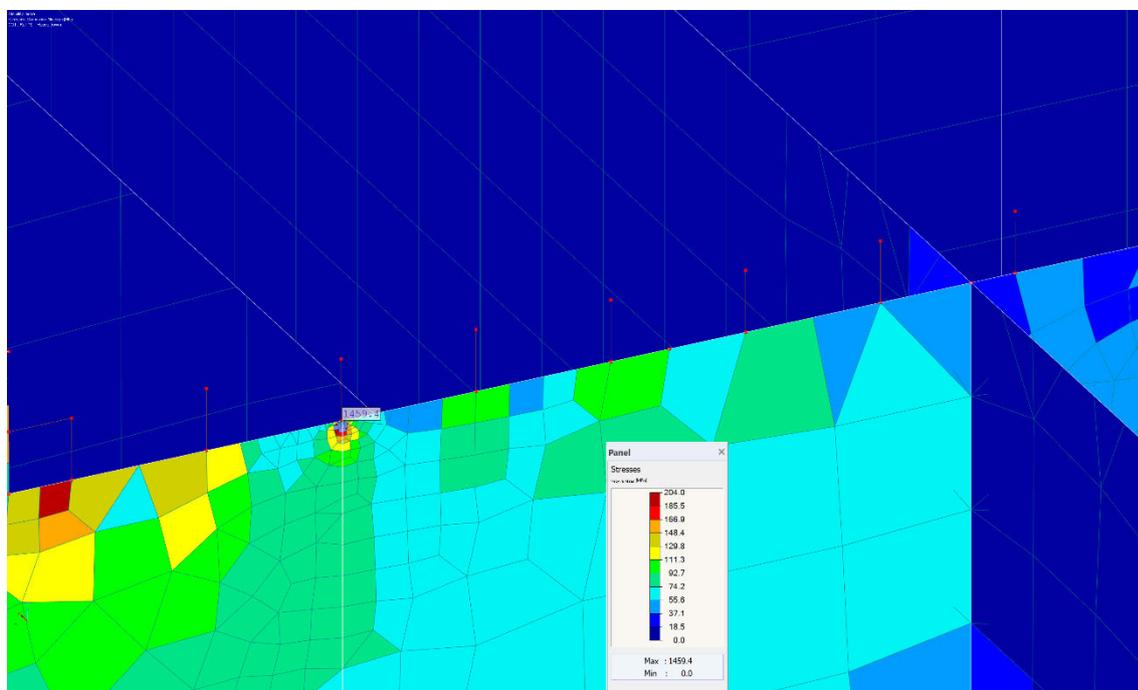


Abbildung 39 Darstellung der überlastete Stelle

Die maximale Vergleichsspannung nach von Mises im Schiffsrumpf beträgt 1459,4 MPa. Nach der Untersuchung dieser Stelle wurde festgestellt, dass das Netz an dieser Stelle

unregelmäßig ist, was zu verfälschten Ergebnissen führen kann. Zudem liegt der Spannungsspitzenwert genau auf dem Knoten des eindimensionalen Balkens. Es ist auch zu beachten, dass die Spannungen an den Verbindungspunkten im Vergleich zum restlichen Träger erhöht sind. Aus diesen Gründen kann entschieden werden, dass diese Spannungskonzentrationen aufgrund der punktuellen Lastübertragung des Balkens und nicht aufgrund eines realistischen Falls auftreten.

Die Spannungen zeigen eine unregelmäßige Lastverteilung, die durch die unterschiedliche Wandstärke der Träger des Schiffs, erklärt werden kann, was zu unterschiedlichen Darstellungen der Skalare führt. Es ist auch zu beachten, dass Querträger 1 im Vergleich zu den vorherigen Trägern weniger belastet ist, obwohl sie die gleiche Wandstärke besitzen. Dieser Unterschied ergibt sich aufgrund der Platzierung des Schotts an der nächsten Stelle. Die Spannung in diesem Fall folgt dem Weg mit größerer Steifigkeit aufgrund des Prinzips der Minimierung der potenziellen Energie, wie durch die größere Belastung des Längsträgers 1 (LT1) im Vergleich zu anderen Trägern nachgewiesen wird. Dieses kleine Problem kann vermieden werden, indem der Rahmen nicht auf dem Schott platziert wird oder durch eine symmetrische Positionierung

## 6 Zusammenfassung

Das Holzblock zeigt gute Ergebnisse hinsichtlich Verformung und Spannungen, die sich innerhalb des zulässigen Bereichs bewegen. Allerdings weist das Stützkonzept einige akzeptable Spannungskonzentrationen aufgrund der Art und Weise auf, wie der Kontakt zwischen dem Rahmen und der unteren Platte implementiert wurde, wie im Abschnitt 5.1.2 erläutert wurde. Die Verformung liegt innerhalb der zulässigen Werte. Das Konzept erfüllt alle Anforderungen und ist leicht von Personen montierbar, ohne dass schwere Werkzeuge erforderlich sind. Allerdings birgt dieses Konzept auch einige Herausforderungen in Bezug auf die Verbindungsmethode, wie beispielsweise die Entspannung der Schrauben während des Transports von Monopile. Zudem besteht eine geringe Gefahr des Kippens des Stützkonzepts, obwohl dies bei den berücksichtigten Kräften unwahrscheinlich ist. Im Gegensatz dazu bietet dieses Konzept hohe Flexibilität beim Transport verschiedener Größen von Monopile und ermöglicht Einsparungen beim Materialverbrauch. Es ist auch einfacher als das Konzept mit mechanischem Getriebe, das zu mehr Komplexität und höheren Kosten führt.

Die Struktur, die für das Design dieses Modells verwendet wurde, zeigt akzeptable Ergebnisse. Die Verformung des Monopiles wurde gemäß DIN 1993-1-1 bewertet und ergibt eine Änderung von 86 mm, was im Vergleich zur Gesamtlänge des Monopiles gering ist. Die Spannungen im Rahmen liegen unterhalb der Grenzwerte, mit Ausnahme von zwei Elementen an den Rippen, wie im vorherigen Abschnitt erläutert. Die Verwendung von Schrauben zur Verbindung der verschiedenen Teile stellt eine Herausforderung in Bezug auf Montage- und Demontagezeit dar, da hydraulische Drehmomente erforderlich sind. Zudem sind Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 empfindlich gegenüber Umgebungsbedingungen wie Korrosion. Daher ist es notwendig, dass die Schrauben eine Rostschutzbeschichtung haben, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern. Die verwendeten Schrauben müssen während der Montage aufgrund ihrer Größe und Festigkeitsklasse überwacht werden, um sicherzustellen, dass sie ordnungsgemäß installiert sind. Obwohl die Verwendung dieser Konstruktion zeitaufwändig sein kann, bietet sie dennoch eine hohe Nachhaltigkeit. Nach den durchgeführten Berechnungen kann festgestellt werden, dass die Struktur mit den ausgewählten Schrauben halten kann und diese Konstruktion realisierbar ist.

Die Lasten wurden auf dem Deck gleichmäßig verteilt, jedoch gibt es aufgrund der unregelmäßigen Netzstruktur und der Verwendung von Balkenmodellen kleinere Spannungskonzentrationen auf dem Deck. Es wurde eine Berechnung der Lastverteilung gemäß Anhang C durchgeführt, bei der festgestellt wurde, dass die Lasten in der symmetrischen Bauweise nicht optimal gleichmäßig verteilt waren. Durch Optimierung und experimentelle Versuche konnte die Verteilung verbessert werden, jedoch bleibt sie immer noch nicht zu 100% gleichmäßig. Insbesondere die äußeren Füße nehmen mehr Kräfte auf als die anderen Teile, jedoch ist die Abweichung im Vergleich zum ersten Modell nicht so groß. Ein weiteres Problem besteht in der Struktur des Rahmens, insbesondere in Bezug auf die Verformung im freien Bereich zwischen den Kontaktstellen der Bauteile. Aufgrund der fehlenden vollständigen Stützung der Bauteile tritt hier eine Durchbiegung

auf, die zu Abweichungen in den Ergebnissen führt. Zudem führt diese Struktur zu Einschränkungen bei der Platzierung von Schrauben und verringert die Anzahl möglicher Schrauben. Ohne diese Struktur könnten mehrere Schrauben verwendet werden, was jedoch zu einer Reduzierung der Geometrie der Schrauben führen würde. Aus den oben genannten Gründen erhöht diese Struktur die Komplexität.

Im Allgemeinen erfüllen alle Lösungen die Konstruktionsanforderungen und funktionieren ordnungsgemäß. Die erste Teiloption kann gut mit den anderen Teiloptionen kombiniert werden, ohne dass sie sich gegenseitig beeinflussen. Allerdings führt die untere Rahmengestaltung zu erhöhter Komplexität der Konstruktion und stößt aufgrund des begrenzten Platzes für Verschraubungen mit nachhaltigen Bauteilen zusammen. Beide Teiloptionen sind stark voneinander abhängig, daher wäre es ratsam, eine alternative Struktur zur Lastenverteilung zu finden oder nur die erste Teiloption allein zu verwenden, ohne die zweite Teiloption. Durch weitere Optimierung des Transportrahmens unter Berücksichtigung von Meeressicherungen wie Laschen und verbesserten Stoppern kann die Leistung des Rahmens verbessert und die Verformung des Monopiles verringert werden.

## 7 Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde die Optimierung von Transportrahmen für Monopiles, die als Fundamente für Offshore-Windkraftanlagen dienen, behandelt. Es wurden drei wesentliche Aspekte untersucht: die Anpassungsfähigkeit des Rahmens an unterschiedliche Monopile-Durchmesser, die Wiederverwendbarkeit des Rahmens für weitere Projekte und die gleichmäßige Lasteinleitung ins Deck, um Punktlasten und Kantenpressungen zu vermeiden.

Unter Berücksichtigung von Anforderungen gemäß DNVGL-ST-N001 wurden Lasten berechnet und Schraubenkräfte ermittelt, um die Schrauben und die Stützplatte zu dimensionieren. Durch Experimente und Lastverteilungsstudien wurde das ursprüngliche Modell verbessert und optimale Strukturen sowie Abstände identifiziert.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass durch die Optimierung der Transportrahmen eine verbesserte Anpassungsfähigkeit an verschiedene Monopile-Durchmesser erreicht werden kann, was zu einer Kosteneinsparung durch Wiederverwendbarkeit führt. Die gleichmäßige Lasteinleitung ins Deck trägt zur Vermeidung von Punktlasten und Kantenpressungen bei, was die Sicherheit während des Transports erhöht.

Die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit können als Grundlage für weitere Forschungen und Entwicklungen im Bereich der Transportrahmen für Offshore-Windkraftanlagen dienen und zur Verbesserung der Effizienz und Nachhaltigkeit von Offshore-Windenergieprojekten beitragen.

Es ist jedoch zu beachten, dass weitere Validierungstests und umfassende praktische Versuche erforderlich sind, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der optimierten Transportrahmen zu bestätigen.

## Literaturverzeichnis

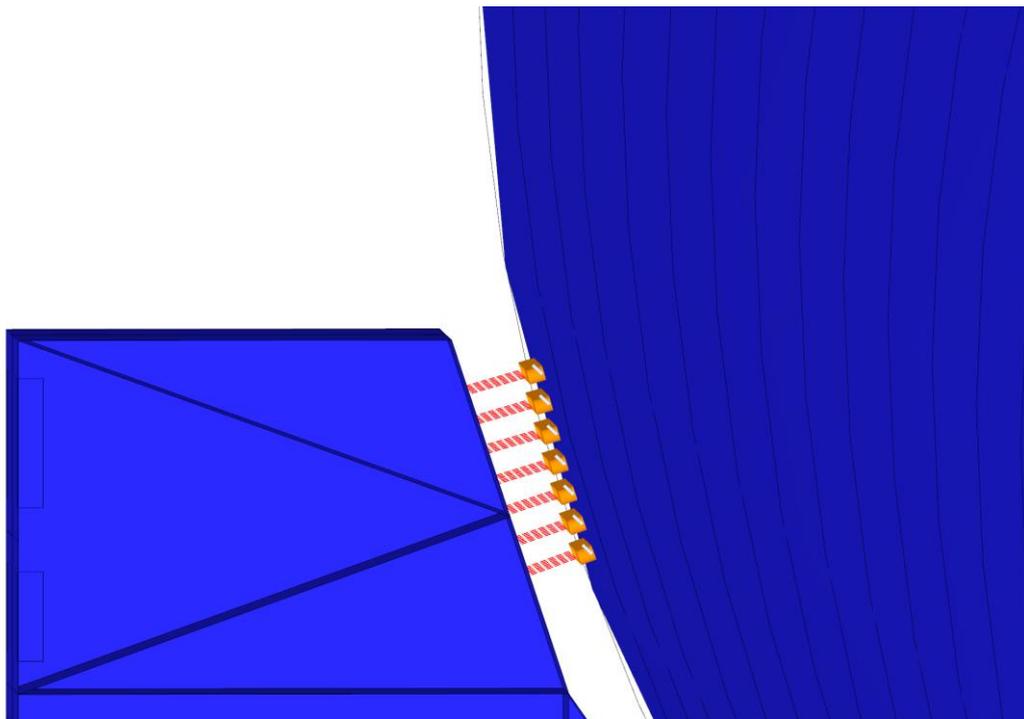
1. 1993-1-8, D. E. (2021). *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*.
2. Arunjyoti Sarkar, O. T. (2011). *Installation of Monopiles for Offshore Wind Turbines—By Using End-Caps and a Subsea Holding Structure*. Rotterdam.
3. *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz*. (kein Datum). Von <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Technologien/Windenergie-auf-See/Technik/Fundamente/fundamente.html> abgerufen
4. Dai, G. (2021). *Monopile Foundations in Offshore Wind Farm*. Nanjing, China.
5. Dlubal. (2. September 2022). *Dlubal, Stabtyp*. Von <https://www.dlubal.com/de/loesungen/online-dienste/glossar/000016> abgerufen
6. DNV. (2016). *Full version of Standard - DNVGL-ST-N001 & DNVGL-ST-N002*.
7. Fritzen, P. D.-I.-P. (2021). *Verbundvorhaben: DRIFT - Innovative Präzisionstechnologie für die Fertigung sehr schwerer, rotationssymmetrischer Industrieteile*. Siegen: Universität Siegen.
8. (kein Datum). <https://united.engineering/> - Internal.
9. (kein Datum). *IMO CSS Code*.
10. Mammoet. (kein Datum). <https://www.mammoet.com/>.
11. Wind farms construction. (4. Dez. 2012). *Offshore wind turbines foundation types*. Von Wind farms construction: <https://www.windfarmbop.com/tag/monopile/> abgerufen
12. Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J., & Spura, C. (24., überarbeitete und erweiterte Auflage). *Roloff/Matek Maschinenelemente*. Berlin.

## Anhang A: Durchmesseranpassung

### Ermittlung der Kräfte

In diesem Abschnitt wird das Durchmesseranpassungssystem für ein Monopile mit einem Außendurchmesser von 12m untersucht, da hier die kritischsten Kräfte zu erwarten sind.

Zunächst werden die Kräfte mithilfe eines FEM-Modells ermittelt. RFEM ermöglicht es, die Reaktionskräfte der Balken abzulesen.



**Abbildung 40** Darstellung der untersuchten Stelle

Wie auf der obigen Abbildung zu sehen ist, wird die linke obere Kontaktstelle untersucht, da sie voraussichtlich die größte Last tragen wird. Die Kräfte für jeden Balken sind in Tabelle 13 dargestellt. Am Ende werden alle Kräfte summiert, um die Gesamtreaktionskraft zu ermitteln.

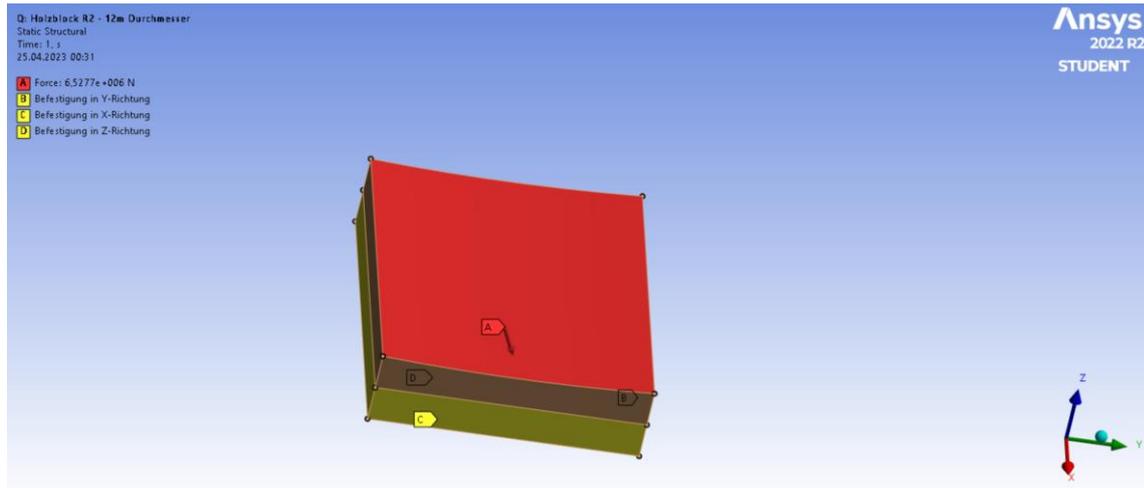
Kräfte [kN]		
N	V <sub>y</sub>	V <sub>x</sub>
-149,43	81,17	5,97
-72,66	79,78	20,71
-191,3	73,02	29,4
-323,08	64,6	0,86
-188,42	71,47	-27,23
-62,62	76,83	-18,87
-114,59	76,82	-6,23
-162,32	91,67	6,95
-63,41	86,17	13,7

-81,79	73,75	16,04
-124,66	64,64	0,72
-67,34	71,37	-14,13
-31,01	81,22	-12,02
-94,97	85,11	-6,78
-439,98	52,61	5,91
-375,82	52,67	20,9
-508,32	56,19	32,3
-675,1	60,85	0,4
-506,16	55,56	-30,71
-368,46	51,78	-19,98
-410,99	50,92	-6,47
-247,91	71,89	5,85
-108,19	69,54	5,53
-36,02	65,1	5,05
-12,22	61,42	0,7
-10,18	64,02	-17,227
-51,52	67,55	-4,3556
-146,65	69,05	-2,7851
-57,81	54,72	1,17
0	53,34	6,44
0	53,38	8,53
0	53,34	1,72
0	52,88	-4,33
0	51,79	-2,3
0	52,11	0,72
-159,29	53,75	2,79
-32,02	53,5	6,2
0	56,55	5,82
0	60,14	1,25
0	56,61	-2,86
0	54,05	-2,89
-74,14	54,01	-1,41
<b>-5948,38</b>	<b>2686,94</b>	<b>25,0523</b>

**Tabelle 13 Reaktionskräfte auf dem Anpassungssystem**

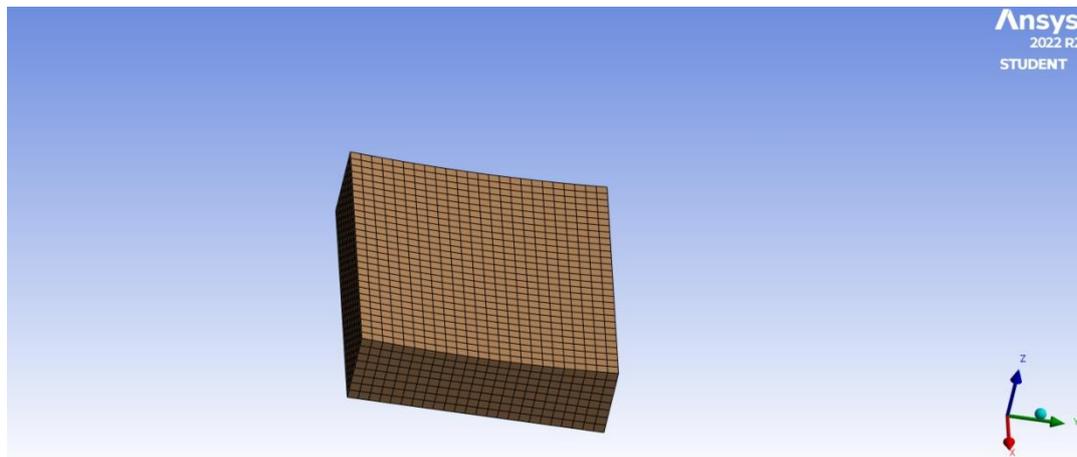
## Untersuchung des Holzblocks

Nachdem die Reaktionskräfte bestimmt wurden, wurde ein Holzblock mit den Maßen 970x830 mm modelliert. Es wurde auch ein Durchmesser von 12 m in der Höhe eingegeben. Wie im Abschnitt 4.4.1 erwähnt wurde, wird dieser Block vierseitig bis zur Höhe des Schwerpunkts gestützt, wie in Abbildung 40 dargestellt. Die vorderen und hinteren Seiten des Blocks werden in X-Richtung durch die Rahmenstruktur abgestützt, während die seitlichen Seiten in Y-Richtung durch ein Stützsystem oder eine Stützplatte gelagert werden, um ein Verrutschen und Kippen zu verhindern.



