



**Floating
Offshore
Wind
Solutions**
Mecklenburg
Vorpommern

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger Neue Warnow Design & Technology GmbH (WD)	Förderkennzeichen 03WKDC1B
Wachstums-kern: OWS ^{plus} - Floating Offshore Wind Solutions	
Verbundprojekt: VP1 - Schwimmende Unterstrukturen	
Teilprojekt: TP1.B - System- und Objekttechnologie zur Entwicklung schwimmender Unterstrukturen	
Teilprojektleiter: Sachbearbeiter:	
Laufzeit: 01.08.2019 – 31.07.2022	

Abschlussbericht des Forschungsprojektes OWSplus - Floating Offshore Wind Solutions (inklusive Erfolgskontrollbericht-separat)

August 2019 – Juli 2022

Neue Warnow Design & Technology GmbH
Am Strande 18
18055 Rostock

Rostock, 23. Januar 2023

Dr.-Ing. Thomas Schuricht

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Glossar	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Teil I – Kurzdarstellung	10
1 Aufgabenstellung	10
1.1 Gesamtvorhaben	10
1.2 Teilvorhaben	11
2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens	11
3 Stand der Technik, auf welchem aufgebaut wurde	13
4 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	14
4.1 Komplex 1 – System, Modul und Designtechnologie für schwimmende Unterstrukturen	14
4.1.1 Form- und Funktionsgestaltung für schwimmende Systemträger	14
4.1.2 Lastensimulation für Floating-Offshore-Windenergie-Turbinen	14
4.1.3 Technologien für die adaptive Quer-Modul-Baumethodik	14
4.1.4 Objekt-Design-Methodik für verschiedene Systemträger	15
4.2 Komplex 6 – Verankerung und Zustandsüberwachung schwimmender Unterstrukturen	15
4.2.1 Betriebs- und Errichter-Technologien.....	15
4.2.2 Alternative Verankerungssysteme bei minimalem Footprint	15
4.2.3 Zustandsbewertung mit Produkt-Lebenszyklus für das Maintenance	15
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
Teil II – Eingehende Darstellung	17
1 Abgleich gesetzter Ziele und erreichter Ergebnisse.....	17
1.1 Komplex 1 – System, Modul und Designtechnologie für schwimmende Unterstrukturen	17
1.1.1 Form- und Funktionsgestaltung für schwimmende Systemträger	17
1.1.2 Lastensimulation für Floating-Offshore-Windenergie-Turbinen	28
1.1.3 Technologien für die adaptive Quer-Modul-Baumethodik	37
1.1.4 Objekt-Design-Methodik für verschiedene Systemträger	41
1.2 Komplex 6 – Verankerungen und Zustandsüberwachung schwimmender Unterstrukturen	46

1.2.1	Betriebs- und Errichter-Technologien.....	46
1.2.2	Alternativer Verankerungssysteme bei minimalem Footprint	51
1.2.3	Zustandsbewertung mit Produkt-Lebenszyklus für das Maintenance	54
1.3	Fazit.....	57
1.3.1	Innovative Systemträger für FOWEA	57
1.3.2	Lastensimulation für Floating-Offshore-Windenergie-Turbinen.....	57
1.3.3	Adaptive Quer-Modul-Baumethodik	57
1.3.4	Objekt-Design für verschiedene FOWT.....	58
1.3.5	Die Betriebs- und Errichter-Technologie für FOWT.....	58
1.3.6	Innovative Verankerungssysteme	58
1.3.7	Zustandsbewertung für das Maintenance	58
2	Zahlenmäßiger Nachweis	59
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	59
4	Voraussichtlicher Nutzen hinsichtlich des Verwertungsplans	60
4.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	60
4.2	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	61
4.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	61
5	Externe Fortschritte auf dem Forschungsgebiet während der Durchführung des Vorhabens.....	62
6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	62
Teil III - Erfolgskontrollbericht		63
1	Beiträge zu förderpolitischen Zielen.....	63
2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	64
3	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	66
3.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte	66
3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	66
3.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	67
3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	67
4	Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben	68
5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	68
6	Einhaltung der Ausgaben und Zeitplanung	69

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current – Wechselstrom
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BfN	Bundesamt für Naturschutz
CFD	Computational Fluid Dynamics
DC	Direct Current – Gleichstrom
EPCI	Engineering, Procurement, Construction and Installation
EÜP	Energieübertragungsplattform (Sammelbegriff für AC- und DC-Plattformen)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FOWEA	Floating Offshore Windenergieanlage
FOWT	Floating Offshore Windturbine
HVDC	High Voltage Direct Current – Hochspannungs Gleichstrom
OWP	Offshore Wind Park
T&I	Transport und Installation
WEA	Windenergieanlage

Glossar

Baseframe	Gründungstragwerkstruktur für EÜP
Brace	kleinerer Teil einer Rohrknotenverbindung
Chord	größerer Teil einer Rohrknotenverbindung
Grouted Joint	Hochfeste Betonverbindung
Kolk	Effekt des Ausspülens von Meeresboden (Sediment-Erosion)
Maintenance	Wartung und Instandhaltung
Leg	Stützen/Beine der Plattform
Mud Line	Bezeichnung für Meeresgrund-Ebene mit Höhenbezug zum Wasserstand
Pile	Rammpfahl aus Stahl, der direkt im Meeresgrund eingebunden sind

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Arbeitsplan mit Meilensteinen für das Teilprojekt TPA.B	14
Abbildung 1-1: Lokationen – Überblick der Standorte	17
Abbildung 1-2: Wellenhöhen, -perioden, Strömungen (1a, 10a, 50a) – Wassertiefe, Distanz 18	18
Abbildung 1-3: Wellenhöhen 1a, 10a, 50a – Korrelation von Wellenlasten und Standorten	18
Abbildung 1-4: Leistungsklasse Channel Island – Lokation 1	19
Abbildung 1-5: Leistungsklasse Gulf of Main – Lokation 2.....	19
Abbildung 1-6: Leistungsklasse Nördliche Nordsee – Lokation 3	20
Abbildung 1-7: Leistungsklasse Golf du Lion – Lokation 4.....	20
Abbildung 1-8: Leistungsklasse Sagami-Wan – Lokation 5	21
Abbildung 1-9: Leistungsklasse Channel Island – Lokation 6	21
Abbildung 1-10: Leistungsklasse Biscaya – Lokation 7	22
Abbildung 1-11: Leistungsklasse Yellow Sea – Lokation 8	22
Abbildung 1-12: Nachweise Ultimate, Accidental und Fatigue Limit State – hier Lokation 3	23
Abbildung 1-13: Nachweise bzgl. der Schädigung bzgl. Bauwerkshöhe und Richtung – hier Lokation 3	23
Abbildung 1-14: Struktur- / Systemgrenzen für Aussteifungen und Grenzzustand der Betriebsfestigkeit	24
Abbildung 1-15: Auslenkung auf Höhe Turmkopf – hier Lokation 3 (Ausgabe für Lastfallkombinationen).....	24
Abbildung 1-16: Beschleunigungen, Verschiebungen und Verdrehungen für die Lastfallkombinationen	25
Abbildung 1-17: Semi-Sub-Zentralanker (5) – ANSYS-Mechanical & ANSYS-AQUA (Modell 3D-CAD)	26
Abbildung 1-18: FEM-Modell (RFEM) – System (1) Spar mit Zentralanker – eingespannt	27
Abbildung 1-19: Darstellung Mono-Floater (Spar) mit Mooring System und verschiedener Anordnung des Ballastsystems und Ballastkomponenten	27
Abbildung 1-20: CFD-Berechnungsmodell für eigene Bewertungen einer 15 MW Turbine 28	28
Abbildung 1-21: Konfiguration (Auszug) - Vereinfachte Kennfeld-Zuordnung bei P = 15 MW 28	28
Abbildung 1-22: Mono-Floater – „Langversion“	29
Abbildung 1-23: Mono-Floater – „Kurzversion“ als 2D-CAD Darstellung	30
Abbildung 1-24: Multi-Floater – „Aufgelöste Struktur“	30
Abbildung 1-25: Klassische Mooring-Verankerung mit räumlicher Gleichgewichtswirkung - Vergleichende Simulationen – Ansys Aqwa (FEM) und FAST (Mehrkörpersystem)	31
Abbildung 1-26: Vergleichende Simulationen – Ansys Aqwa (FEM) und WAMIT (Potentialtheorie)	31

Abbildung 1-27: Ergebnisvergleiche – vereinfachte Darstellungen für die Bewegungsmodi	31
Abbildung 1-28 Zuglastbeanspruchte Verankerung mit räumlicher Auslenkungswirkung.....	32
Abbildung 1-29: Alternative Verankerung mit zentraler Rückstellwirkung (Biegemoment) - „Boden-Einspannung“, „Boden-Gelenk“ und „Doppelpendel“	32
Abbildung 1-30: Abbildung einer 50MW WEA; Bild a : Detailabbildung der Nabe; Bild b : Simulation der Umströmung	33
Abbildung 1-31: Ergebnisse der Simulation – Flügel-Schub, Rotor-Leistung, Auftriebsbeiwert.....	33
Abbildung 1-32: Ergebnisse – Umströmung (Geschwindigkeiten); Bild a : Anstellwinkel 5°; Bild b : Anstellwinkel 10°	33
Abbildung 1-33: Rotorflügel – Flügelverstellung.....	34
Abbildung 1-34: Rotorflügel – Steigungsverlauf	34
Abbildung 1-35: NACA 0015 an der Flügelspitze und Innenbereich	35
Abbildung 1-36: Triebstrang-Dämpfungen (abhängig von Torsionseigenfrequenz).....	36
Abbildung 1-37: Darstellung verschiedener Verhältnisse zur Skalierung der Modulgrößen	37
Abbildung 1-38: Darstellung minimalster und maximalster Leistungsklassen.....	38
Abbildung 1-39: Darstellung der betrachteten Windenergieanlage für den Größeneffekt (Spar).....	38
Abbildung 1-40: Betrachtung der Unterstruktur für den Größeneffekte (Spar).....	39
Abbildung 1-41: Unterstruktur und Windenergieanlage – Skalen- und Größeneffekte	39
Abbildung 1-42: Durchgängige Modifikationsmöglichkeit für Auftrieb- und Verankerung	40
Abbildung 1-43: Funktionsvariablen für Paneelen, Bodengruppen und Sektionen	40
Abbildung 1-44: Daten der Funktionsvariablen für Paneelen, Bodengruppen und Sektionen.....	41
Abbildung 1-45: Virtuelle Baumethodik – hier Rückwärtsmodus „bildhaft“ dargestellt	41
Abbildung 1-46: Virtuelle Baumethodik – hier Rückwärtsmodus „bildhaft“ dargestellt	42
Abbildung 1-47: Spar - Zentralanker – Gesamtdesign (3 Großsektionen) - Fertigungsmatrizen	42
Abbildung 1-48: Spar - Zentralanker – Gesamtdesign (3 Großsektionen) - Fertigungsmatrizen	43
Abbildung 1-49: : Bottom-Up-Methode mit CAD-Konzepten	43
Abbildung 1-50: Top-Down-Methode mit CAD-Konzepten.....	44
Abbildung 1-51: Konzeptioneller Werftentwurf für FOWT (Windfloat, Quelle: Roddier, D. et al, 2016).....	44
Abbildung 1-52: Topologie - CAD-Aufstellungen als Blockschemen für die Verknüpfungen	45
Abbildung 1-53: CAD-Konzepte- Vorteile und Nachteile	46
Abbildung 1-54: Floating-Offshore-Wind-Turbinen-Systeme – Prinzipie, Operation, Installation, Transit.....	46
Abbildung 1-55: Anker- und Mooring-Technologien analysierter Referenzsysteme	47
Abbildung 1-56: Mooring-Parameter der skalierten Referenz- und Vorzugskonzepte	47

Abbildung 1-57: Spar – Catenary - Ballast-Konfiguration - Parameter für 2 Varianten	47
Abbildung 1-58: Spar – Catenary - Ballast-Konfiguration - Werte für 2 Varianten	48
Abbildung 1-60: Spar – Zentralanker - Ballast-Konfiguration – Werte	48
Abbildung 1-59: Spar – Zentralanker - Ballast-Konfiguration - Parameter	49
Abbildung 1-61: – Zentralanker – Schiffs- und Heavy-Load-System (Beispiel mit „Boskalis-SemiSUB-HTV - BOKA VANGUARD“	49
Abbildung 1-62: Spar – Zentralanker – Schiffs- und Heavy-Load-System - Bewertung der Auftriebs- und Aufricht-Prozeduren als Ergebnis der hydrostatischen Berechnungen mit ANSYS-AQWA	50
Abbildung 1-63: Spar – Catenary – Schiffs- und Heavy-Load-System - Bewertung der Auftriebs- und Aufricht-Prozeduren als Ergebnis der hydrostatischen Berechnungen mit ANSYS-AQWA	50
Abbildung 1-64: CAD und FEM für Zentralanker - Modellzuweisungen	51
Abbildung 1-65: Auslenkung + Zuglast - Zentralanker (für angegebenen Knoten, siehe Abbildung 44)	52
Abbildung 1-66: ANSYS-Mechanical-Modell (links) und RFEM-Modell (rechts)	52
Abbildung 1-67: Baugrund-Modellierung – Zentralanker-Fundament (Drucker- Prager-Ansatz)	53
Abbildung 1-68: Skaleneffekte – Gelenk-Struktur und Einbindung in die Varianten (Durchmesser)	53
Abbildung 1-70: Systembewertungen mit Fehlersignal – Bezug auf die Bauwerkshöhe	54
Abbildung 1-71: Ablaufschema einer prädiktiven Verschleißbestimmung für Mooring Komponenten mit Anwendungsbereichen bei klassischem und neuartigem Anker-/Mooring-Konzept.....	54
Abbildung 1-72: Schematischer CMS-Ablauf für FOWT anhand des digitalen Zwillings (abgeleitet von: Botz & Große, 2020)	55
Abbildung 1-73: Schadensindikation – und Monitoring mit Beschleunigungen und Verschiebungen.....	55
Abbildung 1-74: Positionierung und Zusammenfassung der identifizierten Sensoreinheiten – Kategorisierung gemäß Messgrößen und -methoden	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lokationsspezifikation mit Länge, Breite, Wassertiefe und Küstenentfernung	17
--	----

Teil I – Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Teilvorhabens ergibt sich aus den Teilaspekten des Gesamtvorhabens OWS^{plus}.

1.1 Gesamtvorhaben

Das Gesamtziel des Verbundprojektes besteht in der anwendungsorientierten Entwicklung zum Bau von schwimmenden Windenergieanlagen für den künftigen nationalen und internationalen Offshore-Wind-Markt. Der Wachstumskern OWS^{plus} deckt eine Reihe von Kernkompetenzen aller Projektpartner für die Planung, den Bau, die Installation und den Betrieb eines kompletten Windenergieparks ab.

Das Verbundprojekt 1 konzentriert sich auf den Marktbereich der Systemträger für Floating Offshore Windenergieanlagen (FOWEA) und den dazugehörigen Wertschöpfungsgliedern Design, Planung, Fertigung sowie Betrieb und Wartung von Systemträgern innerhalb der Wertschöpfungskette des Wachstumskerns.

Daher ist auch das Verbundprojekt 1, in dem alle Kernkompetenzen für die Entwicklung, das Design, den Bau, die Installation und den Betrieb von Systemträgern für FOWEA aus der Region Mecklenburg-Vorpommern vertreten sind, von strategischer Bedeutung für den gesamten Wachstumskern.

Wie der gesamte Technologiezweig der Offshore-Windenergie ist auch der Technologiebereich der FOWEA „neu“. Derzeit ist jede Gründungsstruktur ein Unikat. Eine Standardisierung ist auf Grund der sehr unterschiedlichen Anforderungen, wie die unterschiedlichen Leistungsparameter, Wassertiefen und Kundenwünschen, nur schwer zu realisieren. Um weiterhin den Marktanforderungen – günstigen, verbraucherfreundlichen Strom zu liefern – gerecht zu werden und Aufträge für die Planung, den Bau und den Betrieb von FOWT akquirieren zu können, ist eine Weiterentwicklung der Technologien und eine Anpassung an die Kundenbedürfnisse unabdingbar.

1.2 Teilvorhaben

Das Ziel dieses Teilprojektes im Rahmen angewandter Forschung mit anwendungsorientierter Entwicklung stellt das Gewinnen von Fortschritten und neuen Fachkenntnissen für technologisch basierte Designlösungen und numerische Berechnungs- und Nachweismethoden in Anwendung auf innovative Systemträger-Plattformen dar. Insbesondere erzielen die wissensbasierten Neuentwicklungen der Systemträger-Plattformen die Systemintegration von gewonnenen Spezialentwicklungen und die Schnittstellen bei sowie die Formgebung von Systemträger-Plattformen. Einen technologischen Mehrwert für die Offshore Windenergie Branche. Dies sind vor allem Netzbetreiber mit Gesamtverantwortung in den Kernbereichen Maintenance, Systemhersteller von Hochleistungselektronik, Systemhersteller von Offshore Windenergieanlagen sowie EPCI-Unternehmen, mit der gemeinsamen Zielstellung konservative Unikatlösungen zu vermeiden.

2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Zum Umfang der Erfahrungen des Antragstellers zählen die Konzeption, Basisplanung und Detailkonstruktion von maritimen Großstrukturen im Bereich Schiffbau, Offshore-Wind, Stahlbau, Maschinenbau, Ausrüstung, Ingenieurbau, Schiffstheorie und Berechnung einschließlich Forschung und Entwicklung. Das Fundament des Vorabends bilden schiffbauliche Grundlagen und umfassen die Serienfertigung von Containerschiffen, die erfolgreiche Konstruktion von Spezialschiffen sowie der innovativen modularen Bauweise im Schiffbau. Auf Basis der aktuellen Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Energien erfolgt die Spezialisierung auf die Konstruktion der Gründungsstruktur bzw. des Systemträgers der Floating Offshore Windenergieanlagen (FOWT). Für diesen Bereich verfügt das Unternehmen Neue Warnow Design and Technologie GmbH über eine umfassende Reputation. Die vorhandenen Referenzen umfassen Projekte für Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee sowie Forschungsthemen und reichen bis in das Jahr 2004 zurück.

Die bisherigen Arbeiten mit Bezug und thematischer Auswahl zum Teilprojekt sind:

- Die bisherigen Arbeiten mit Bezug und thematischer Auswahl zum Teilprojekt sind:
- HVDC-Energieübertragungsplattformen: Konstruktion im Basic und Detailed Design für OWP SylWin1, BorWin2, HelWin1, Dolwin3 (Nordic Yards)
- AC-Energieübertragungsplattformen: Entwicklung und Konstruktion im Pre-Design für OWP Baltic I (Wadan Yards) und OWP Nordergründe (Energiekontor)
- Baseframe-Struktur für Energieübertragungsplattform: Entwicklung und Konstruktion für OWP DolWin3 zur Genehmigung nach erster Freigabestufe BSH (Nordic Yards)
- Einbeziehung der Baumethodik von Großsektionen: Dockmontagezyklen auf einer Barge im Dock mittels FEM-Nachweisen für OWP SylWin1 (Nordic Yards)
- Kolkanalyse: Semiempirische Berechnungen der Sedimentumlagerungen und Identifikation von Kolkgefährdungen für OWP Nordergründe (Energiekontor AG)

- Baseframe-Struktur für größere Wassertiefen: Entwicklung eines Tri-Jacks für 60 m Wassertiefe zur Aufnahme einer 6MW-Offshore-Windenergie-Turbine mit Basisdaten vom OWP Albatross (STRABAG)
- Schwimmende Baseframe-Strukturen mit Auftrieb: Auftriebsberechnungen für die Baseframe-Strukturen OWP HelWin1 und BorWin2 (SIEMENS AG) und OWP DolWin3 (Nordic Yards); Entwicklung, Design und Dimensionierung einer Tension-Leg-Plattform für die Nordsee inklusive Verankerungssystemen (Forschungsprojekt Gründung III)
- Rammsysteme und externer Schallschutz: Integration eines externen Systems „Blasenschleier“ in Pile-Guidance-Frame des Offshore-Errichter-Schiffes „Wind Lift 1“ für Baseframe-Strukturen (Tri-Piles) des OWP Bard Offshore 1 (BARD/CSC)
- Einbeziehung von Baugrund und Umweltdaten: Gründungsstrukturen (Monopiles und Jackets) OWP Baltic I und Baltic II/Kriegers Flak (wpd); Gründungsstrukturen (Tri-Jacket) OWP Albatross (STRABAG); Bodenmechanische Clusterbildung und Nachweisführungen für Einbindelängen von Gründungsstrukturen im Baugrund (Tri-Piles) OWP Bard Offshore 1 (BARD); Rammbarkeitsanalysen für Piles des Baseframes der EÜP für OWP DolWin3 (Nordic Yards)
- 3D-CAD-Aufbereitung der Konzeptstudie „N4“ zur Präsentation der erstellten Inhalte und Pläne für „TenneT SMART HVDC PLATFORM“
- Konzeptstudie zum Aufstellen für ein standardisiertes Plattform-Layout „TenneT SMART HVDC PLATFORM“ unter Einbezug der generellen Informationen aus dem Dokument „20181128_Scope-of-Work_Standardized-Layout“

3 Stand der Technik, auf welchem aufgebaut wurde

Das Vorhaben beschäftigt sich mit der Gründungsstruktur einer Floating Offshore Windenergieanlage (FOWEA). Systemlösungen bzw. Standards für das Design von Floating Offshore Windenergieanlagen liegen bislang noch nicht vor. Eine Serienfertigung bzw. Standardisierung basiert bislang nur für sehr wenige Pilotprojekte im Bereich der Offshore Windenergie. Als Beispiel seien hier die Pilotprojekte Hywind Scotland und Hywind Tampen genannt. Als Auftriebskörper dienen hier große Spar-Bojen, die aus der Erdöl- und Erdgasindustrie adaptiert wurden. Die Spar-Boje besteht aus mehreren aufeinander aufbauenden zylindrischen Stahlmodulen. Die Stahlmodule sind in Spantenbauweise als ausgesteiftes Plattentragwerk konzipiert. Diese entsprechen dem schiffbaulichen Standard bzgl. der Stahlprofile.

Im Bereich der dickwandigen Rohrkonstruktionen der Gründungsstruktur verfügen das Bündnis und die Neue Warnow Design & Technology GmbH über ein ausgewiesenes Knowhow für die Basisplanung und Detailkonstruktion. Dieses umfasst die vollständige Konzeption, Konstruktion und Nachweisführung auf Grundlage anerkannter FEM-Software-Lösungen. Sämtliche Berechnungsmethoden und -prozeduren basieren auf geltenden Normen und Vorschriften. Diese entsprechen dem Stand der Technik und geltenden BSH-Anforderungen und sind durch die Prüf- und Zertifizierungsinstitutionen anerkannt.

Für die bisherigen Einzellösungen umfasst der Stand der Technik für die Gründungsstruktur nachfolgende Themen im Überblick:

- Gründungsstrukturen für den Deep-Water-Bereich
 - Spar als Gründungsstruktur
 - Halbtaucher als Gründungsstruktur
- Verankerungssysteme für den Deep-Water-Bereich
 - Catenary Mooring System
 - Taut Mooring System
 - Tension-Leg Mooring System
- Funktionalität
 - Transport und Installation (T&I)
 - Betrieb / Operation (O)
 - Wartung und Instandhaltung (Maintenance)
 - Rückbau
- Heterogener Baugrund mit gerammten Pfählen zum Lastabtrag
- Einhaltung der umweltspezifischen Schalschutzauflagen zum Schutz der Meere
- Abminderung der Tragfähigkeit des Baugrundes durch Kolk unterhalb der Mud Line

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

[illegible]

Abbildung 4-1: Arbeitsplan mit Meilensteinen für das Teilprojekt TP1.B

Die im Forschungsvorhaben geplanten Arbeiten sind entsprechend des beantragten Arbeitszeitplans (vgl. Abbildung 4-1) durchgeführt und abgeschlossen worden. Die Ziele des Forschungsvorhabens untergliedern sich dabei in sieben Arbeitspakete, welche im Folgenden kurz bzw. in Teil II ausführlich beschrieben werden.

4.1 Komplex 1 – System, Modul und Designtechnologie für schwimmende Unterstrukturen

4.1.1 Form- und Funktionsgestaltung für schwimmende Systemträger

- Klassifizierung globaler Umwelt- und Lokationsanforderungen
- Halbgetauchte schwimmende Gründungsstrukturen für globale OWP
- Struktur- und Schwimmstabilitätsanforderungen

4.1.2 Lastensimulation für Floating-Offshore-Windenergie-Turbinen

- Beanspruchungskollektive für Festigkeitsbeanspruchungen
- Turmkopflasten werden mit Simulationswerkzeugen bewertet

4.1.3 Technologien für die adaptive Quer-Modul-Baumethodik

- Skalierung der Modulgrößen entsprechend der Lokationsszenarien
- Fertigung der Systemvarianten im Baukastensystem

4.1.4 Objekt-Design-Methodik für verschiedene Systemträger

- Dezentrale Fertigung für den Systemträger der FOWT
- Bewertung für die Objekt und Baumethodik-Wechselwirkung
- CAD-basierte Design-Systeme in die Entwicklungsumgebung

4.2 Komplex 6 – Verankerung und Zustandsüberwachung schwimmender Unterstrukturen

4.2.1 Betriebs- und Errichter-Technologien

- Stabilitätskonfigurationen für Gründungsstrukturen für 15MW Turbinen
- Gründungsstrukturen mit verschiedenen Mooring-Konzepten
- Systemkonzept zur Transport- und Errichter-Abfolge

4.2.2 Alternative Verankerungssysteme bei minimalem Footprint

- Mooring Systeme mit geringer Ankergrundfläche und Versiegelung
- Reduzierte Struktur- und Systembewegungen
- Der Zentralanker als System zur Baugrundeinbindung

4.2.3 Zustandsbewertung mit Produkt-Lebenszyklus für das Maintenance

- Zustandsüberwachung durch vernetzte CMS-Technologien
- Zustandsüberwachung für schwimmende Gründungsstrukturen

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wird im Rahmen des innovativen regionalen Wachstumskerns OWS^{plus} im Verbundprojekt VP 1 durchgeführt. Die Durchführung des gesamten Forschungsvorhabens wird mit den Verbundprojektpartnern realisiert. Zu diesen zählen:

- | | |
|---|------|
| • EEW Special Pipe Constructions GmbH | EEW |
| • Neue Warnow & Design Technology GmbH | WDT |
| • Neptun Ship Design GmbH | NSD |
| • Rostocker Korrosionsschutz GmbH | RK |
| • Universität Rostock Lehrstuhl Meerestechnik | LWET |
| • Fraunhofer Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik | IGP |
| • GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH | GIC |

Alle Projektpartner haben innerhalb des Bündnisses Wachstumskern einen gemeinsam abgestimmten Kooperationsvertrag erarbeitet und unterzeichnet.

Teil II – Eingehende Darstellung

1 Abgleich gesetzter Ziele und erreichter Ergebnisse

1.1 Komplex 1 – System, Modul und Designtechnologie für schwimmende Unterstrukturen

1.1.1 Form- und Funktionsgestaltung für schwimmende Systemträger

Klassifizierung globaler Umwelt- und Lokationsanforderungen

Für das Forschungsprojekt OWS^{plus} wurden acht Beispiellokationen identifiziert, an denen das globale Windaufkommen und jeweiligen Lokationsbedingungen näher analysiert wurden. Als Beispiellokationen wurden Channel Island (1), der Gulf of Main (2), die Nördliche Nordsee (3), der Golf of Lion (4), Sagami Wan (5), die Formosa Strait (6), die Biskaya (7) und die Yellow Sea (8) gewählt (siehe Abbildung 1-1).



Abbildung 1-1: Lokationen – Überblick der Standorte

Für die Ermittlung lokationsabhängiger Umweltparameter, wie z.B. Winddaten, Seegangparameter, Bodenbeschaffenheit, Wassertiefe und Küstenentfernung müssen die Lokationen genauer spezifiziert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1, Abbildung 1-2 und Abbildung 1-3 exemplarisch spezifiziert.

Tabelle 1: Lokationsspezifikation mit Länge, Breite, Wassertiefe und Küstenentfernung

No.	Country	Area	Depth	Location			distance to shore	Significant Wave Height				Seabed Conditions	
				latitude		longitude		H _{s,1}	H _{s,50}	H _{s,100}	H _{s,1000}		
			[m]				[km]	[m]	[m]	[m]	[m]		
1	USA	Channel Islands	250	33° 36' 0"	N	119° 47' 60"	W	40	7,66	9,66	9,98	11,01	Sand/Mud/Gravel
2	USA	Gulf of Maine	150	43° 12' 0"	N	69° 0' 0"	W	87	12,34	16,10	16,72	18,70	Sand/Mud/Gravel
3	Germany	nördliche Nordsee	150	58° 15' 0"	N	0° 45' 0"	E	240	11,38	15,63	16,34	18,68	Sand/Mud
4	France	Golfe du Lion	250	42° 45' 0"	N	4° 0' 0"	E	77	8,94	12,16	12,70	14,45	Sand/Mud
5	Japan	Sagami-Wan	500	35° 8' 60"	N	139° 22' 48"	E	18	10,40	13,89	14,47	16,35	Sand/Mud
6	Taiwan	Formosa Strait	140	22° 40' 30"	N	119° 42' 0"	E	55	9,86	12,87	13,36	14,95	Sand/Mud
7	France	Biscaya	115	46° 0' 39"	N	2° 40' 28"	W	80	12,08	16,04	16,69	18,81	Sand/Mud
8	Korea	Yellow Sea	100	33° 21' 24"	N	125° 37' 54"	E	50	9,17	12,52	13,09	14,93	Gravel

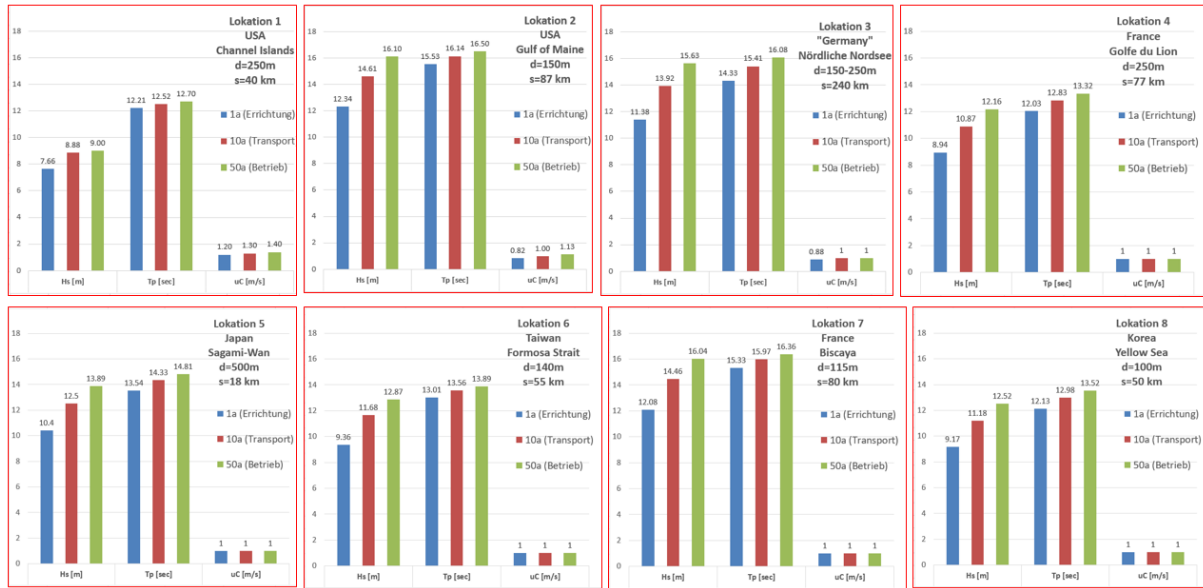


Abbildung 1-2: Wellenhöhen, -perioden, Strömungen (1a, 10a, 50a) – Wassertiefe, Distanz

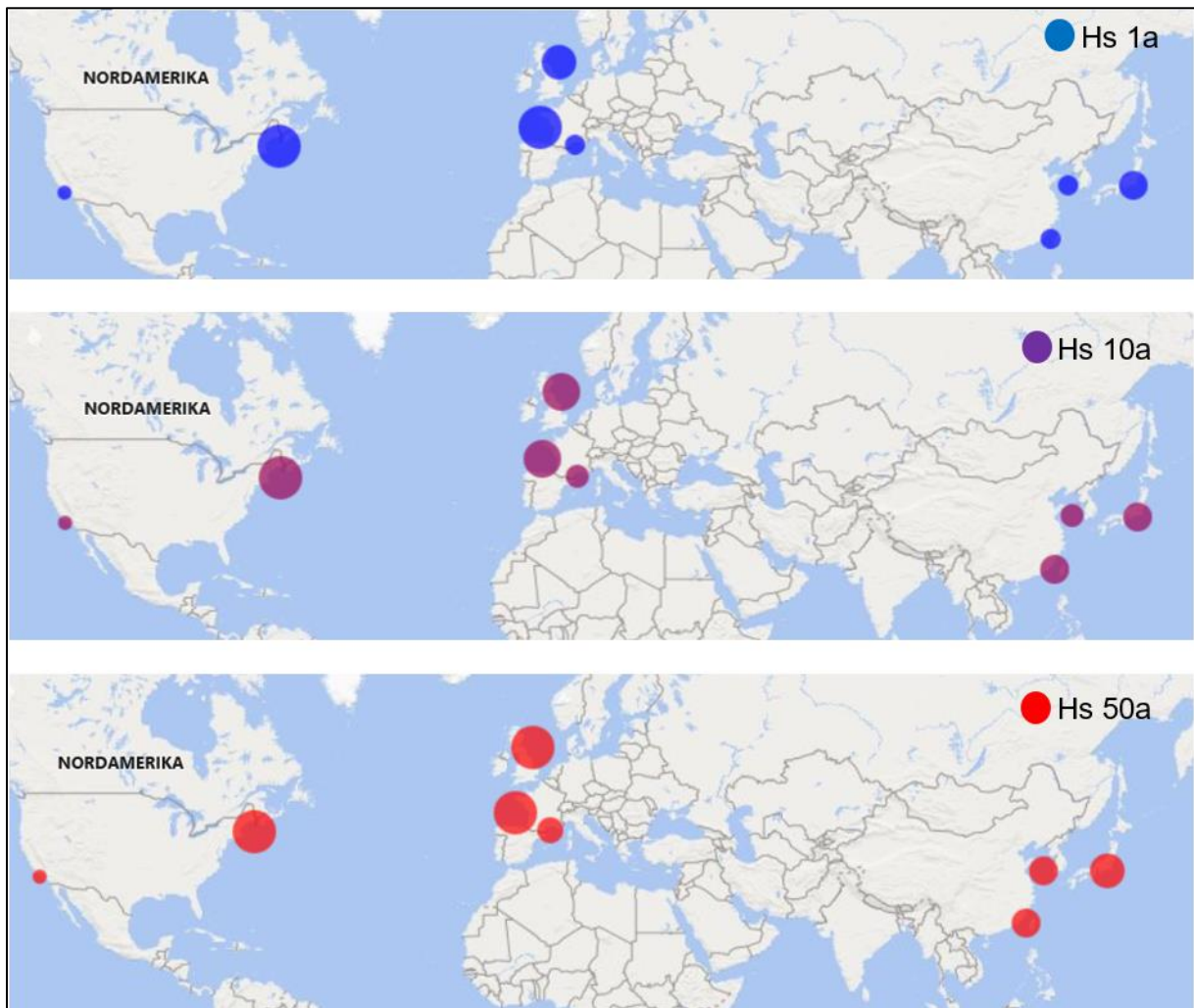


Abbildung 1-3: Wellenhöhen 1a, 10a, 50a – Korrelation von Wellenlasten und Standorten

Halbgetauchte schwimmende Gründungsstrukturen für globale OWP

Nachdem die Beispiellokationen identifiziert und relevante Umweltrandbedingungen abgeleitet wurden, erfolgt nun die Darstellung verschiedener schwimmender Gründungsstrukturen. Die schwimmenden Gründungsstrukturen wurden für jede Lokation aufgestellt und in Leistungsklassen eingeteilt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 1-4 bis zur Abbildung 1-11 dargestellt.

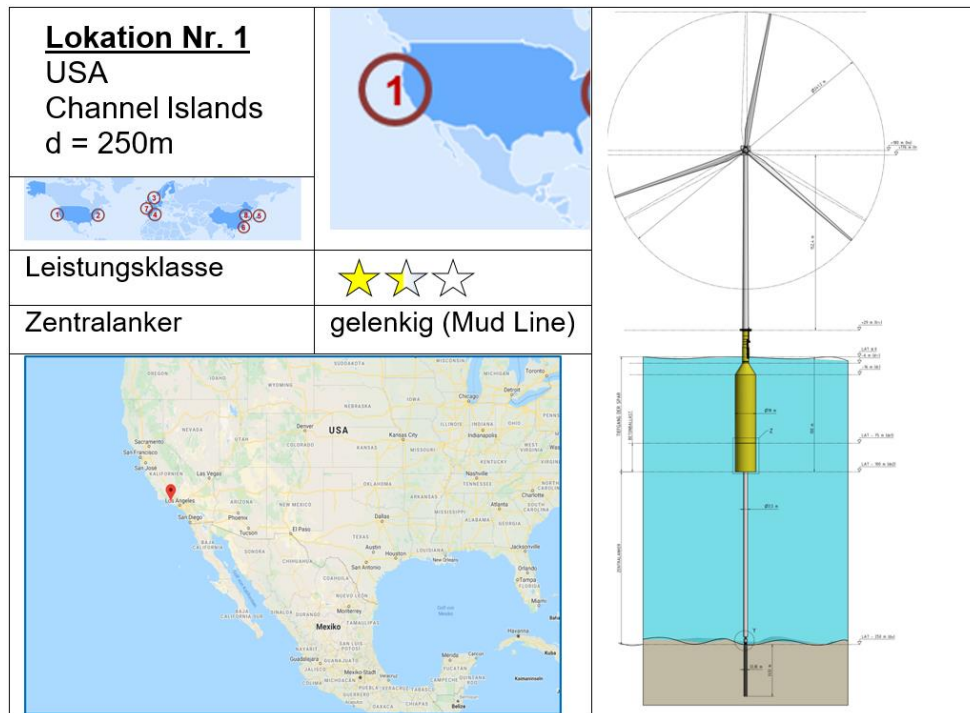


Abbildung 1-4: Leistungsklasse Channel Island – Lokation 1

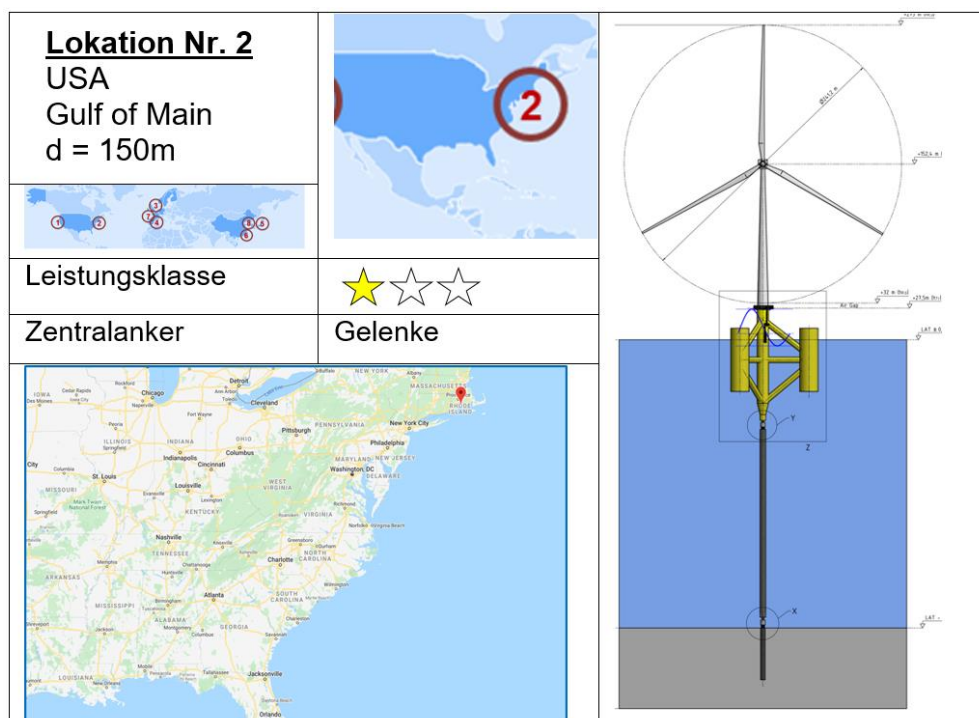


Abbildung 1-5: Leistungsklasse Gulf of Main – Lokation 2

Als Konzepte wurden schwimmende Gründungsstrukturen aus der Erdöl- und Erdgasindustrie identifiziert und weiterentwickelt. Somit ergeben sich Vorzugskonzepte als Mono-Floater (Spar) und als aufgelöste Strukturen mit Zusatzauftriebskörper (Halbtaucher), wie in Abbildung 1-6 dargestellt ist. Auch hier ist eine Einteilung in Leistungsklassen vorgenommen worden.

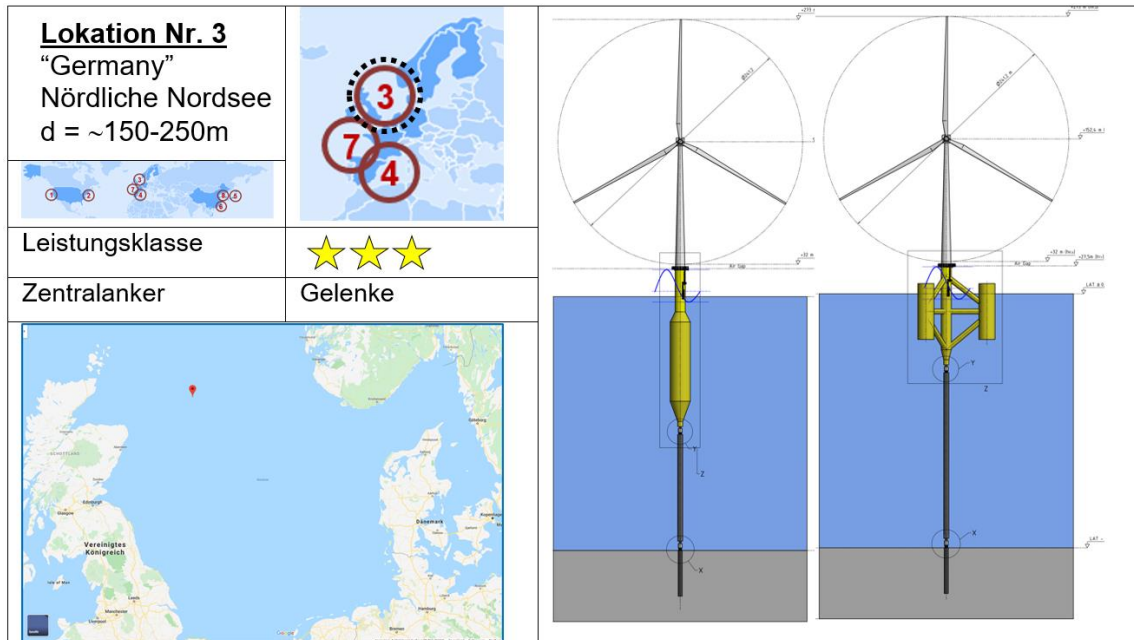


Abbildung 1-6: Leistungsklasse Nördliche Nordsee – Lokation 3

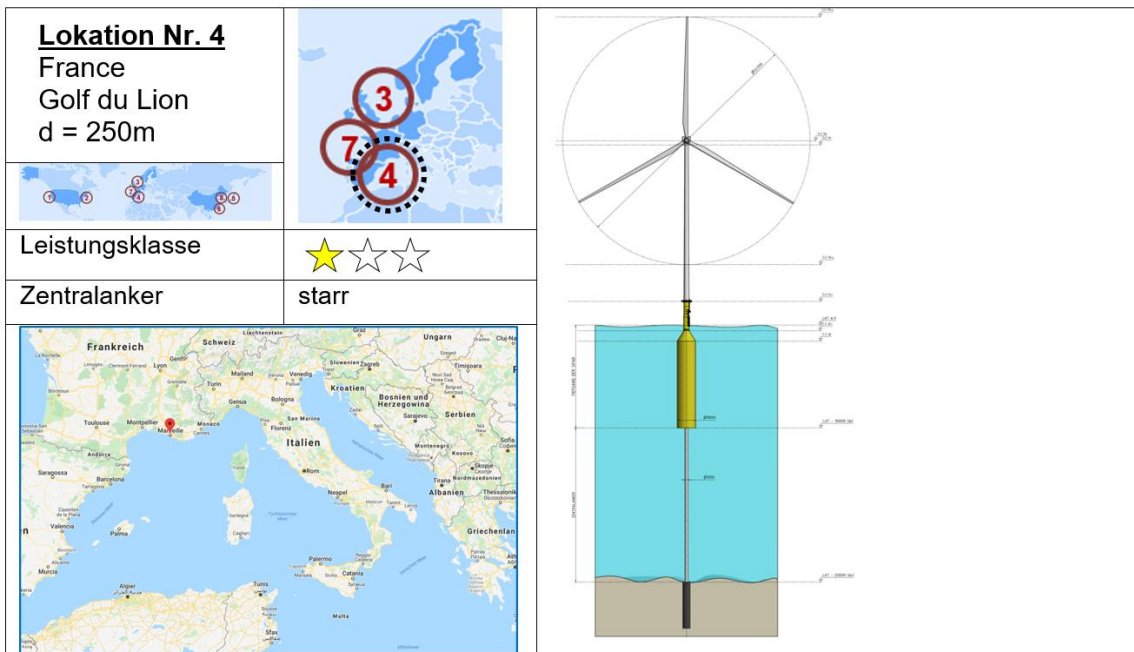


Abbildung 1-7: Leistungsklasse Golf du Lion – Lokation 4

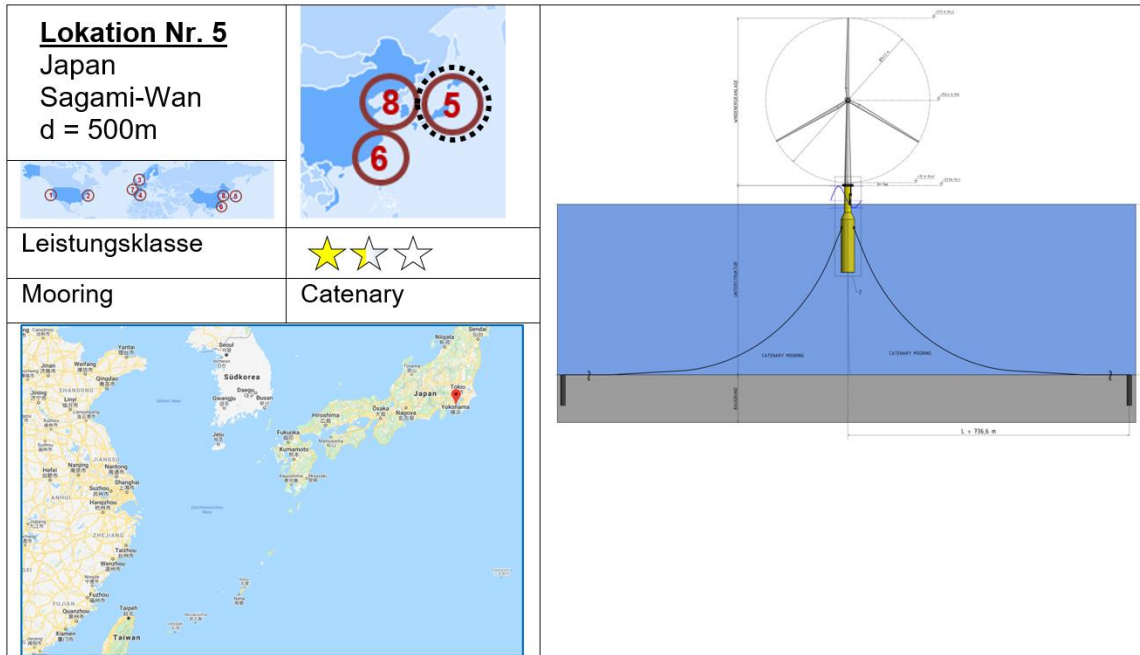


Abbildung 1-8: Leistungsklasse Sagami-Wan – Lokation 5

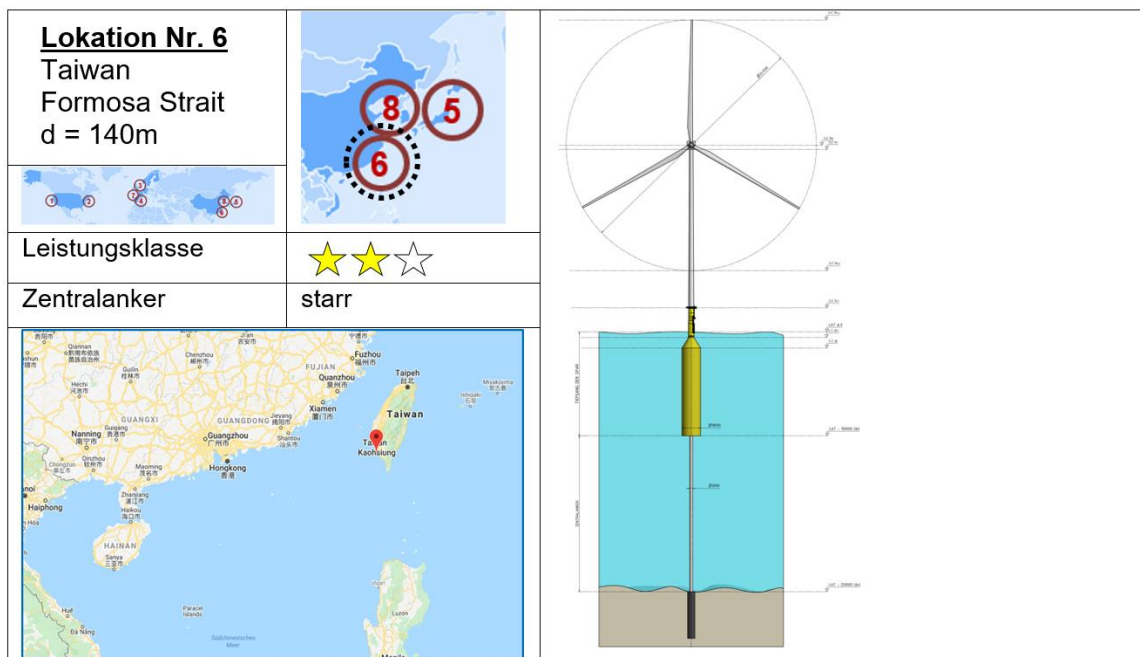


Abbildung 1-9: Leistungsklasse Channel Island – Lokation 6

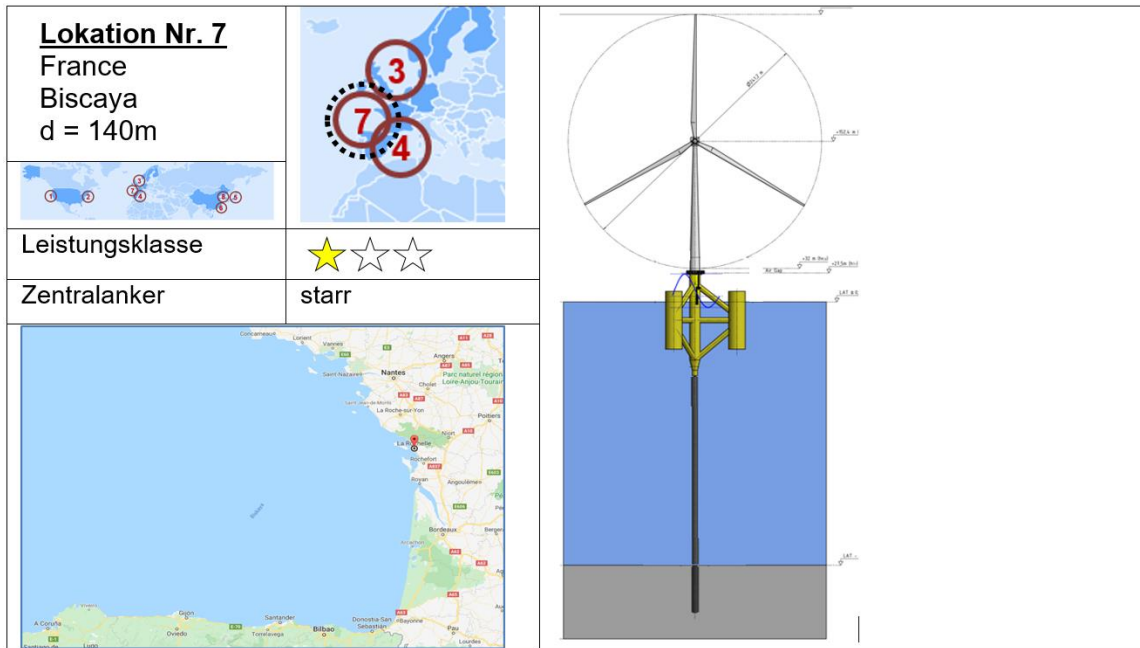


Abbildung 1-10: Leistungsklasse Biscaya – Lokation 7

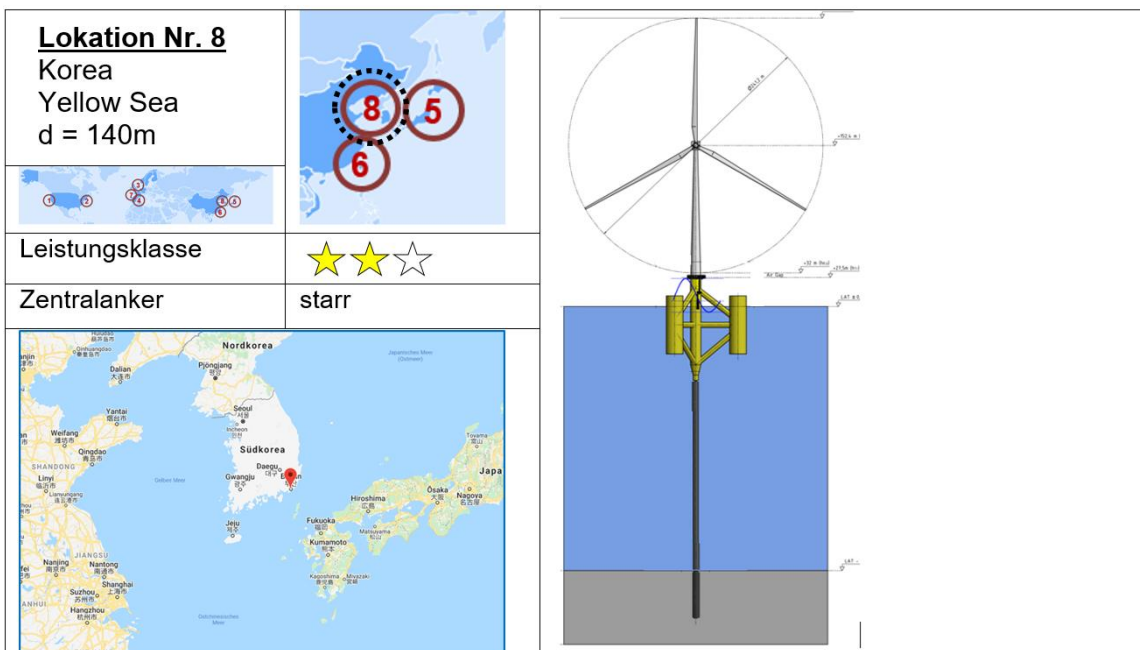


Abbildung 1-11: Leistungsklasse Yellow Sea – Lokation 8

Struktur- und Schwimmstabilitätsanforderungen

Der Abschnitt 0 befasst sich mit der Struktur- und Schwimmstabilitätsanforderungen der lokationsklassifizierten Gründungsstrukturen. Als Vorzugskonzept wurde die Spar identifiziert und hinsichtlich Schädigung bzgl. der Bauwerkshöhe und Richtung (Abbildung 1-13) sowie der Ultimate, Accidental und Fatigue Limit State (Abbildung 1-12).

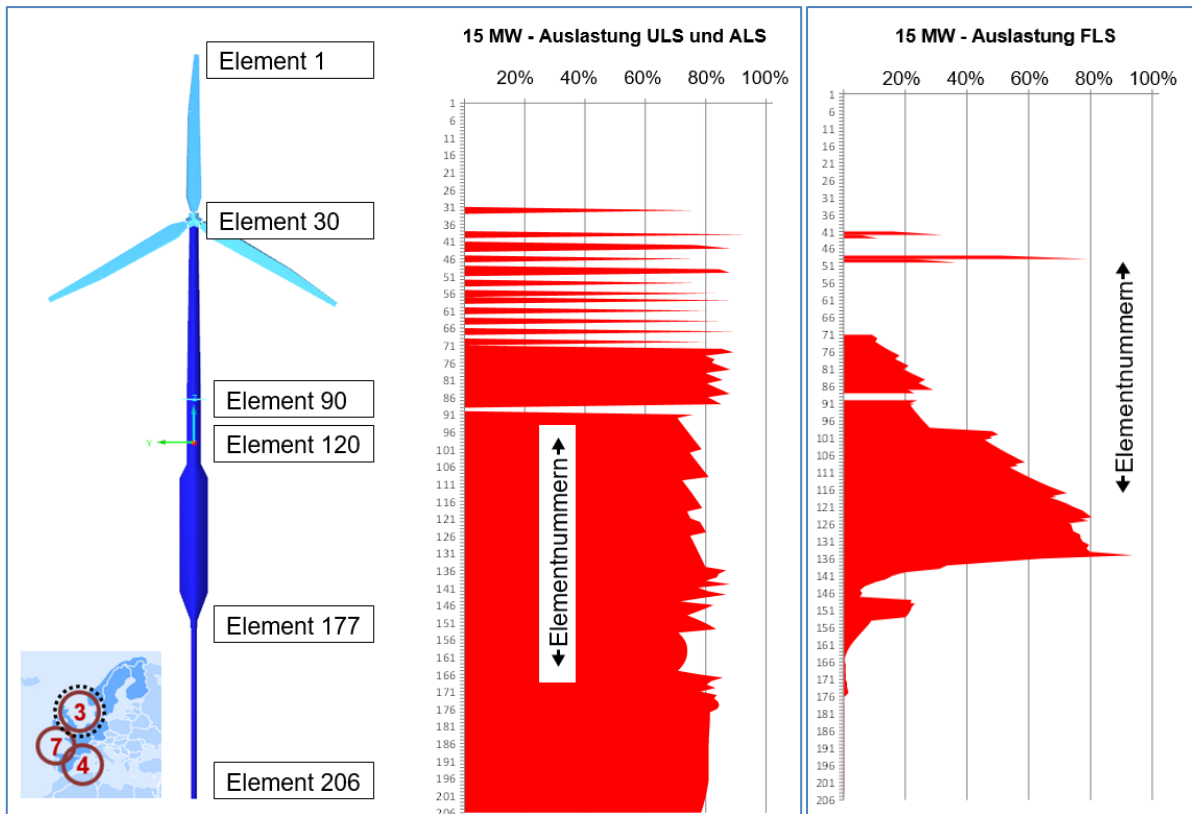


Abbildung 1-12: Nachweise Ultimate, Accidental und Fatigue Limit State – hier Lokation 3

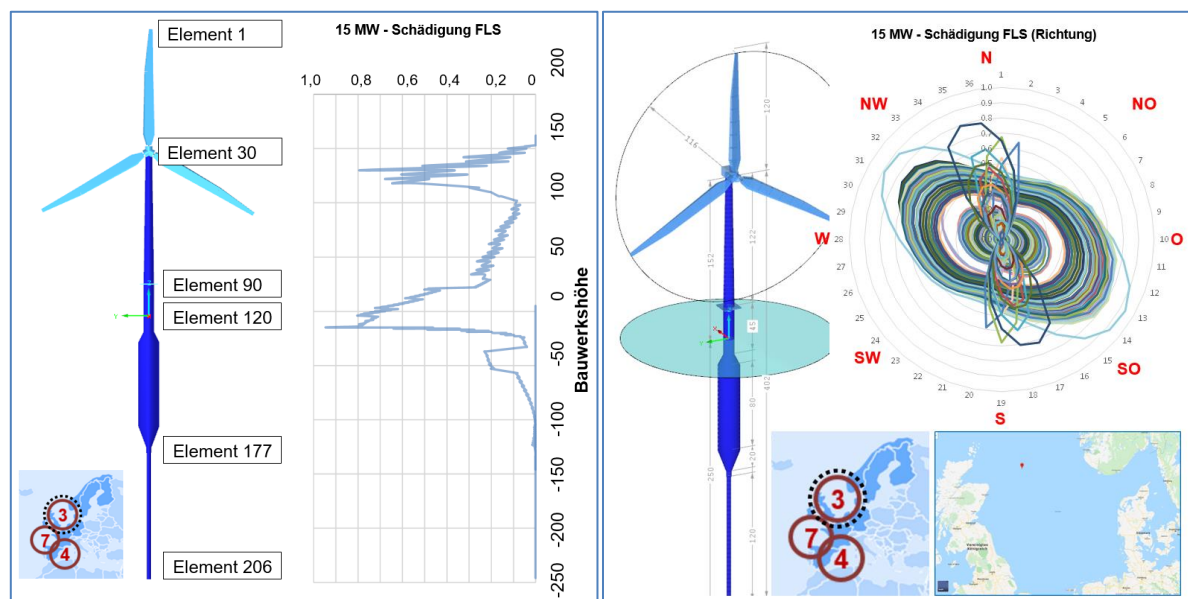


Abbildung 1-13: Nachweise bzgl. der Schädigung bzgl. Bauwerkshöhe und Richtung – hier Lokation 3

Die Ergebnisse der Anforderungen an die Struktur- und Systemgrenzen wurden in Abbildung 1-14 dargestellt. Dazu wurde die Struktur mit Modellierungselementen und einer parametrische 3D-CAD-Software erstellt und anschließend berechnet.