**Abbildung 41 Darstellung der Randbedingungen des Blocks**

Für die FEM-Berechnung wurde eine Maschenweite von 35 mm für das Holzblock-Netz eingegeben.



**Abbildung 42 Darstellung des Netz von Holzblock**

Die berechneten Reaktionskräfte wurden auf das Holzblock-Modell übertragen und die Berechnung wurde durchgeführt.

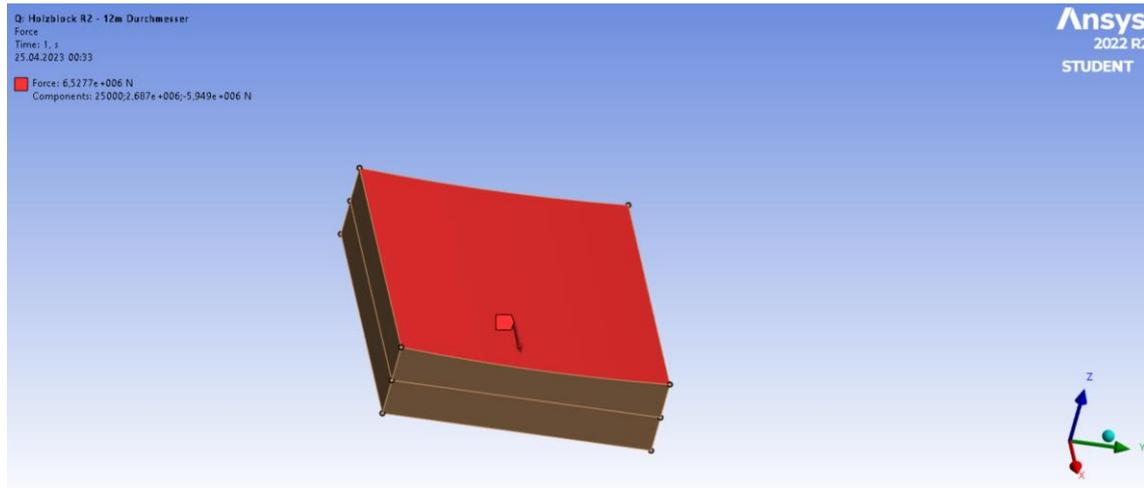


Abbildung 43 Darstellung der Kräfte auf dem Holzblock

## Stützsystem

Nach der Verifizierung des Holzblocks wurde ein Stützsystem entwickelt. Gemäß Abschnitt 4.5.1 wurden zwei Stützen modelliert und die Kräfte wurden gemeinsam übernommen.

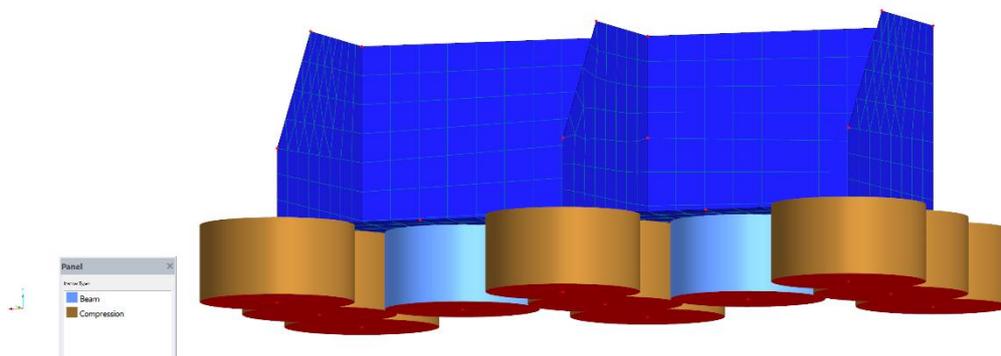
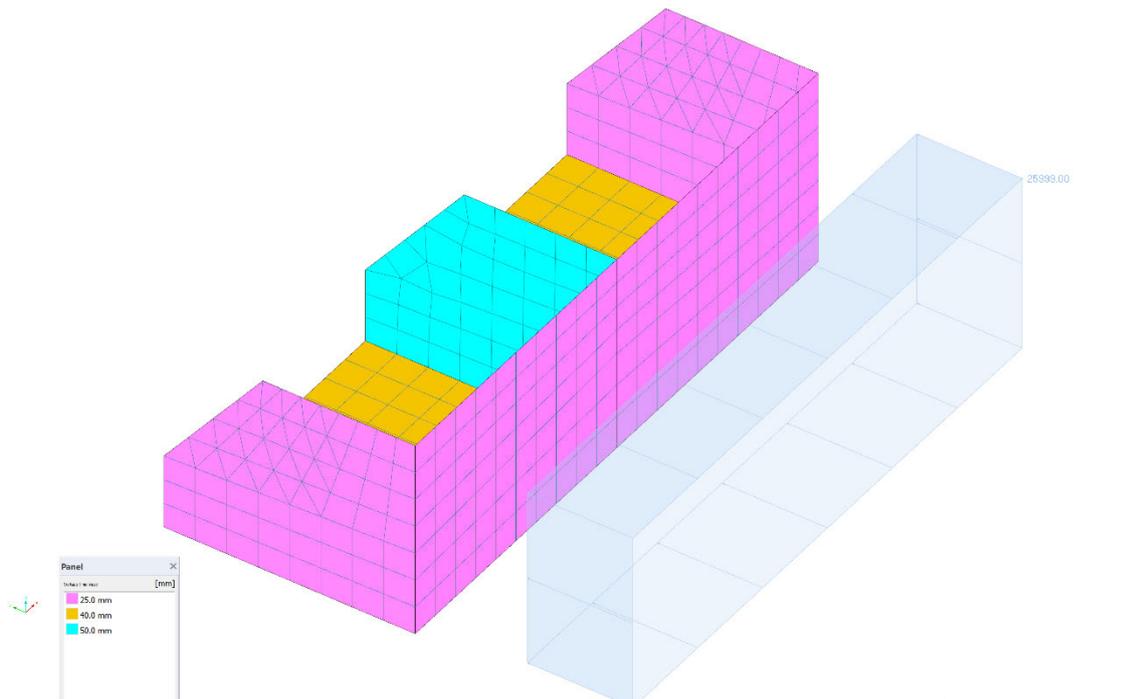


Abbildung 44 Darstellung der Implementierung von den Randbedingungen

Es wurden zwei Arten von Balken verwendet: Diejenigen, die blau dargestellt sind, repräsentieren den Einsatz von Schrauben, während die anderen Balken Druckbalken sind und nur Druckkräfte übernehmen. Die Druckbalken sind im Modell nur in positive z-Richtung fixiert, um die Realität widerzuspiegeln. Die FE-Netzgröße beträgt 20 mm.



**Abbildung 45 Darstellung der Wandstärke der Platten des Stützsystems mit der Flächenlast**

Die Last wird durch den Einsatz der Hälfte der ermittelten Querkraft auf die vertikale Längsplatte übertragen und anschließend die Berechnung durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen zulässige Werte, daher wird mit dem nächsten Schritt fortgefahren, nämlich der Auslegung der Schrauben.

## **Auslegung der Schrauben für Stützsystem**

Da das System symmetrisch zu dem Block werden die Schrauben gleiche Lasten übernehmen. Anhand dieser werden erstmal versuchen vier Schrauben einzusetzen.

$$F_{kl} := \frac{2687}{4} \text{ kN} = 671.75 \text{ kN} \quad E := 210000 \text{ MPa} \quad R_{p02} := 640 \text{ MPa}$$

$$\kappa := 1.19 \quad k_A := 1.2 \quad \beta := 1.1 \quad f_z := 0.011 \text{ mm}$$

$$f_u := 640 \text{ MPa} \quad f_{ub} := 800 \text{ MPa} \quad l_k := 60 \text{ mm}$$

$$A_S := \frac{F_{kl}}{\frac{R_{p02}}{\kappa \cdot k_A} - \beta \cdot E \cdot \frac{f_z}{l_k}} = (1.655 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \Rightarrow A_S := 2362 \text{ mm}^2$$

Nach DIN 13T1 wird die folgende Schraube verwendet für die weitere Berechnungen: M60 nach Reihe 2

## Tragfähigkeit

Hier wird die Tragfähigkeit dieser Schraube nach DIN EN 1993-1-8 berechnet für verschiedene Beanspruchungen

*Abschertragfähigkeit je Scherfuge:*

$$\alpha_v := 0.6 \quad \text{für Schaft in der Scherfuge} \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

$$F_{vRd} := \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_S}{\gamma_{M2}} = 907.008 \text{ kN}$$

*Zugtragfähigkeit:*

$$k_2 := 0.9 \quad \text{für nicht senkende Schrauben}$$

$$F_{tRd} := k_2 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_S}{\gamma_{M2}} = (1.361 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

*Lochleibungstragfähigkeit:*

$$d := 56.428 \text{ mm} \quad t := 40 \text{ mm}$$

Bei einer Schraubenreihe:  $F_{bRd} := 1.5 \cdot f_u \cdot d \cdot \frac{t}{\gamma_{M2}} = (1.733 \cdot 10^3) \text{ kN}$

## Auslastung

Aus FEM Model wurden die folgenden Kräfte ermittelt:

$$F_{Qmax} := 671.75 \text{ kN}$$

$$F_{Zmax} := 445 \text{ kN}$$

$$a_{Zug} := \frac{F_{Zmax}}{F_{tRd}} \cdot 100 = 32.708\%$$

$$a_{Abscherung} := \frac{F_{Qmax}}{F_{vRd}} \cdot 100 = 74.062 \%$$

$$a_{Lochleibung} := \frac{F_{Qmax} + F_{Zmax}}{F_{bRd}} \cdot 100 = 64.423 \%$$

Kombination von Scher-/ Lochleibung und Zug: +

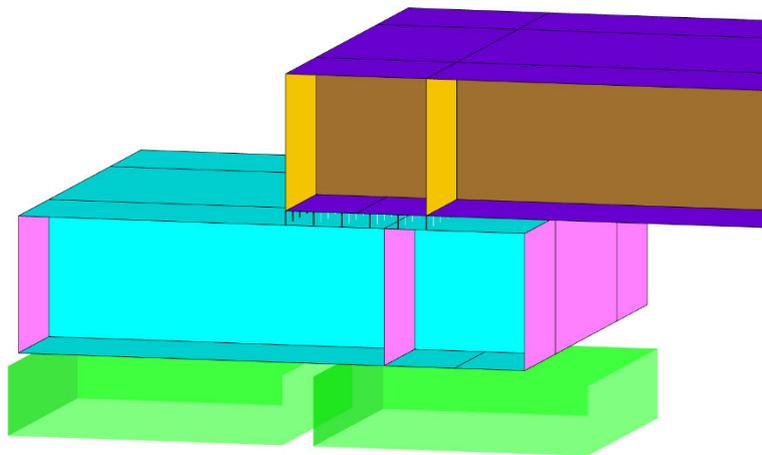
$$a_{Komb} := \left( \left( \frac{F_{Zmax}}{1.4 \cdot F_{tRd}} \right) + \left( \frac{F_{Qmax}}{F_{vRd}} \right) \right) \cdot 100 = 97.425\%$$

Da die Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug über 100% war, wurde eine größere Schrauben ausgewählt um die Struktur sicher zu machen. Die Schraube muss mit einem Anziehmoment von 12219 Nm.

## Anhang B: Wiederverwendbarkeit des Transportrahmens

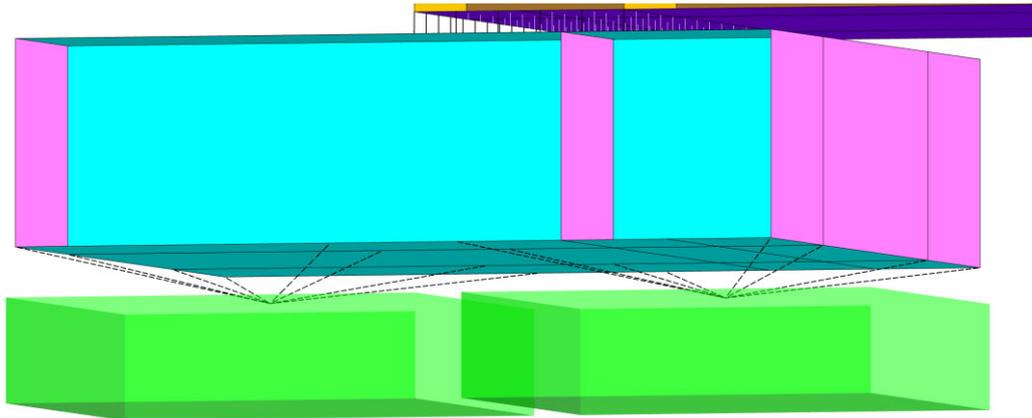
### Ermittlung der Schraubenkräfte für die Füße

Um die Schraubenkräfte zu bestimmen, wurde zunächst die Kraft an den Kontaktstellen zwischen den Füßen und dem geschweißten Doppel T-Profil ermittelt. Es wurde nur das Backboards berücksichtigt, da sie als kritischste Seite betrachtet wird.



**Abbildung 46 Darstellung des vereinfachten Modell zur Ermittlung von Kräfte je Kontaktstelle**

In Abbildung 46 ist das Modell von den Bauteilen in Stufe 3 und Stufe 4 zu sehen. Anstelle der geschweißten doppelten T-Profile wurden Starrbalken an den Kontaktstellen verwendet und zu einem gelagerten Knoten verbunden, um die Reaktionskräfte dieser Lager abzulesen.



**Abbildung 47 Besserer Ansicht auf die Starrbalken**

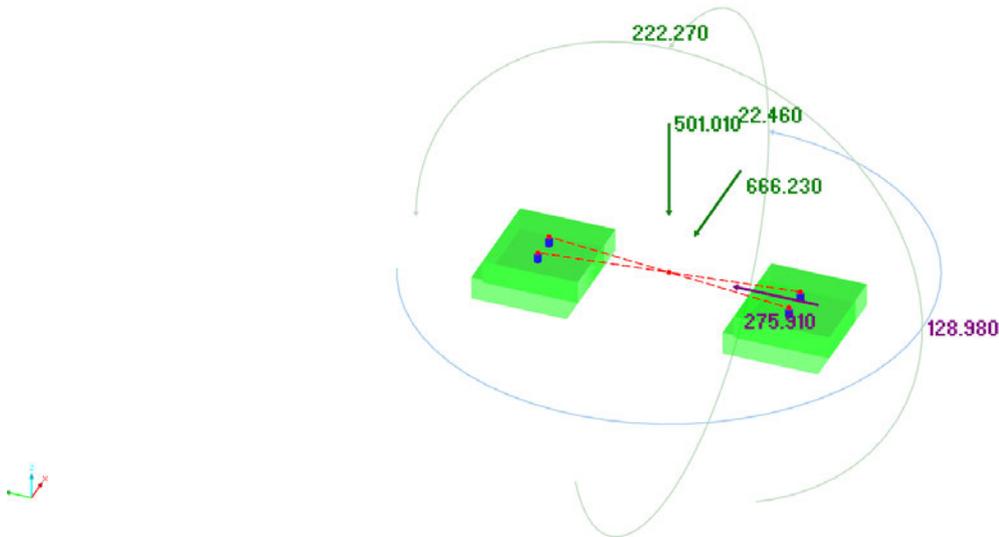
Um sicherzustellen, dass die ausgegebenen Kräfte korrekt sind, entsprechen die Abstände zwischen den Starrbalken in Abbildung 46 der gleichen Bemaßung wie die verwendete Kontaktplatte.

Nach Durchführung der Simulation wurden die nachfolgenden Reaktionskräfte abgelesen:

Knoten	Reaktionskräfte [kN]			Reaktionsmomente [kNm]		
	No.	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$M_x$	$M_y$
1	-666,23	275,91	-501,01	-222,27	-22,46	128,98
2	-519,97	546,61	-2070,78	-501,04	-249,27	53,48
3	-57,04	712,56	-3718,20	-668,18	365,30	-6,47
4	251,60	497,93	-381,60	-366,38	-148,62	-146,33
5	-286,73	485,99	-390,27	-362,23	138,21	151,43
6	68,16	719,95	-3661,62	-674,92	-354,51	10,94
7	414,86	532,50	-1869,62	-453,71	154,92	-124,50
8	708,45	289,02	-652,07	-251,34	-7,52	-20,77

**Tabelle 14 Reaktionskräfte/momente der Kontaktstellen**

Anschließend wurden diese Kräfte auf die Balken übertragen, um die Schraubenkräfte zu berechnen.



#### Abbildung 48 Darstellung des Balkens mit den einwirkenden Kräfte

In Abbildung 48 ist ein Modell zur Implementierung der Schrauben dargestellt, um die einwirkenden Kräfte auf die einzelnen Schrauben zu ermitteln. Vier Schrauben wurden symmetrisch an den Angriffspunkten mit normalen Balken platziert. Die Kräfte aus Tabelle 14 wurden an den Angriffspunkten angewendet. Die Schraubenkräfte werden anschließend mithilfe der Reaktionskräfte der Lagerungen oder der internen Balkenkräfte bestimmt und in Tabelle 15 dargestellt.

Nachdem die Kräfte ermittelt wurden, wurden die entsprechenden Werte aus der unteren Tabelle abgelesen und daraus die resultierenden Querkräfte berechnet. Anschließend wurden die maximalen Kräfte abgelesen und in die Schraubendimensionierung des Durchmessers sowie in den Festigkeitsnachweis eingefügt. Die Festigkeitsberechnung wurde mithilfe von MathCad 4 durchgeführt.