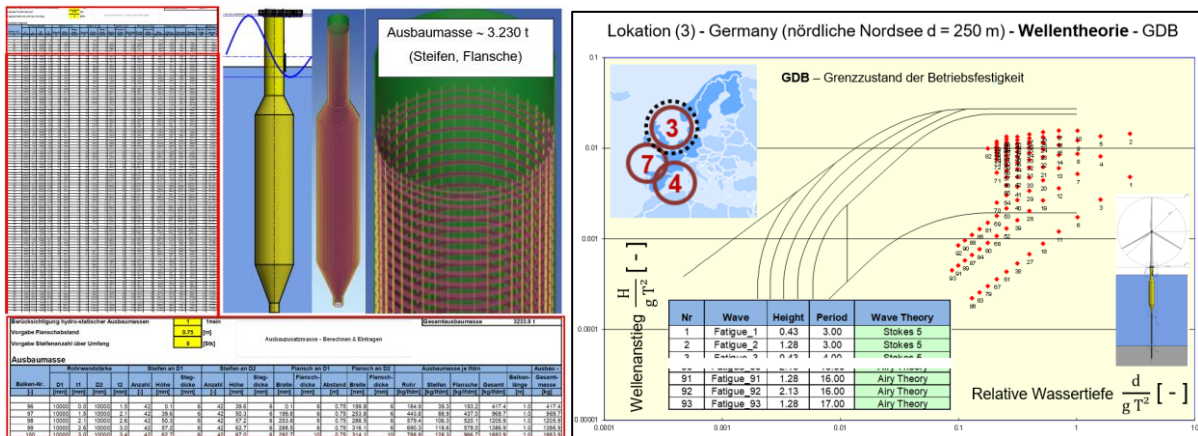


Abbildung 1-14: Struktur- / Systemgrenzen für Aussteifungen und Grenzzustand der Betriebsfestigkeit

Des Weiteren wurde mit dem FEM-Model die Verformung am Turmkopf der Gründungsstruktur berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 1-15 dargestellt. Auf dem linken Bild die verschiedenen Turmkopfauslenkungen dargestellt. Auf der rechten Seite sind die visualisierten Ergebnisse als FEM-Modell dargestellt.

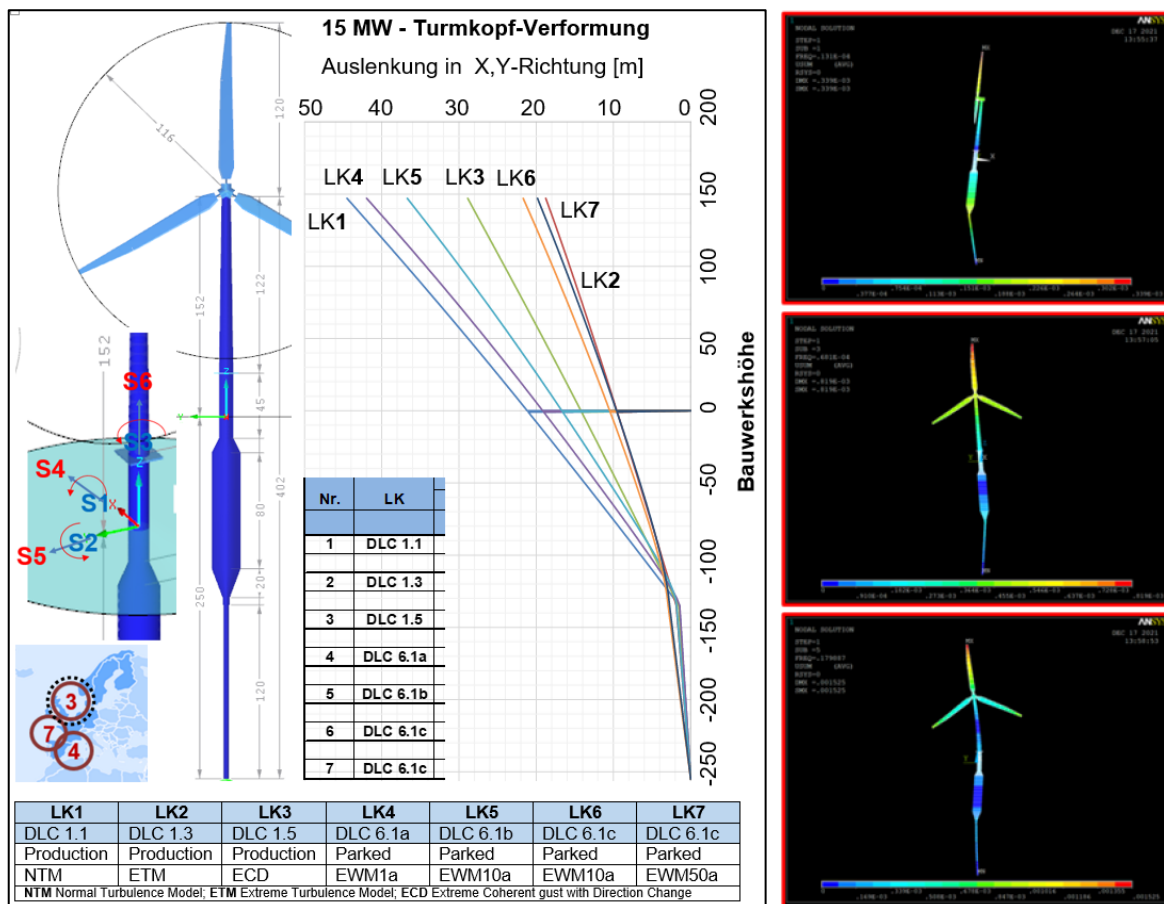


Abbildung 1-15: Auslenkung auf Höhe Turmkopf – hier Lokation 3 (Ausgabe für Lastfallkombinationen)

In Abbildung 1-16 sind die Beschleunigung, der Verschiebung und die Verdrehung der Gründungsstruktur dargestellt. Auf der rechten Abbildung sind die Ergebnisse und auf der linken Seite die Visualisierung in als FEM-Model abgebildet.

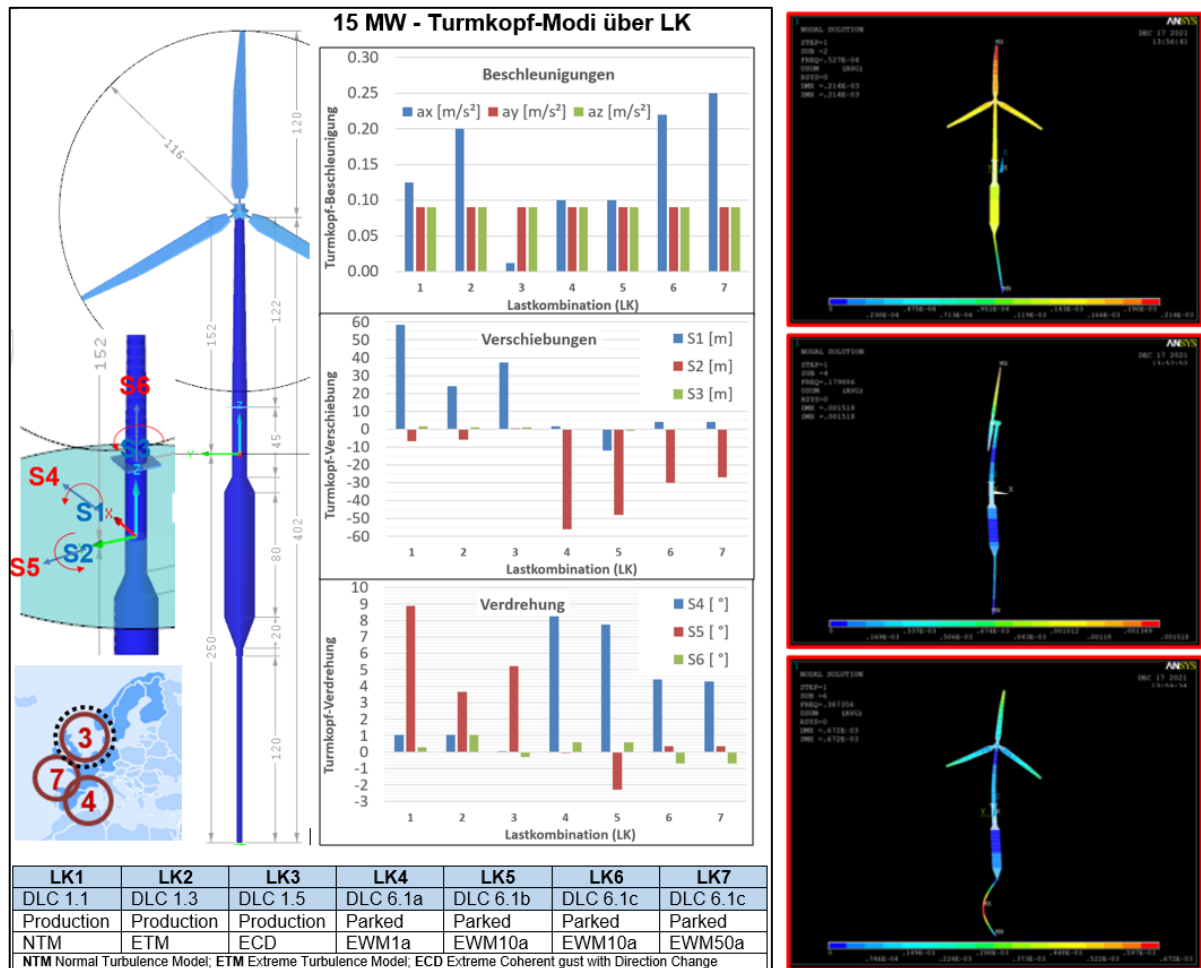


Abbildung 1-16: Beschleunigungen, Verschiebungen und Verdrehungen für die Lastfallkombinationen

Darstellung der Systemvarianten als 3D-CAD/FEM-Modelle

Der Abschnitt 0 stellt die Systemvarianten Spar, als Mono-Floater und den Halbtaucher als 3D-CAD/FEM-Modelle dar. In Abbildung 1-17 ist der Halbtaucher als aufgelöste Struktur mit Zusatzauftriebskörpern dargestellt. Des Weiteren sind die Abmessungen der Strukturen sowie die Designwassertiefe dargestellt.

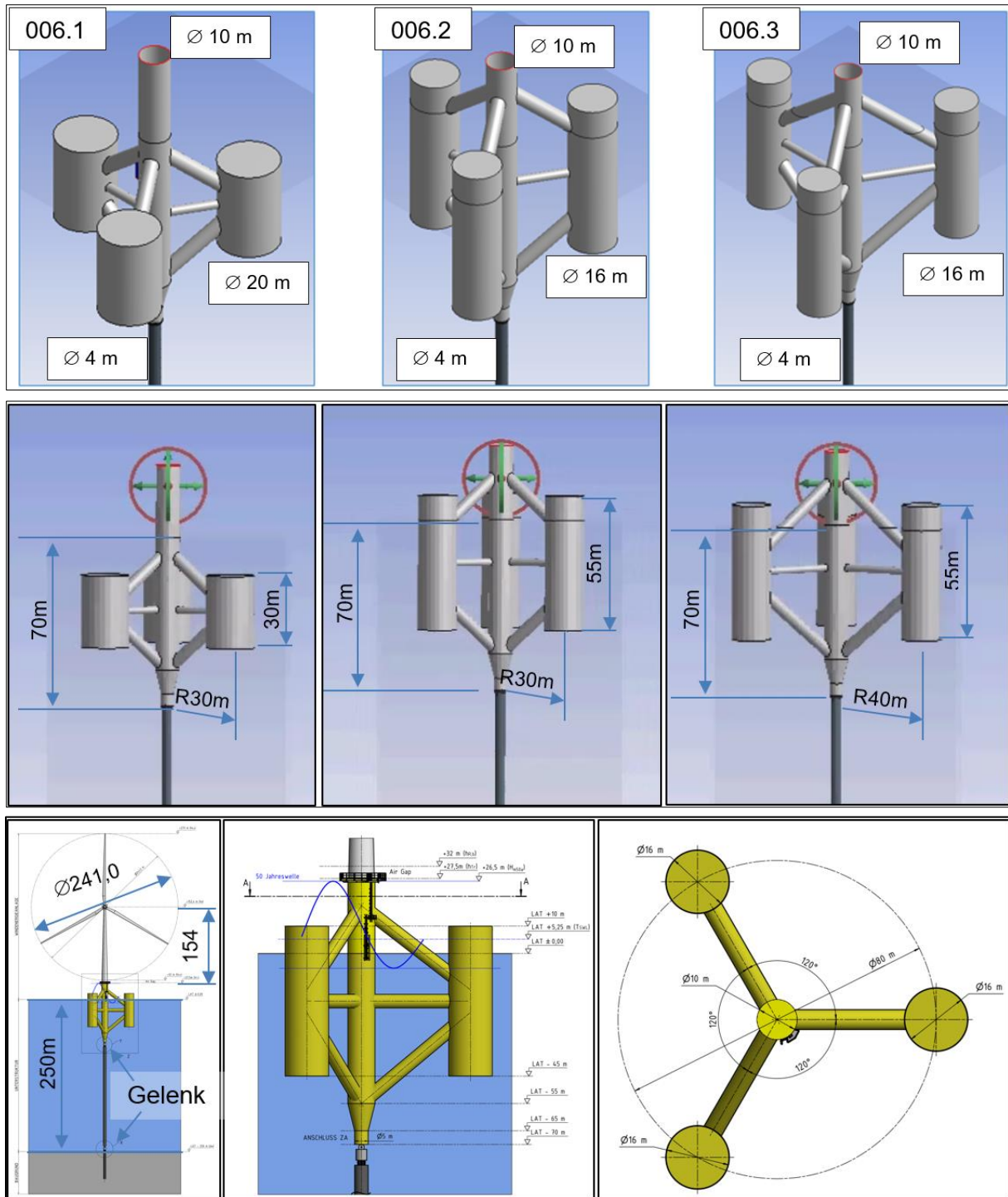


Abbildung 1-17: Semi-Sub-Zentralanker (5) – ANSYS-Mechanical & ANSYS-AQUA (Modell 3D-CAD)

In der Abbildung 1-18 und der Abbildung 1-19 ist die Spar als FEM-Modell sowie als 3D-CAD-Modell visualisiert. Das FEM-Modell zeigt die einzelnen Versteifungen, die für Festigkeitsberechnungen benötigt werden, dargestellt. Das 3D-CAD-Modell beinhalten Angaben zu den Abmessungen des Systemträgers sowie Darstellungen zu verschiedenen Ballastkomponenten. Des Weiteren ist die Designwassertiefe dargestellt. Die Variante ist für WEA für Rotordurchmesser 174m, einer Narbenhöhe von 110m und einer Gondelmasse von bis zu 700t ausgelegt.

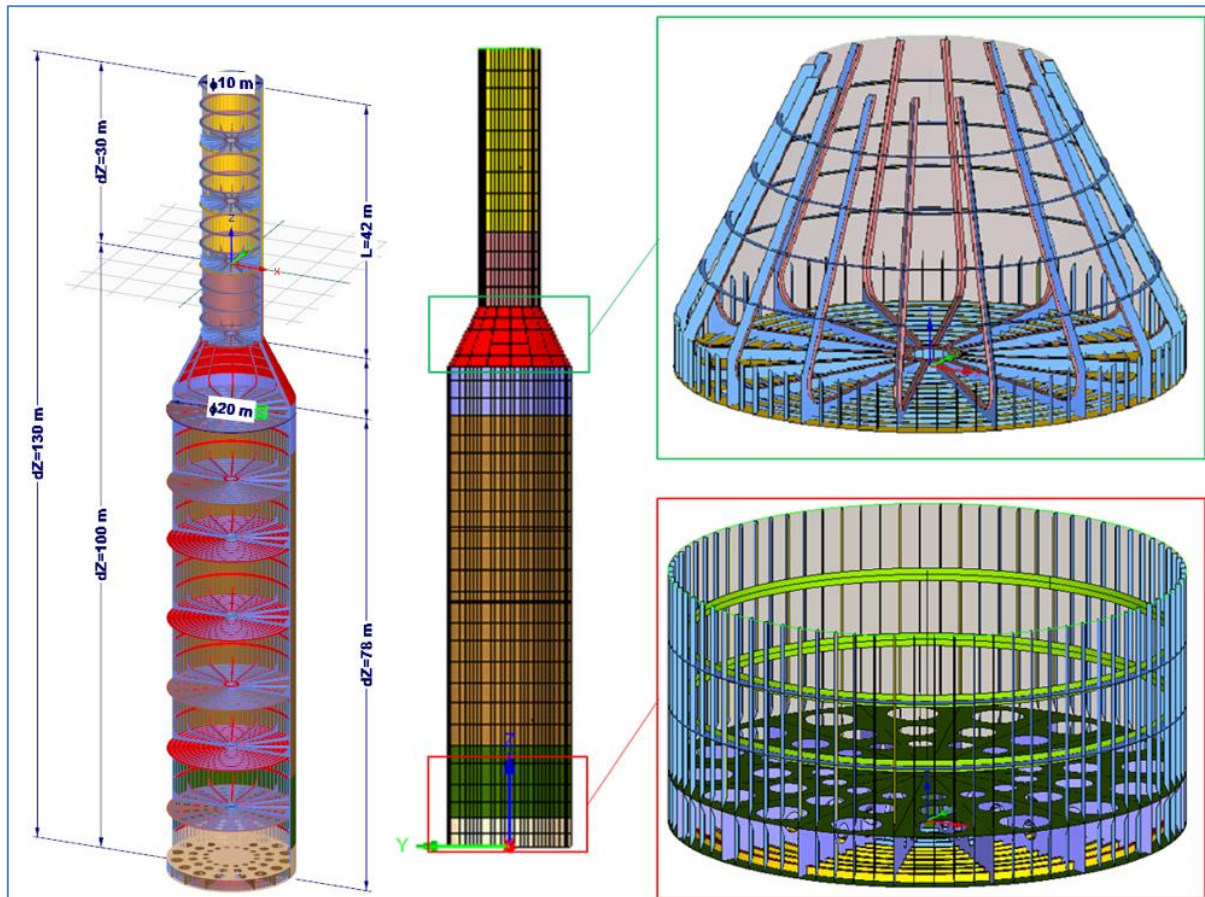


Abbildung 1-18: FEM-Modell (RFEM) – System (1) Spar mit Zentralanker – eingespannt

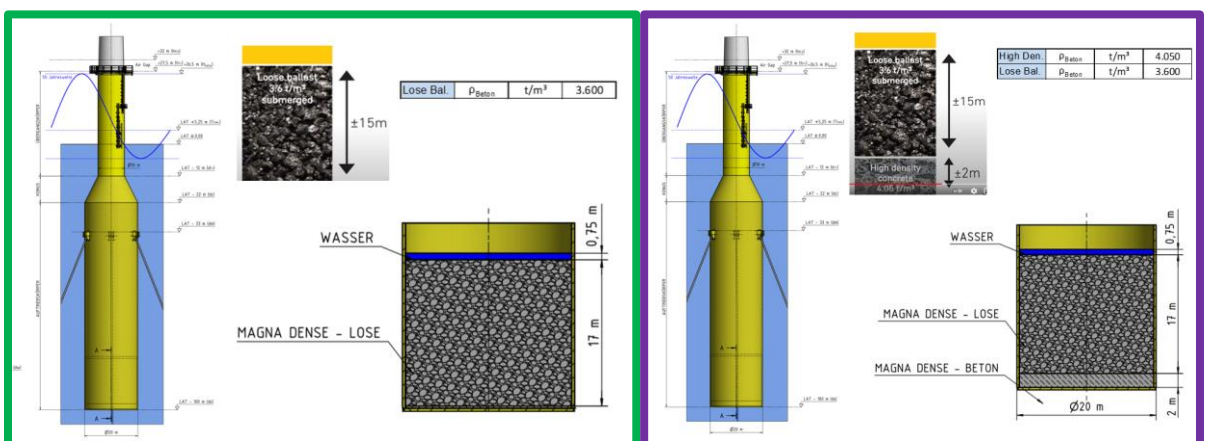


Abbildung 1-19: Darstellung Mono-Floater (Spar) mit Mooring System und verschiedener Anordnung des Ballastsystems und Ballastkomponenten

1.1.2 Lastsimulation für Floating-Offshore-Windenergie-Turbinen

Das Unterkapitel 1.1.2 beschäftigt sich mit verschiedenen Lastsimulationen für Floating-Offshore-Windenergie-Turbinen. Dabei werden Turmkopflasten an Windenergieanlagen mit 15MW an der Turmstruktur betrachtet. Des Weiteren werden Beanspruchungskollektiven für die Betriebsfestigkeit aufbereitet und unterschiedliche Lokationsklassen für Turbinen mit 15MW mit einbezogen.

Beanspruchungskollektive für Festigkeitsbeanspruchungen

In Abschnitt 0 wird auf verschiedene Beanspruchungskollektive für Festigkeitsbeanspruchungen eingegangen. Die Simulationsmodelle umfassen Turbinen mit Referenzsystemen für Typ 5-MW-NREL und 10-MW-DTU. Für die Simulation wurde eine Windenergieanlage in ein CFD-Programm modelliert und bewertet. In Abbildung 1-20 ist das Ergebnis der Simulation dargestellt.

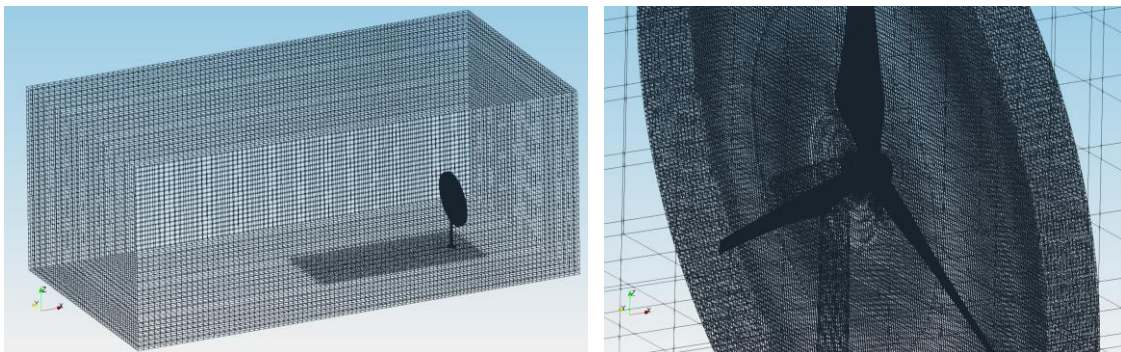


Abbildung 1-20: CFD-Berechnungsmodell für eigene Bewertungen einer 15 MW Turbine

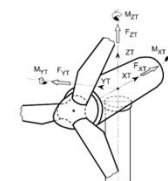
<p>Extrapolation der Anlagenlasten</p> <p>Basisdaten: Repower 5M</p> <p>Rotordurchmesser $D_{R5M} := 126\text{m}$</p> <p>Nennleistung $P_{5M} := 5\text{MW}$</p> <p>Zukunfts - Nennleistung $P_{WDT} := 15\text{MW}$</p> <p>Turmkopflasten ULS (50a) - Repower 5M (charakteristisch)</p> <p>Resulting Bending Moment $M_{y,c5M} := 22.3\text{MN}\cdot\text{m}$</p> <p>Forces $F_{x,c5M} := 1.35\text{MN}$</p> <p>Torsion $M_{z,c5M} := 20\text{MN}\cdot\text{m}$</p> 	<p>Dichte Seewind $\rho_{\text{wind}} := 0.001224\text{kN}\cdot\frac{\text{s}^2}{\text{m}^4}$ $C_H := 1$</p> <p>Windgeschwindigkeiten $v_x := \begin{pmatrix} 12 \\ 24 \\ 20 \\ 20 \\ 50 \\ 63 \\ 55 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$</p> <p>Windwiderstände des Rotors $C_S := \begin{pmatrix} 0.378 \\ 0.0291 \\ 0.2621 \\ 0.2391 \\ 0.010745 \\ 0.005447 \\ 0.004332 \end{pmatrix}$</p> <p>Windlast $q_l := \frac{(\vec{v}_x \cdot \vec{v}_x \cdot C_S) \cdot C_H \cdot \rho_{\text{wind}}}{2} = \begin{pmatrix} 0.067 \\ 0.021 \\ 0.128 \\ 0.117 \\ 0.033 \\ 0.026 \\ 0.016 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$</p>
<p>Extrapolation über die Rotorfläche</p> <p>Fläche 5M $A_{5M} := \frac{D_{R5M}^2}{4} \cdot \pi = 1.247 \times 10^4 \text{m}^2$</p> <p>Fläche WDT-15MW $A_{15MW} := \frac{A_{5M}}{P_{5M}} \cdot P_{WDT} = 3.741 \times 10^4 \text{m}^2$</p> <p>Rotordurchmesser WDT $D_{WDT} := 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{15MW}}{\pi}} = 218.238 \text{m}$</p> <p>Höhenunterschied HUB $\text{Dist}_{\text{hub}} := \frac{D_{WDT} - D_{R5M}}{2} = 46.119 \text{m}$</p>	<p>Last $F_{x5M} := q_l \cdot A_{5M} = \begin{pmatrix} 831 \\ 256 \\ 1600 \\ 1460 \\ 410 \\ 330 \\ 200 \end{pmatrix} \text{kN}$</p> <p>$F_{x15MW} := q_l \cdot A_{15MW} = \begin{pmatrix} 2492 \\ 767 \\ 4800 \\ 4379 \\ 1230 \\ 990 \\ 600 \end{pmatrix} \text{kN}$</p>

Abbildung 1-21: Konfiguration (Auszug) - Vereinfachte Kennfeld-Zuordnung bei P = 15 MW

Der Aufbau der Entwicklung für die Universal-Floating-Unterstrukturen umfasst a) Mono-Floater mit konservativer Auftriebskonstellation (langer Zylinder), b) Mono-Floater mit reduzierter Auftriebskonstellation (verkürzter Zylinder) und Multi-Floater mit aufgelöster Auftriebskonstellation (mehrere Zylinder). Zusätzlich erstellte dieses Arbeitspaket die Konfigurationen der Mono-Floater mit den Parametern der Struktur-, Ballast- und Mooring-Lastwerten (Abbildung 1-22).

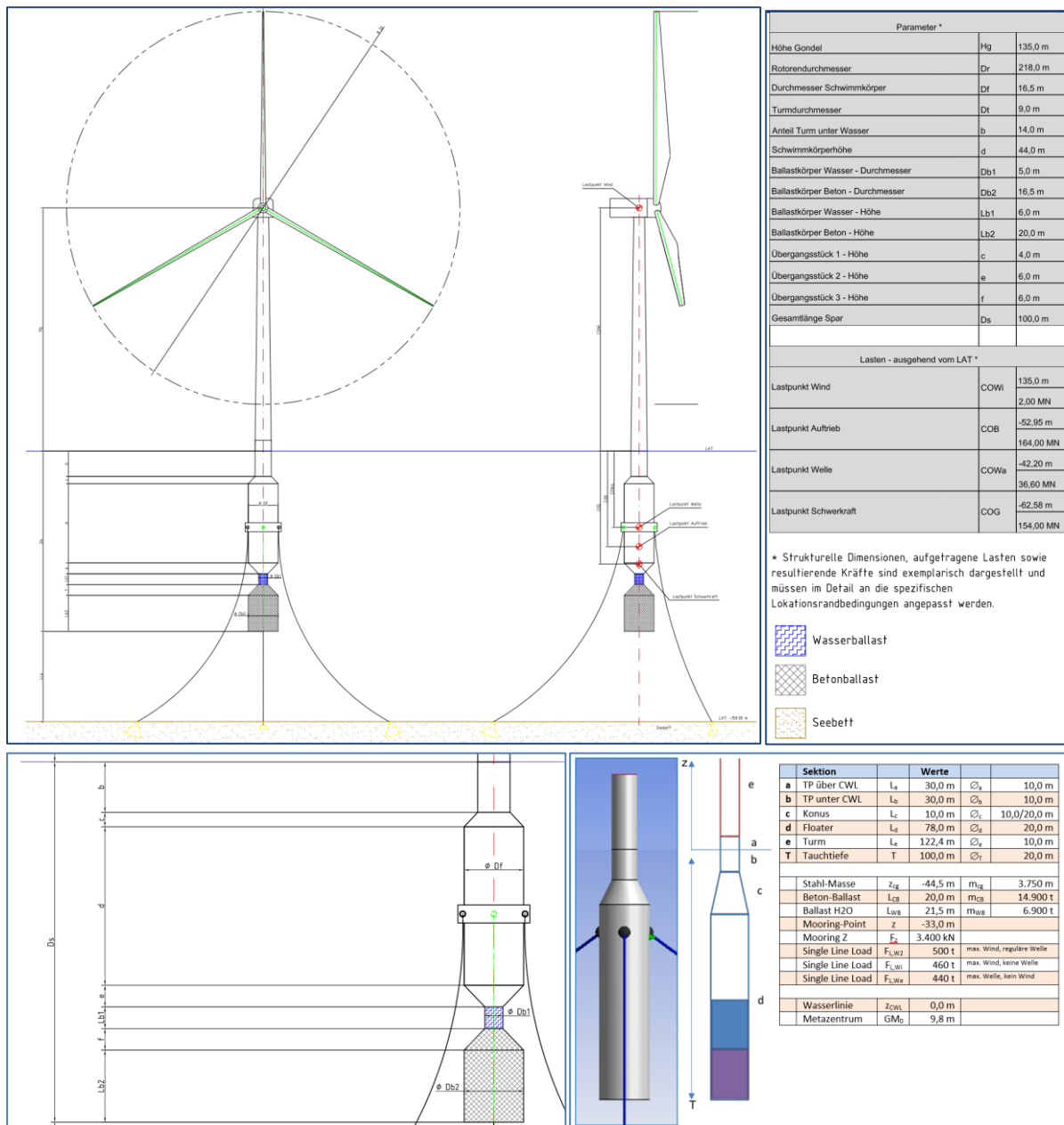


Abbildung 1-22: Mono-Floater – „Langversion“

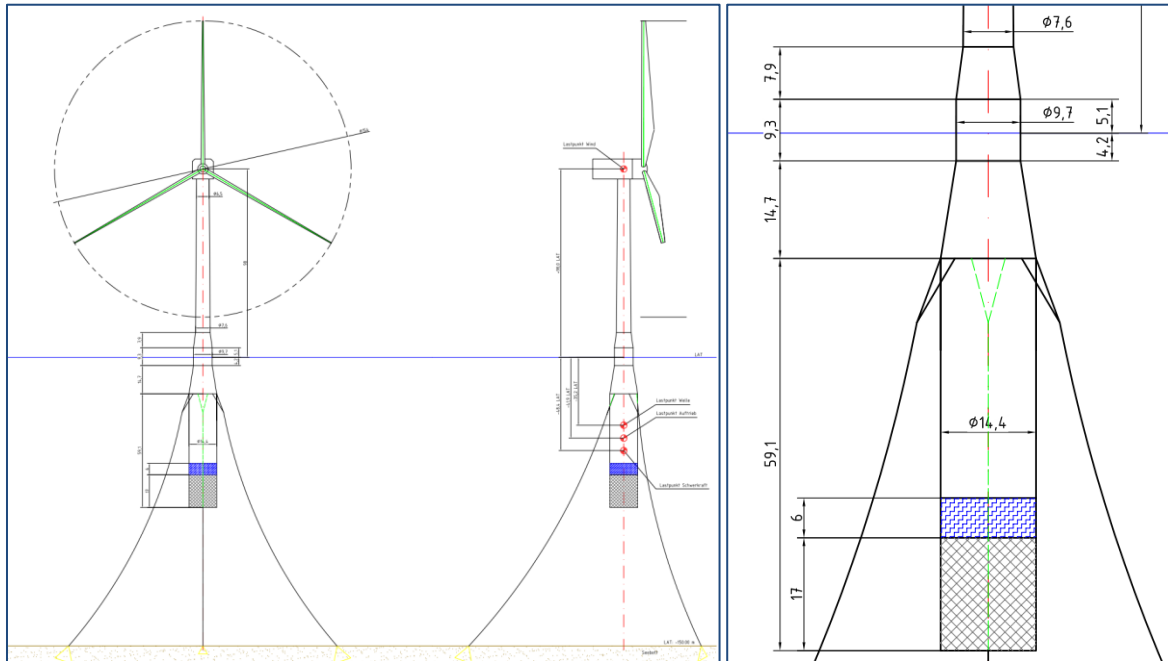


Abbildung 1-23: Mono-Floater – „Kurzversion“ als 2D-CAD Darstellung

Neben dem Mono-Floater wurde auch ein Multi-Floater als Halbtaucher erstellt. Dazu hat das Arbeitspaket die Konfiguration mit Parametern der Struktur-, Ballast- und Mooring-Lastwerten erstellt (siehe Abbildung 1-24).

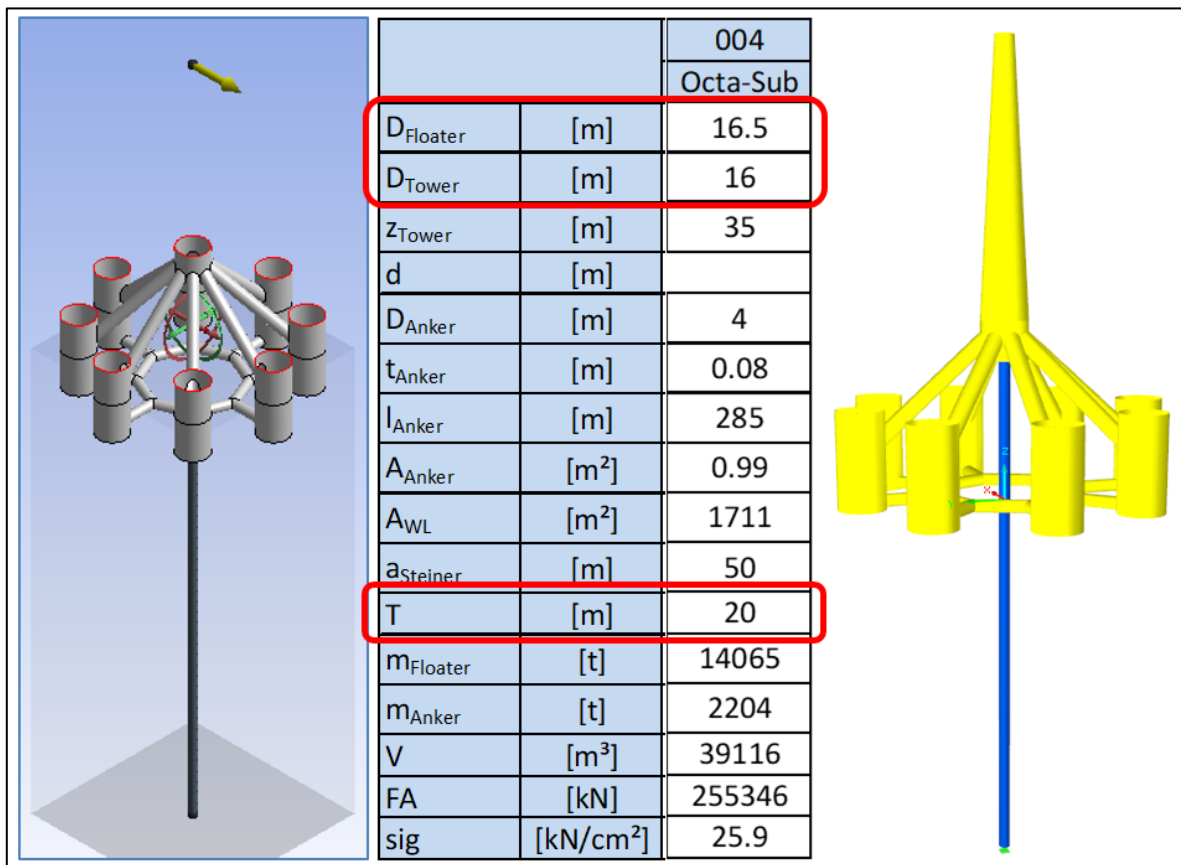


Abbildung 1-24: Multi-Floater – „Aufgelöste Struktur“

Das Aufstellen der Verankerungsstruktur ist in der Abbildung 1-25 dargestellt. Dies umfasst die Darstellung von klassischen Mooring-Verankerung mit räumlicher Gleichgewichtswirkung, alternative Verankerung mit zentraler Rückstellwirkung (Biegemoment) und zuglastbeanspruchte Verankerung mit räumlicher Auslenkungswirkung.

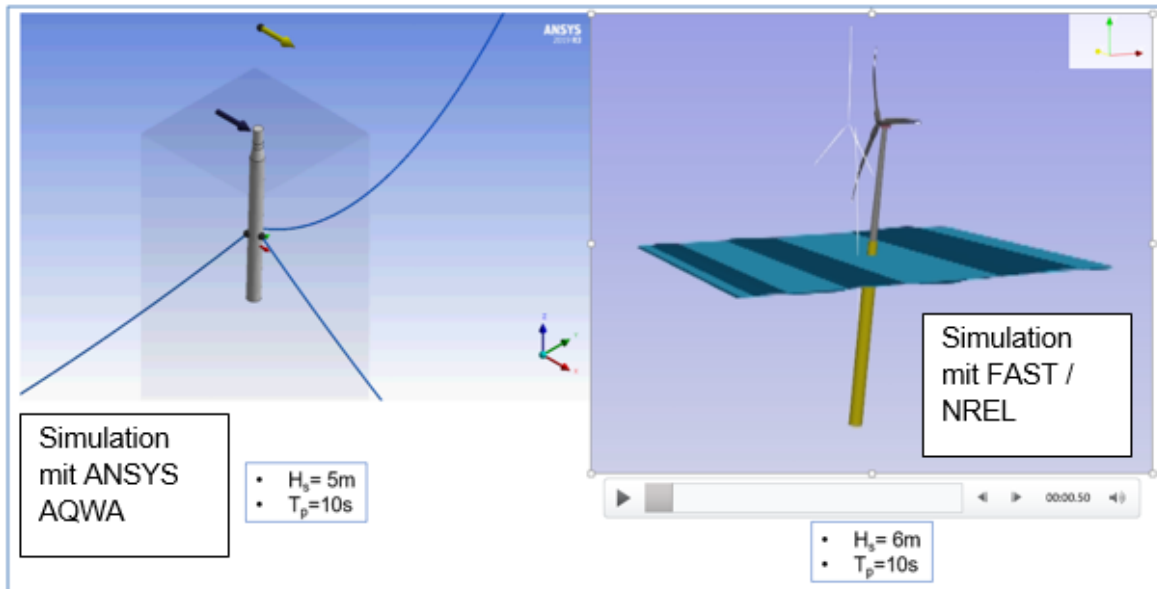


Abbildung 1-25: Klassische Mooring-Verankerung mit räumlicher Gleichgewichtswirkung - Vergleichende Simulationen – Ansys Aqwa (FEM) und FAST (Mehrkörpersystem)

In den Abbildung 1-26 sind die Ergebnisse der Simulationen dargestellt und wurden mit Ansys Aqua und WAMIT berechnet. Daraus ist ersichtlich, dass sich die Ergebnisse gleichen. Der Ergebnisvergleich ist in Abbildung 1-27 visualisiert.

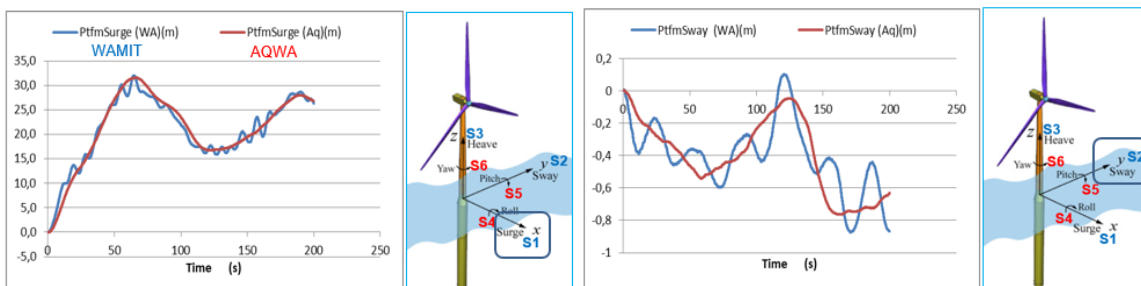


Abbildung 1-26: Vergleichende Simulationen – Ansys Aqwa (FEM) und WAMIT (Potentialtheorie)

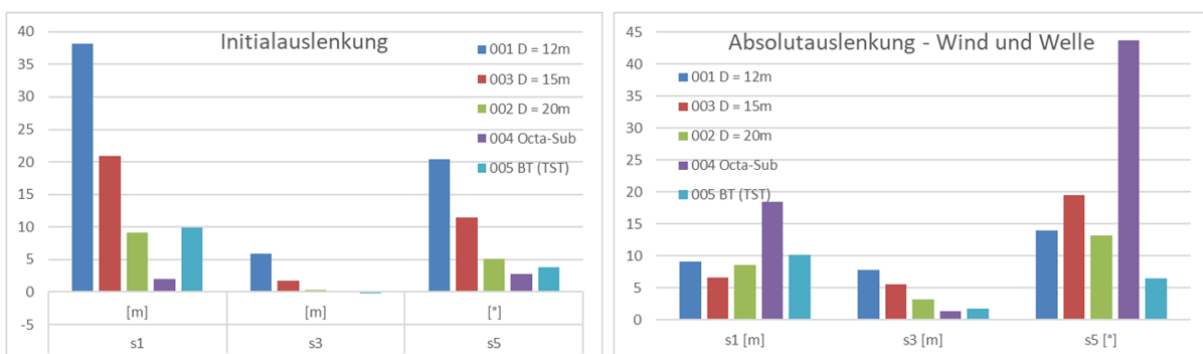


Abbildung 1-27: Ergebnisvergleiche – vereinfachte Darstellungen für die Bewegungsmodi

Die Zuglastbeanspruchung der Systemvarianten Mono-Floater und Halbtaucher ist in Abbildung 1-28 dargestellt. Der Mono-Floater ist durch mehrere Verankerungsleinen zugspannungsverankert mit dem Meeresboden verbunden und besitzt daher eine größere Ankerfläche als der Multi-Floater (Halbtaucher). Des Weiteren kann der Mono-Floater über einen Zentralanker mit dem Meeresboden verbunden werden. Die Rückhaltekräfte resultieren aus dem Auftriebsüberschuss des Systemträgers. Das Ergebnis ist in Abbildung 1-29 dargestellt.

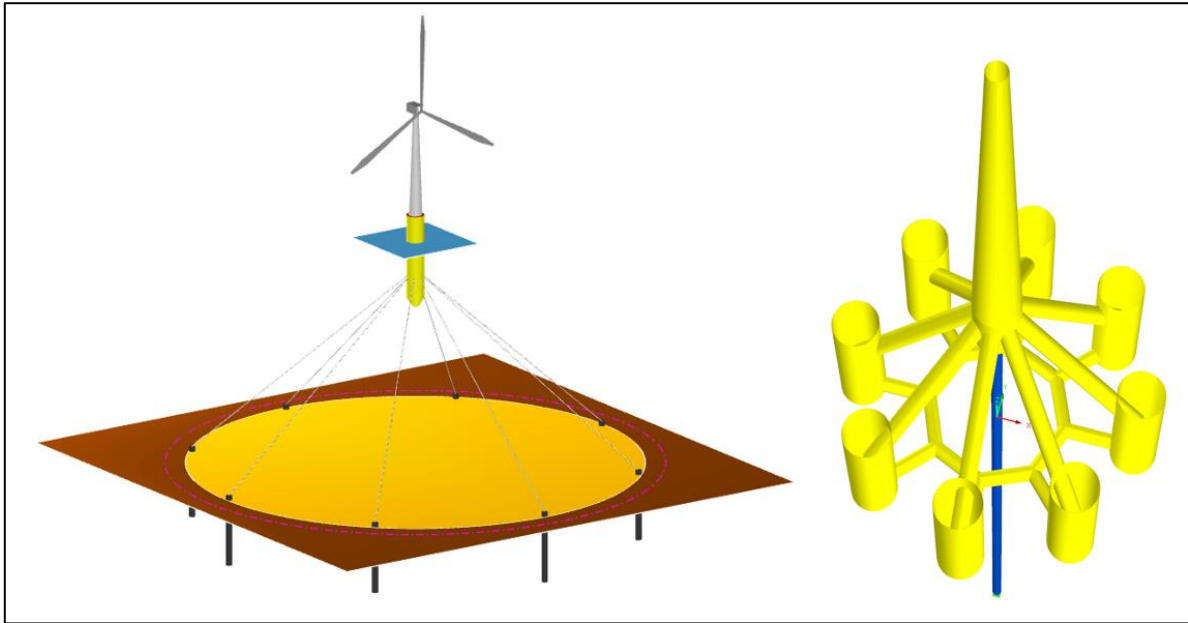


Abbildung 1-28 Zuglastbeanspruchte Verankerung mit räumlicher Auslenkungswirkung

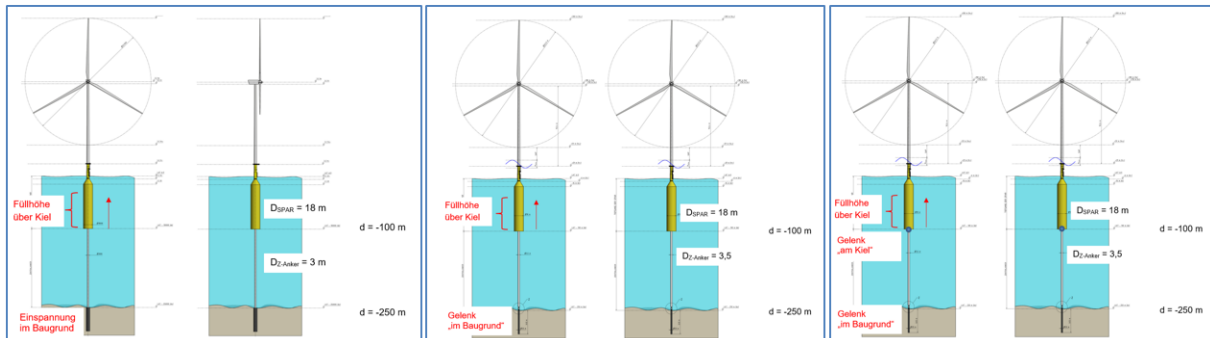


Abbildung 1-29: Alternative Verankerung mit zentraler Rückstellwirkung (Biegemoment) - „Boden-Einspannung“, „Boden-Gelenk“ und „Doppelpendel“

Turmkopflasten werden mit Simulationswerkzeugen bewertet

In Abschnitt 0 werden die Turmkopflasten an der Gondel und an den Rotorblättern bewertet. Dazu wurde die Turbine als CFD-Konstruktion erstellt (siehe Abbildung 1-30). Die Ergebnisse aus der Simulation sind in Abbildung 1-31 als „Key-Experts“ erstellt und enthalten die Ergebnisse zum Flügel-Schub, zur Rotor-Leistung und zu den Auftriebsbeiwerten. Des Weiteren sind die Umströmungen der Flügel in Abbildung 1-32 visualisiert und die an den Flügeln auftretenden Druckunterschiede dargestellt.

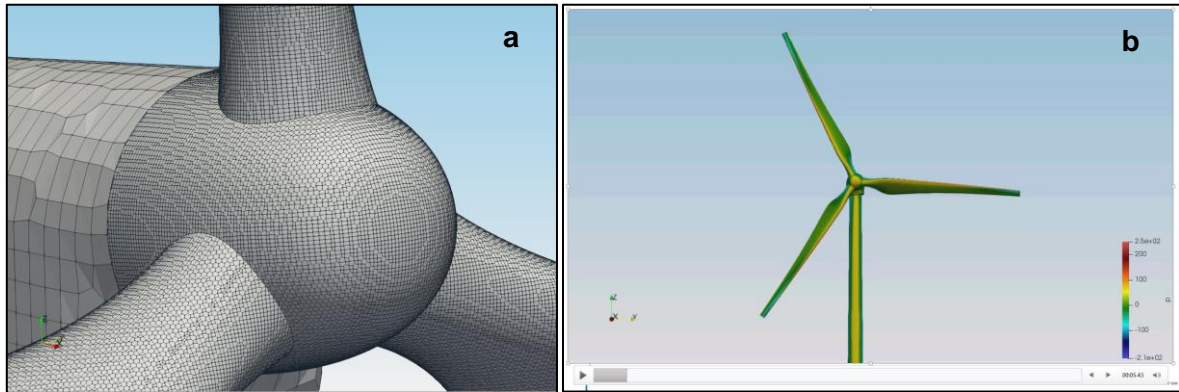


Abbildung 1-30: Abbildung einer 5MW WEA; Bild a: Detailabbildung der Nabe; Bild b: Simulation der Umströmung

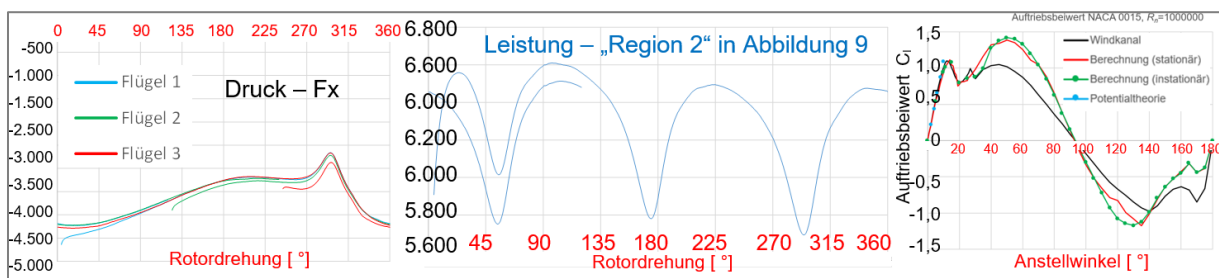


Abbildung 1-31: Ergebnisse der Simulation – Flügel-Schub, Rotor-Leistung, Auftriebsbeiwert

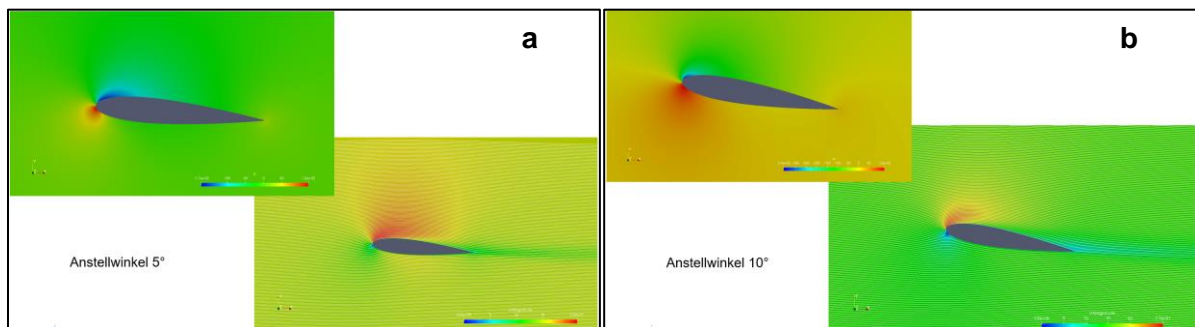


Abbildung 1-32: Ergebnisse – Umströmung (Geschwindigkeiten); Bild a: Anstellwinkel 5°; Bild b: Anstellwinkel 10°

Die Entwurfsumfänge beinhaltet die reduzierte Profilaerodynamik der Rotorblattkonstruktion und Einstellwinkel. In der Abbildung 1-34: Rotorflügel – Steigungsverlauf Abbildung 1-34 bis Abbildung 1-35 sind diese detaillierten Ergebnisse für die Darstellung der Profilwirkungen aufgestellt.

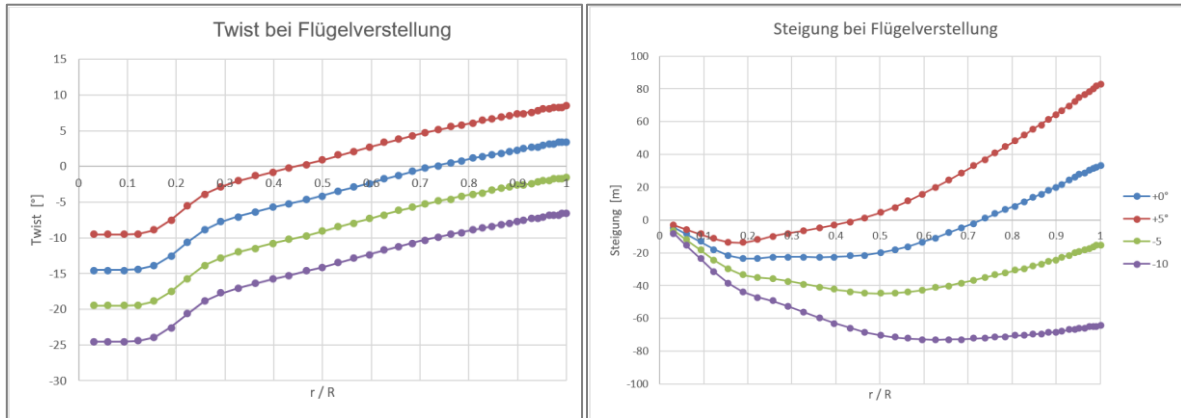


Abbildung 1-33: Rotorflügel – Flügelverstellung

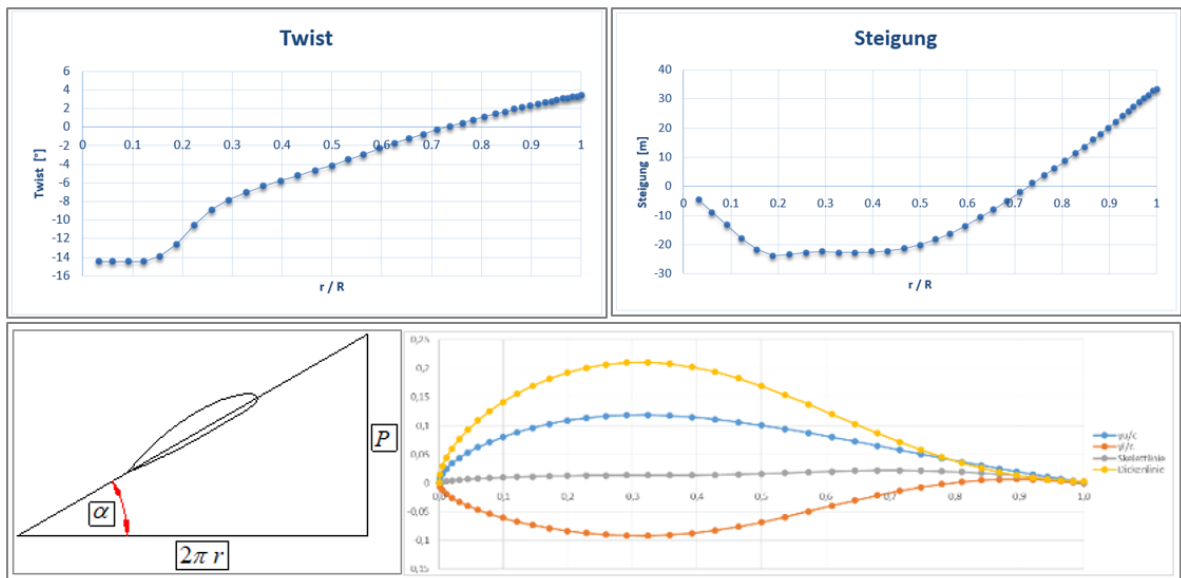


Abbildung 1-34: Rotorflügel – Steigungsverlauf

Das Berücksichtigen von Regler-Effekten umfasst a) Triebstrang-Dämpfungen (abhängig von Torsionseigenfrequenz), b) Werkstoff-Dämpfungen (Rayleigh Dämpfung) der Gesamtstruktur und c) Anker-Strang-Dämpfungen (abhängig von Mooring-Eigenfrequenz). Mit den Resultaten ab Abbildung 1-36 weisen die Simulationen diese Effekte in den Berechnungsmodellen aus.

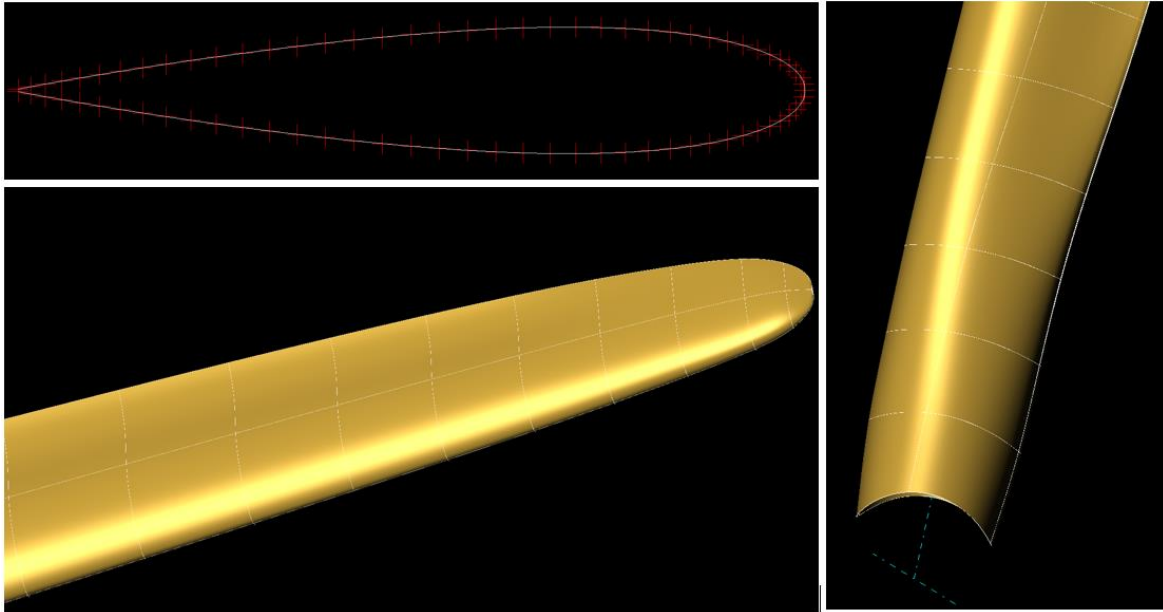
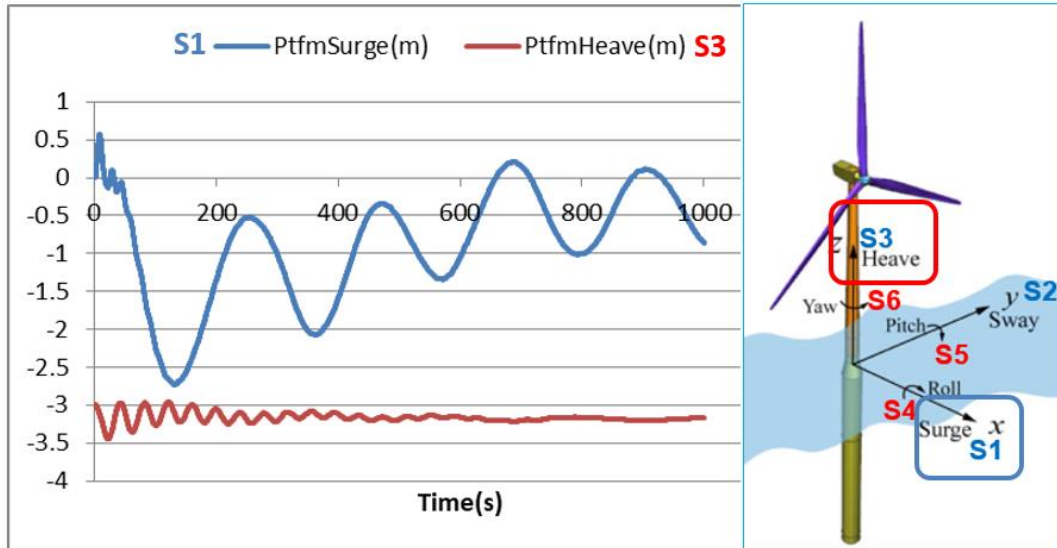
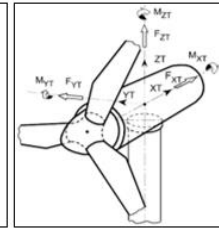
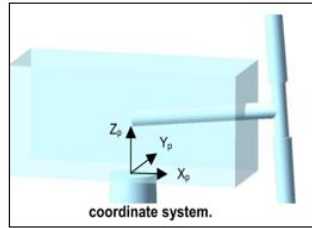
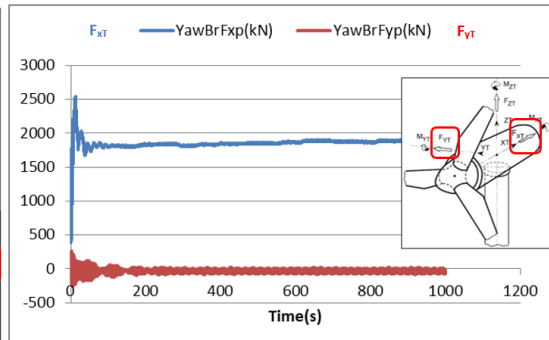
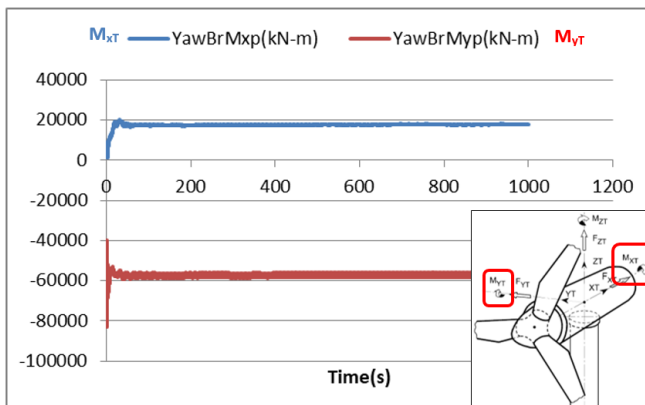