Gruppe	Schrauben Nr,	Zug- / Druckkraft [kN]	Qy [kN]	Qz [kN]	Qres [kN]
1	1	-166,38	63,45	-118,14	-118,62
	2	-340,62	63,45	-214,97	-214,49
	3	90,12	74,50	-118,14	-118,62
	4	-84,12	74,50	-214,97	-214,49
2	5	-1181,84	134,36	-109,92	-110,12
	6	-1573,20	134,36	-150,07	-149,87
	7	537,81	138,94	-109,92	-110,12
	8	146,45	138,94	-150,07	-149,87
3	9	523,84	178,42	-16,69	-16,67
	10	2,23	178,42	-11,83	-11,85
	11	-1861,33	177,86	-16,69	-16,67
	12	-2382,94	177,86	-11,83	-11,85
4	13	-417,87	130,67	9,07	9,34
	14	-705,89	130,64	118,92	118,11
	15	515,09	118,33	6,88	7,69
	16	227,07	118,29	116,73	116,46
5	17	474,28	115,01	-14,85	0,00
	18	189,64	115,01	-128,52	0,00
	19	-384,77	127,98	-14,85	-65,17
	20	-669,42	127,98	-128,52	-221,56
6	21	-1807,77	179,52	23,87	23,16
	22	-2334,66	179,56	15,63	15,01
	23	503,85	180,42	18,45	19,07
	24	-23,04	180,46	10,21	10,92
7	25	251,88	138,46	56,98	57,44
	26	-103,22	138,46	150,45	149,99
	27	-831,59	127,79	56,98	57,44
	28	-1186,69	127,79	150,45	149,99
8	29	-31,20	73,13	169,24	169,33
	30	-227,79	73,11	184,83	184,77
	31	-98,25	71,40	169,39	169,45
	32	-294,84	71,38	184,99	184,89
Max		537,81			184,89

**Tabelle 15 Schraubenkräfte**

## Tragfähigkeit für die Füße

$$\begin{aligned}
 F_{kl} &:= 538 \text{ kN} & E &:= 210000 \text{ MPa} & R_{p02} &:= 640 \text{ MPa} & l_k &:= 60 \text{ mm} \\
 \kappa &:= 1.19 & k_A &:= 1.2 & \beta &:= 1.1 & f_z &:= 0.011 \text{ mm} \\
 f_u &:= 630 \text{ MPa} & f_{ub} &:= 800 \text{ MPa} & & & &
 \end{aligned}$$

$$A_S := \frac{F_{kl}}{\frac{R_{p02}}{\kappa \cdot k_A} - \beta \cdot E \cdot \frac{f_z}{l_k}} = (1.326 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \Rightarrow A_S := 1473 \text{ mm}^2$$

Nach DIN 13T1 wird die folgende Schraube verwendet für die weitere Berechnungen: M48 von der Reihe 1

### Tragfähigkeit

Hier wird die Tragfähigkeit dieser Schraube nach DIN EN 1993-1-8 berechnet für verschiedene Beanspruchungen

*Abschertragfähigkeit je Scherfuge:*

$$\alpha_v := 0.6 \quad \text{für Schaft in der Scherfuge} \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

$$F_{vRd} := \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_S}{\gamma_{M2}} = 565.632 \text{ kN}$$

*Zugtragfähigkeit:*

$$k_2 := 0.9 \quad \text{für nicht senkende Schrauben}$$

$$F_{tRd} := k_2 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_S}{\gamma_{M2}} = 848.448 \text{ kN}$$

*Lochleibungstragfähigkeit:*

$$e_1 := 100 \text{ mm} \quad e_2 := 200 \text{ mm} \quad d := 44.752 \text{ mm} \quad p_1 := 150 \text{ mm}$$

$$p_2 := 1315 \text{ mm} \quad t := 20 \text{ mm} \quad d_0 := 52 \text{ mm} \quad k_1 := 1$$

Für am Rand liegende Schrauben:

$$\frac{e_1}{d_0} = 1.923$$

$$3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u} = 3.81$$

3

$$\Rightarrow \alpha_b := 1.923$$

$$F_{bRd} := k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot \frac{t}{\gamma_{M2}} = 867.466 \text{ kN}$$

### Auslastung

Aus FEM Model wurden die folgenden Kräfte ermittelt:

$$F_{Qmax} := 227 \text{ kN} \qquad F_{Zmax} := 538 \text{ kN}$$

$$\alpha_{Zug} := \frac{F_{Zmax}}{F_{tRd}} \cdot 100 = 63.41\%$$

$$\alpha_{Abscherung} := \frac{F_{Qmax}}{F_{vRd}} \cdot 100 = 40.132 \%$$

$$\alpha_{Lochleibung} := \frac{F_{Qmax} + F_{Zmax}}{F_{bRd}} \cdot 100 = 88.188 \%$$

Kombination von Scher-/ Lochleibung und Zug:

$$\alpha_{Komb} := \left( \left( \frac{F_{Zmax}}{1.4 \cdot F_{tRd}} \right) + \left( \frac{F_{Qmax}}{F_{vRd}} \right) \right) \cdot 100 = 85.425\%$$

Basierend auf den durchgeführten Berechnungen lässt sich sagen, dass die Verwendung einer Schraube mit einem Durchmesser von M48 sehr gut für den Transportrahmen geeignet ist. Es wurde eine konservative Annahme getroffen, um die Auslastung zu berechnen, bei der die maximale Kraft jeder Komponente aller Schrauben berücksichtigt wird. Daher werden nicht alle Auslastungen einzeln berechnet.

## Ermittlung der Schrauben für die dritte Stufe

Das gleiche Verfahren wie zuvor wurde angewendet, und anschließend wurden die Ergebnisse für die untere Hälfte ausgegeben.

Knoten	Reaktionskräfte [kN]			Reaktionsmomente [kNm]			
	No.	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
1		-4528.77	1116.83	-3466.33	-443.71	1485.90	916.18
2		3016.60	1096.91	-3350.33	-412.21	-1800.40	-798.05
3		-3015.25	1087.39	-3355.40	-406.69	1841.51	805.41
4		4423.71	1112.91	-3370.18	-431.86	-1413.48	-892.62

**Tabelle 16 Reaktionskräfte/momente der Kontaktstellen an der dritten Stufe**

$$\begin{aligned}
 F_{kl} &:= 1245.6 \text{ kN} & E &:= 210000 \text{ MPa} & R_{p02} &:= 900 \text{ MPa} & l_k &:= 70 \text{ mm} \\
 \kappa &:= 1.19 & k_A &:= 1.2 & \beta &:= 1.1 & f_z &:= 0.011 \text{ mm} \\
 f_u &:= 900 \text{ MPa} & f_{ub} &:= 1000 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$A_S := \frac{F_{kl}}{\frac{R_{p02}}{\kappa \cdot k_A} - \beta \cdot E \cdot \frac{f_z}{l_k}} = (2.097 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \implies A_S := 2676 \text{ mm}^2$$

Nach DIN 13T1 wird die folgende Schraube verwendet für die weitere Berechnungen: M64 von der Reihe 1

## Tragfähigkeit

Hier wird die Tragfähigkeit dieser Schraube nach DIN EN 1993-1-8 berechnet für verschiedene Beanspruchungen

*Abschertragfähigkeit je Scherfuge:*

$$\alpha_v := 0.6 \quad \text{für Schaft in der Scherfuge} \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

$$F_{vRd} := \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_S}{\gamma_{M2}} = (1.284 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

*Zugtragfähigkeit:*

$$k_2 := 0.9 \quad \text{für nicht senkende Schrauben}$$

$$F_{tRd} := k_2 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_S}{\gamma_{M2}} = (1.927 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

*Lochleibungstragfähigkeit:*

$$e_1 := 100 \text{ mm} \quad e_2 := 200 \text{ mm} \quad d := 60.103 \text{ mm} \quad p_1 := 260 \text{ mm}$$

$$p_2 := 1315 \text{ mm} \quad t := 35 \text{ mm} \quad d_0 := 70 \text{ mm} \quad k_m := 1$$

Für am Rand liegende Schrauben:

$$\frac{e_1}{d_0} = 1.429$$

$$3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u} = 3.333$$

3

Für innen liegende Schrauben:

$$\alpha_{d2} := \frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2} = 3.214$$

$$3 \cdot \frac{f_{ub}}{f_u} = 3.333$$

3

==>  $\alpha_b := 1.429$  Als konservativ Wert  
angenommen

$$F_{bRd} := k_m \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot \frac{t}{\gamma_{M2}} = (2.164 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

### Auslastung

Aus FEM Model wurden die folgenden Kräfte ermittelt:

$$F_{Qmax} := 970 \text{ kN} \quad F_{Zmax} := 619.84 \text{ kN}$$

$$\alpha_{Zug} := \frac{F_{Zmax}}{F_{tRd}} \cdot 100 = 32.171 \%$$

$$\alpha_{Abscherung} := \frac{F_{Qmax}}{F_{vRd}} \cdot 100 = 75.517 \%$$

$$\alpha_{Lochleibung} := \frac{F_{Qmax} + F_{Zmax}}{F_{bRd}} \cdot 100 = 73.456 \%$$

Kombination von Scher-/ Lochleibung und Zug:

$$\alpha_{Komb} := \left( \left( \frac{F_{Zmax}}{1.4 \cdot F_{tRd}} \right) + \left( \frac{F_{Qmax}}{F_{vRd}} \right) \right) \cdot 100 = 98.496\%$$

Schrauben Nr,	Zug- / Druck- kraft [kN]	Qy [kN]	Qz [kN]	Qres [kN]	Auslast ung zug	Ausla stung Ab- schr	Auslastung lochleibung	Ausla stung aus komb
1	858,93	-544,47	102,95	554,12	44,57	43,16	65,30	74,99
2	619,84	-965,12	102,95	970,60	32,17	75,59	73,50	98,57
3	-458,18	-544,47	186,14	575,41	0,00	44,81	26,59	44,81
4	-697,26	-965,12	186,14	982,91	0,00	76,55	45,42	76,55
5	-2102,10	319,56	255,28	409,01	0,00	31,85	18,90	31,85
6	-2324,97	685,97	255,28	731,93	0,00	57,00	33,82	57,00
7	-446,95	319,56	182,82	368,16	0,00	28,67	17,01	28,67
8	-669,82	685,97	182,82	709,91	0,00	55,29	32,81	55,29
9	-1775,28	-544,47	269,33	607,44	0,00	47,31	28,07	47,31
10	-2014,37	-965,12	269,33	1002,00	0,00	78,04	46,30	78,04
11	1208,19	319,56	110,36	338,08	62,70	26,33	71,45	71,11
12	985,32	685,97	110,35	694,79	51,13	54,11	77,64	90,63
13	747,94	-434,79	105,74	447,46	38,81	34,85	55,24	62,57
14	518,68	-814,83	105,74	821,66	26,92	63,99	61,94	83,22
15	-436,50	-434,79	180,90	470,92	0,00	36,68	21,76	36,68
16	-665,76	-814,83	180,90	834,67	0,00	65,01	38,57	65,01
17	1245,59	-321,59	108,21	339,31	64,64	26,43	73,24	72,60
18	1025,65	-691,46	108,18	699,87	53,23	54,51	79,74	92,53
19	-449,26	-317,61	181,25	365,69	0,00	28,48	16,90	28,48
20	-669,20	-687,48	181,22	710,96	0,00	55,37	32,85	55,37
21	-1620,94	-434,78	256,06	504,58	0,00	39,30	23,32	39,30
22	-1850,20	-814,83	256,06	854,12	0,00	66,52	39,47	66,52
23	-2144,12	-313,62	254,29	403,76	0,00	31,45	18,66	31,45
24	-2364,06	-683,49	254,26	729,25	0,00	56,80	33,70	56,80
max	1245,59			1002,00	64,64	78,04		98,57

**Tabelle 17 Darstellung der Kräfte von Schrauben mit der Auslastung jeder Schraube**

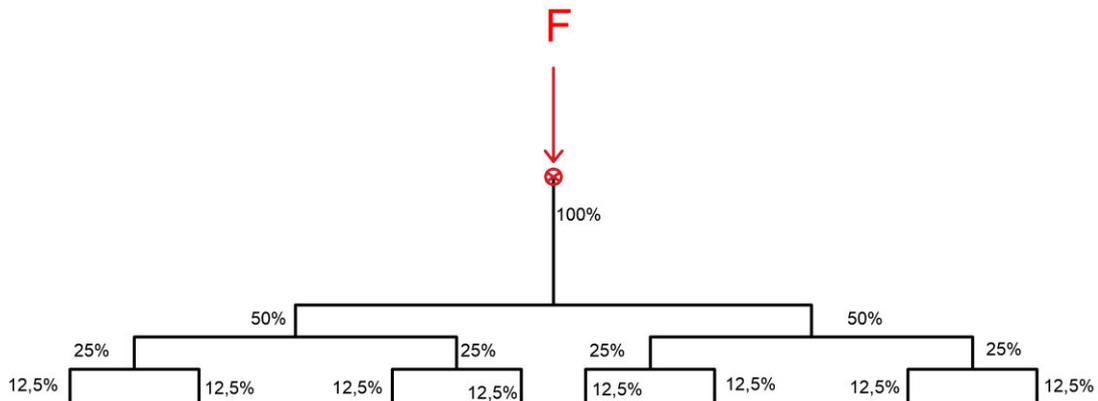
Es ist zu bemerken, dass die Stellen in Tabelle 17 sehr stark ausgelastet sind, mit einer Auslastung von 98,57% für den Kombinationsfall, was sehr hoch ist. Es ist jedoch zu beachten, dass verschiedene Lastfaktoren berücksichtigt wurden, wie z.B. die Belastungen aufgrund der Bewegung des Schiffs und der Schrauben. Aufgrund dieser vielfachen Faktoren sind die Ergebnisse akzeptabel.

## Anhang C: Lastverteilungsstudie

### Initialberechnung

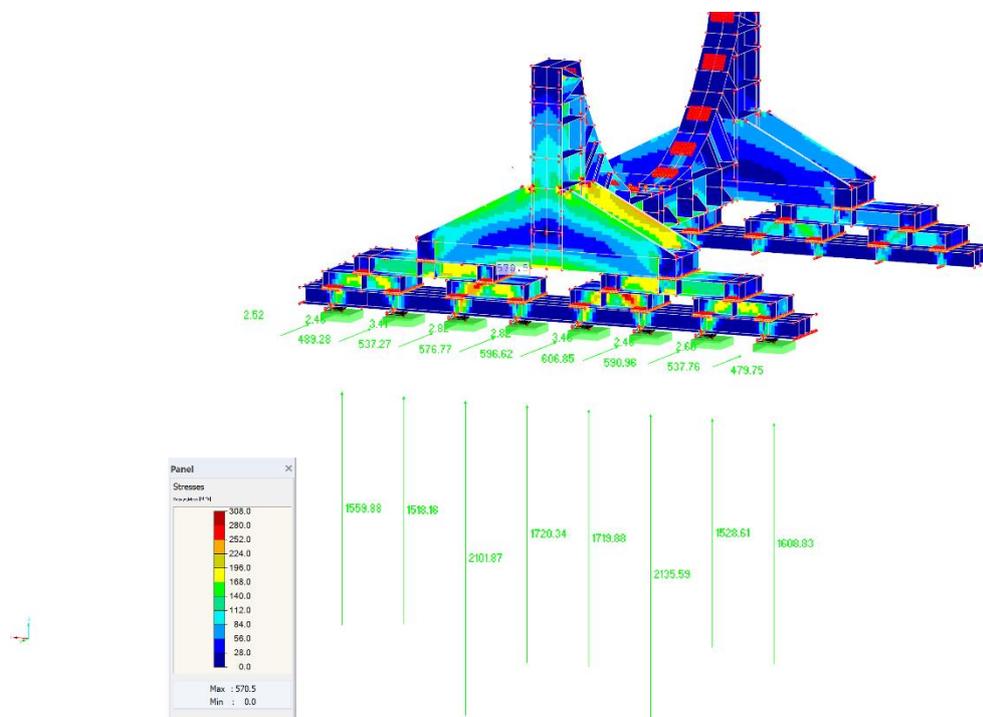
Hier wird gezeigt wie die Lastverteilungsstudie durchgeführt und die Ergebnisse davon.

Theoretisch sollten die Kräfte bei symmetrischem System mit dem selben Abstände gleichmäßig verteilt werden.



**Abbildung 49 Theoretische Lastverteilung**

Ein FE-Modell wurde erstellt und die Kontaktbalken und die Stopper wurden zu einem Konten mittels Starrbalken verbunden und am Ende wird diese Knoten starr gelagert.



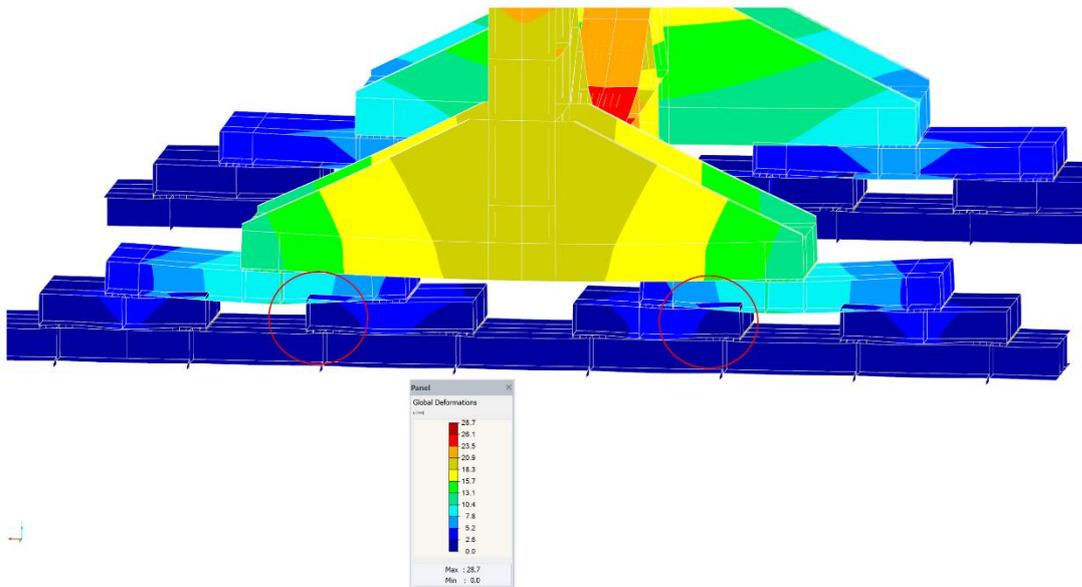
**Abbildung 50 Darstellung des Ergebniss vom initialen Modell**

Die Spannungen zeigen gleichmäßige Spannungsverteilung außer die innere Füßen. Um es besser zu sehen, wurden die Kräfte zu einer Tabelle exportiert und sind wie folgt:

Knoten	Reaktionskräfte [kN]			Reaktionsmomente [kNm]		
	No.	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$M_x$	$M_y$
76287	2,60	479,75	-1608,83	-741,36	0,65	-0,98
76293	3,46	590,96	-2135,58	-861,16	0,87	-1,15
76295	2,48	537,76	-1528,61	-774,87	0,62	-1,03
76297	2,82	606,85	-1719,88	-889,51	0,71	-1,20
76299	2,82	596,62	-1720,34	-883,51	0,71	-1,19
76318	3,41	576,77	-2101,86	-868,82	0,85	-1,16
76319	2,46	537,27	-1518,16	-775,91	0,62	-1,03
76320	2,52	489,28	-1559,88	-742,07	0,63	-0,98

**Tabelle 18 Die Reaktionskräfte des Backboards**

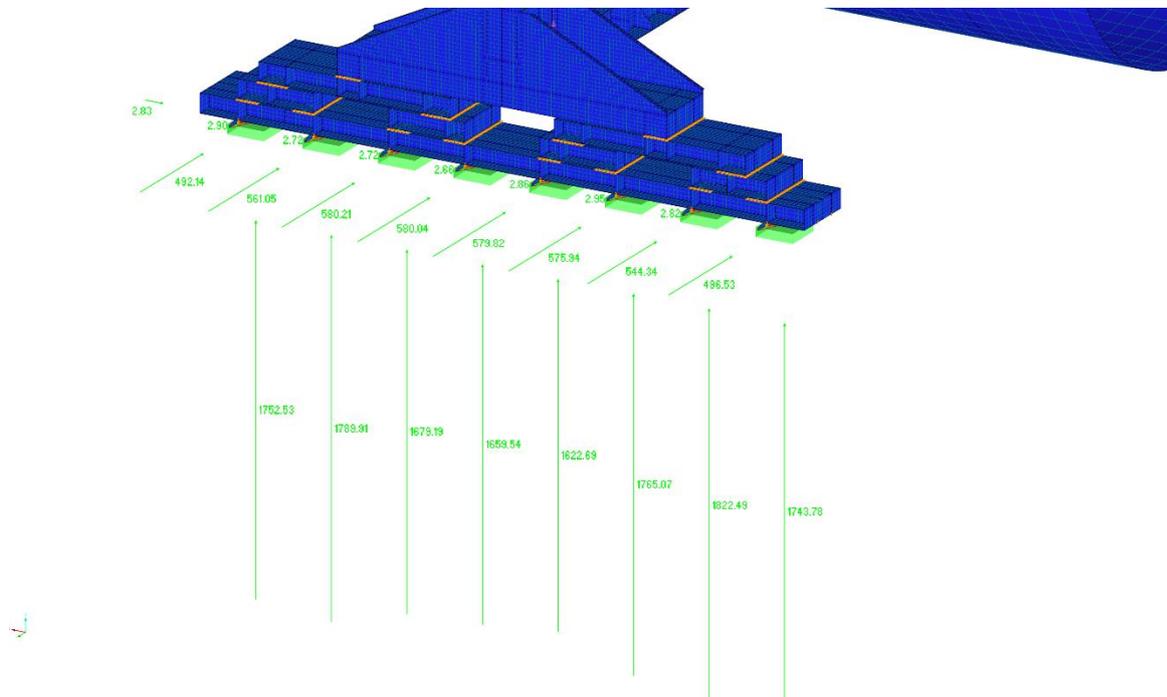
Wie ist zu sehen in Abbildung 51 und aus der Tabelle 18 es gibt größere Variation zwischen der untersuchten Stellen. Diese lässt sich erklärt durch die Verformung bzw. die größeren Druckkräfte in der Mitte des Rahmens, da die Mitte ist nicht zum Schiff gestützt sondern in der Luft. Und auch die zwei obere Teile sind an ihre Schwerpunkte nicht gestützt und verursacht mehr Druck zur inneren Teile des Rahmens.



**Abbildung 51 Darstellung der Verformung des Rahmens**

## Optimiertes Modell

Nach paar Versuche wurde die folgende Ergebnisse ermittelt:



**Abbildung 52 Darstellung der Ergebnisse des optimierten Modells**

Knoten No.	Reaktionskräfte [kN]			Reaktionsmomente [kNm]		
	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
76287	2.82	496.53	-1743.78	-816.16	0.70	-1.10
76293	2.86	575.94	-1765.07	-878.24	0.72	-1.18
76295	2.95	544.34	-1822.49	-802.60	0.74	-1.07
76297	2.66	579.82	-1622.69	-910.89	0.67	-1.24
76299	2.72	580.04	-1659.54	-899.66	0.68	-1.23
76318	2.72	580.21	-1679.19	-851.80	0.68	-1.14
76319	2.90	561.05	-1789.91	-858.02	0.73	-1.15
76320	2.83	492.14	-1752.53	-803.85	0.71	-1.08

**Abbildung 53 Die Reaktionskräfte des optimierten Modells**

Es wurde festgestellt, dass das Modell immer noch Abweichungen zwischen den Ergebnissen zeigt, jedoch sind die Abweichungen im Vergleich zu vorher deutlich geringer.

## Anhang D

### Lastkombination CO1: Stampfen voraus + negatives Tauchen

Im folgenden Teilabschnitt werden die Ergebnisse für die Lastkombination CO1, bestehend aus Stampfen voraus und negatives Tauchen, detailliert präsentiert. Diese Lastkombination stellt einen der kritischsten Lastfälle für die Konstruktion des Transportrahmens für Monopile dar.

Beschreibung	Wert	Einheit
Summe die Lasten in x	2449,98	kN
Summe die Lasten in y	-1337,01	kN
Summe die Lasten in z	-53553,4	kN
Maximale Verformung in x	4,30	mm
Maximale Verformung in y	-24,80	mm
Maximale Verformung in z	-39,60	mm
Maximale Resultierende Verformung	40,90	mm

Tabelle 19 Zusammenfassung der Ergebnisse von CO1

### Transportrahmen

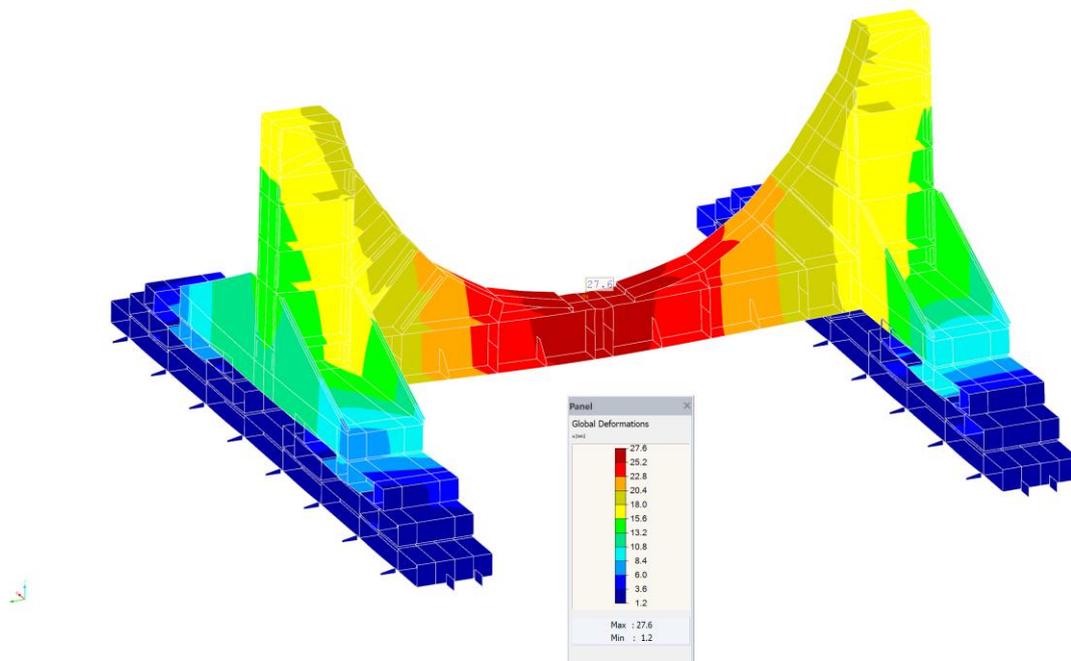


Abbildung 54 CO1: Absolute Verschiebung des Rahmens

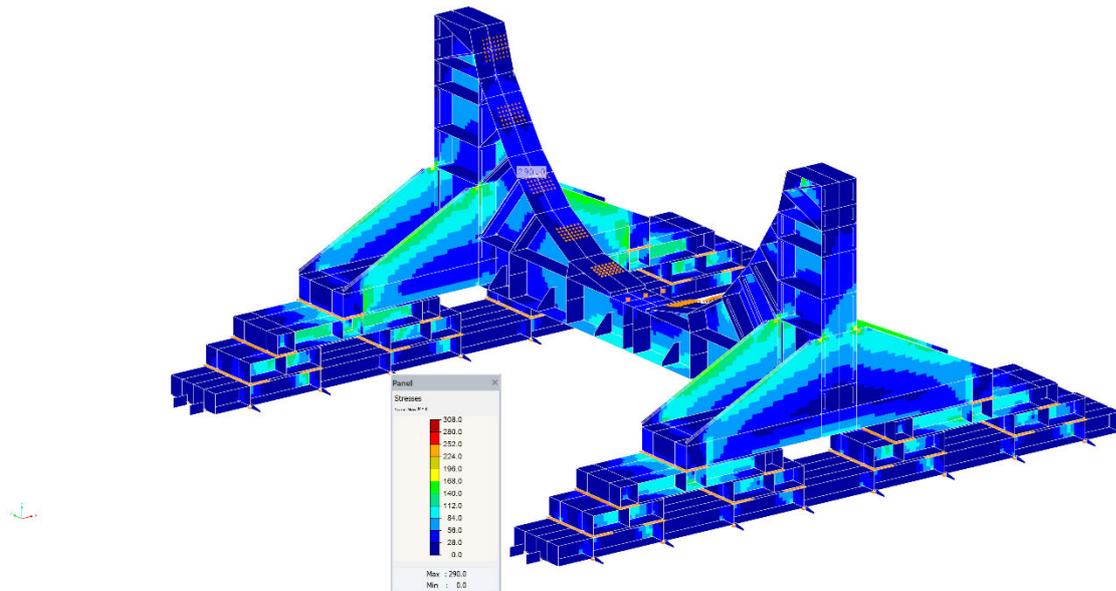


Abbildung 55 CO1: Von-Mises Vergleichsspannung des Rahmens

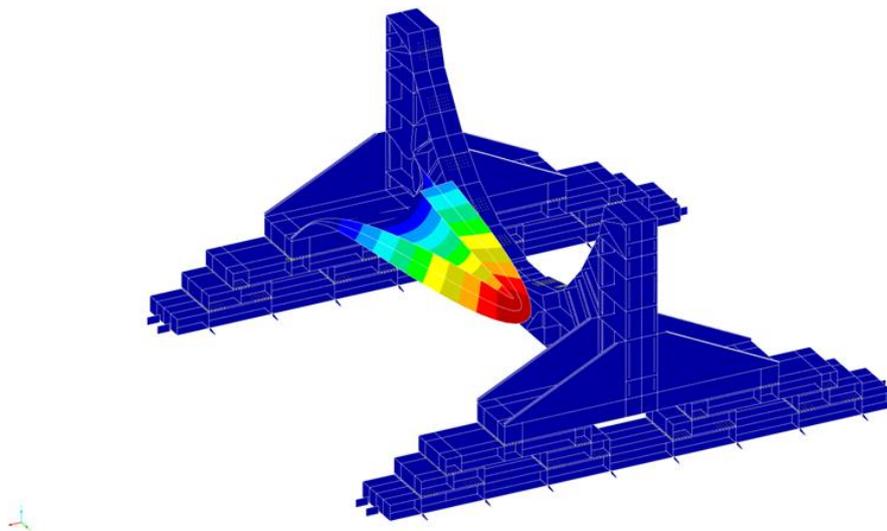


Abbildung 56 Stabilität des Transportrahmens  $\lambda=1,67$

## Monopile

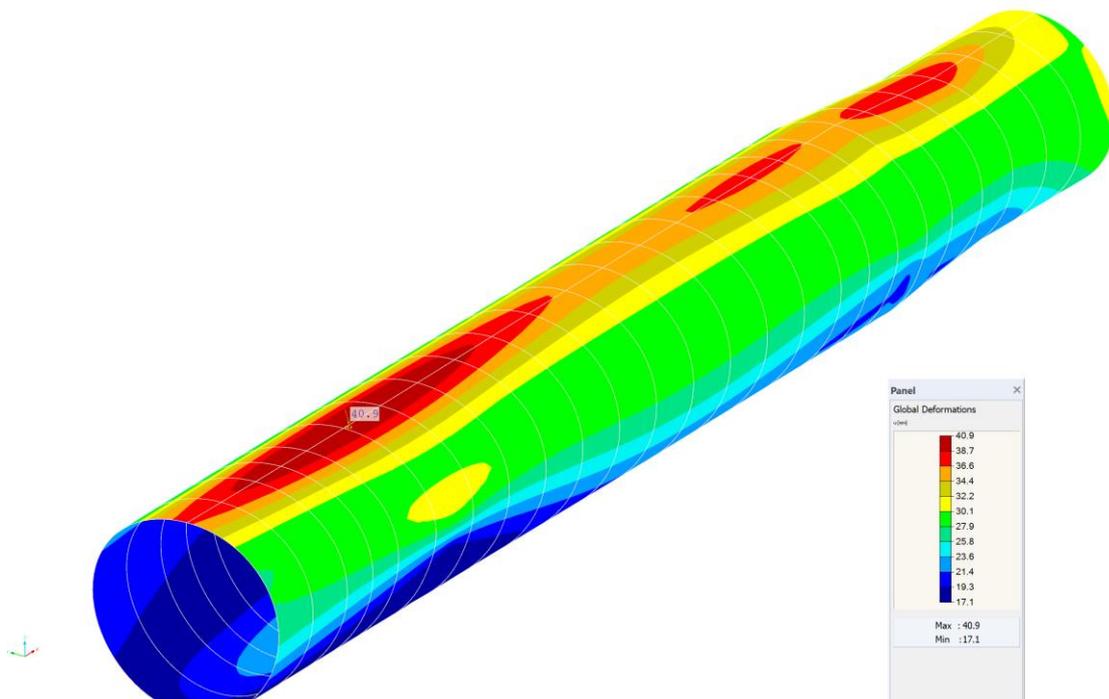


Abbildung 57 CO1: Absolute Verschiebung des Monopiles

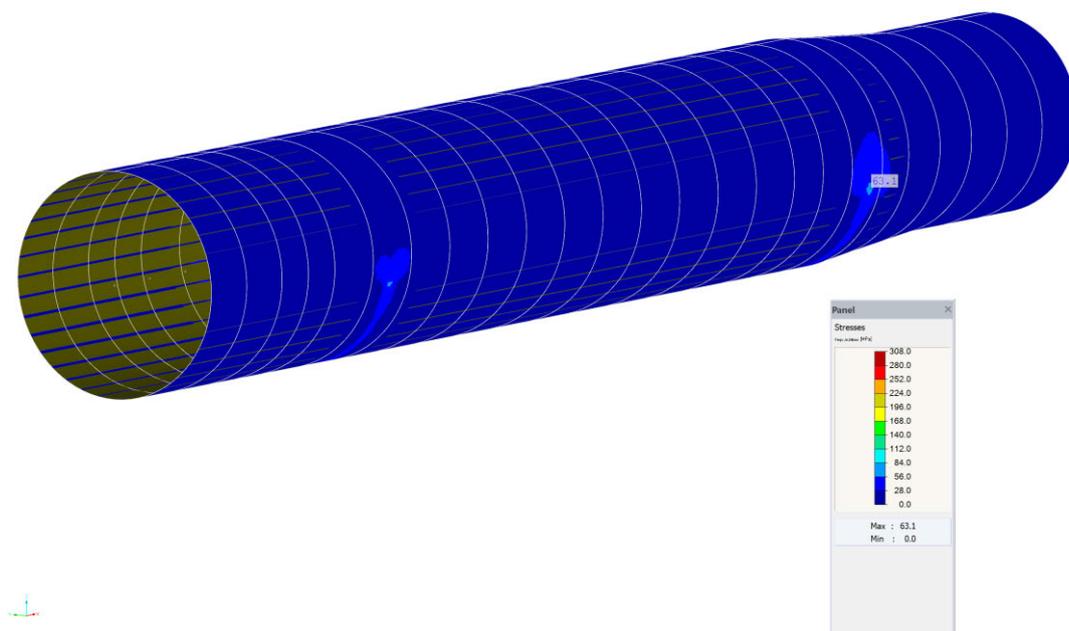


Abbildung 58 CO1: Von-Mises Vergleichsspannung des Monopiles

## Schiffstruktur

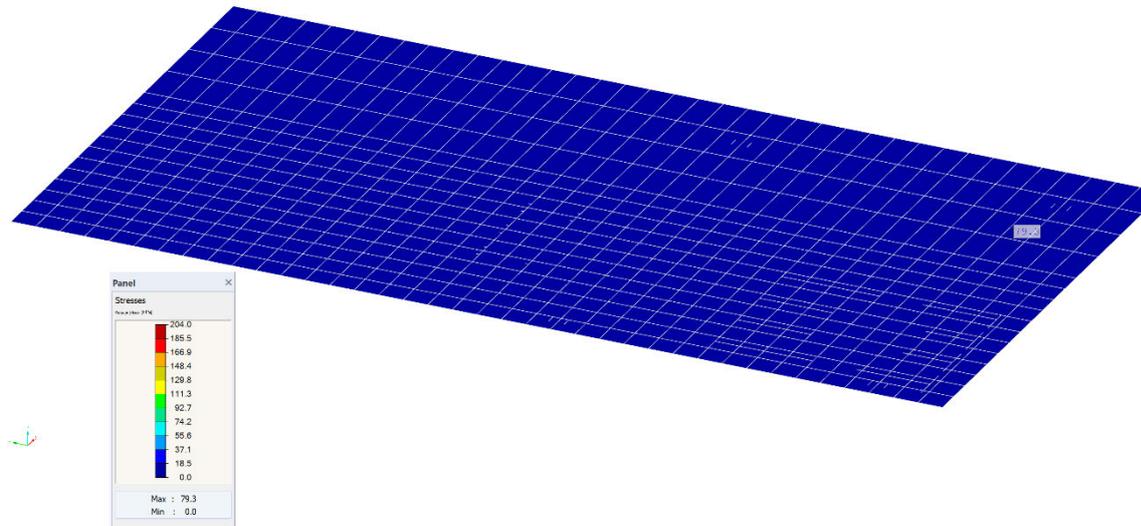


Abbildung 59 CO1: Von-Mises Vergleichsspannung des Schiffsdecks

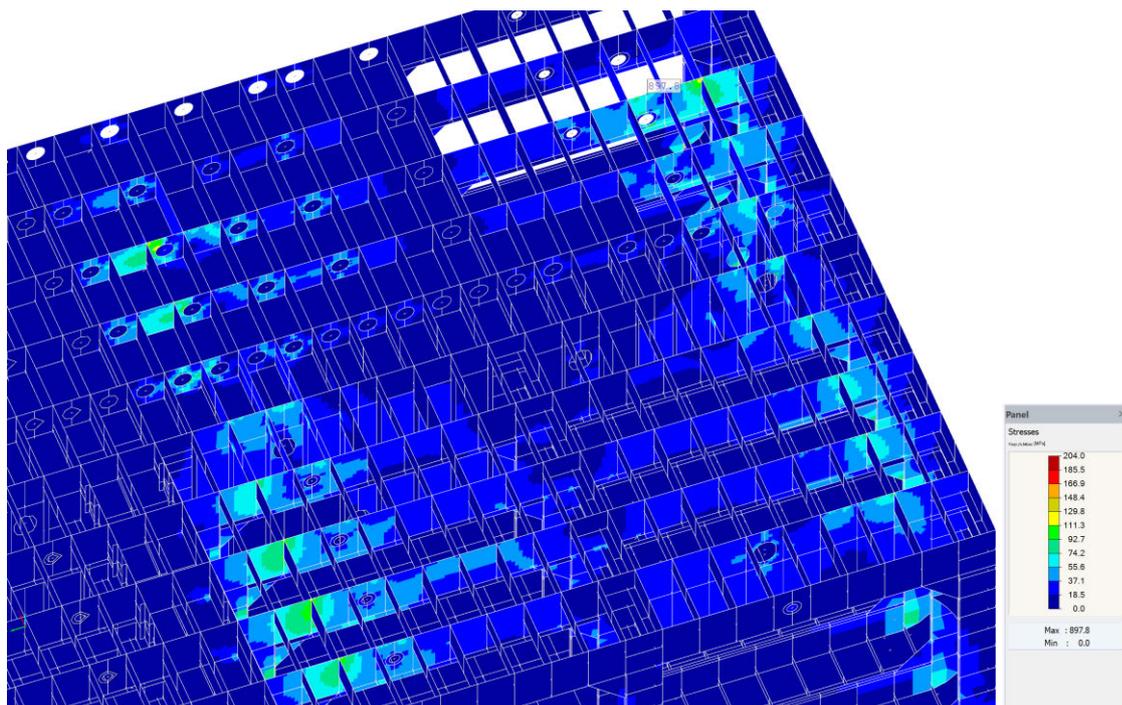


Abbildung 60 CO1: Von-Mises Vergleichsspannung des untersuchten Bereichs des Schiffs