Abbildung 1-35: NACA 0015 an der Flügelspitze und Innenbereich

- 10m/s constant Wind
- H_s 5m T_p 10s
- Moored
- Heave Offset -3m von MSL
- 1000s Simulation



Lastfall	Turm					Turmkopfschnittgrößen der Windenergieanlage					
	Wind		Welle								
		Welle	Periode		Strömung						
	$V_{\text{Modell(HUB)}}$	H_{Welle}	T_{min}	T_{max}	$U_{\text{resultierend}}$	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
	[m/s]-10min	[m]	[s]	[s]	[m/s]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
DLC 1.1	24	6.0	8.7	11.2	0.850	2750	-199	-10000	16566	16566	9940
DLC 1.3	24	1.4	4.2	5.4	0.850	1188	-178	-10000	27837	77943	32476
DLC 1.5	39.54	11.2	11.9	15.3	0.850	4837	265	-10000	3181	-35783	-11265
DLC 1.6	50.75	14.9	13.7	17.6	1.140	-5301	364	-10000	-4970	-49699	-16566
DLC 6.1a	42.50	13.8	13.2	17.0	0.850	1358	-4639	-10000	15307	22961	46468
DLC 6.1b	53.13	18.1	15.1	19.4	0.850	1093	-3562	-10000	10934	13584	35783
DLC 6.1c	46.75	25.5	13.2	17.0	1.340	663	-2154	-10000	6627	8283	21536



YawBrFxp -> Non-rotating tower-top/ yaw-bearing shear force (about xp axis)
YawBrMyp -> Non-rotating tower-top/ yaw-bearing shear force (about yp axis)

Lastfall	Turm						Turmkopfschnittgrößen der Windenergieanlage							
	Wind		Welle		Periode		Störung							
	$V_{Modell(HUB)}$	H_{Welle}	T_{min}	T_{max}	$U_{Resultierend}$	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz			
	[m/s]-10min	[m]	[s]	[s]	[m/s]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]			
DLC 1.1	24	6.0	8.7	11.2	0.850	2750	-199	-10000	16566	16566	9940			
DLC 1.3	24	1.4	4.2	5.4	0.850	1188	-178	-10000	27837	77943	32476			
DLC 1.5	39.54	11.2	11.9	15.3	0.850	4837	265	-10000	3181	-35783	-11265			
DLC 1.6	50.75	14.9	13.7	17.6	1.140	-5301	364	-10000	-4970	-49699	-16566			
DLC 6.1a	42.50	13.8	13.2	17.0	0.850	1358	-4639	-10000	15307	22961	46468			
DLC 6.1b	53.13	18.1	15.1	19.4	0.850	1093	-3562	-10000	10934	13584	35783			
DLC 6.1c	46.75	25.5	13.2	17.0	1.340	663	-2154	-10000	6627	8283	21536			

Lastfall	Turm						Turmkopfschnittgrößen der Windenergieanlage					
	Wind		Welle		Periode							
	$V_{Modell(HUB)}$	H_{Welle}	T_{min}	T_{max}	$U_{Resultierend}$							
	[m/s]-10min	[m]	[s]	[s]	[m/s]		Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
DLC 1.1	24	6.0	8.7	11.2	0.850		2750	-199	-10000	16566	16566	9940
DLC 1.3	24	1.4	4.2	5.4	0.850		1188	-178	-10000	27837	77943	32476
DLC 1.5	39.54	11.2	11.9	15.3	0.850		4837	265	-10000	3181	-35783	-11265
DLC 1.6	50.75	14.9	13.7	17.6	1.140		-5301	364	-10000	-4970	-49699	-16566
DLC 6.1a	42.50	13.8	13.2	17.0	0.850		1358	-4639	-10000	15307	22961	46468
DLC 6.1b	53.13	18.1	15.1	19.4	0.850		1093	-3562	-10000	10934	13584	35783
DLC 6.1c	46.75	25.5	13.2	17.0	1.340		663	-2154	-10000	6627	8283	21536

Abbildung 1-36: Triebstrang-Dämpfungen (abhängig von Torsionseigenfrequenz)

1.1.3 Technologien für die adaptive Quer-Modul-Baumethodik

Das Unterkapitel 1.1.3 beschäftigt sich mit der Technologie für die adaptive Quer-Modul-Baumethodik schwimmender Unterstrukturen. Neben der Methodik „Skaleneffekt“ und die Systemvarianten auf unterschiedliche Größenklassen skalieren zu können wird des Weiteren die Quer-Modul-Baumethodik als Baukastensystem betrachtet.

Skalierung der Modulgrößen entsprechend der Lokationsszenarien

Der Abschnitt 0 beschäftigt sich mit der Skalierung der Modulgrößen entsprechend der definierten Leistungsklassen. Die Methodik „Skaleneffekt“ umfasst die Betrachtung der Größeneffekte für verschiedene Auftriebskomponenten, als Hauptbereichsstufe für Längen und Durchmesser und die Stufe der Hauptbereiche aus Leistungsklassen und Lokationen. In Abbildung 1-37 sind verschiedene Verhältnisse zur Skalierung der Modulgrößen dargestellt. Dazu wurden die WEA-Leistung, die Turmmasse sowie die Gondelmasse als Skalierungsgrößen definiert und betrachtet.

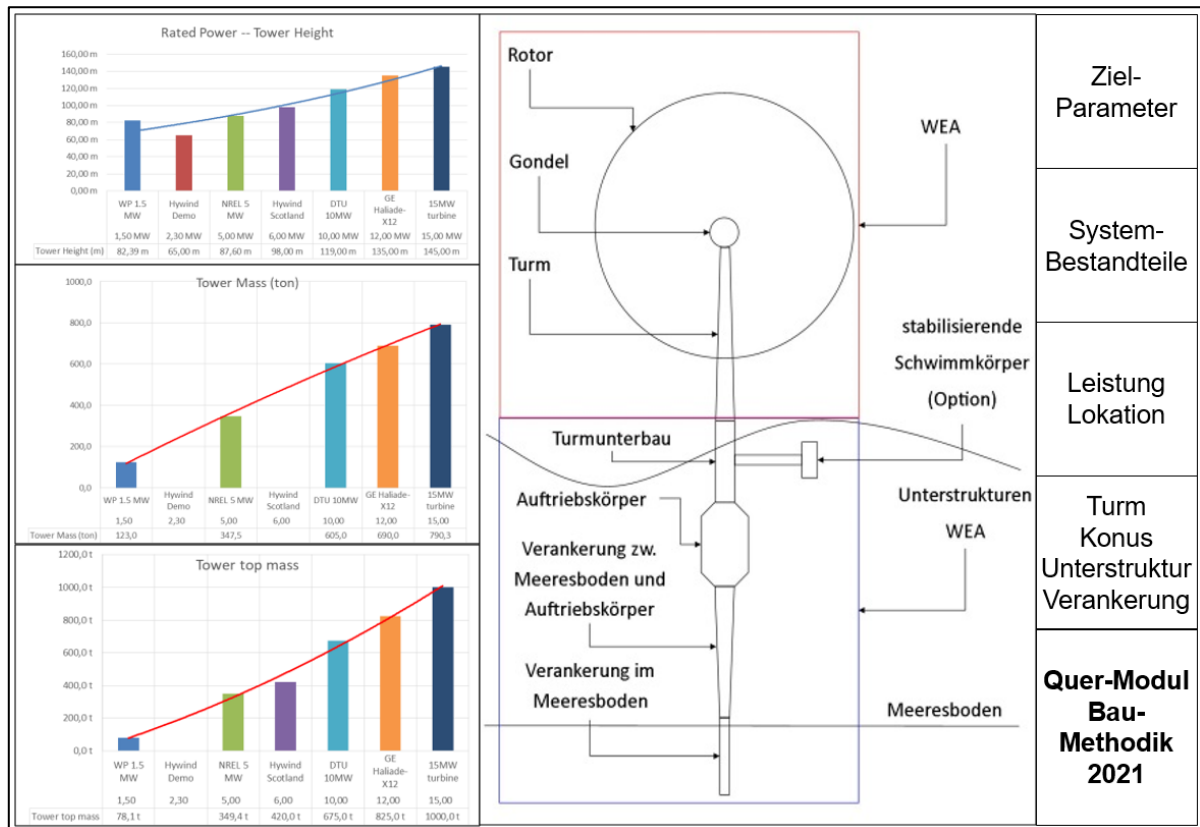


Abbildung 1-37: Darstellung verschiedener Verhältnisse zur Skalierung der Modulgrößen

Neben der Skalierung der Windenergieanlagen wurden auch verschiedene Leistungsklassen für die definierten Beispiellokationen erstellt. Die Einteilung erfolgt dabei in minimale, optimale und maximale Leistungsklasse (siehe Abbildung 1-38).

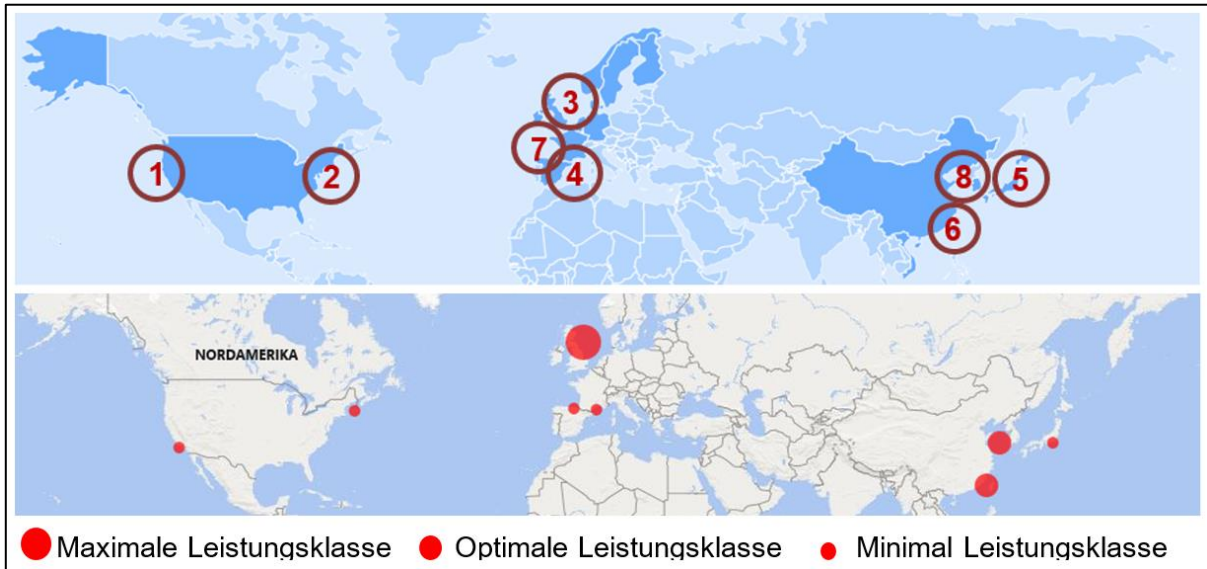


Abbildung 1-38: Darstellung minimalster und maximalster Leistungsklassen

Nachdem die Windenergieanlage nach verschiedenen Komponenten skalierte wurde, sowie verschiedene Leistungsklassen erstellt wurden erfolgt nun eine exemplarische Darstellung der skalierbaren Teile der Windenergieanlage. Das Ergebnis ist in Abbildung 1-39 dargestellt.

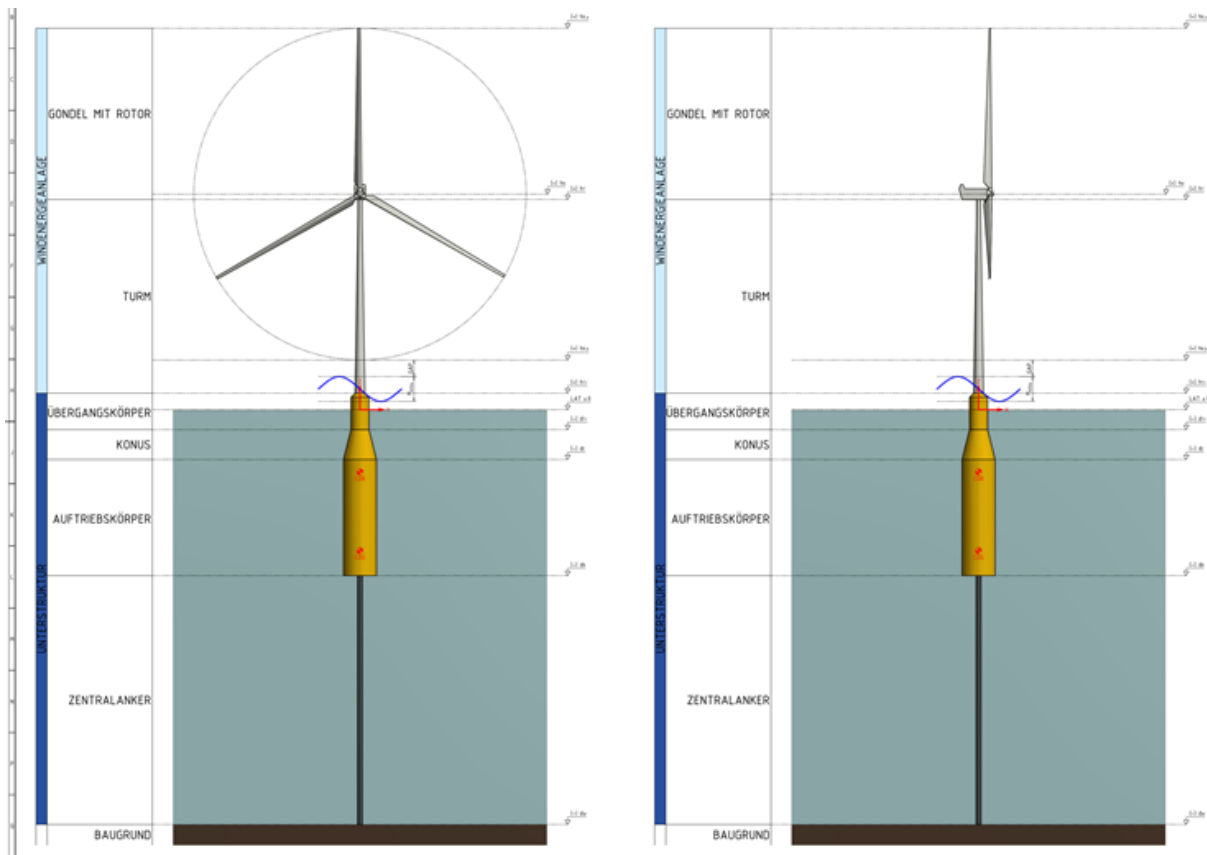


Abbildung 1-39: Darstellung der betrachteten Windenergieanlage für den Größeneffekt (Spar)

Der skalierbare Systemträger ist in Abbildung 1-40 dargestellt. Dabei wird die systemvariante Mono-Floaters in Abhängigkeit des Durchmessers skaliert.

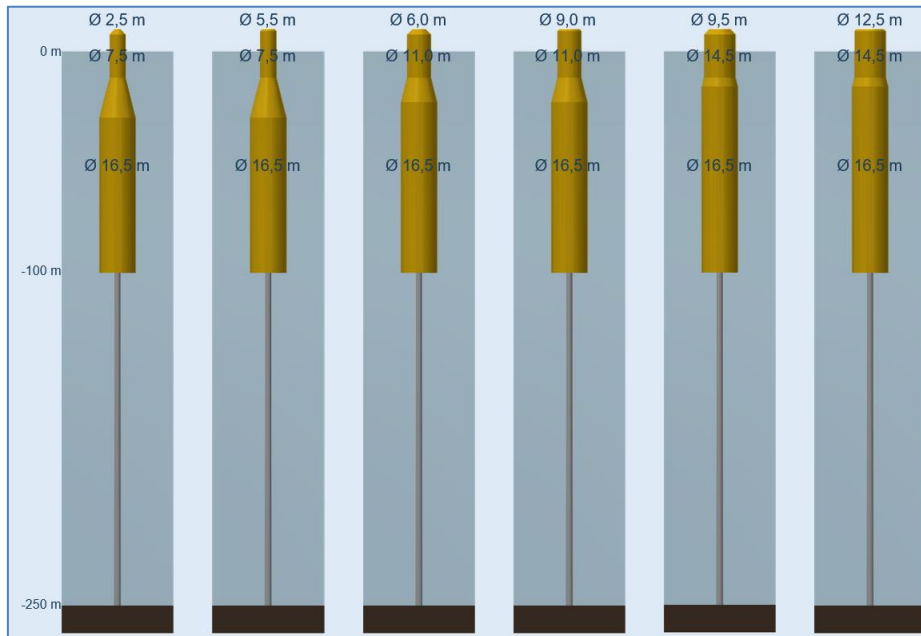


Abbildung 1-40: Betrachtung der Unterstruktur für den Größeneffekte (Spar)

Fertigung der Systemvarianten im Baukastensystem

Der Abschnitt 0 beschäftigt sich mit der Fertigung der Systemvarianten im Baukastensystem. Dazu wurde am Beispiel der Systemvariante Mono-Floater eine Sektionsteilung vorgenommen. Somit gliedert sich die Spar in Turmunterbau, Konus, Auftriebskörper und Zentralanker. Diese können dann nach dem Baukastenprinzip gefertigt und je nach Leistungsklasse zusammen gebaut werden (siehe dazu Abbildung 1-41).

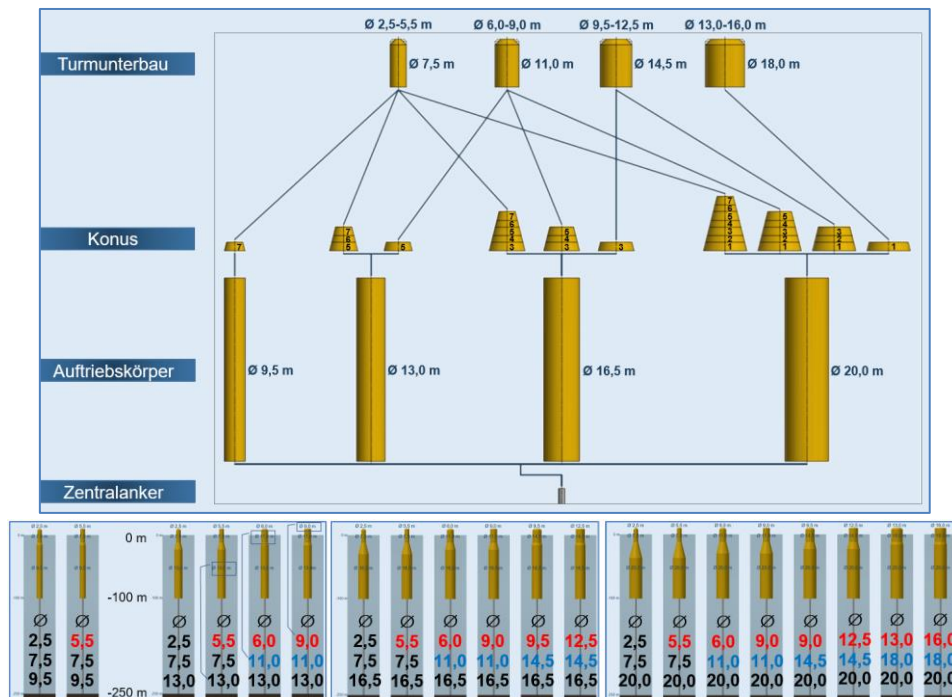


Abbildung 1-41: Unterstruktur und Windenergieanlage – Skalen- und Größeneffekte

Die Baugruppenentwicklung mit Ausrichtung auf variabler Bauraum-Ausgestaltung berücksichtigt die durchgängige Modifikationsmöglichkeit für Auftrieb- und Verankerung, die Skaleneffekte für die Hauptsysteme in radialer und axialer Richtung und die Funktionsvariablen für Paneelen, Bodengruppen und Sektionen (siehe Abbildung 1-43 und Abbildung 1-44). Ab Abbildung 1-42 zeigen die Ausführungen die technologischen Gruppierungen für die Baumethodik in den Entwicklungsdetails auf.

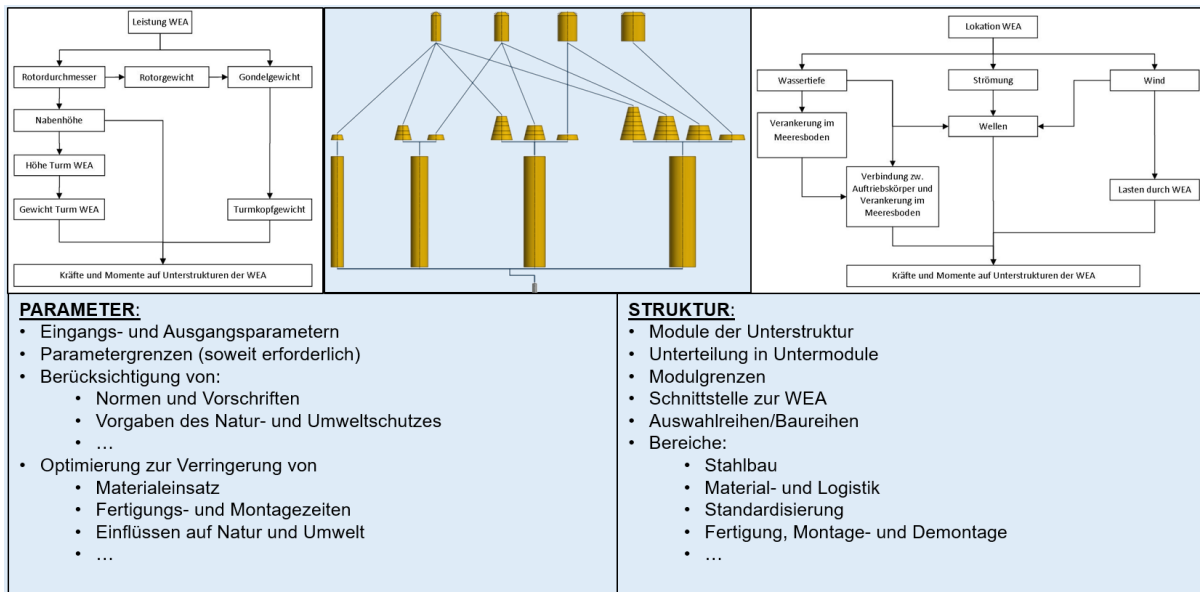


Abbildung 1-42: Durchgängige Modifikationsmöglichkeit für Auftrieb- und Verankerung

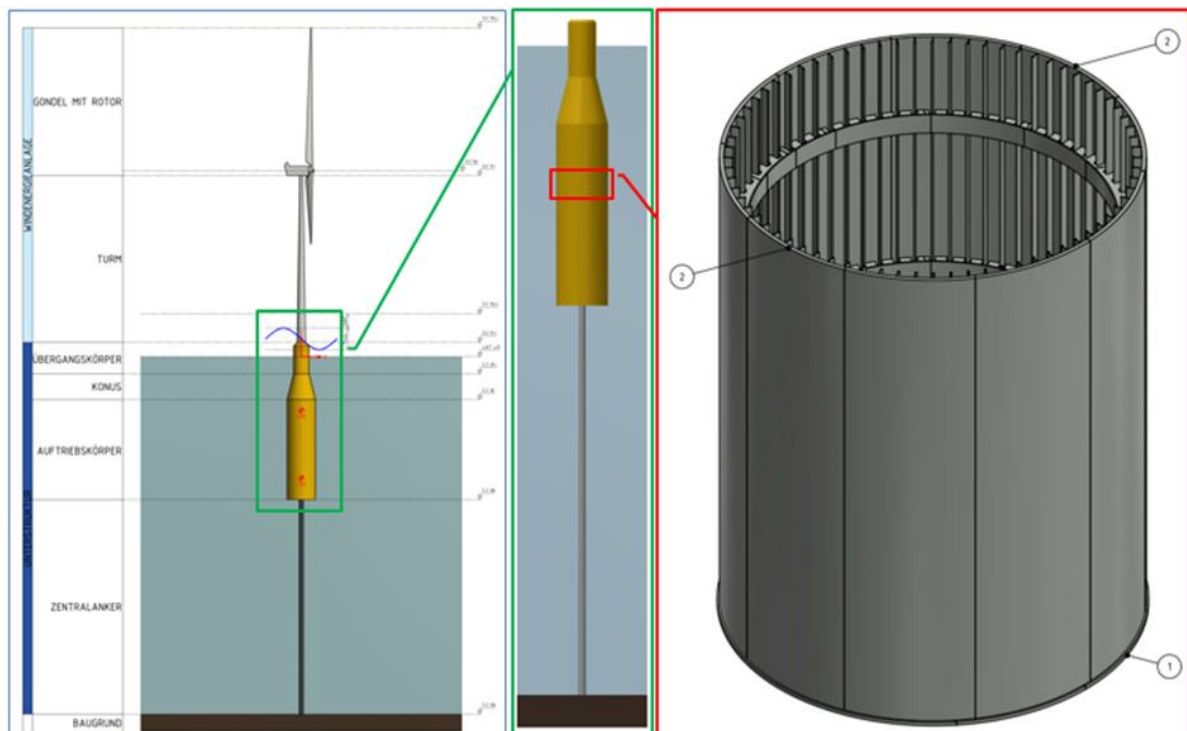
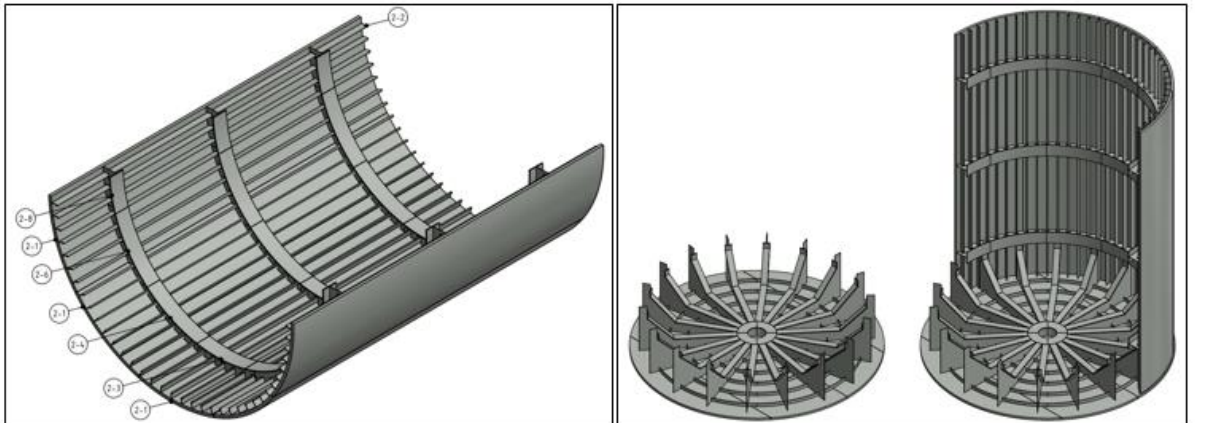


Abbildung 1-43: Funktionsvariablen für Paneelen, Bodengruppen und Sektionen



BEZEICHNUNG	Ø	BAUTEILNUMMER	Ø	BAUTEILNUMMER	Ø	BAUTEILNUMMER	Ø	BAUTEILNUMMER
VERBINDUNGSMODUL	7500	OWSplus-WDT-103-02701	11000	OWSplus-WDT-103-02702	14500	OWSplus-WDT-103-02703	18000	OWSplus-WDT-103-02704
ÜBERGANGSMODUL 2	7500	OWSplus-WDT-103-02601	11000	OWSplus-WDT-103-02602	14500	OWSplus-WDT-103-02603	18000	OWSplus-WDT-103-02604
ÜBERGANGSMODUL 1	7500	OWSplus-WDT-103-02501	11000	OWSplus-WDT-103-02502	14500	OWSplus-WDT-103-02503	18000	OWSplus-WDT-103-02504
KONUSMODUL 7		OWSplus-WDT-103-02407						
KONUSMODUL 6		OWSplus-WDT-103-02406						
KONUSMODUL 5		OWSplus-WDT-103-02405						
KONUSMODUL 4		OWSplus-WDT-103-02404						
KONUSMODUL 3		OWSplus-WDT-103-02403						
KONUSMODUL 2		OWSplus-WDT-103-02402						
KONUSMODUL 1		OWSplus-WDT-103-02401						
AUFTRIEBSMODUL 2	9500	OWSplus-WDT-103-02301	13000	OWSplus-WDT-103-02302	16500	OWSplus-WDT-103-02303	20000	OWSplus-WDT-103-02304
AUFTRIEBSMODUL 1	9500	OWSplus-WDT-103-02201	13000	OWSplus-WDT-103-02202	16500	OWSplus-WDT-103-02203	20000	OWSplus-WDT-103-02204
BODENMODUL	9500	OWSplus-WDT-103-02101	13000	OWSplus-WDT-103-02102	16500	OWSplus-WDT-103-02103	20000	OWSplus-WDT-103-02104
UNTERSTRUKTUR 2		OWSplus-WDT-103-02002						
UNTERSTRUKTUR 1		OWSplus-WDT-103-02001						

Abbildung 1-44: Daten der Funktionsvariablen für Paneelen, Bodengruppen und Sektionen

1.1.4 Objekt-Design-Methodik für verschiedene Systemträger

Dezentrale Fertigung für den Systemträger der FOWT

Die dezentrale Fertigung wurde für die jeweiligen Lokationen, aus den Parametern für Transport & Installation und aus den Zuordnungen zu den Schnittstellen für die Ausführung der einzelnen Ausbaustufen erfasst. Die Abbildung 1-46 stellt die Rückwärtsabfolge vom Werkstatt-Design bis hin zur Planung der Baugruppe in einer virtuellen Baumethodik entsprechend dar.