## Lastkombination CO2: Stampfen achtern + negatives Tauchen

Beschreibung	Wert	Einheit
Summe die Lasten in x	-2449,98	kN
Summe die Lasten in y	-1337,01	kN
Summe die Lasten in z	-53553,40	kN
Maximale Verformung in x	-3,80	mm
Maximale Verformung in y	-25,10	mm
Maximale Verformung in z	-40,40	mm
Maximale Resultierende Verformung	41,60	mm

Tabelle 20 Zusammenfassung der Ergebnisse von CO2

### Transportrahmen

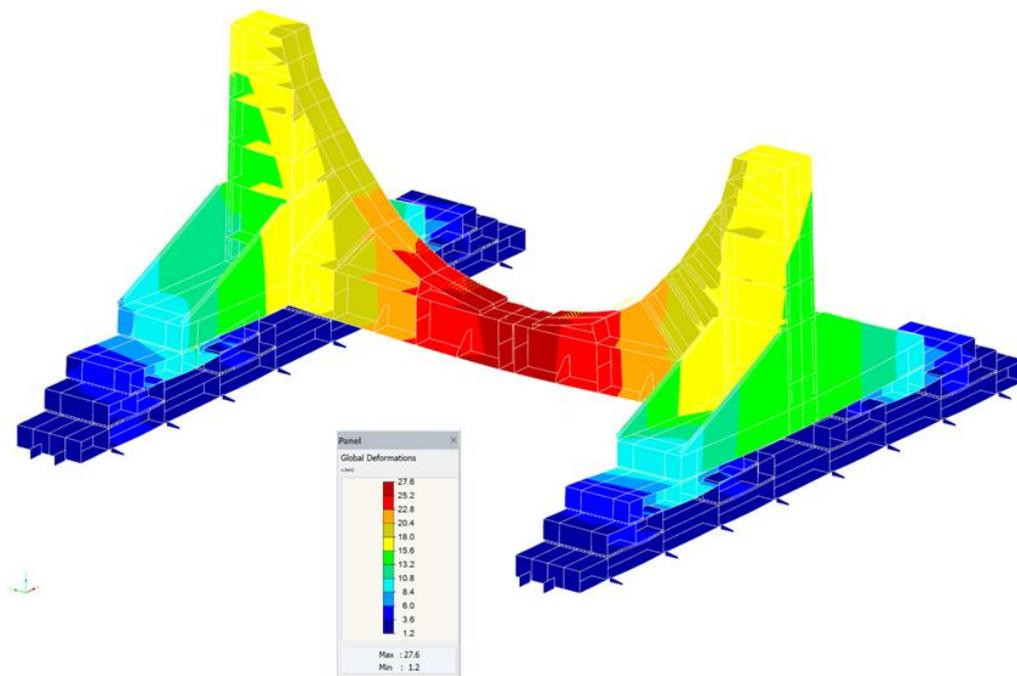


Abbildung 61 CO2: Absolute Verschiebung des Rahmens

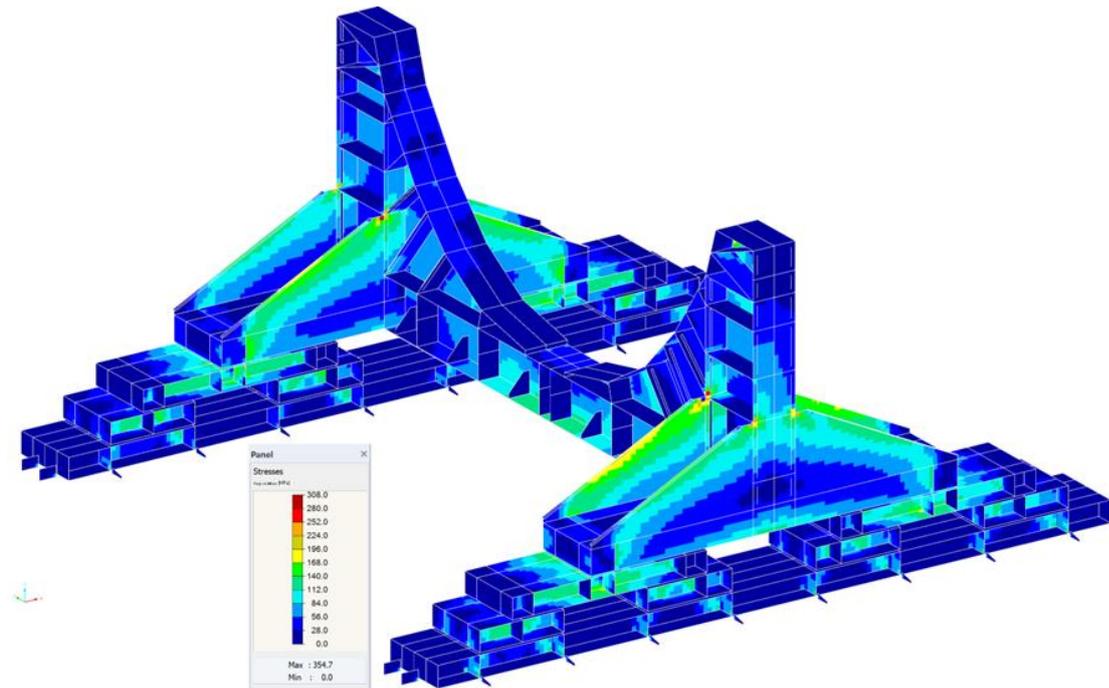


Abbildung 62 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Rahmens

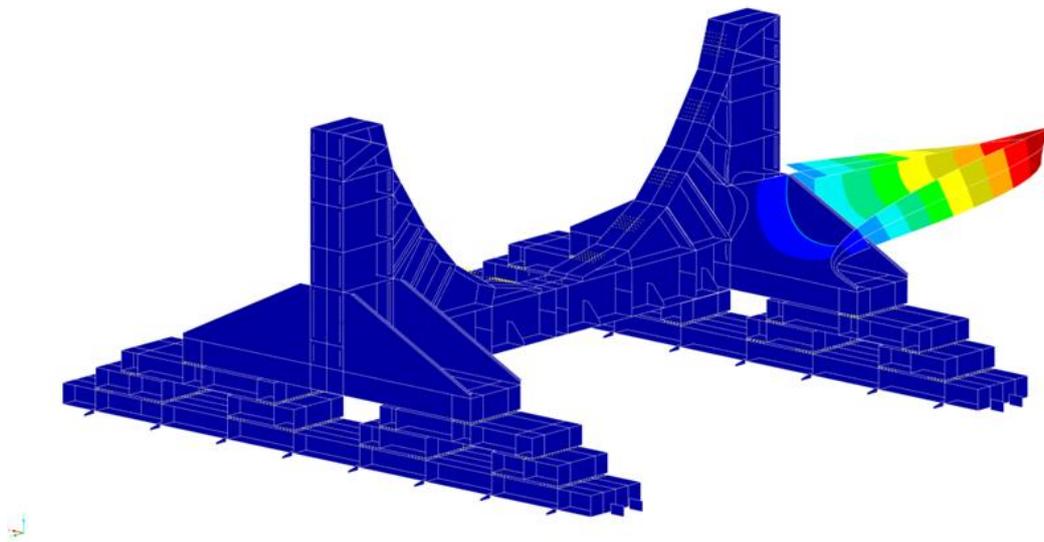


Abbildung 63 Stabilität des Transportrahmens  $\lambda=1,66$

## Monopile

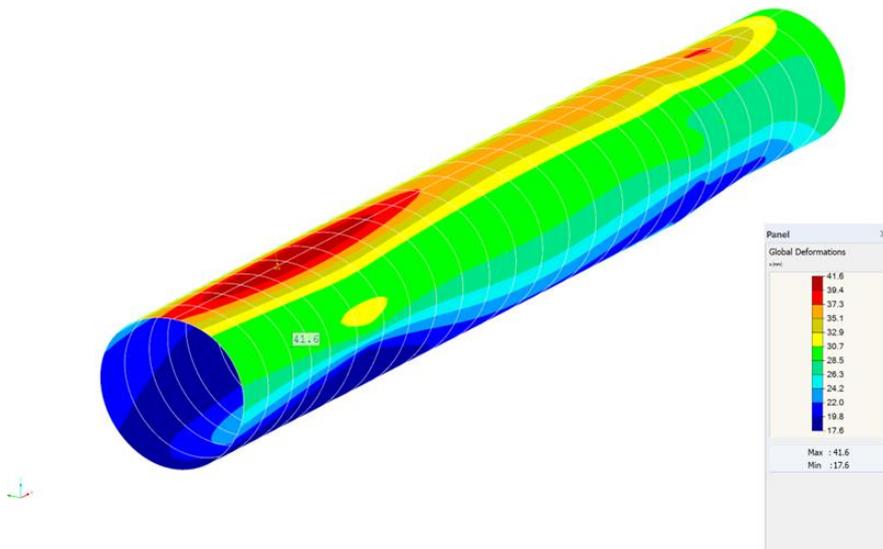


Abbildung 64 CO2: Absolute Verschiebung des Monopiles

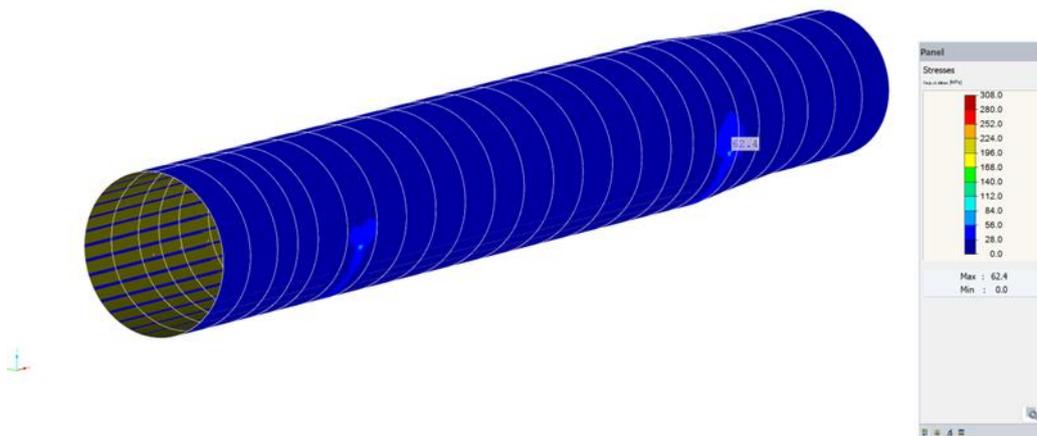


Abbildung 65 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Monopiles

## Schiffstruktur

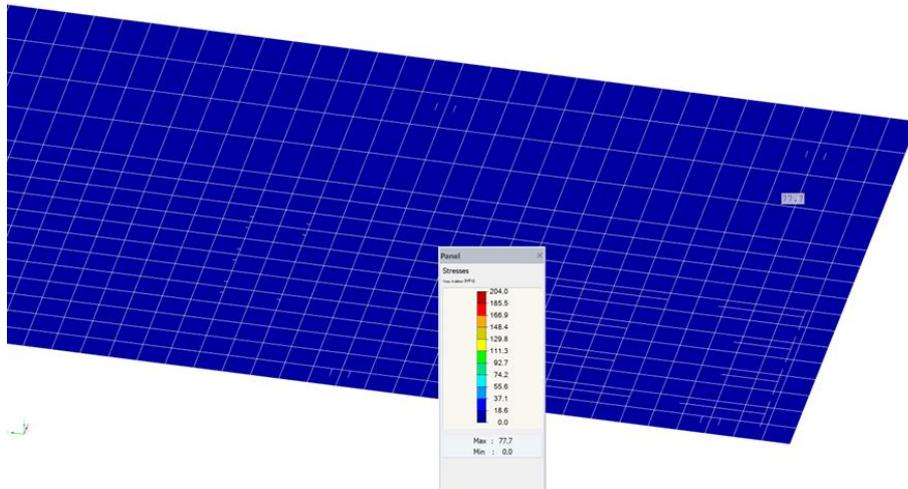


Abbildung 66 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Schiffsdecks

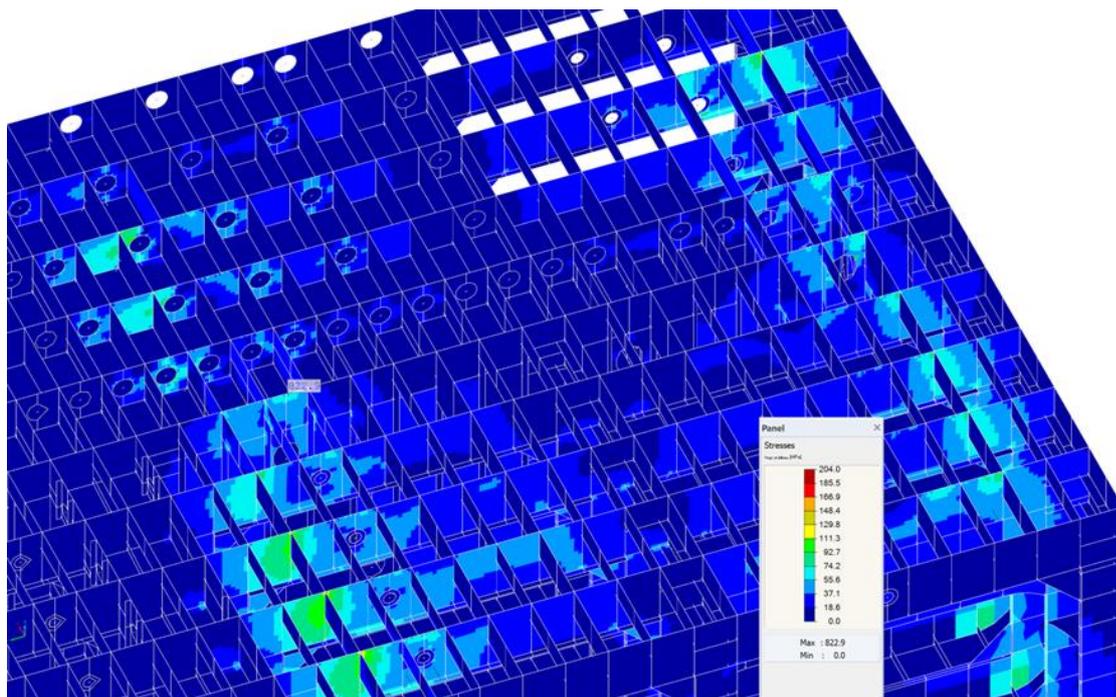


Abbildung 67 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des untersuchten Bereichs des Schiffs

## Lastkombination CO4: Rollen Steuerboard + negatives Tauchen

Beschreibung	Wert	Einheit
Summe die Lasten in x	0	kN
Summe die Lasten in y	-16160,90	kN
Summe die Lasten in z	-52898,20	kN
Maximale Verformung in x	-2,30	mm
Maximale Verformung in y	-88,30	mm
Maximale Verformung in z	-42,30	mm
Maximale Resultierende Verformung	89,7	mm