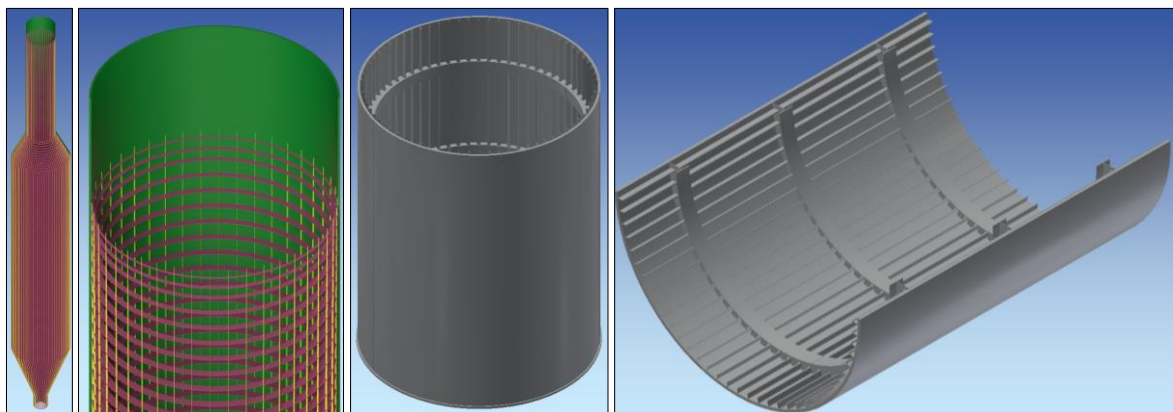


Abbildung 1-45: Virtuelle Baumethodik – hier Rückwärtsmodus „bildhaft“ dargestellt

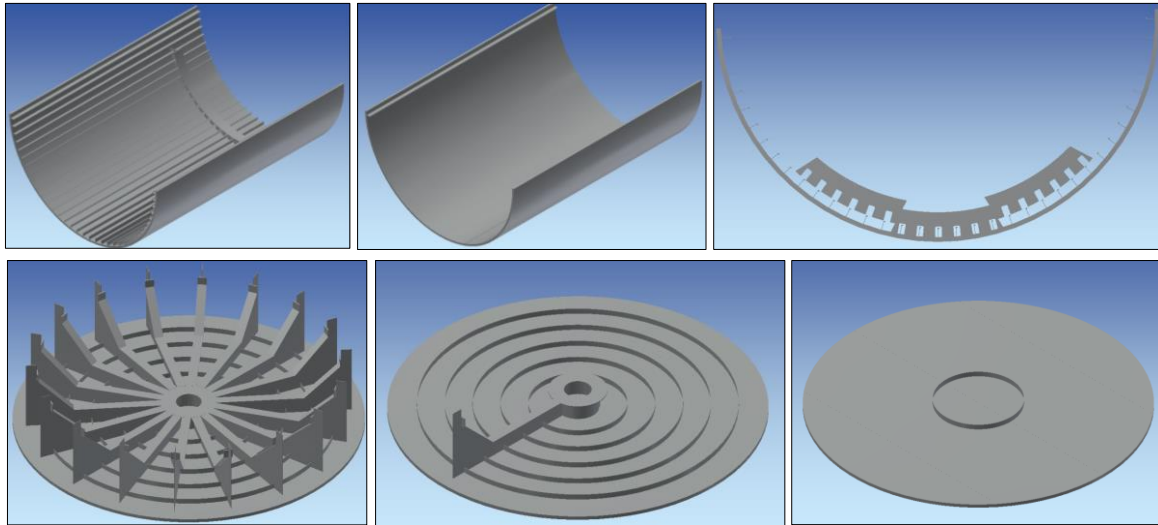


Abbildung 1-46: Virtuelle Baumethodik – hier Rückwärtsmodus „bildhaft“ dargestellt

Unter Einbezug der „Verfügbarkeiten“ von virtuellen Fertigungskapazitäten in die dezentrale Fertigung für fehlende Komponenten dient die lokale Bewertung von Produktionsmöglichkeiten. Dies betrifft insbesondere die vorgefertigten Halbzeuge „Blech“ für Aussteifungen und „Rohrschüsse“ für die einzelnen Segmente einer schwimmenden Unterstruktur. In das Gesamt-System aus Design und Fertigung „fließen“ die kompletten Ausführungen zur Struktur und deren Baugruppen, d.h. Großsektionen ein. Mit Abbildung 1-47 stehen hierfür die Konstruktion und die Fertigungsmatrizen bereit.

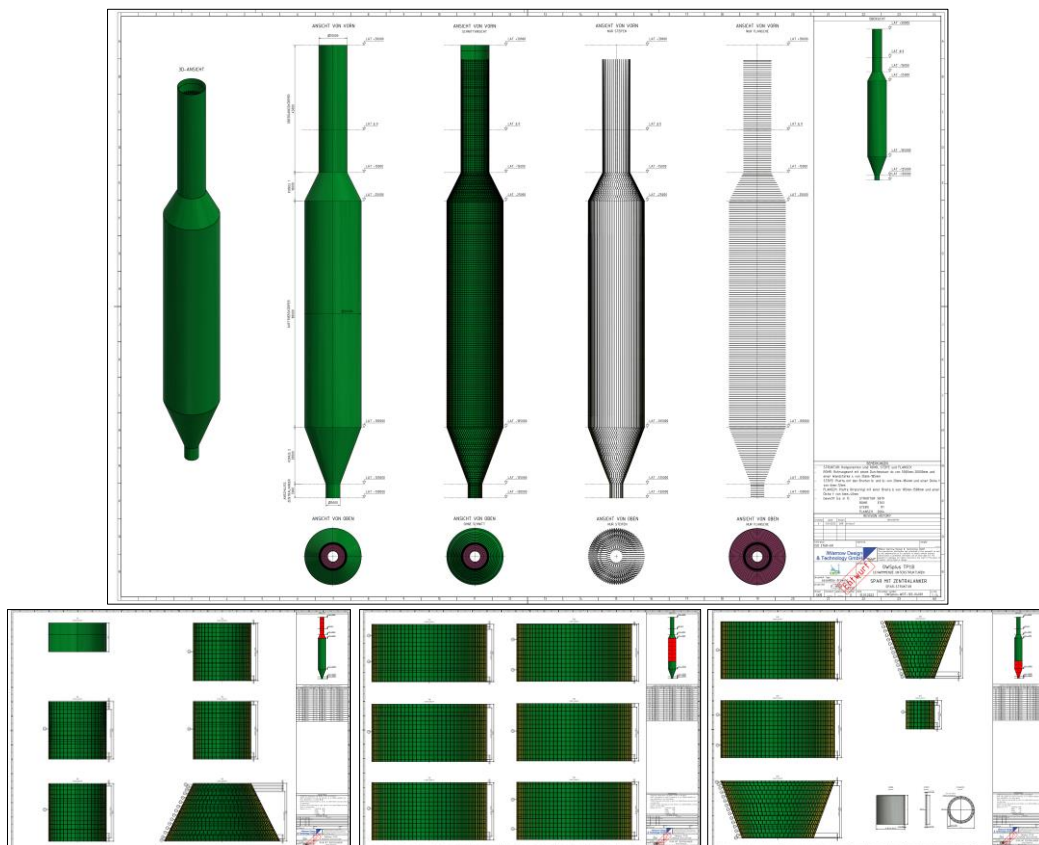


Abbildung 1-47: Spar - Zentralanker – Gesamtdesign (3 Großsektionen) - Fertigungsmatrizen

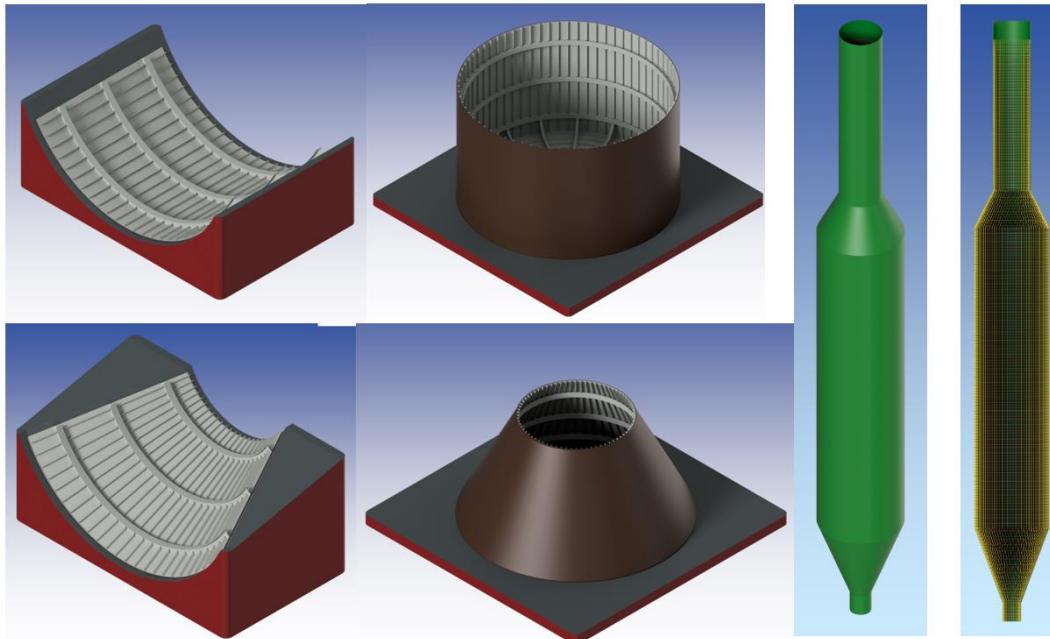


Abbildung 1-48: Spar - Zentralanker – Gesamtdesign (3 Großsektionen) - Fertigungsmatrizen

Bewertung für die Objekt und Baumethodik-Wechselwirkung

Die Bewertung von Simulationsstrategien für die digitale Design-Vernetzungen (CAD) zwischen der Festigkeitsbewertung (CAE) und modulare Sektionsfertigung (CAM) wurden explizit im vorigen Abschnitt aufgeführt. Für die Bewertung der Baumethodik-Wechselwirkung kann eine Bottom-Up-Methode als auch die Top-Down-Methode identifiziert werden. Eine „Bottom-Up-Technologie“ bezieht das Einzel-System in die explizite CAD-Aufbereitung ein. Änderungen folgen einem expliziten Prüfmodus für das Einzelkonstrukt. Im Bereich der Layout-Vernetzung bezieht die „Top-Down-Methode“ den vernetzten Prozess bis zur Änderung von Layout-Abhängigkeiten ein (siehe dazu auch Abbildung 1-50).

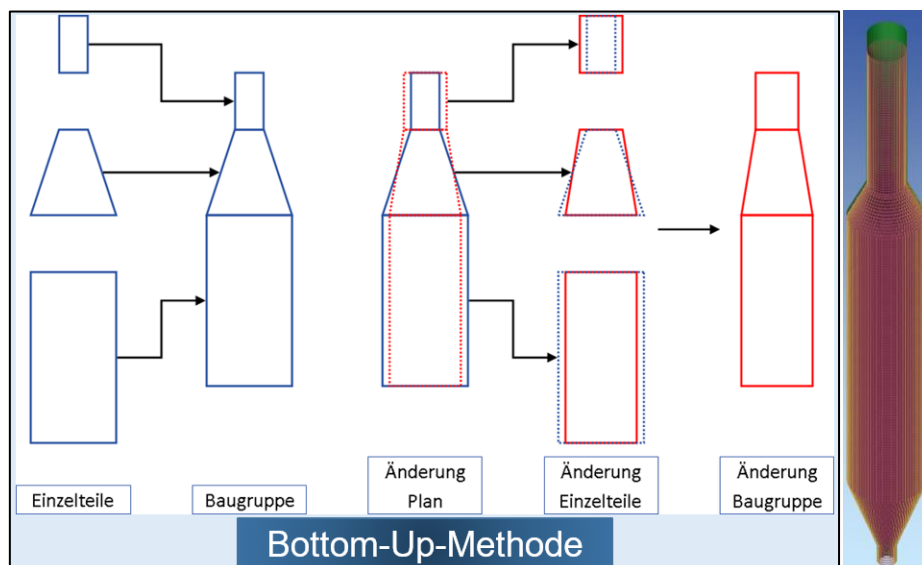


Abbildung 1-49: Bottom-Up-Methode mit CAD-Konzepten

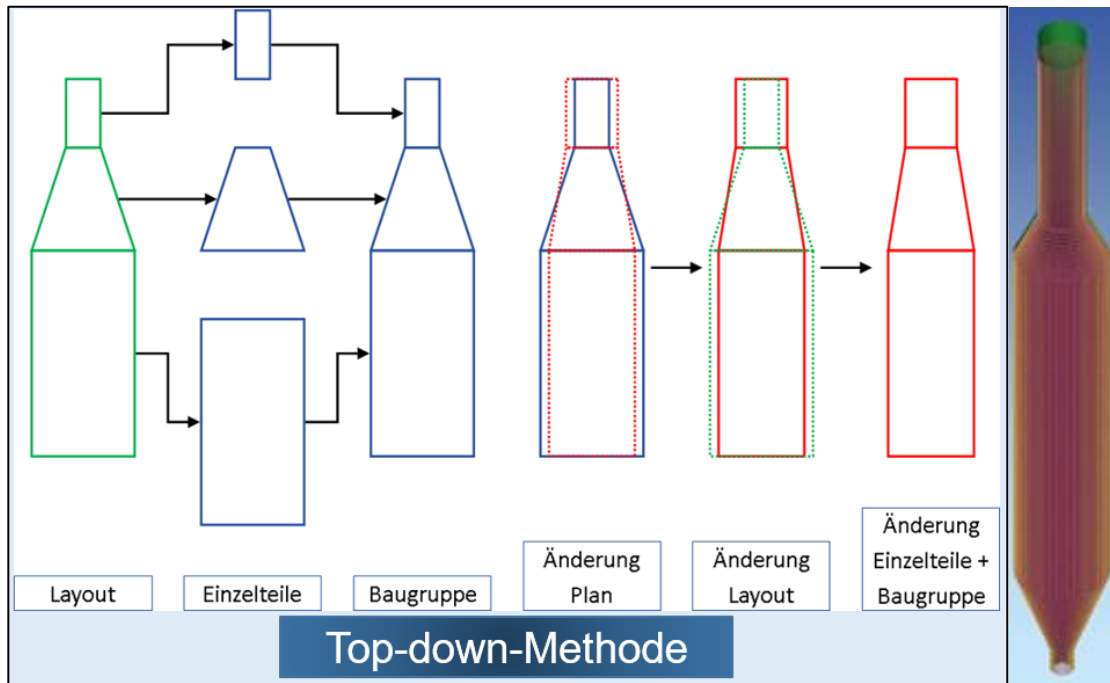


Abbildung 1-50: Top-Down-Methode mit CAD-Konzepten

Virtuelle Fertigungsrandbedingungen wie Hallenkapazitäten, Krankapazitäten, Kailängen und Dock-Volumen sind anhand bestehender Werftstrukturen (klassische Werftstrukturen sowie FOWT-Werften, z.B. Semi-Sub Windfloat-Werft, vgl. Abbildung 1-51 (Roddier, D. et al, 2016)) analysiert und hinsichtlich der Anforderungen für differenzierte FOWT-Designs definiert. Analog dazu sind die entsprechenden Schnittstellenattribute exemplarischer Werftstrukturen (z.B. Navantia Fene – Ferrol-Werft für Spar-Strukturen (6-MW)) analysiert und entsprechend bewertet.

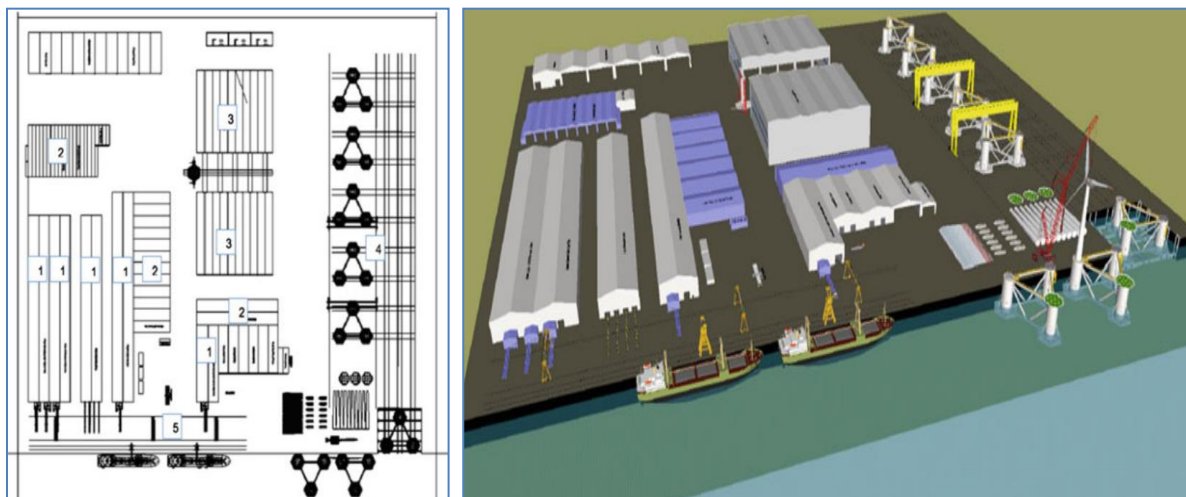


Abbildung 1-51: Konzeptioneller Werftentwurf für FOWT (Windfloat, Quelle: Roddier, D. et al, 2016)

Für die differenzierten Teilsysteme (Floater, TP, etc.) sind Strukturen und Komponenten mit entsprechenden Materialanforderungen (Primary vs. Secondary Steel) identifiziert und belastungsgerecht definiert. Die getrennten Fertigungsrandbedingungen umfassen Hafen-/Werft-Schlüsselkriterien sowie Anforderungen zur Ausstattung, Anbindung und Interaktion der unterschiedlichen Fertigungsstätten und sind parametrisch erfasst.

CAD-basierte Design-Systeme in die Entwicklungsumgebung

Insbesondere die Wahl und Zuordnung von Daten-Paketen basiert auf „vertikalen“ / „parallelen“ Verknüpfungen entsprechend Abbildung 1-52. Alle drei Verfahren resultieren in entwickelten Prozeduren mit klar gestuften Datenpaketen für die Anwendung auf 3D-CAD. Abbildung 1-53 stehen die Vorteile und Nachteile bereit. Diese zeigen den standardisierten Anspruch an die technologische Anpassung je Lokation und Umfang an.

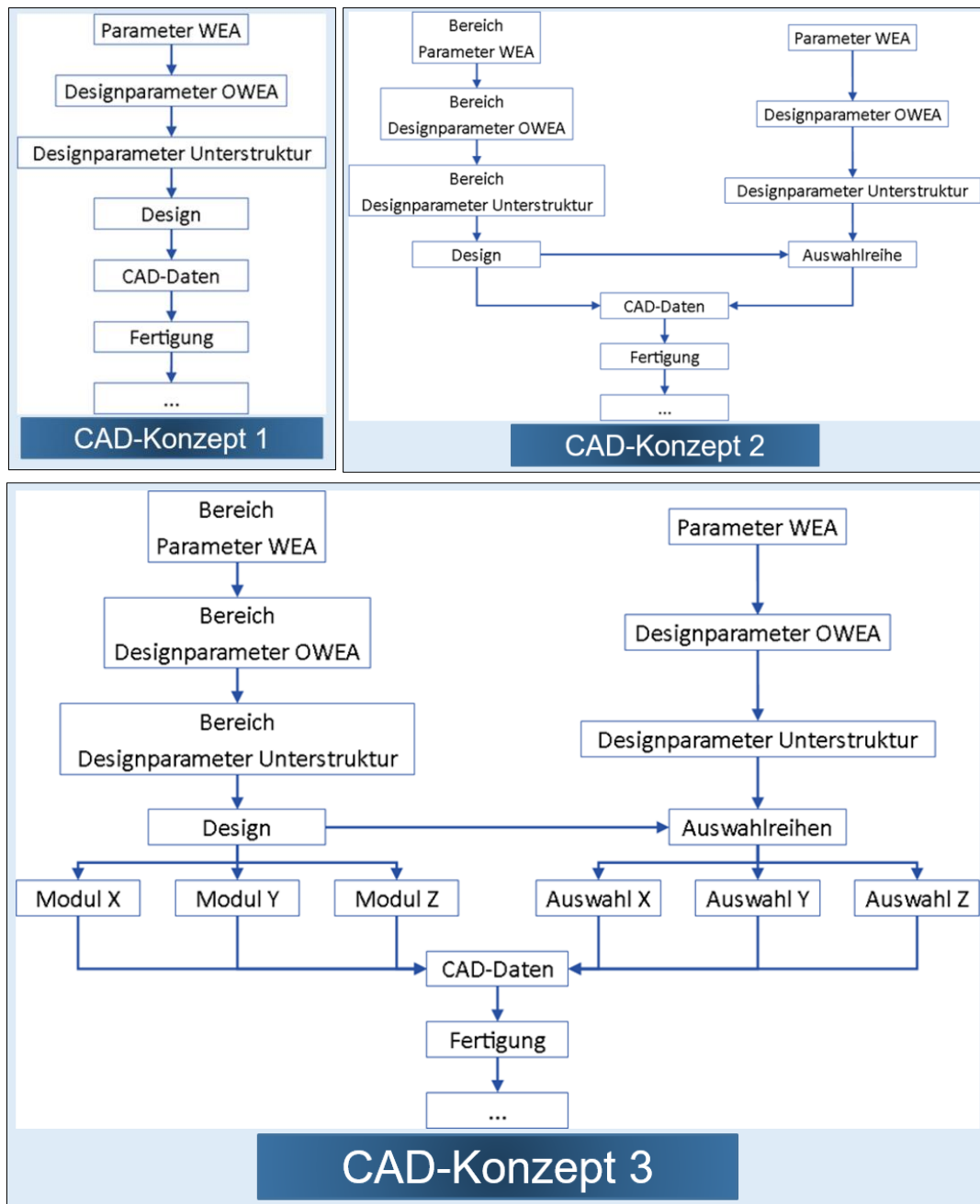


Abbildung 1-52: Topologie - CAD-Aufstellungen als Blockschemen für die Verknüpfungen

Die in Abbildung 1-52 dargestellten Konzepte zur Entwicklungsumgebung und Darstellung der Topologie zur CAD-Verknüpfung werden nun mit einander verglichen und Vorteile als auch Nachteile gegenüber gestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 1-53 dargestellt.

	CAD-Konzept 1	CAD-Konzept 2	CAD-Konzept 3
Vorteile	hohe Anpassungsfähigkeit	Nutzung von Wiederholteilen/ Serienfertigung umsetzbar	Nutzung von Wiederholteilen/ Serienfertigung umsetzbar
	beliebige Anwendbarkeit	Verringerung des Aufwandes für Fertigung und Montage	Verringerung des Aufwandes für Fertigung und Montage
Nachteile	Zyklus muss für jedes Projekt komplett neu durchlaufen werden	geringe Anpassungsfähigkeit	mittlere Anpassungsfähigkeit
	Nutzung von Wiederholteilen/ Serienfertigung kaum umsetzbar	stark eingeschränkte Anwendbarkeit	eingeschränkte Anwendbarkeit
	hoher Aufwand für Fertigung und Montage	Überdimensionierung	

Abbildung 1-53: CAD-Konzepte- Vorteile und Nachteile

1.2 Komplex 6 – Verankerungen und Zustandsüberwachung schwimmender Unterstrukturen

1.2.1 Betriebs- und Errichter-Technologien

Stabilitätskonfigurationen für Gründungsstrukturen für 15MW Turbinen

Die Entwicklung der Systemsteuerung (Auftrieb, Ballast, Installation ab Montage/Fertigung bis Betrieb) umfasst die Spezifika für Transport und Installation, Resonanz-Bewertungen und Parameter der 15MW-Offshore-Turbine (Abbildung 1-54 ff.).

Prinzipien				SPAR	Barge	Semi-Sub	TLP	WDT-BT
				001	003	003	001	002
				WDT	IDEOL	NREL	MIT/NREL	WDT
Operation	Durchmesser bzw. Länge/Breite	D/L,B	m	20	72.6	102.1	24.7	20
	Tiefgang	T	m	100	12.2	20	65.6	100
	Verdrängung	V	m³	27279	44304	20206	31433	27279
	Masse Flaoter	m _{stahl}	t	3372	18009	3914	1377	3372
	Masse OWT + Turm	m _{OWT}	t			1893		
	Masse Ballast	m _{Ballast}		22389	25447	14286	18340	0
	Gesamtmasse	m _{gesamt}	t	27654	45348.8	20093	21611	5265
	Gewichtsschwerpunkt (bzgl. SWL)	z _{cg}	m	-70.6	-0.2	-2.3	-47.8	-19.2
	Anfangsstabilität	GM ₀	[m]	14.4	41.3	-	15.1	-37.0
		GM _{0,AQWA}	[m]	14.2	41.1	13.1	16.4	-37.0
Installation	ohne OWT & Turm	RB		Near Shore	at Port	at Port	Offshore	Offshore
	Masse	m	t	25761	43456	18200	19718	3372
	Verdrängung	V	m³	25132	42396	17756	19237	3290
	Gewichtsschwerpunkt (bzgl. SWL)	z _{cg}	m	-78.6	-1.9	-	-56.0	-51.3
	Anfangsstabilität	GM ₀	[m]	22.4	43.0	-	23.8	-4.9
Transit	ohne OWT & Turm & Ballast	RB		instabil	stabil	stabil	instabil	instabil
	Masse	m	t	3372	18009	3914	1377	3372
	Verdrängung	V	m³	3290	17570	3819	1344	3290
	Gewichtsschwerpunkt (bzgl. SWL)	z _{cg}	m	-51.3	1.4	-	-35.3	-
	Anfangsstabilität	GM ₀	[m]	-4.9	39.7	-	3.1	-

Abbildung 1-54: Floating-Offshore-Wind-Turbinen-Systeme – Prinzipie, Operation, Installation, Transit

Gründungsstrukturen mit verschiedenen Mooring-Konzepten

Eine Vielzahl von Ankersystemen für differenzierte Bodenrandbedingungen ist bereits identifiziert worden und geeignete Mooring Systeme für FOWT entsprechend der Ankerrandbedingungen abgeleitet worden. Abbildung 1-55 vergleicht Anker- und Mooring-Technologien analysierter Referenzsysteme. Die adaptierten Mooring-Parameter der skalierten Referenz- und Vorzugskonzepte sind auszugsweise in Abbildung 1-56 aufgeführt.

Projektname	Typology	Konzept	Mooring-System	Ankertyp	Anzahl pro OWT
WindFloat 1	Semi-Sub	WindFloat	Catenary	Drag Embedded Anker	4
Fukushima Mirai		4-Col. V-Shape		Drag Embedded Anker	4
Hywind	Spar	Spar-Buoy		Suction Anker	3
Fukushima Hamakaze		Anvenced Spar		Drag Embedded Anker	6
Floatgen	Barge	Ideol		Drag Embedded Anker	6
Gicon SOF	TLP	Gicon	Tethered (TRL)	Suction-Anker	6
Glosten Pelastar		Glosten		Pile- Anker	5
Blue H Semi		Blue H		-	4

Abbildung 1-55: Anker- und Mooring-Technologien analysierter Referenzsysteme

		SPAR	Barge	Semi-Sub		TLP	WDT-BT
		WDT	IDEOL	WindFloat	NREL	WDT	WDT
Anzahl der Mooringeilen	-	3	3	3	3	4	1
Tiefe Fairleads	m	33	0	23.4	14	50	100
Tiefe Anker	m	250	250	250	250	250	250
Radius Fairlead	m	10.5	51.3	44.4	58.0	37.0	0
Radius Anker	m	736.6	610.3	915.7	989.2	37.0	0
Ungedehnte Mooringeilenlänge	m	772.8	685.4	919.4	1018.8	199.5	149.9
Mooringeilen Durchmesser	m	0.123	0.123	0.105	0.185	0.246	2
Mooringeilen Dichte	kg/m	145.6	244.3	212.4	685.0	434.6	4686
axiale (Dehn-) Steifigkeit	N	9.85E+08	1.51E+09	1.93E+09	3.27E+09	1.58E+10	1.55E+12

Abbildung 1-56: Mooring-Parameter der skalierten Referenz- und Vorzugskonzepte

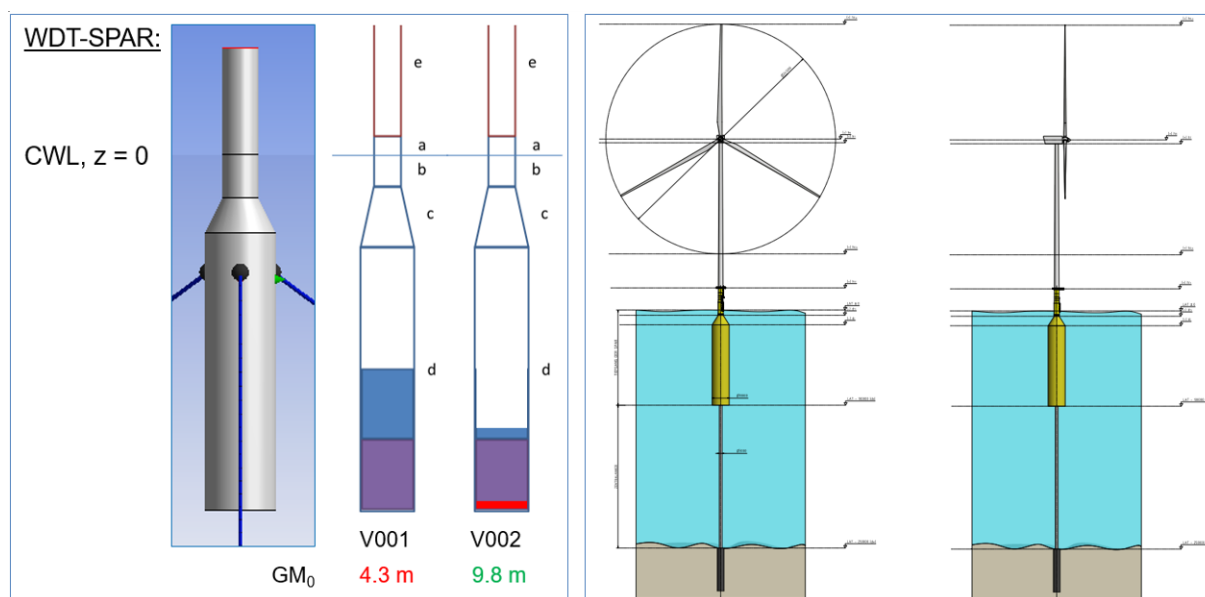


Abbildung 1-57: Spar – Catenary - Ballast-Konfiguration - Parameter für 2 Varianten

Der Konzeptionseinbezug für ausgewählte Vorzugsvarianten als Start-Sequenzen umfasst die Detaillierung der Struktur- und Hydrostatik-Konfiguration. Dafür stehen mit Abbildung 1-57 und Abbildung 1-58 die Spar-Konfigurationen mit Parametern und Werten für 2 unterschiedliche System-Entwicklungen bereit.

Konzeptannahmen:			
	L	D	
a	TP über CWL	: 30 m	10 m
b	TP unter CWL	: 12 m	10 m
c	Konus	: 10 m	10/20 m
d	Floater	: 78 m	20 m
e	Turm	: 122,4 m	konisch
T	Tauchtiefe	: 100 m	
Ballast-Variation:			
SPAR Variante	V001	V002	
Beton-Ballast	Standard	Magna-Dense	
Stahl-Masse	~ 3.750 t	~ 3.750 t	
Wasser-Ballast	~ 6.840 t	~ 250 t	
Beton-Ballast	~ 14.900 t	lose ~ 19.000 t	($\rho = 3.60 \text{ t/m}^3$)
		high density ~ 2.500 t	($\rho = 4.05 \text{ t/m}^3$)

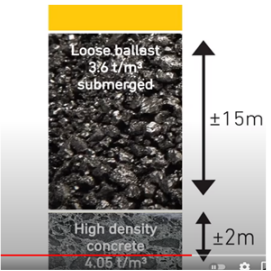


Abbildung 1-58: Spar – Catenary - Ballast-Konfiguration - Werte für 2 Varianten

Konzeptannahmen:			
	L	D	
a	TP über CWL	: 30 m	10 m
b	TP unter CWL	: 15 m	10 m
c	Konus	: 10 m	10/20 m
d	Floater	: 78 m	20 m
e	Turm	: 122,4 m	konisch
f	Konus ZA	: 20 m	20/5 m
g	Anschluss ZA	: 5 m	5 m
ZA	Zentralanker	: 122 m	4 m (geflutet)
T	Tauchtiefe	: 128 m	
Ballast:			
Stahl-Masse z_{cg}	: ~-70 m	~ 4.200 t	
ZA-Masse	: ~ 750 t		
Mooring-Anschlag	$z = -128 \text{ m}$		
Auftriebsüberschuss	$F_z \sim 25.000 \text{ t}$		

Abbildung 1-59: Spar – Zentralanker - Ballast-Konfiguration – Werte

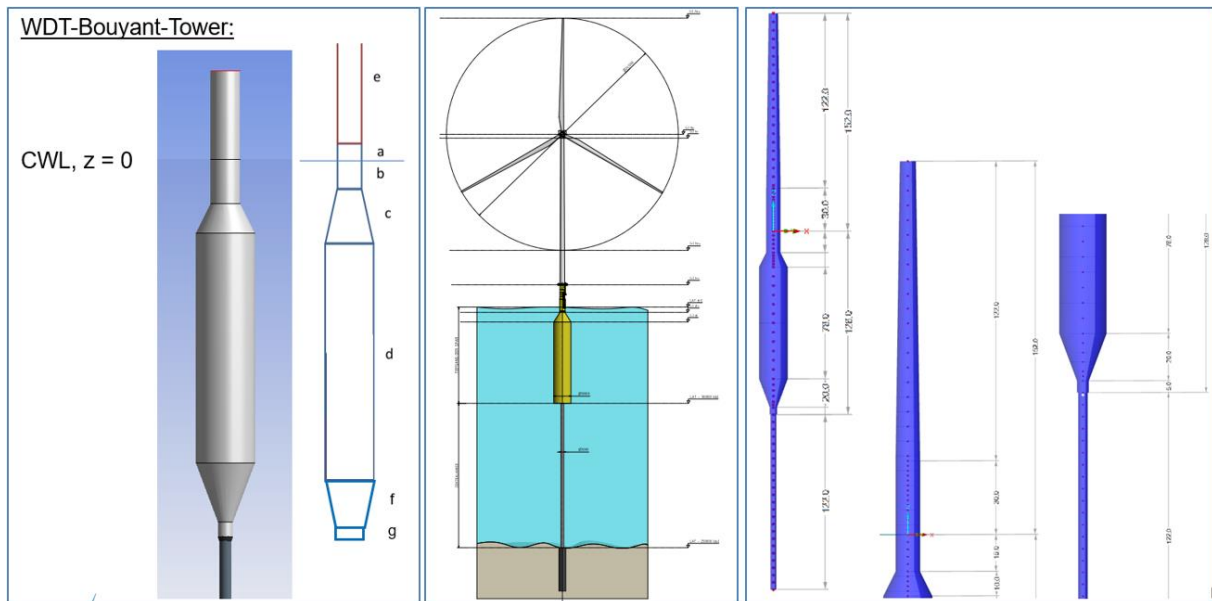


Abbildung 1-60: Spar – Zentralanker - Ballast-Konfiguration - Parameter

Systemkonzept zur Transport- und Errichter-Abfolge

Die Betrachtung der Systemkonzepte für den Transport und der Errichter-Abfolge erfolgt unter Einbindung von Schiffs- und Heavy-Load-Systemen. In Abbildung 1-61 ist die Übergabe und Übernahme der Spar-Gesamt-Konfigurationen (ohne Turm und Gondel) basiert auf der direkten Bewertung der Auftriebs- und Aufricht-Prozeduren dargestellt.

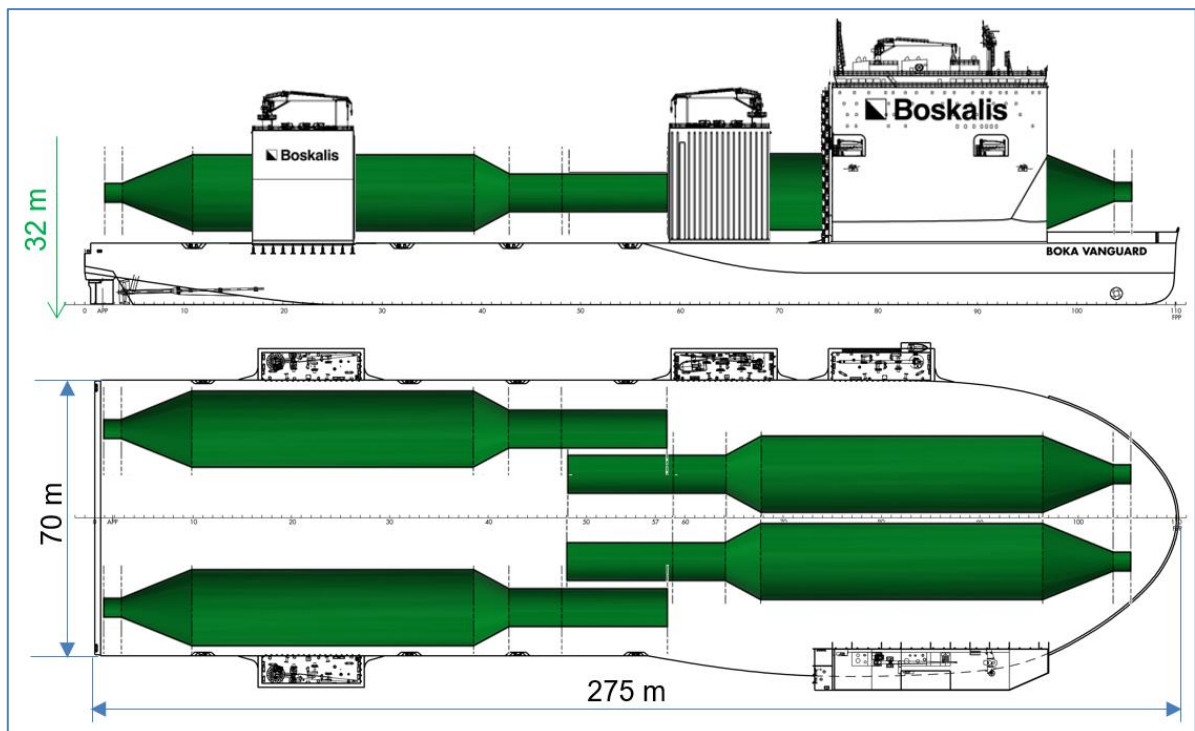


Abbildung 1-61: – Zentralanker – Schiffs- und Heavy-Load-System (Beispiel mit „Boskalis-SemiSUB-HTV - BOKA VANGUARD“)

Der Prozess des Absenkens vom Schiffskörper auf dem Prinzip Semi-Submersible wurde nicht abgebildet, da diese Prozedur eine eigenständige und äußerst komplexe Schiffstheorie erfordert. Es sind bis zu vier Floater auf dem Schiffsdeck als Beladung möglich. Die Zentralanker-Komponenten können ebenfalls in diese Konfiguration aufgenommen werden (in der Abbildung nicht dargestellt).

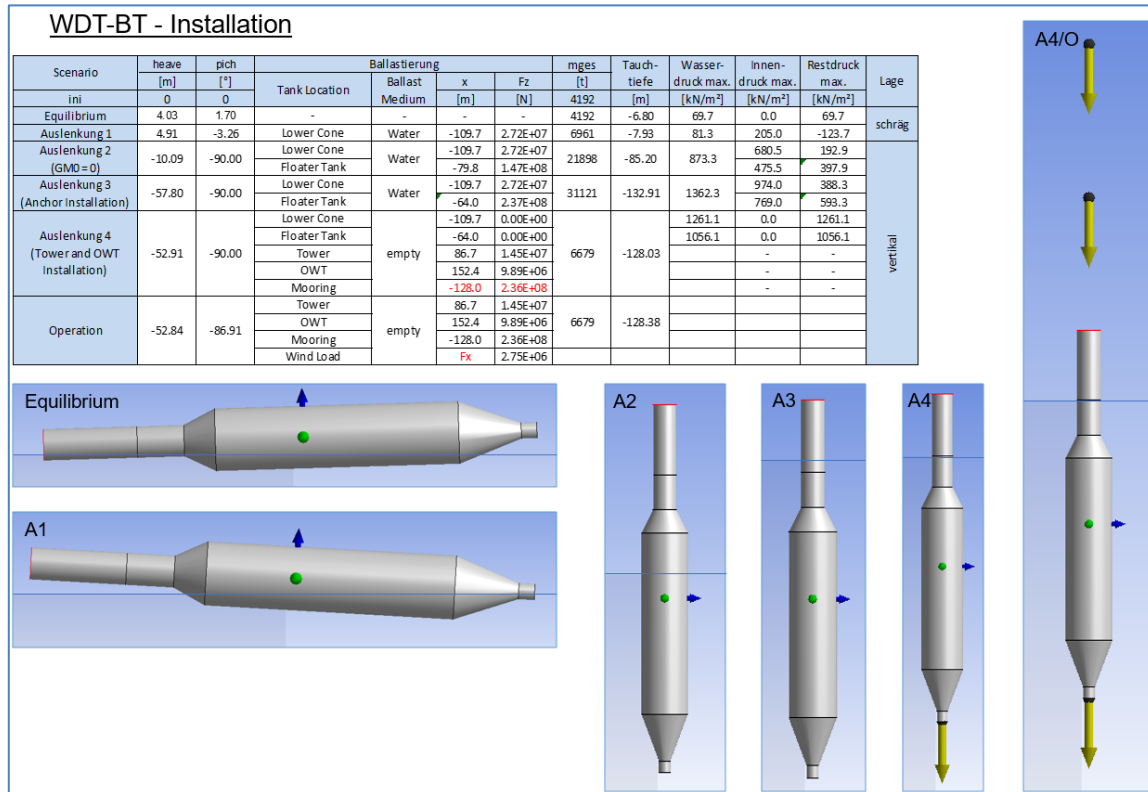


Abbildung 1-62: Spar – Zentralanker – Schiffs- und Heavy-Load-System - Bewertung der Auftriebs- und Aufricht-Prozeduren als Ergebnis der hydrostatischen Berechnungen mit ANSYS-AQWA

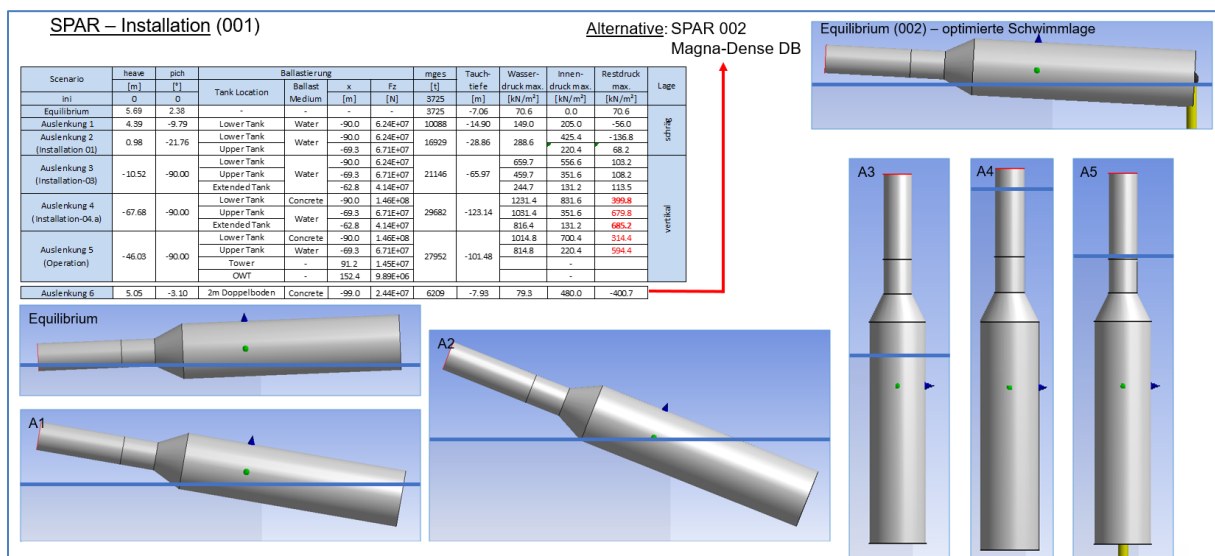


Abbildung 1-63: Spar – Catenary – Schiffs- und Heavy-Load-System - Bewertung der Auftriebs- und Aufricht-Prozeduren als Ergebnis der hydrostatischen Berechnungen mit ANSYS-AQWA

1.2.2 Alternativer Verankerungssysteme bei minimalem Footprint

Das Unterkapitel 1.2.2 beschäftigt sich mit alternativen Verankerungssystemen bei minimalen Footprint (Ankergrundfläche). Als Randbedingung für einen minimalen Footprint kann die geringstmögliche Flächenversiegelung durch den Anker, der Verzicht von umfangreichen Mooring-Ketten als auch eine reduzierte Strukturbewegung durch die tiefgetauchte Struktur benannt werden.

Mooring Systeme mit geringer Ankergrundfläche und Versiegelung

Die Sonder-Baugruppenentwicklung für Anpassungen an die Quer-Längsmodule umfasst die 3D-CAD-Entwicklung und die zugehörige Nachweisführung in FEM, siehe Abbildung 1-64.

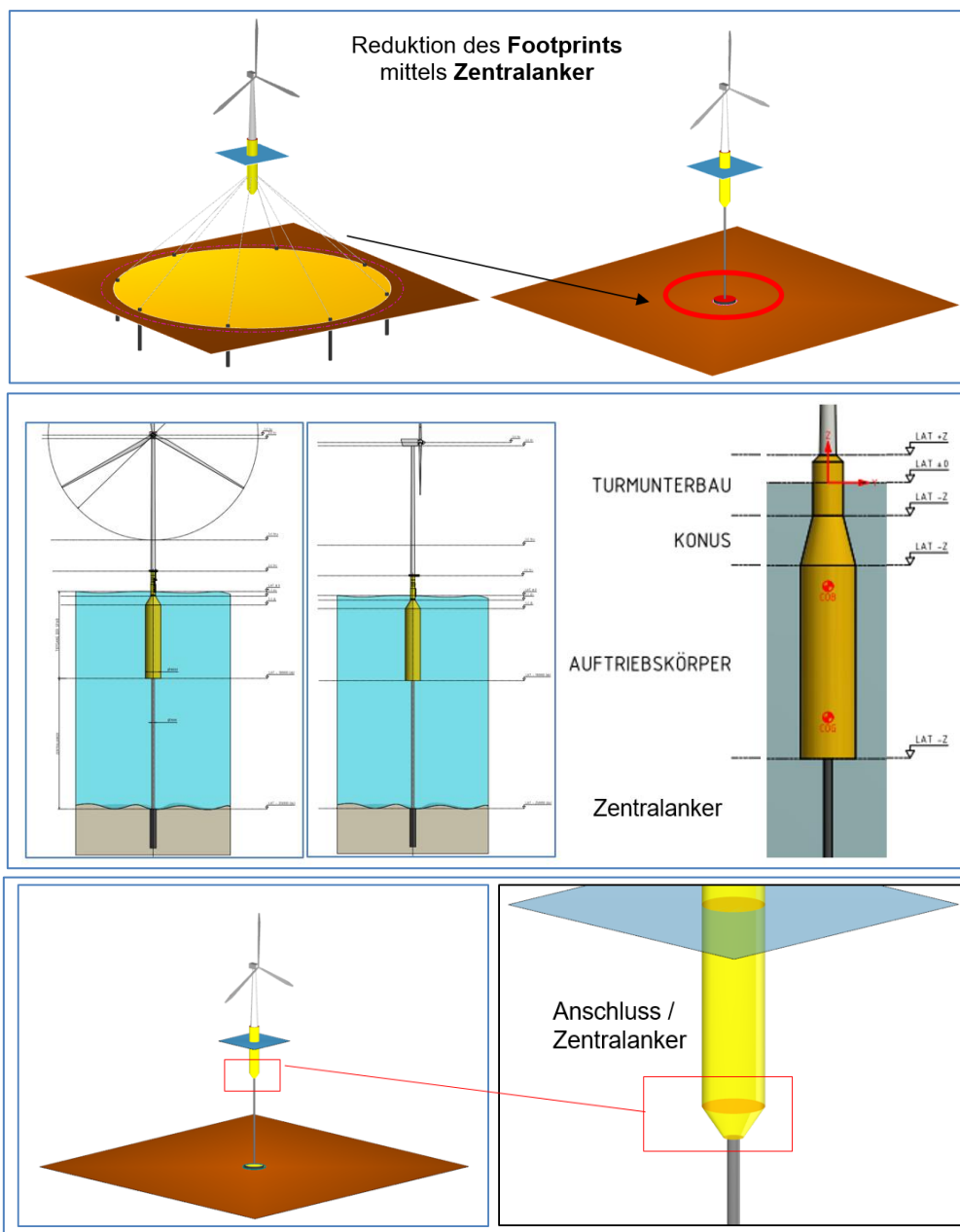


Abbildung 1-64: CAD und FEM für Zentralanker - Modellzuweisungen

Reduzierte Struktur- und Systembewegungen

In diesem Abschnitt geht es um die Reduzierung der Struktur- und Systembewegungen. In Abbildung 1-65 ist die Auslenkung sowie die Zuglast der Gründungsstruktur mit einem Zentralanker dargestellt.

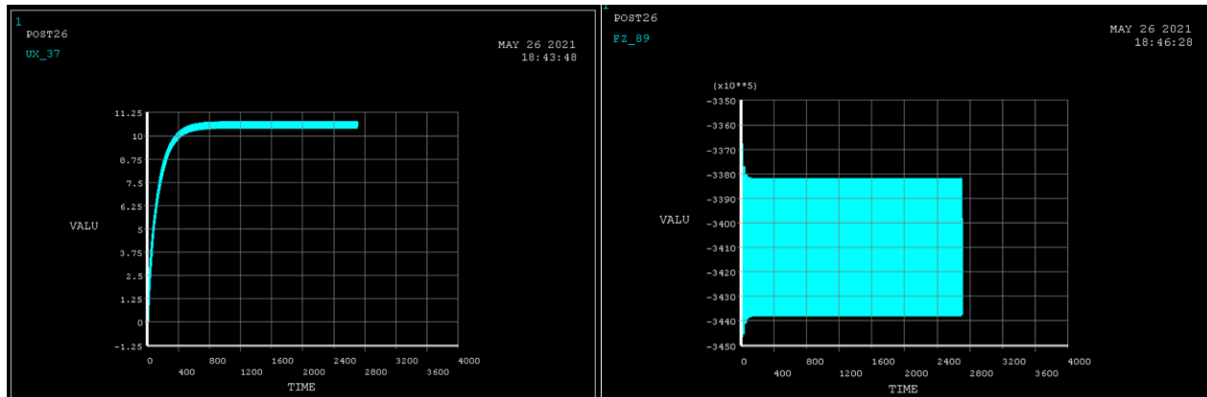


Abbildung 1-65: Auslenkung + Zuglast - Zentralanker (für angegebenen Knoten)

Das Berechnen der erforderlichen Systemsteifigkeiten in den Knotenpunkten für den Querkraftabtrag von der schwimmenden Unterstruktur in den Baugrund bildet sich mittels der Berechnungen und Baugrundverhaltens ab, siehe Abbildung 1-66.

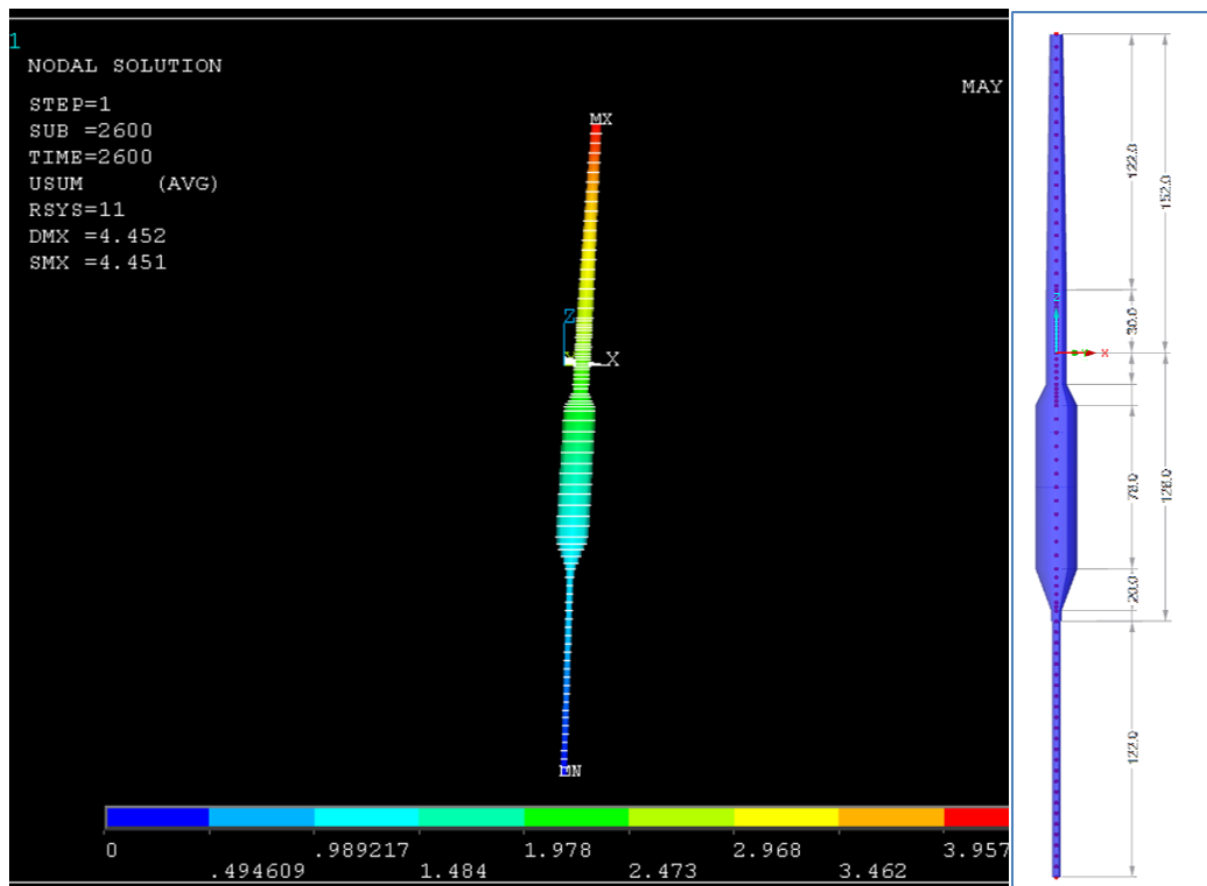


Abbildung 1-66: ANSYS-Mechanical-Modell (links) und RFEM-Modell (rechts)

Der Zentralanker als System zur Baugrundeinbindung

Als Vorzugsvariante bei der Installation der Gründungsstruktur wurde der Zentralanker identifiziert. Die Ergebnisse für Baugrund sowie zur Verankerung sind in den Abbildung 1-67 und Abbildung 1-68 dargestellt.

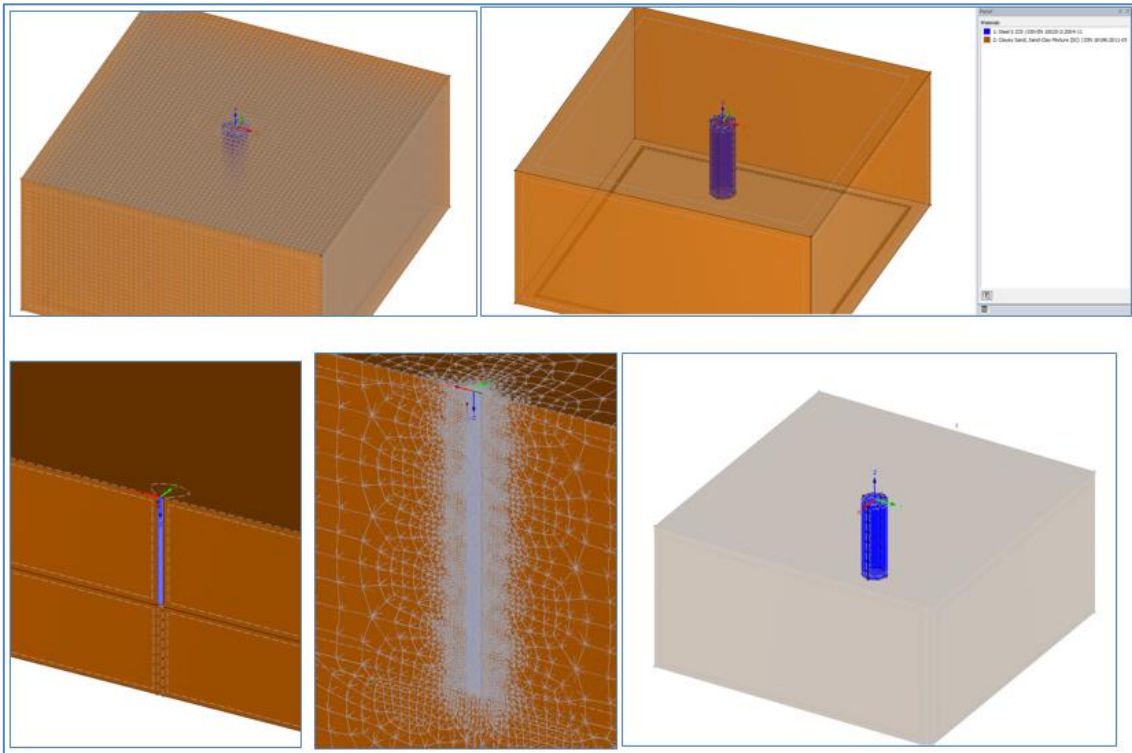


Abbildung 1-67: Baugrund-Modellierung – Zentralanker-Fundament (Drucker-Prager-Ansatz)

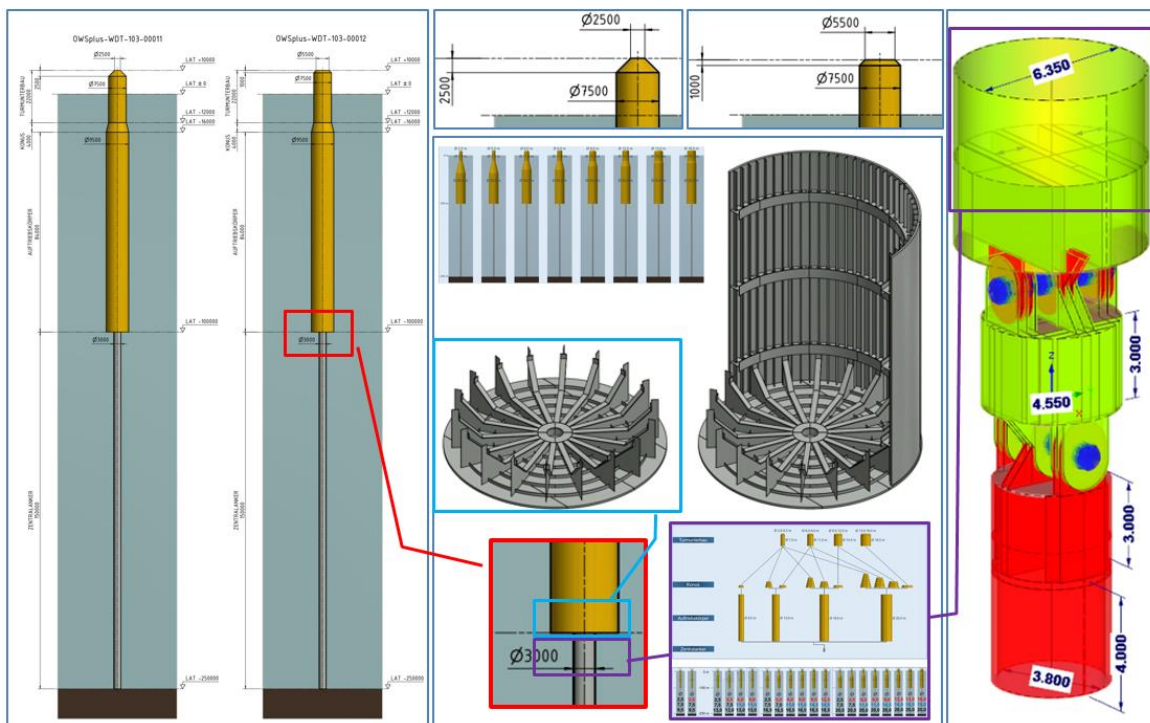


Abbildung 1-68: Skaleneffekte – Gelenk-Struktur und Einbindung in die Varianten (Durchmesser)

1.2.3 Zustandsbewertung mit Produkt-Lebenszyklus für das Maintenance

Das Unterkapitel 1.2.3 geht auf die schwimmende Zustandsbewertung mit akkumuliertem Produktlebenszyklus und digitaler Planungsstrategien für das Maintenance und Floating Controlling ein.

Zustandsüberwachung durch vernetzte CMS-Technologien

Die Validierung der ausgewählten numerischen Berechnungsmodelle anhand der simulierten Sensorausgängen (Abtastpunkte auf der Struktur) bei ausgewählten Betriebszuständen (Betrieb, Störung, Ausfall) mit der Entwicklung geeigneter und übertragbarer Schadensindikatoren führt auf ausgewählte Prozeduren entsprechend Abbildung 1-69.