Tabelle 21 Zusammenfassung der Ergebnisse von CO4

### Transportrahmen

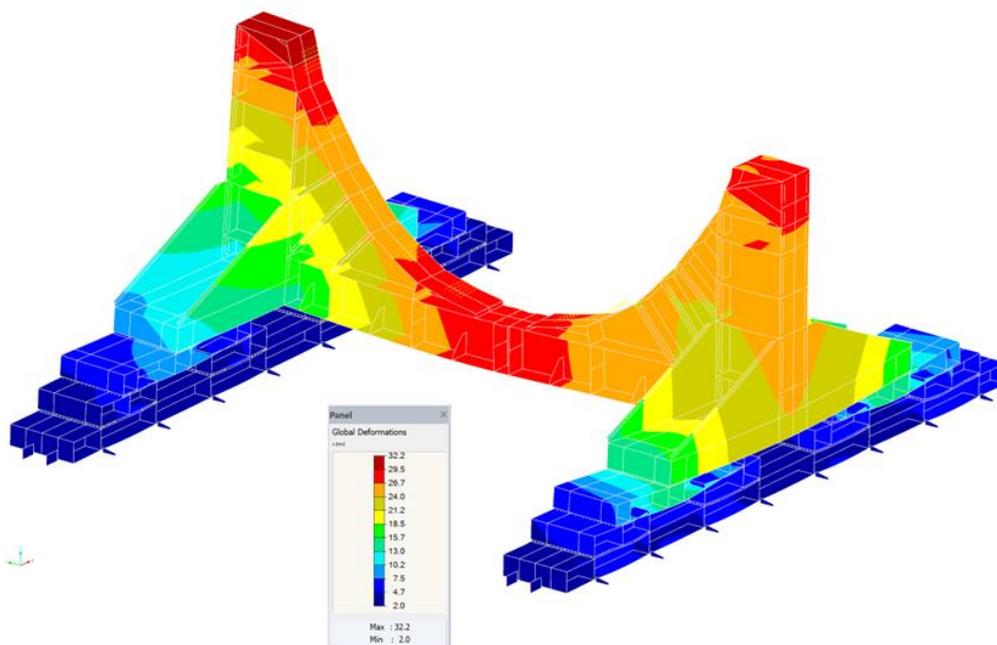


Abbildung 68 CO2: Absolute Verschiebung des Rahmens

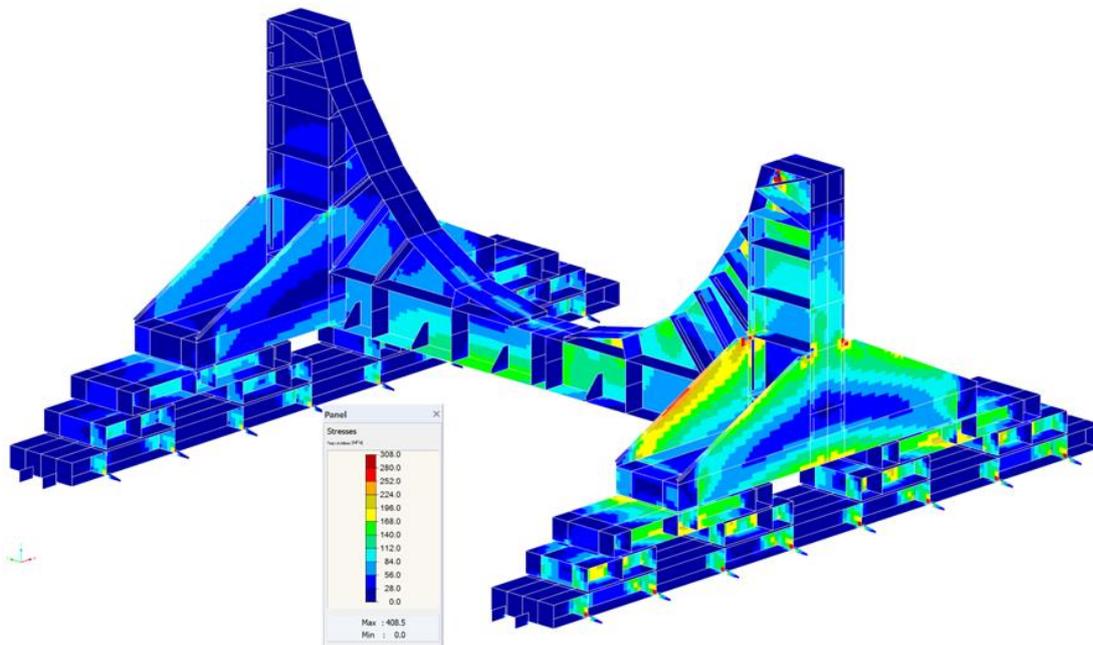


Abbildung 69 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Rahmens

## Monopile

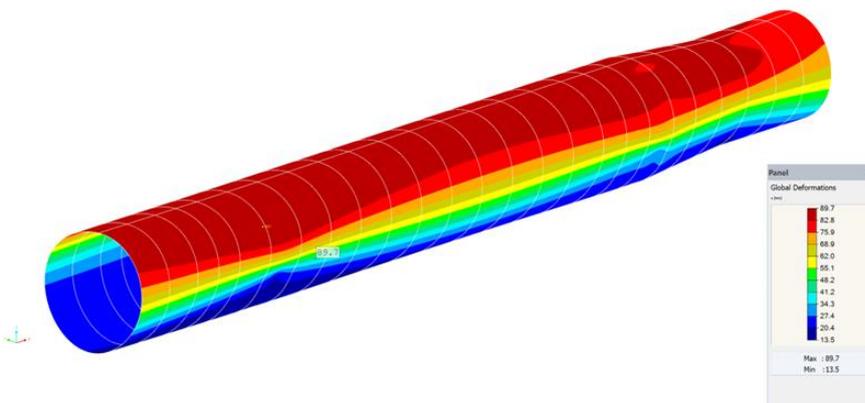


Abbildung 70 CO2: Absolute Verschiebung des Monopiles

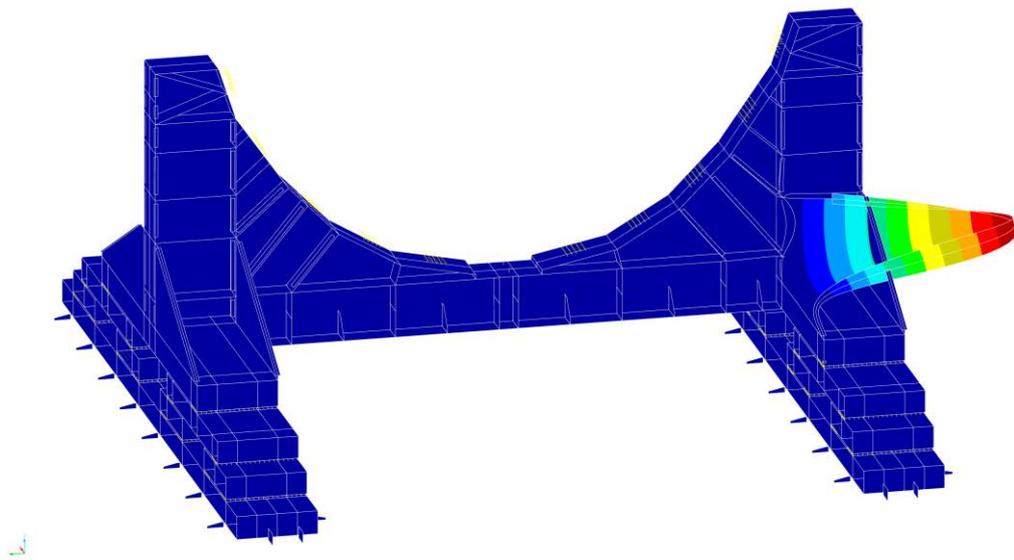


Abbildung 71 Stabilität des Transportrahmens  $\lambda = 1,28$

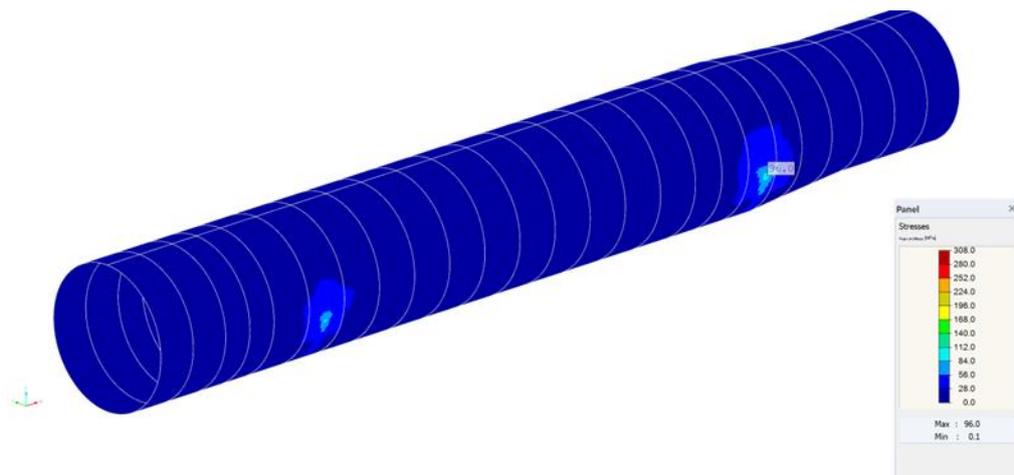


Abbildung 72 CO2: Von-Mises Vergleichsspannung des Monopiles

## Schiffstruktur

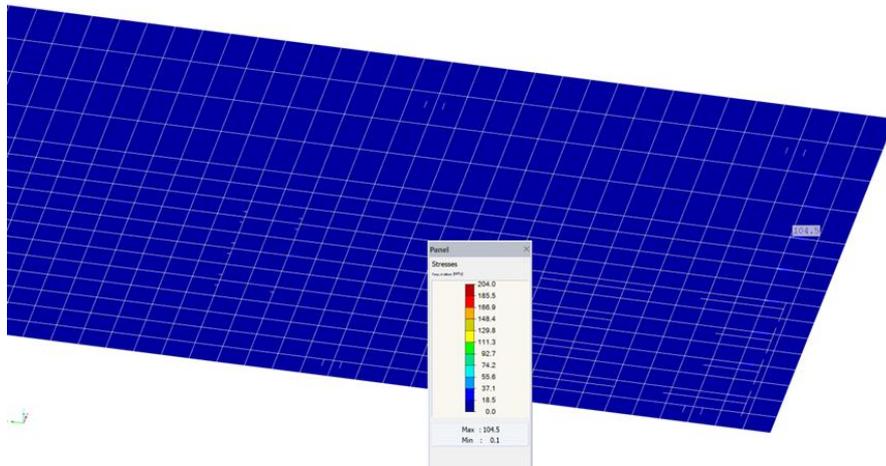


Abbildung 73 CO4: Von-Mises Vergleichsspannung des Schiffsdecks

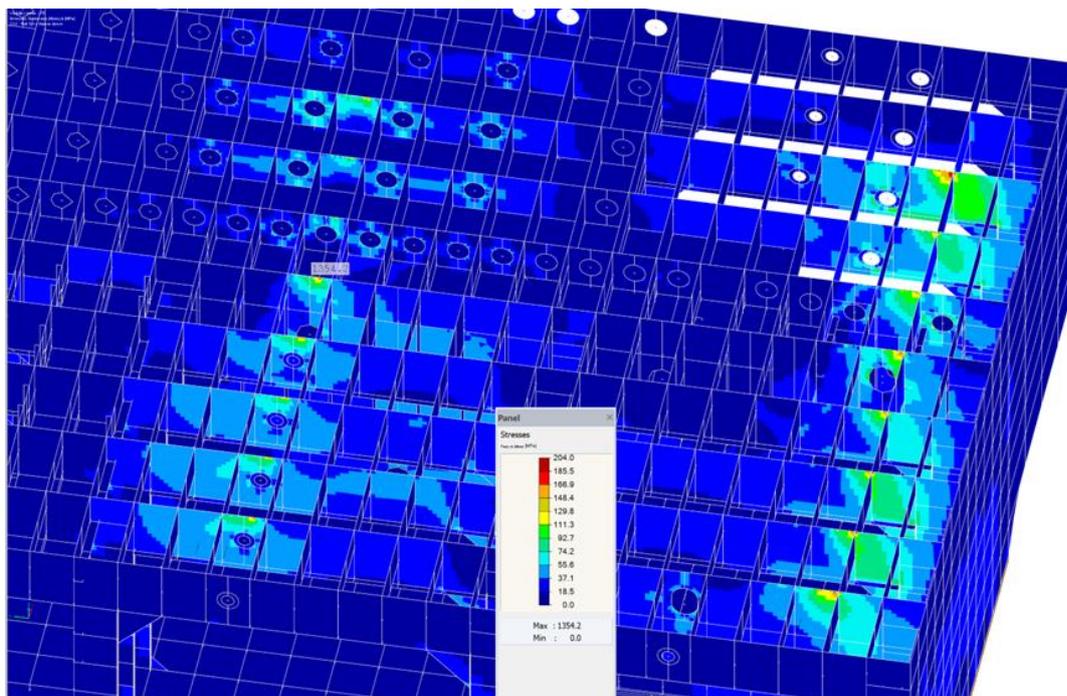
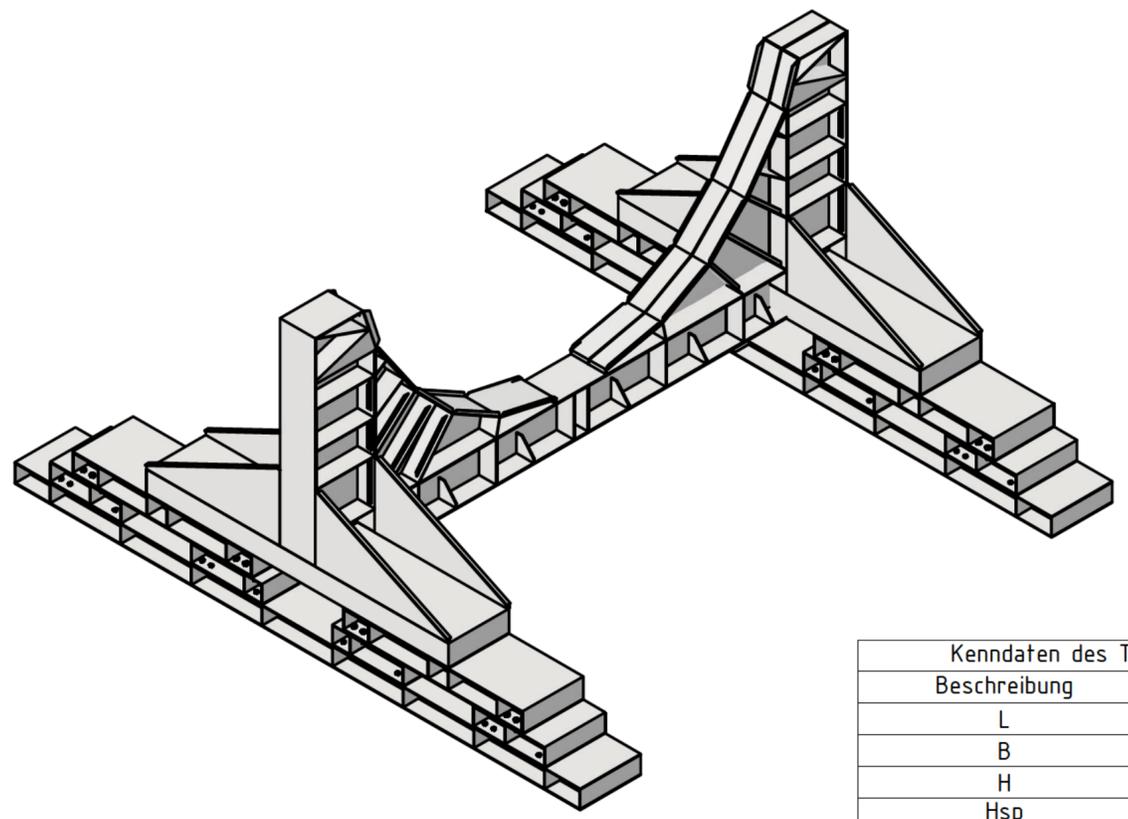
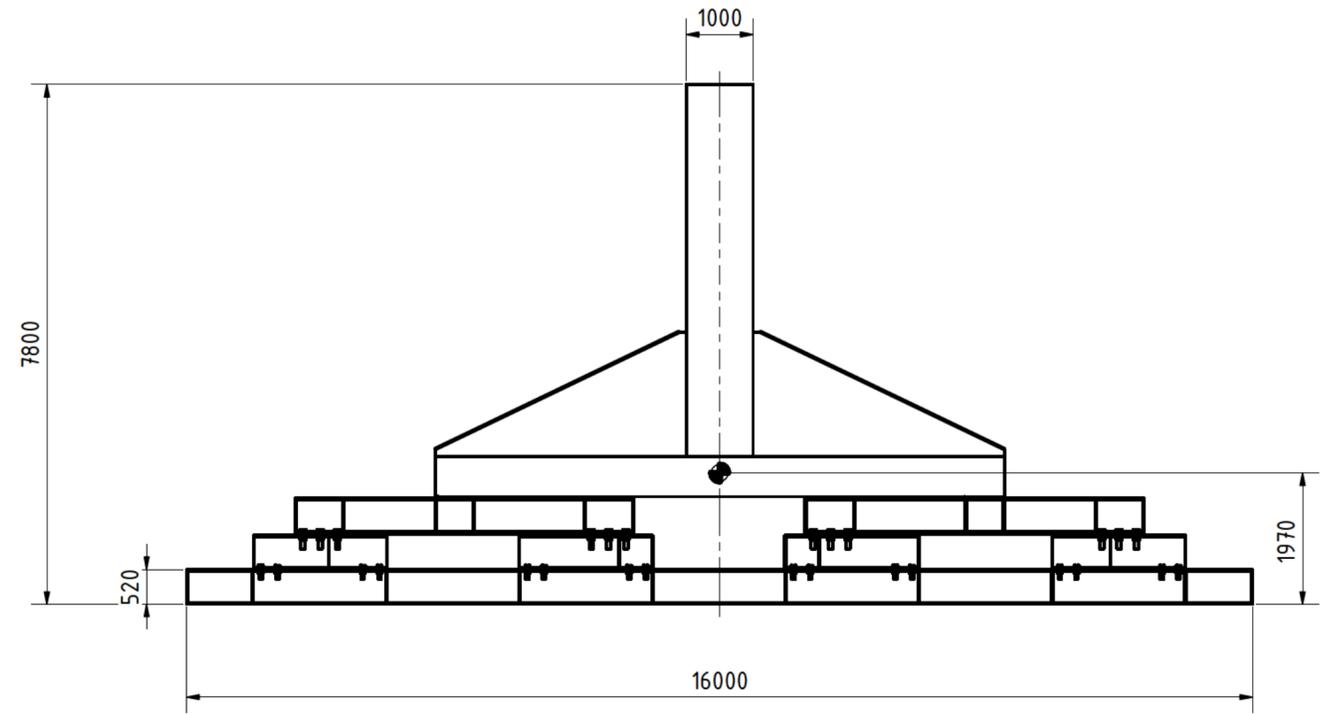
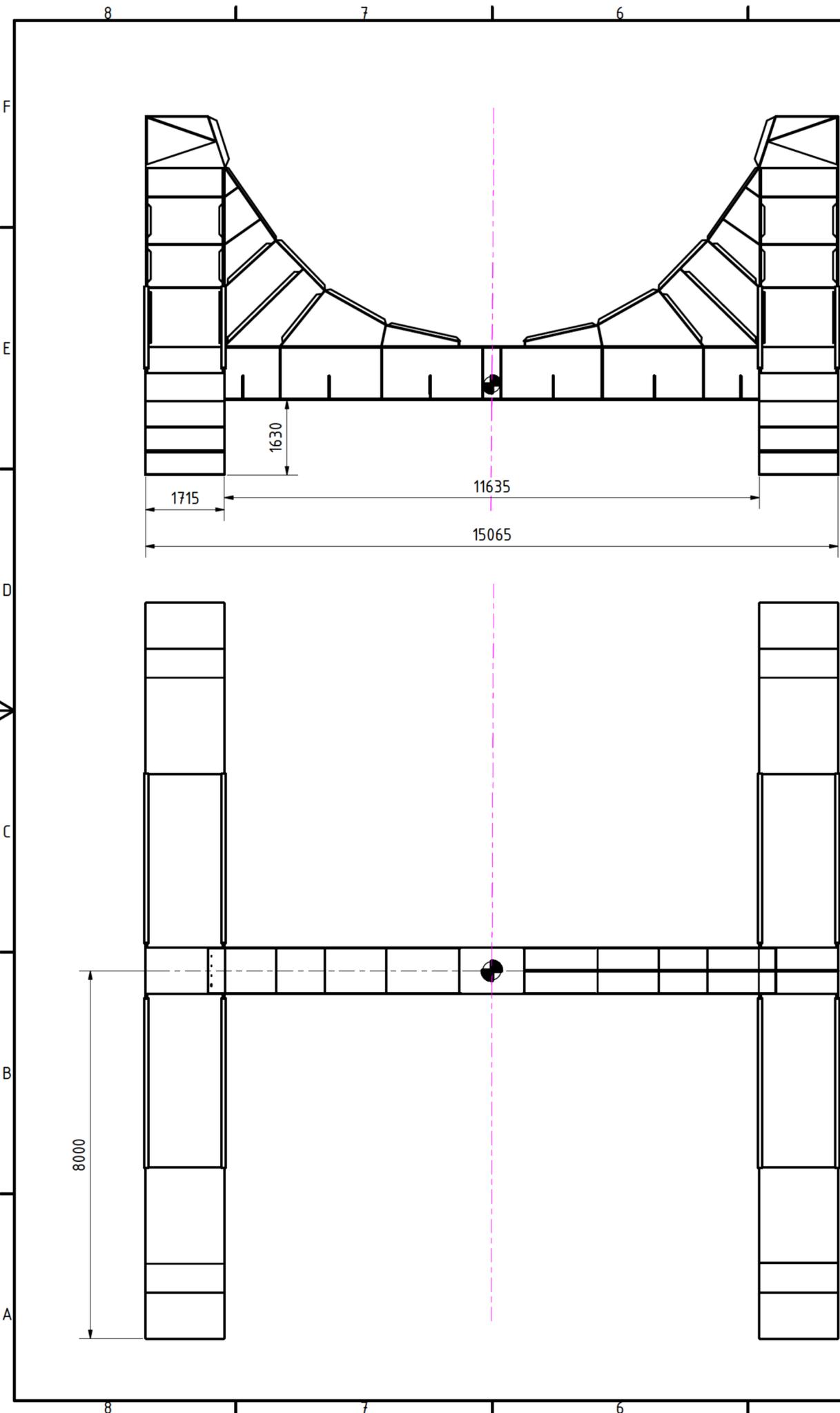


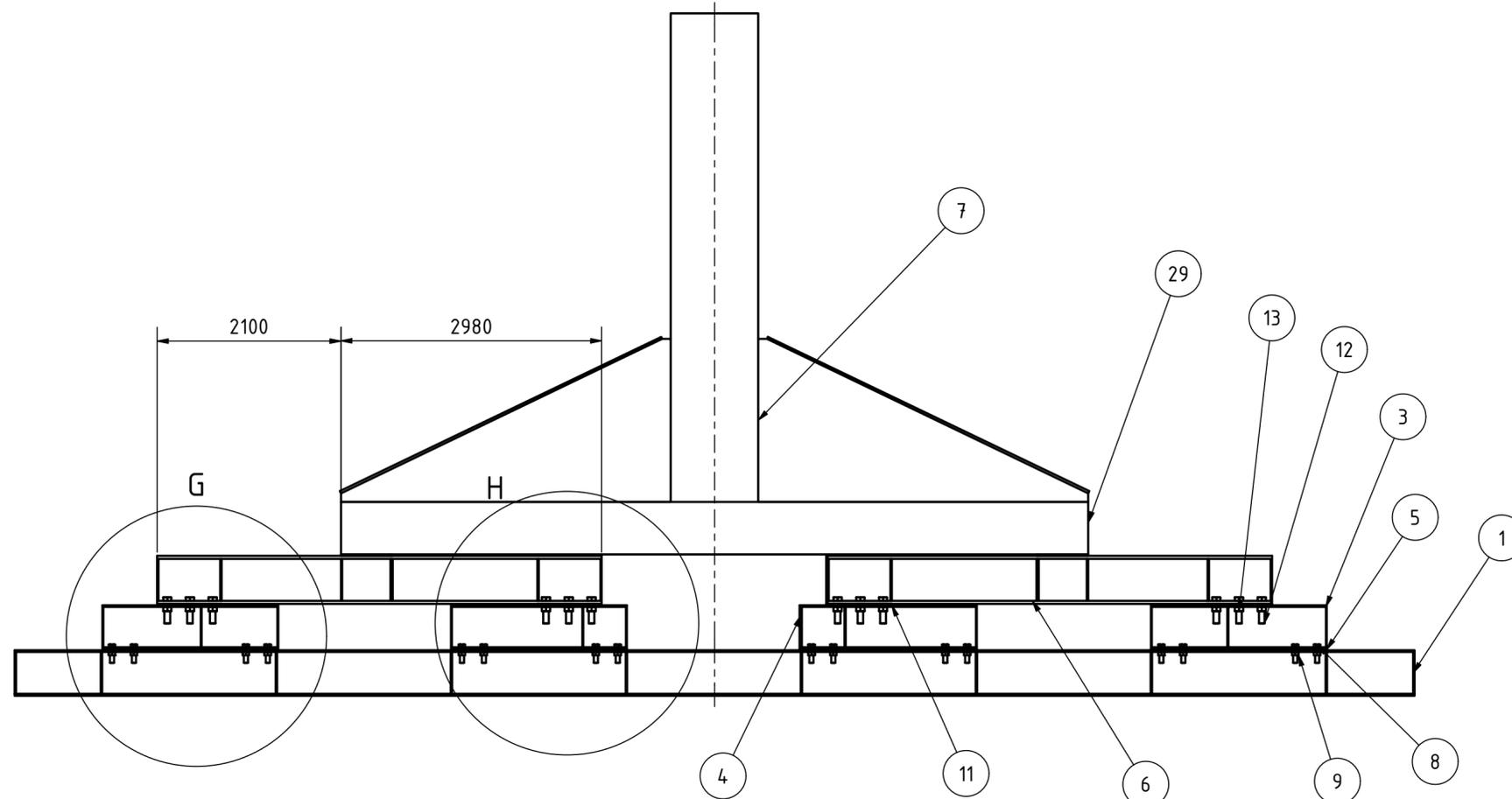
Abbildung 74 CO4: Von-Mises Vergleichsspannung des untersuchten Bereichs des Schiffs





Kenndaten des Transportrahmens		
Beschreibung	Wert	Einheit
L	16,00	m
B	15,06	m
H	7,80	m
Hsp	1,97	m
G	126,60	t

Projekt Bachelorarbeit Optimierung von Trasportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)		
Erstellt von	Mohamad Ihab Hammal	
Beschreibung	Baugruppe von Transportrahmen	
		1 A2
Datum	Maßstab	Einheiten
09.04.2023	1 : 75	Alle Einheiten sind in mm

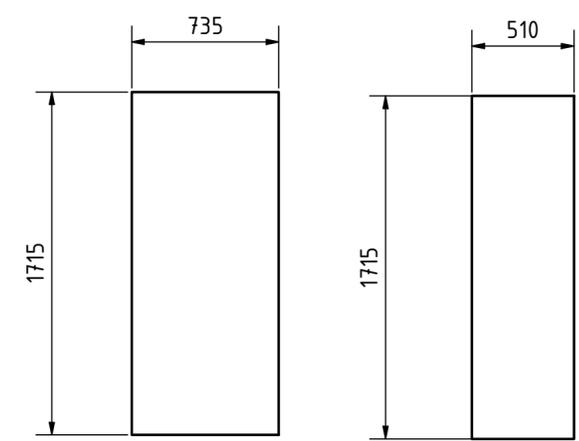
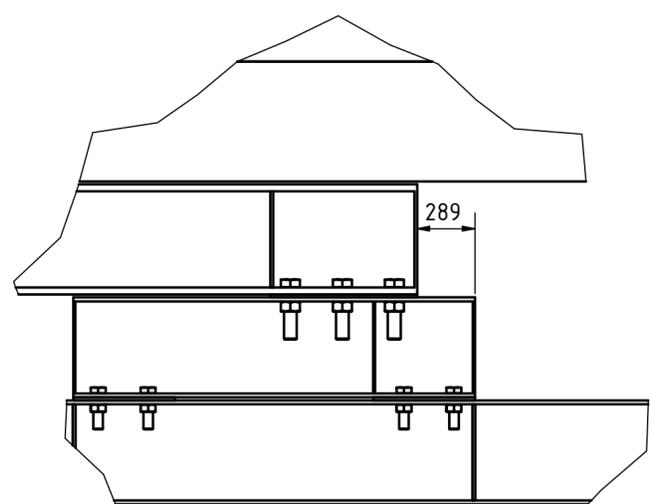
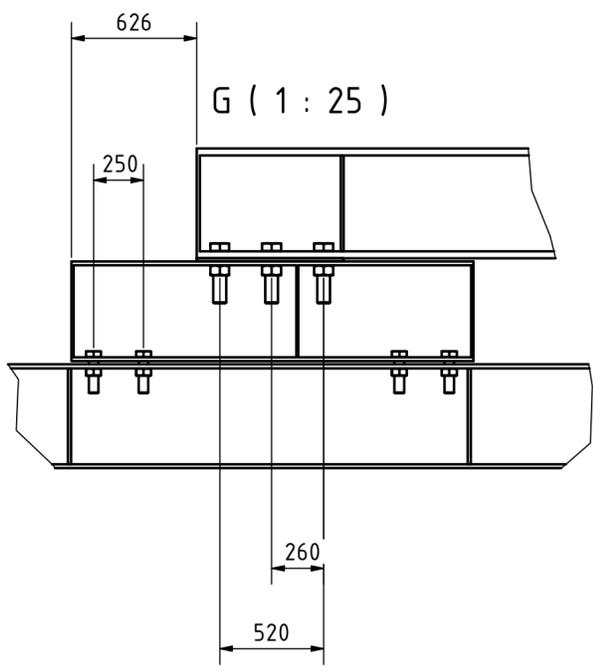


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	2	Geschweißte doppel T-Profil	
3	4	Äußere Bauteil der vierten Stufe	
4	4	Innere Bauteil der vierten Stufe	
5	16	Kontaktplatte der vierten Stufe	
6	4	Bauteil der dritten Stufe	
7	1	Oberer Teil des Transportrahmens	
8	64	ISO 4014 - M48 x 180	Hexagon head bolt - product grades A and B
9	64	ISO 4032 - M48	Hexagon nuts, style 1 - Product grades A and B
11	8	Kontaktplatte der dritten Stufe	
12	48	ISO 4014 - M64 x 260	Hexagon head bolt - product grades A and B
13	48	ISO 4032 - M64	Hexagon nuts, style 1 - Product grades A and B
29	2	Bauteil der zweiten Stufe	

H ( 1 : 25 )

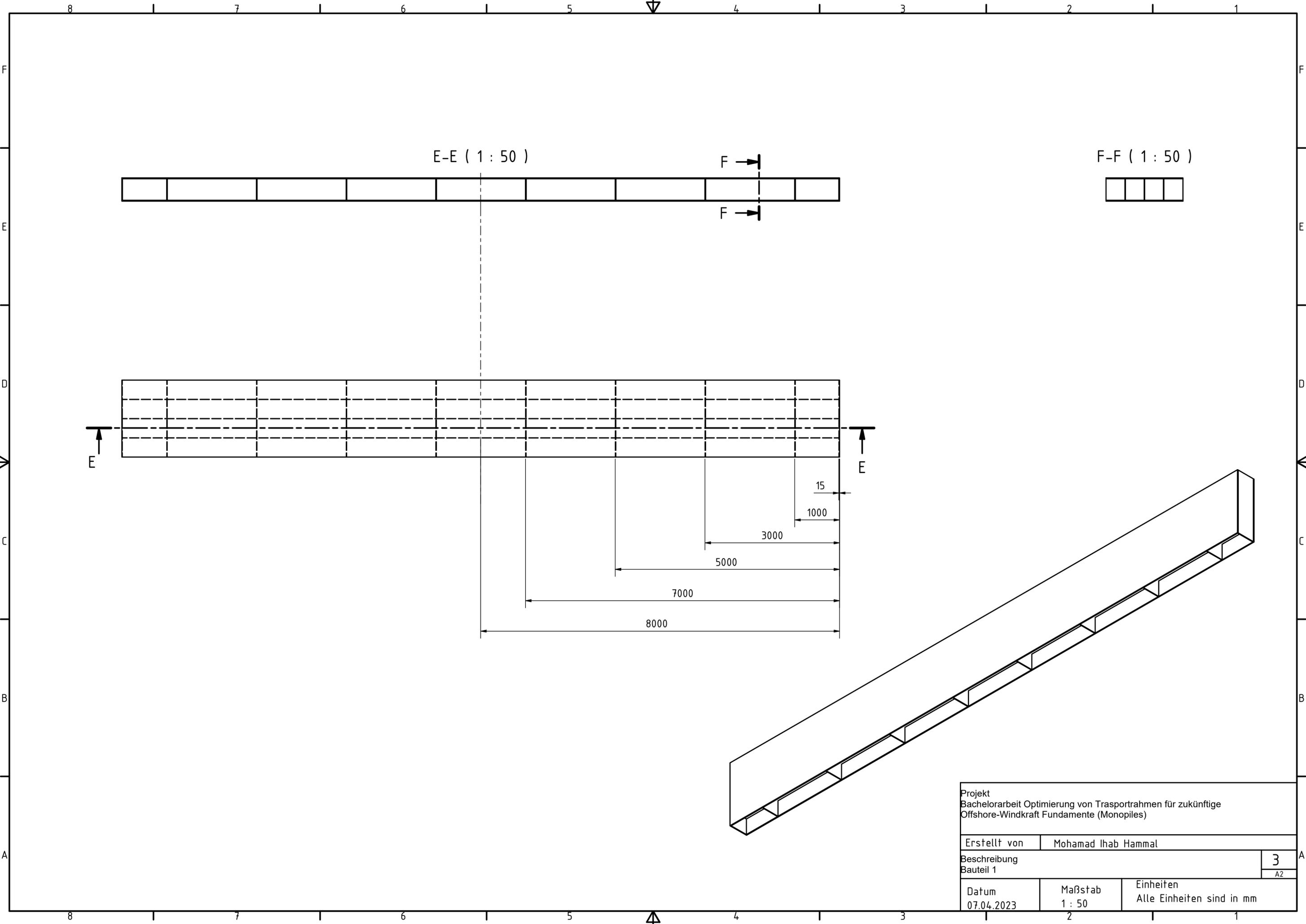
Part 11 (1:25)

Part 5 (1:25)



Projekt Bachelorarbeit Optimierung von Trasportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)		
Erstellt von	Mohamad Ihab Hammal	
Beschreibung	Baugruppe von Transportrahmen	
Datum	Maßstab	Einheiten
09.04.2023	1 : 50	Alle Einheiten sind in mm

2  
A2

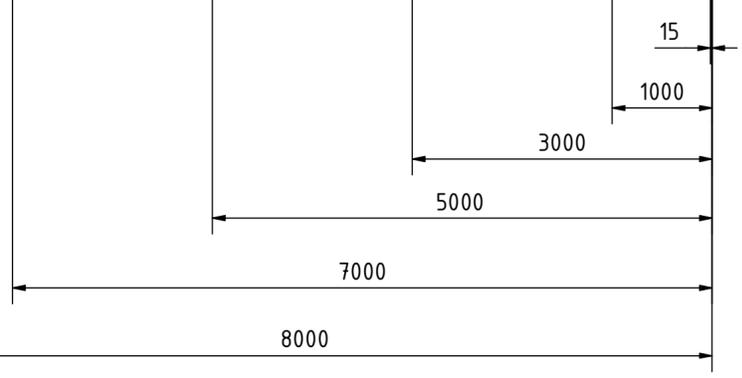


E-E ( 1 : 50 )

F-F ( 1 : 50 )

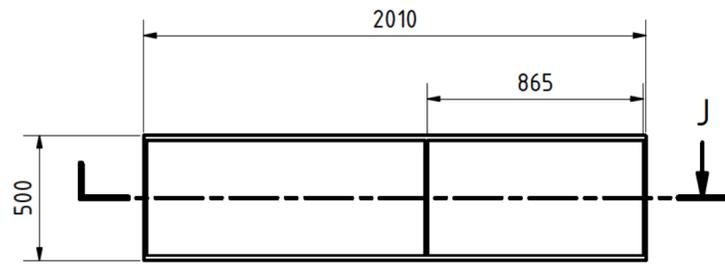
E

E

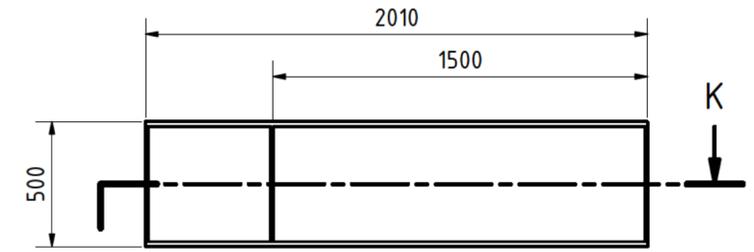


Projekt Bachelorarbeit Optimierung von Trasportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)		
Erstellt von	Mohamad Ihab Hammal	
Beschreibung Bauteil 1	3 A2	
Datum 07.04.2023	Maßstab 1 : 50	Einheiten Alle Einheiten sind in mm

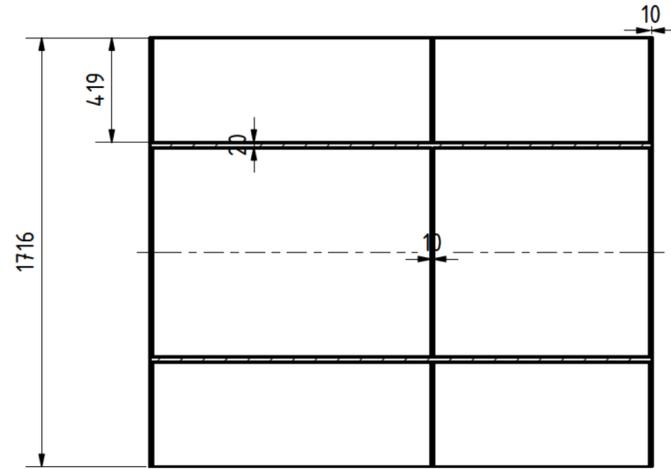
Item 3 (1:20)



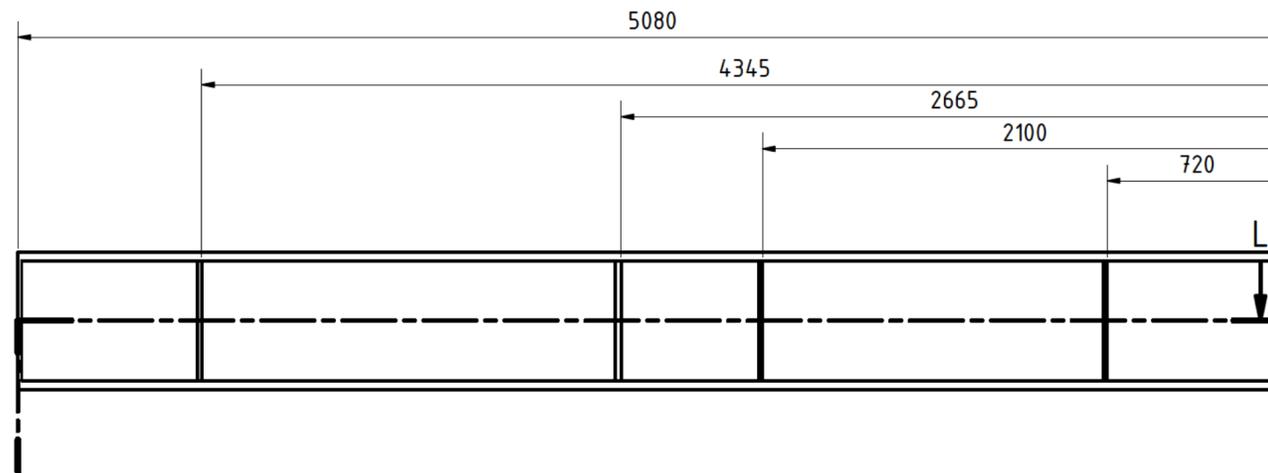
Item 4 (1:20)



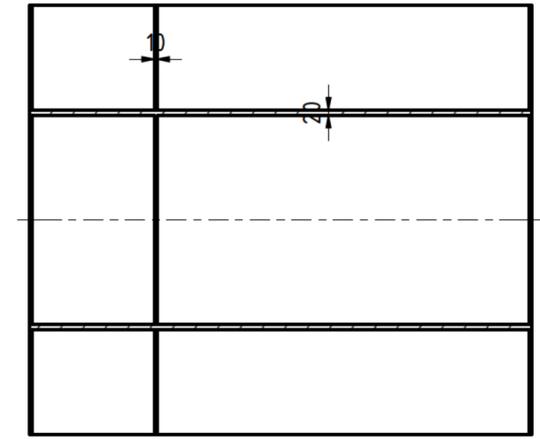
J-J ( 1 : 20 )



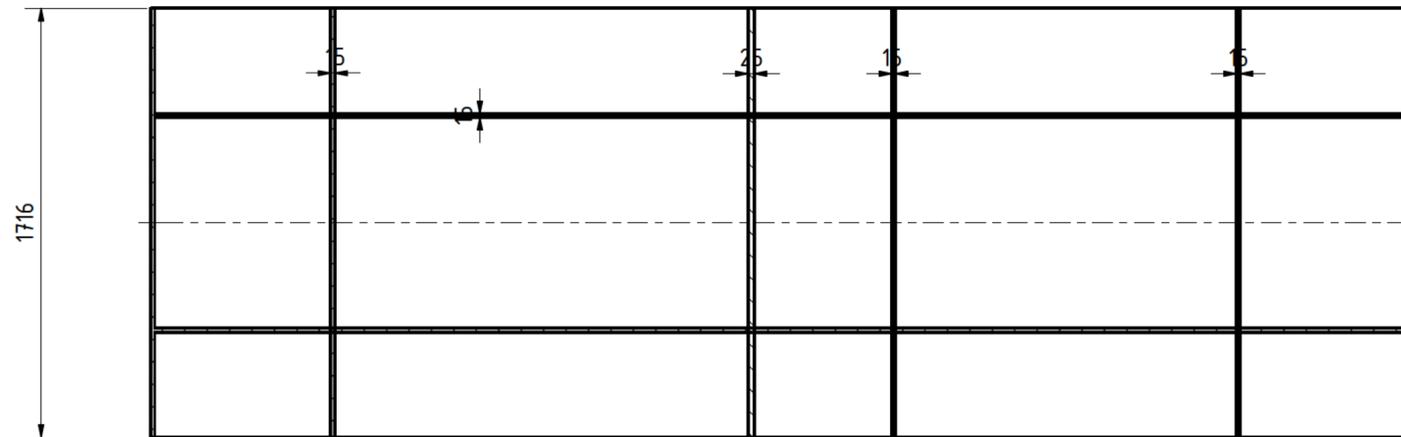
Item 6 (1:20)



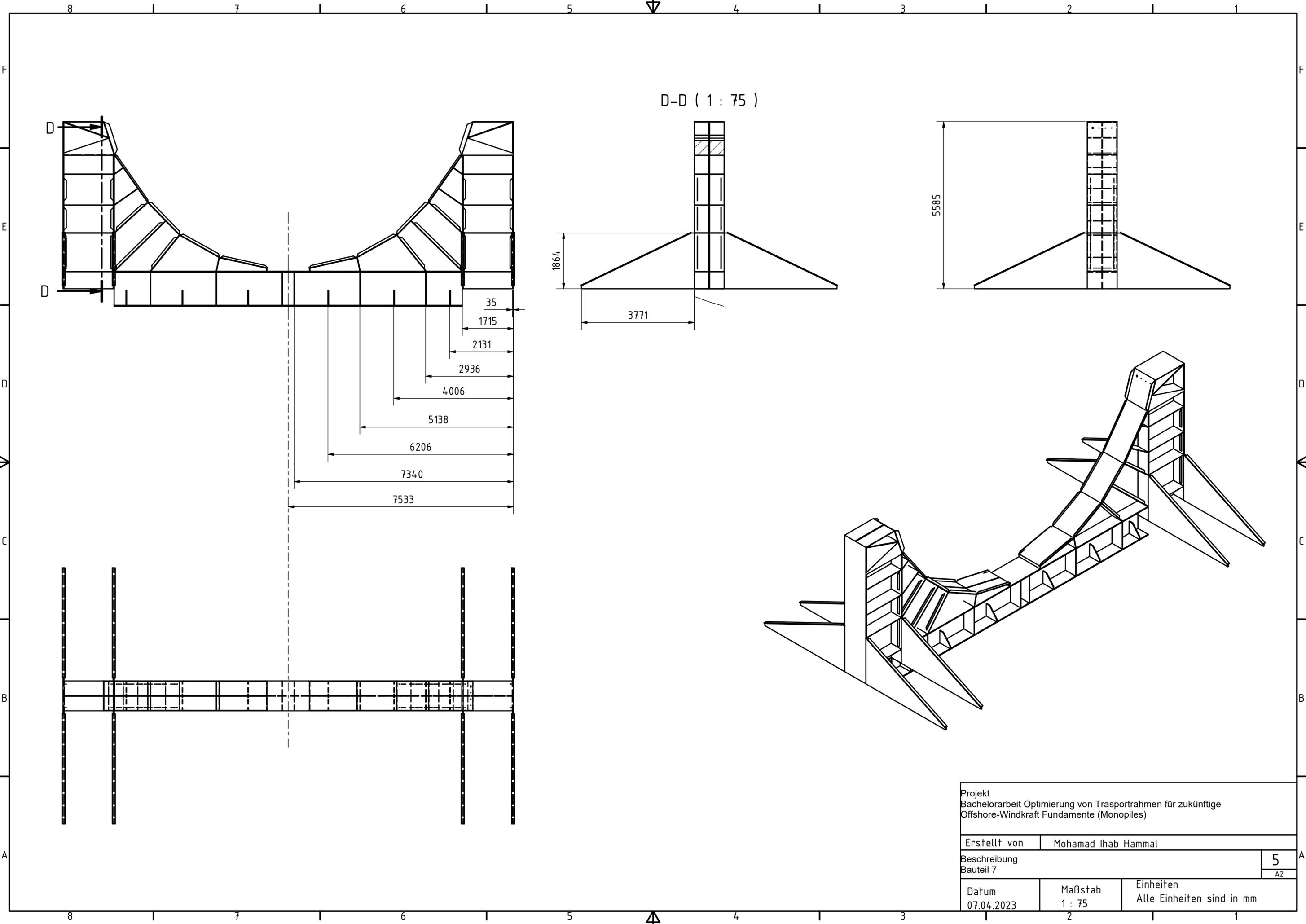
K-K ( 1 : 20 )



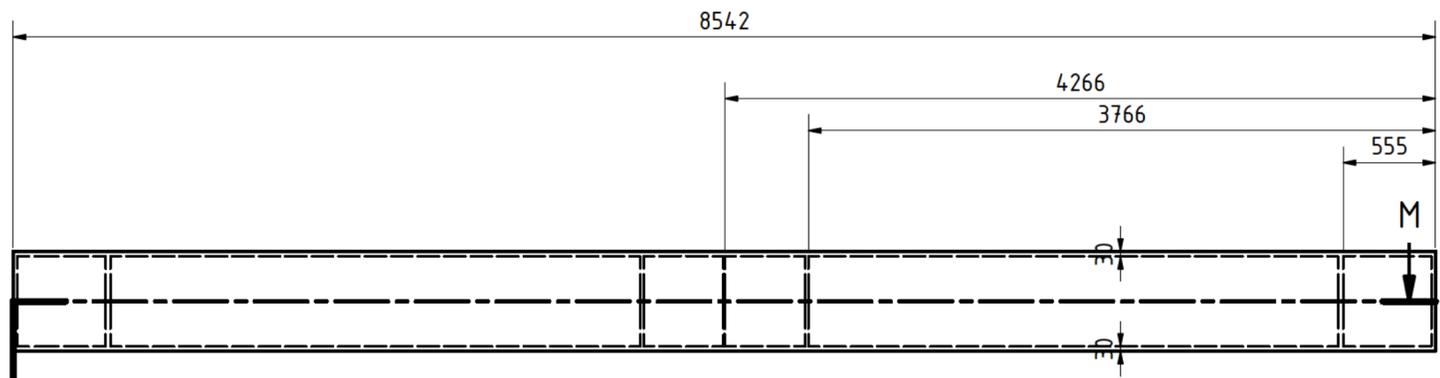
L-L ( 1 : 20 )



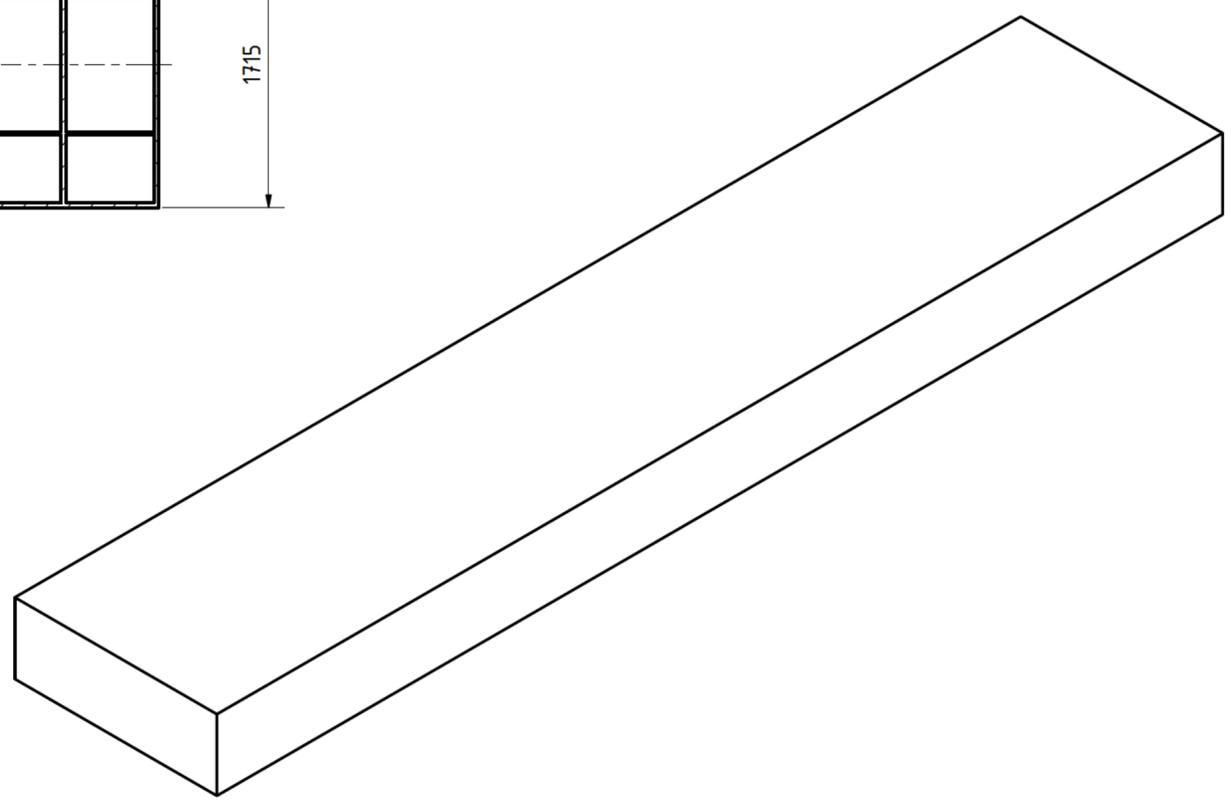
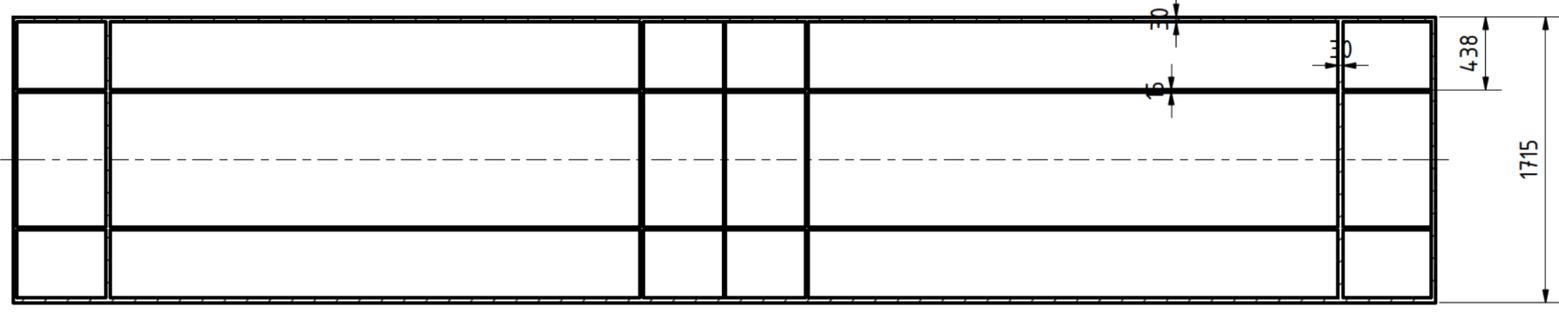
Projekt Bachelorarbeit Optimierung von Trasportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)		
Erstellt von	Mohamad Ihab Hammal	
Beschreibung Bauteile 3, 4 und 6	4 A2	
Datum 07.04.2023	Maßstab 1 : 20	Einheiten Alle Einheiten sind in mm



Projekt Bachelorarbeit Optimierung von Transportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)		
Erstellt von	Mohamad Ihab Hammal	
Beschreibung Bauteil 7	5 A2	
Datum 07.04.2023	Maßstab 1 : 75	Einheiten Alle Einheiten sind in mm

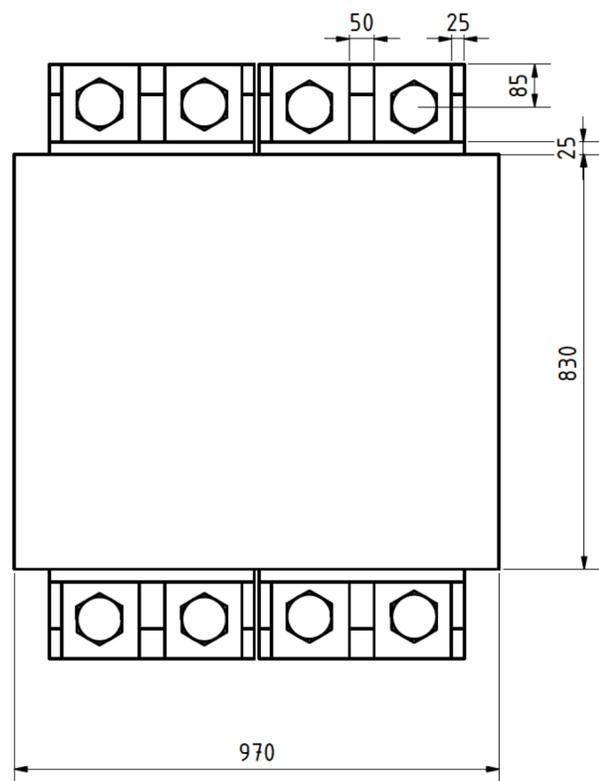
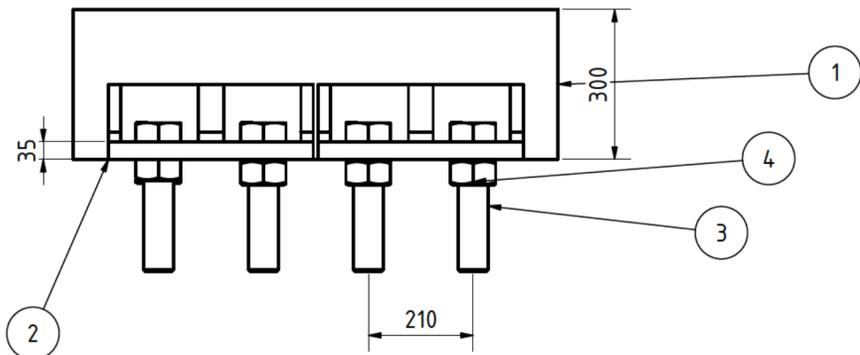


M-M ( 1 : 30 )

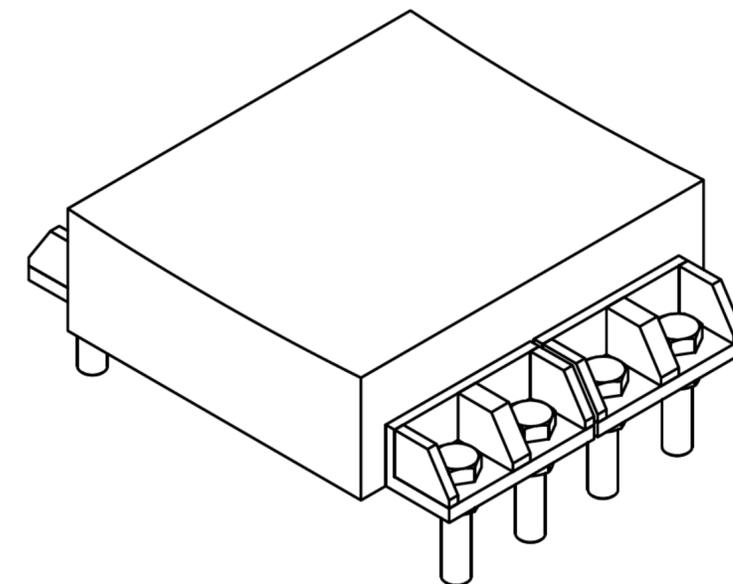
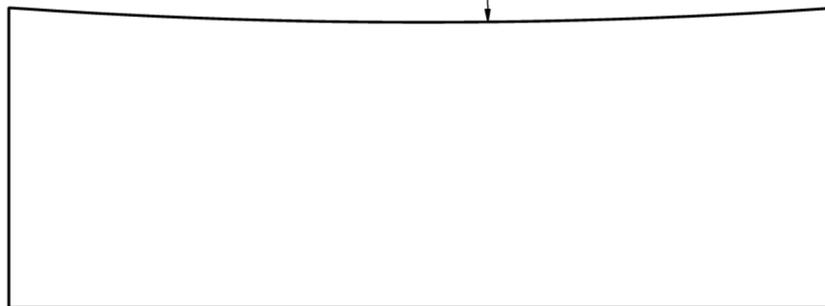


Projekt Bachelorarbeit Optimierung von Trasportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)		
Erstellt von	Mohamad Ihab Hammal	
Beschreibung Bauteil 29	6 A2	
Datum 07.04.2023	Maßstab 1 : 30	Einheiten Alle Einheiten sind in mm

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Holzblock	
2	2	StahlStuetze	
3	8	ISO 4014 - M60 x 260	Hexagon head bolt - product grades A and B
4	8	ISO 4032 - M60	Hexagon nuts, style 1 - Product grades A and B



Item 6 (1:5)



Projekt Bachelorarbeit Optimierung von Trasportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft Fundamente (Monopiles)		
Erstellt von	Mohamad Ihab Hammal	
Beschreibung	Baugruppe von Anpassungssystem	
Datum	Maßstab	Einheiten
26.04.2023	1 : 10	Alle Einheiten sind in mm

7  
A2

Eidesstattliche Erklärung

### **Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit**

Hiermit versichere ich,

Name:     Hammal    

Vorname:     Mohamad Ihab    

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit - mit dem Thema:

Optimierung von Transportrahmen für zukünftige Offshore-Windkraft-Fundamente (Monopiles)

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg

Ort

27.04.2023

Datum

Unterschrift im Original