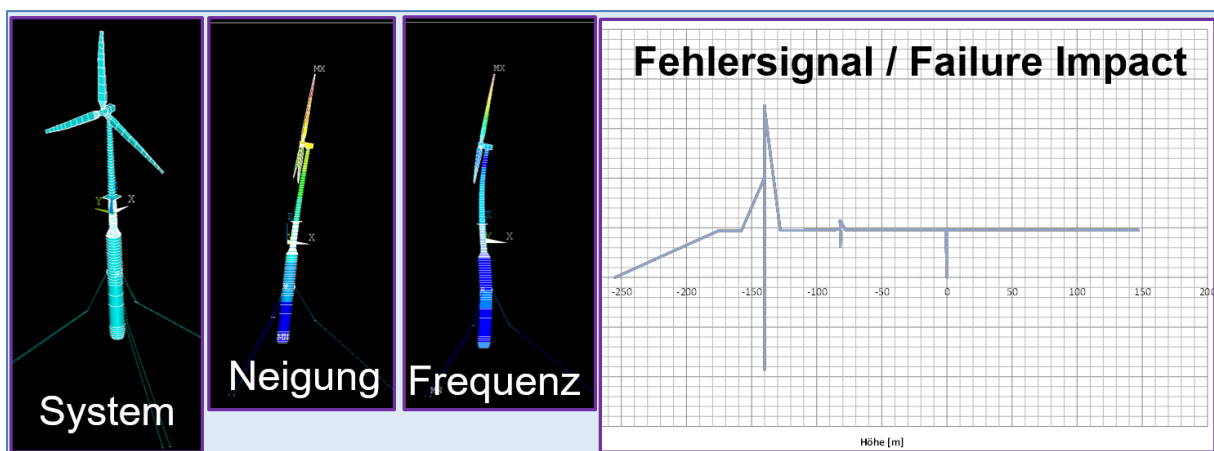


Abbildung 1-69: Systembewertungen mit Fehlersignal – Bezug auf die Bauwerkshöhe

Um zeit- und kostensparendes Monitoring für identifizierte Komponenten in FOWP realisieren zu können, wird nachfolgend ein prädiktiver Ansatz für die Verschleißbestimmung an Mooring Komponenten angewandt. Ziel dieses Monitoring- und Vorhersageansatzes ist es, Prüfanforderungen zu optimieren und zielgerichtet umzusetzen. Abbildung 1-69 veranschaulicht den Ablaufplan einer prädiktiven Verschleißbestimmung für Mooring Komponenten und vergleicht relevante Komponenten bei klassischen (Catenary) und neuartigen (ZA) Mooring-Konzepten.

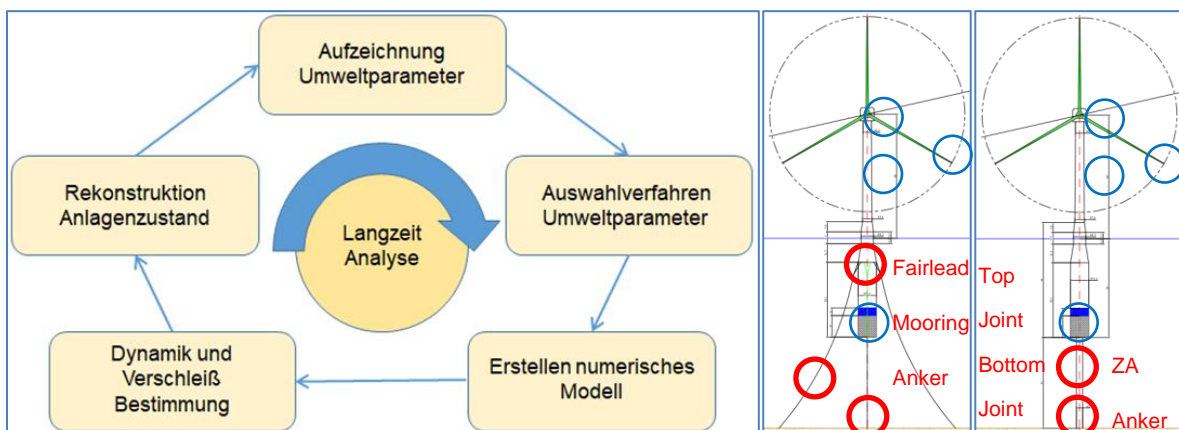


Abbildung 1-70: Ablaufschema einer prädiktiven Verschleißbestimmung für Mooring Komponenten mit Anwendungsbereichen bei klassischem und neuartigem Anker-/Mooring-Konzept

Es existieren zahlreiche CMS für FOWT. Diese sind jedoch wartungsanfällig und kostenintensiv. Um trotz geringer CMS-Dichte (~10% (BSH)) eine Zustandseinschätzung aller im Park befindlichen OWT zu generieren, wird die Methode des digitalen Zwillings (siehe Abbildung 1-71) angewendet. Dazu werden mechanischen Größen und Umweltbedingungen durch Sensornetzwerk an exemplarischer Anlage erfasst und die Validierung des mechanischen Systems über modale Größen und Simulation und Kalkulation von Materialspannungen, Lastwechseln vorgenommen.

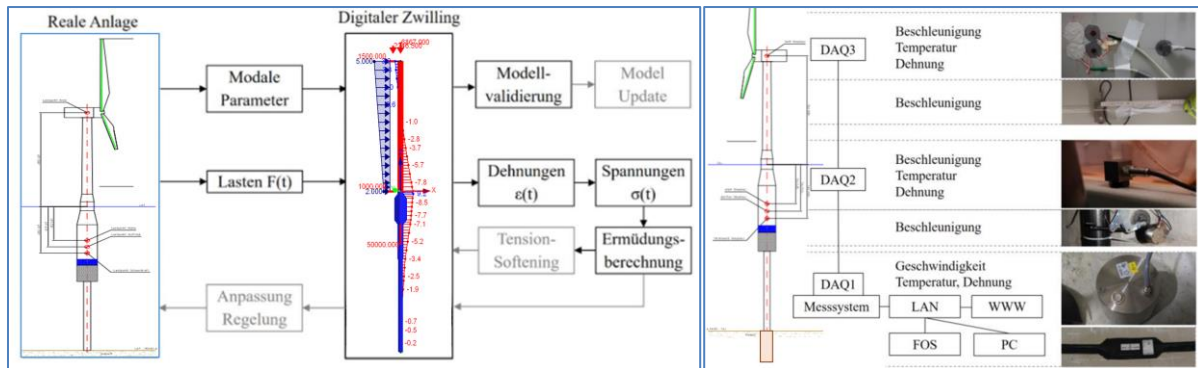


Abbildung 1-71: Schematischer CMS-Ablauf für FOWT anhand des digitalen Zwillings (abgeleitet von: Botz & Große, 2020)

Zustandsüberwachung für schwimmende Gründungsstrukturen

Die Zustandsüberwachung erfolgt für Wassertiefen größer 100m. In Abbildung 1-72 ist die Zustandsüberwachung einer Vorzugsvariante zur Schadensidentifikation abgebildet. Dafür werden die Turmkopfbeschleunigungen und Turmkopfverschiebungen fortlaufend erfasst und mit Soll-Werten verglichen.

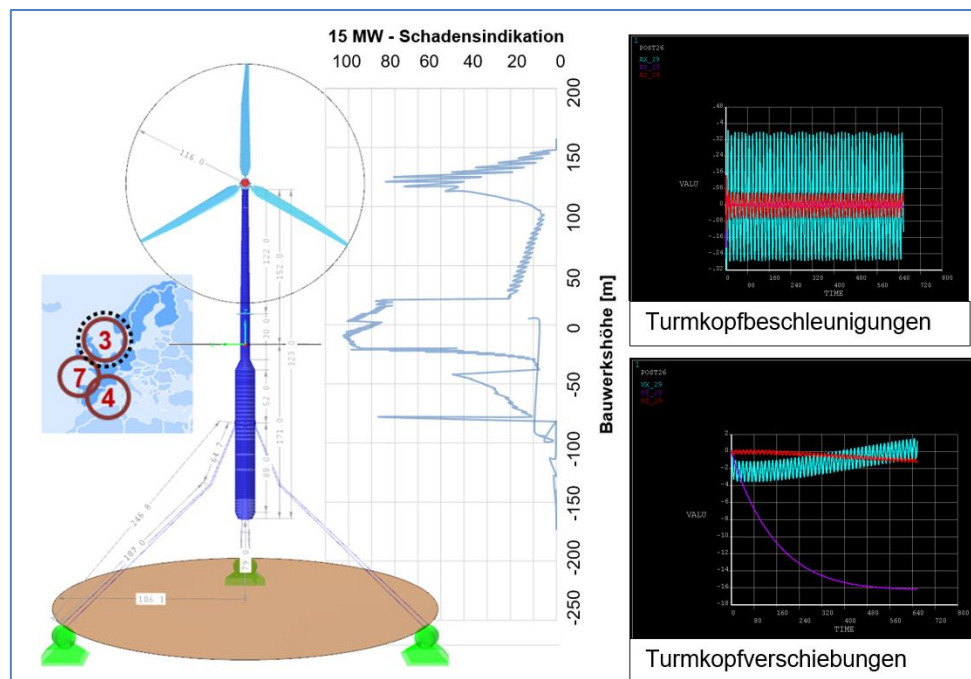


Abbildung 1-72: Schadensindikation – und Monitoring mit Beschleunigungen und Verschiebungen

Condition Monitoring Systeme an Offshore Windenergieanlagen gehören gegenwärtig zu unverzichtbaren Systemkomponenten in Offshore Windparks. Die identifizierten Anlagenzustände dienen der Parametrisierung der Sensoreinheiten. Hierfür wurden unterschiedliche „State of the Art“ Sensorapplikationen anhand des Anforderungsprofils identifiziert. Abbildung 1-73 fasst die Sensoreinheiten gemäß ihrer Messgröße und verfahrensspezifischen Messmethodik zusammen.



Nr.	Bezeichnung	Messgröße	Messmethode
Anlagendynamik			
1.1	Winkelneigung der Anlage	Neigung	MEMS
1.2	Beschleunigungssensorik	Beschleunigung	MEMS, Piezoelektrisch
1.3	Dehnungssensorik	Längenänderung	DMS, FBGS
1.4	Deflektion Flügel	Auslenkung/Neigung	Deflektionssensor
Serienspezifisch			
2.1	Monitoring Grout-Stahl-Verbindung	Längenänderung	DMS
2.2	Gasmonitoring	Salzgehalt, Sauerstoff	elektro-chemisch
Umweltbedingungen			
3.1	Kolkmonitoring	Impulslaufzeit	Piezoelektrisch
3.2	Windmessung	Impulslaufzeit	Piezoelektrisch
3.3	Dichtemessung Seewasser	Salzgehalt, Temperatur, Druck	Leitfähigkeit, PT 100, DMS
Mooring			
4.1	Tension Log	Spannung	DMS, MEMS
4.2	Inclination Log	Neigung	MEMS

Abbildung 1-73: Positionierung und Zusammenfassung der identifizierten Sensoreinheiten – Kategorisierung gemäß Messgrößen und -methoden

1.3 Fazit

Die im Forschungsvorhaben geplanten Arbeiten sind entsprechend des beantragten Arbeitszeitplans durchgeführt und abgeschlossen worden. Die Ziele des FV konnten dabei in sieben Arbeitspakete untergliedert und bearbeitet werden. Deren Ergebnisse sollen in Hinsicht auf das Gesamtvorhaben im Folgenden kurz beschrieben werden.

1.3.1 Innovative Systemträger für FOWEA

- Vielseitige selbstschwimmende Systemträger wurden für Meerestiefen von 100m bis 500m entwickelt und anhand von T&I-Anforderungen sowie der Umweltrandbedingungen bewertet
- Als selbstschwimmende Systemträger wurden Mono-Floater als auch Multi-Floater entwickelt
- Die selbstschwimmenden Systemträgervarianten sind auf Basis von Turbinendimensionen mit einem Rotordurchmesser von 240m, einer Nabenhöhen H 156m und mit einer Gondelmassen bis 1.000t entwickelt worden
- Die erforderlichen Transportkapazitäten konnten durch die entwickelten selbstschwimmenden Systemträgerstrukturen vermieden werden

1.3.2 Lastensimulation für Floating-Offshore-Windenergie-Turbinen

- Die entwickelten Systemträger wurden entsprechend exemplarisch valider Umweltrandbedingungen dimensioniert und bewertet
- Für acht exemplarische Lokationen stehen verschiedene Unterstrukturen bereit
- Technologische Aspekte und die sich daraus abgeleiteten Randbedingungen sind in die FEM-Berechnungen integriert
- Die Numerische Implementierung der FEM-Systemträger konnte durch Detailreduzierung optimiert und verbessert werden

1.3.3 Adaptive Quer-Modul-Baumethodik

- Ein modulares Design für den Systemträger einer FOWT ist realisiert
- Durch das modulare Design können die entwickelten Systemträger auf verschiedene Größenklassen skaliert und gefertigt werden
- Für die dimensionierten Turbinenstrukturen wurden Strukturdurchmesser von bis zu 20m realisiert
- Für die entwickelten Systemvarianten konnte das Baukastensystem vollständig integriert werden

1.3.4 Objekt-Design für verschiedene FOWT

- Für die entwickelten Systemträger konnte ein skalierbares Objekt-Design entwickelt werden
- Die aufgestellten Simulationstools integrieren Design, Manufacturing und Engineering für 3D-DME-Bewertungen in die Baumethodik mit Anpassungen an globale Ansprüche
- Die entwickelte Objekt- und Baumethodik gewährleistet eine „verteilte“ sowie „gleichzeitige“ virtuelle Fertigung

1.3.5 Die Betriebs- und Errichter-Technologie für FOWT

- Für den Auftrieb und den Ausgleich von Lasten wurden explizite Konfigurationen von Ballastsystemen entwickelt, die auf Turbinen ab 15MW anwendbar sind
- Für die acht betrachteten Lokationen liegen detaillierte Einsatzbedingungen für den Transport und der Installation vor
- Der Einbezug von verschiedenen Schiffssystemen ist für die entwickelten Floater anwendbar

1.3.6 Innovative Verankerungssysteme

- Die Entwicklung eines minimalen Ankersystems zum Querlastabtrag als Ersatz bisheriger Mooring Systeme mündet in die Integration eines Zentralankers mit der Einbindung in die auftriebsstabilisierte Strukturhülle (Systemträger)
- Somit konnte auch neben dem minimalen Footprint eine minimale Flächenversiegelung des Meeresbodens und der Habitat-Schutz realisiert werden
- Bei sehr großen Wassertiefen empfiehlt sich jedoch das Verankerungssystem „Catenary“

1.3.7 Zustandsbewertung für das Maintenance

- Die vereinfachte Validierung des mechanischen Modells für „schwimmende Schadensdiagnosen“ ist aufgestellt
- Die charakteristischen Systemgrößen und Schnittstellenparameter sind identifiziert und werden hinsichtlich der System- und Fehlersimulation mitberücksichtigt
- Für den Frequenz und Zeitbereich wurden Strukturantworten und deren Abweichungen vom Normalzustand erfasst und dargestellt

2 Zahlenmäßiger Nachweis

Bezüglich des Budgetumfangs für das Projekt waren keine Änderungen notwendig. Der Kostenrahmen wurde eingehalten.

Bezüglich des Zeitplans ergaben sich gegenüber dem Projektantrag keine Änderungen. Eventuell auftretende Verschiebungen der Bearbeitungsschwerpunkte konnten innerhalb des Projektablaufs ausgeglichen werden. Das Projektziel wurde durch die Anpassungen nicht gefährdet.

Eine detaillierte Auflistung der resultierenden Selbstkosten und Aufwendungen ist im separaten Verwendungsnachweis erfasst.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Forschungsvorhaben konnte – wie im Projektantrag vorgesehen – erfolgreich durchgeführt werden. Alle geplanten Ziele wurden erreicht. Es wurden keine zusätzlichen Ressourcen für die Bearbeitung aufgewandt.

4 Voraussichtlicher Nutzen hinsichtlich des Verwertungsplans

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Für die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten dienen die ausgewiesenen Umsatzziele, welche die geplante Verwertung der Ergebnisse innerhalb der Teilprojekte darstellen. Bereits umgesetzte Bereiche beinhalten:

- Konzeptentwicklung künftiger Gründungsstrukturen für WEA für Netzbetreiber als Rücklauf aus präsentierten Ergebnissen der FuE-Ergebnisse
- Erstellen von Analysen und Konzeptionen für die nächste Generation von Gründungsstrukturen
- Aufstellen von Ausschreibungsunterlagen (Deck Layout, Design Philosophie)

Geplante Bereiche avisieren:

- Entwicklung alternativer Verankerungssysteme und –Methoden
- Konzeptentwicklung einer selbstschwimmenden Gründungsstruktur
- Für die entwickelten Systemträger konnte ein skalierbares Objekt-Design entwickelt werden
- Die selbstschwimmenden Systemträgervarianten sind auf Basis von Turbinendimensionen mit einem Rotordurchmesser von 240m, einer Nabenhöhen H 156m und mit einer Gondelmassen bis 1.000t entwickelt worden

Mit der Genehmigung und Planung umfangreicher Windparks in europäischen Gewässern wird die Erschließung neuer Offshore-Gebiete weiterhin an Bedeutung gewinnen. Die Umsetzung und Vermarktung innovativer Gründungs- und Systemträgerstrukturen unter Berücksichtigung minimaler Ankerfläche, minimaler Flächenversiegelung sowie reduziertem Transport- und Errichter-Bedarf sichert hierbei die Wettbewerbsfähigkeit und die Erschließung des neuen Marktes. Hieraus lassen sich die folgenden mittel- und langfristigen Ziele ableiten:

- Weiterentwicklung der Berechnungstools und CAD-/Visualisierungstools auf Basis der im VP erreichten technologischen Ergebnisse für Wartung und Meta-Daten-Handling
- Weiterentwicklung und Vermarktung der im VP entwickelten standardisierten EÜP unter Berücksichtigung aller im VP entwickelten Teilaspekte (T&I, Standardschnittstelle, Kolkschutz, Rammschallschutz)

4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die erzielten Entwicklungen realisieren die Zielparameter im avisierten Soll-Ist-Vergleich. Die Integration innovativer, technologisch neuartiger Lösungen in Gründungs- und Systemträger-Strukturen bildet die Basis und somit einen essenziellen Beitrag zum Ausbilden leistungsfähiger Technologien als Modular oder Komplettsystem für Offshore Windparks.

Mit dem Einrichten vertikaler Entwicklungsstrukturen für das WEA-Design mit ganzheitlichem Strukturdesign und Objektplanung inklusive Wartungs- und Inspektionskonzepten sind die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten in der Marktintegration abgesichert.

Die methodischen und wissensbasierten Ergebnisse für die Entwicklungen der Gründungsstrukturen gewährleisten ein validiertes Überwinden der Soll-Ist-Differenzen sowie bestehender Markt-Hemmnisse. Die entwickelten Konzepte für selbstschwimmende Offshore Gründungsstrukturen für den Tiefenwassereinsatz ermöglichen die Weiterentwicklung und Skalierung von modularen und standardisierten Lösungen.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Anschlussfähigkeit basiert auf den erfolgreichen Ergebnissen der einzelnen Teilaufgaben in den Themenbereichen 1 bis 7. In Korrelation zu den gesetzten Meilensteinen sowie für jeden Teilbereich liegen mit Abschluss des Vorhabens wissenschaftliche Anwendungen, wirtschaftliche Anwendungen und anschlussfähige Verwertungen vor.

Für die marktfähigen Applikation sind unmittelbare Entwicklungen von Produktanwendungen an die Kunden entsprechend der vorliegenden Bedarfe bereitgestellt. Unmittelbare Erkenntnisse vom Markt und den Kunden gewährleisten problemorientierte Adaptionen und sichern den Wettbewerbsvorteil. Die zielorientierten Anwendungen fokussieren sich auf nachgewiesene Erkenntnisse für prototypische Ergebnisse zur Formgebung der Gründungsstrukturen für WEA.

Erkenntnisse aus den Eingangsanalysen, den konzeptionellen Überlegungen sowie den umfangreichen Entwurfsprozessen und Berechnungen können in weiterführende (Teil-) Projekte einfließen. Durch die Entwicklung von einzelnen Modulen ist auch die Anwendung einzelner Komponenten für neue Konzepte möglich, was die Diversität streut und somit das Marktpotential erhöht. Darüber hinaus können Designgrundsätze, die im Rahmen des Vorhabens entwickelt wurden – modulares WEA Design, alternative Verankerungen sowie schwimmfähige Gründungsstrukturen für Windenergieanlagen – der Industrie zur Verfügung gestellt werden.

Die Überführung der Erkenntnisse in die marktorientierte Projektentwicklung ermöglicht neue Anwendungen im Bereich Offshore-Wind und erschließt neue Märkte. Diese Ergebnisse können auch außerhalb von OWS Anwendungen finden.

5 Externe Fortschritte auf dem Forschungsgebiet während der Durchführung des Vorhabens

Während der Laufzeit des Forschungsprojektes gab es – nach aktuellem Kenntnisstand des Zuwendungsempfängers – keine relevanten Fortschritte oder Entwicklungen anderer Stellen auf den Gebieten des bearbeiteten Teilvorhabens.

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden ein Fachvortrag im Rahmen der Zukunftskonferenz „Wind und Maritim“ geplant. Die Konferenz wurde jedoch auf Grund der Corona-Pandemie abgesagt und auf das Jahr 2022 verschoben.

In diesem Jahr hat die Konferenz „Wind und Maritim“ ihren Fokus auf andere Themengebiete gesetzt. Das Forschungsprojekt konnte in diesem Jahr nicht präsentiert werden. Somit ist die Präsentation des Forschungsprojektes OWS^{plus} auf der Zukunftskonferenz „Wind und Maritim“ für das Jahr 2023 geplant.

Teil III - Erfolgskontrollbericht

1 Beiträge zu förderpolitischen Zielen

Die strategische und förderpolitische initiierte Zielsetzung fokussiert auf den hohen Anspruch zum wissenschaftlichen Ausbau der Kompetenzen von Unternehmen in der Region, um die Wettbewerbsfähigkeit kontinuierlich auszubauen und zu festigen. Die gebündelten Kompetenzen basieren auf dem entwickelten Know-How und dienen dem Erschließen neuer Märkte durch Erweitern der technischen Applikationen. Die Entwicklungsvorhaben in diesem Teilprojekt unterstützen die strategische Bedeutung im Verbundprojekt zum Gewährleisten und Erschließend neuer Offshore-Windparkstandorte mit folgenden Lösungszielen:

- Verbessern der ökologischen Rahmenbedingungen für den Naturschutz
 - Innovative Verankerungssysteme ermöglichen, auf Grund des reduzierten Footprint, eine minimale Versiegelung des Meeresbodens und des Benthos
 - Die Betriebs- und Errichter-Technologie reduziert die Umweltlasten, welche beim T&I auftreten
- Einbeziehung technologischer Innovationen der Fertigungsprozesse
 - Gründungsstrukturen für Gewässer mit Meerestiefen größer 100m
 - Entwicklung skalierbarer Gründungsstrukturen für den Einsatz von WEA mit verschiedenen Leistungsklassen
 - Verankerungssysteme mit minimalem Footprint und minimaler Versiegelung des Meeresbodens
- Innovation der Konstruktion durch Optimierung der Formgebung
 - Berücksichtigung der Wechselwirkung von Gründungsstruktur, WEA und Umwelt durch Einbezug unterschiedlicher Lastabtragungswege in Form unterschiedlich ausgeformter Objekt-Design-Stufen für die Schnittstellen, z. B. zwischen den Seilabspannungen, der Einbindung in die Gründungsstruktur sowie die auftretenden Kräfte am Rotor
 - Objekt-Design-Entwicklung mit skalierbaren Modulgrößen und modulare Struktur, die sowohl die Hauptlasteigenschaften als auch die Komponenten der Großausrüstung umfasst
- Erweitern der technologischen Applikationen
 - Schwimmende Gründungsstrukturen für Meerestiefen größer 100m
 - Nachweismethoden für große Wassertiefen für extrem erhöhte Lastkollektive
 - Neue Parameteraufstellung für Umweltdaten in Gebieten großer Meerestiefen
 - Technologie-Basis mit Entwurf und Design für künftige Windparks

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Rahmen des Verbundprojektes steht die anwendungsorientierte Entwicklung zum Bau von schwimmenden Unterstrukturen für Windenergieanlagen. Dabei richtet sich der Fokus auf die zukünftigen nationalen und internationalen Offshore-Wind-Märkte. Der Wachstumskern OWS^{plus} deckt eine Reihe von Kernkompetenzen aller Projektpartner für die Planung, den Bau, die Installation und den Betrieb eines kompletten Windenergieparks ab. Das Verbundprojekt 1 konzentriert sich dabei auf den Marktbereich der schwimmenden Offshore Windenergieanlagen und den dazu gehörigen Wertschöpfungsgliedern Design, Planung, Fertigung sowie Betrieb und Wartung von EÜP innerhalb der Wertschöpfungskette. Folgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele wurden mit der Bearbeitung dieses Teilvorhabens erreicht:

- **Form und Funktionsgestaltung für schwimmende Systemträger**

Die Grundlegende Aufgabe war die Entwicklung schwimmender Systemträger für Offshore Windenergieanlagen mit einer Leistung bis 15MW. Das Design ist für ein wassertiefenunabhängiges, skalierbares und halbgetauchten Trägersystem entwickelt worden. Die Erstellung einer Lokationsklassenmatrix für verschiedene Leistungsskalierungen schließt die ganzheitliche Entwicklung ab.

- **Lastensimulation für Floating Offshore-Windenergie-Turbinen**

Die Entwicklung der Lastensimulation für Floating Offshore-Windenergie-Turbinen basiert auf die Erweiterung bestehender Turbinen-Referenzdaten auf die 15MW-Anlagen. Des Weiteren erfolgte das integrieren des Systemverhaltens von Floating Offshore Windenergieanlagen und schwimmender Systemträger. Der Gesamtentwicklungsansatz ist somit die Summe aus Floating Turbine und Systemträger.

- **Technologien für die adaptive Quermodul-Baumethodik**

Die entwickelten schwimmenden Systemträger sind für maximale Design- und Laststufen anhand gewählter Beispiellokationen aufgestellt worden. Das adaptierte Design für die Gründungsstruktur ist für lokationsspezifische Anforderungen entwickelt. Die Strukturkopplung zwischen Systemträger und WEA sind im Schnittstellendesign der Quermodul-Systeme und Quermodul-Baumethodik erfasst. Die dabei entwickelten skalierbaren Baugruppen wurden technisch und logistisch aufeinander abgestimmt.

- **Objekt-Design-Methodik für verschiedene Systemträger**

Die Objekt-Design-Methodik wurde für die verschiedenen entwickelten Systemträger der Floating Offshore Windenergieanlage vorgenommen. Dabei integriert die Entwicklung die sukzessiven und simultanen Bearbeitungstools für Design- und Fertigungsentwicklung. Im Fokus steht der Einbezug von Fertigungsbedingungen aus dem Verteilen und dezentralen Einflüsse. Für den Windenergiepark (WEP) erfolgt ein Aufbau einer 3D-DME-Modellierung (CAD+CAM+CEA) für die Simulation, Planung und das Objekt-Design. Die Flexibilität der Baumethodik erfolgt aus der globalen Entwicklung des Strukturdesigns.

- **Betriebs- und Errichter-Technologie**

Die Entwicklung der Betriebs- und Errichter-Technologie mündet in eine virtuelle Systemsteuerung für die Load-Out-Technologien. Somit erfolgt die Integration von Ausgleichs- und Steuerungssystemen für die schwimmende Gründungsstruktur. Des Weiteren erfolgt die Energie- und Lastenkopplung der schwimmenden Systemumgebung. Die Schnittstellen wurden für die Entwicklung auf die Tiefseeverankerung erweitert und münden in die Entwicklung eines Zentralankers.

- **Alternative Verankerungssysteme bei minimalem Footprint**

Die Entwicklung alternativer Verankerungssysteme mündet in die Entwicklung eines innovativen Zentral-Anker-Systems mit minimalen Footprint und als Ersatz für großflächige Mooring-Verankerungen. Dabei ist die Reduktion der versiegelten Fläche mit zentralem Fundamentknoten im Meeresboden und Benthos zu benennen. Des Weiteren wurde das Zentralankersystem in die virtuelle Quer- und Längsmodul-Komponenten integriert sowie eine optimale Strukturantwort für gekoppelte Einflüsse auf die Systemsteifigkeit entwickelt.

- **Zustandsbewertung mit Produkt-Lebenszyklus für das Maintenance**

Die Zustandsbewertung für das Maintenance mündet in die Entwicklung in ein robustes und stabiles Schadensdiagnosesystem mit CMS für das Floating. Dabei wurden bei den unterschiedlich entwickelten Systemträger adaptive „Floating-Control“-Systeme realisiert. Dabei konnte die hohe Betriebssicherheit durch aktive CMS-Strategien und Predictive-Maintenance entwickelt werden.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Die Unternehmensstrategie sieht durch Vorgaben keine Anmeldung von Patenten vor, da durch das Veröffentlichen der Neuheiten die Gefahr von ungewolltem Know-How-Transfer besteht. Die erstellten Verfahren fließen unmittelbar in die Verwertung durch hochwertige Ingenieur-Dienstleistungen als Alleinstellungsmerkmale ein.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Für die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten dienen die ausgewiesenen Umsatzziele, welche die geplante Verwertung der Ergebnisse innerhalb der Teilprojekte darstellen. Bereits umgesetzte Bereiche beinhalten:

- Konzeptentwicklung künftiger schwimmender Gründungsstrukturen für Netzbetreiber als Rücklauf aus präsentierten Ergebnisse der FuE-Ergebnisse
- Aufstellen von Ausschreibungsunterlagen (Deck Layout, Design Philosophie)
- Ermitteln von Leistungsindikatoren für Raum-Funktionen und Raumpläne
- Bedienen von erhaltenen Anfragen auf Basis von Empfehlungen zur Aufstellung von Projektplänen und Leistungsbeschreibungen für geplante Pre-Design-Konzept-Entwicklungen

Geplante Bereiche avisieren:

- Systementwicklung von Gründungsstrukturen für Meerestiefen größer 100m
- Konzeptentwicklung schwimmender Gründungsstrukturen für Windenergieanlagen
- Entwicklung des Zentral-Anker-Systems

Mit der Genehmigung und Planung umfangreicher Windparks in europäischen Gewässern wird die Erschließung neuer Offshore-Gebiete weiterhin an Bedeutung gewinnen.

Die Umsetzung und Vermarktung innovativer Plattform- und Gründungsstrukturen unter Berücksichtigung smarter Form- und Funktionsgestaltung, der adaptiven Quermodulbauweise, einer intelligenten Objekt-Design-Methodik für verschiedene Systeme sowie einem reduzierten Transport- und Errichter-Bedarf sichert hierbei die Wettbewerbsfähigkeit und die Erschließung des neuen Marktes. Hieraus lassen sich die folgenden mittel- und langfristigen Ziele ableiten:

- Auftragsakquise im Bereich Offshore WEA mit Schnittstellen als Kooperation zu den beteiligten Projektpartnern um für Pre-Design-Konzept-Entwicklungen die elektrische Ausrüstung im Raumbuch funktional und masseoptimiert zu integrieren
- Applikation der Ergebnisse in verwandten maritimen Bereichen
- Weiterentwicklung der Berechnungstools auf Basis der im VP erreichten technologischen Ergebnisse für Betriebs- und Errichter-Technologie
- Weiterentwicklung und Vermarktung der im VP entwickelten standardisierten Gründungsstruktur für FOWEA unter Berücksichtigung aller im VP entwickelten Teilaspekte

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die erzielten Entwicklungen realisieren die Zielparameter im avisierten Soll-Ist-Vergleich. Die innovativen und technologisch neuartigen Lösungen bei den Gründungs- und Plattform-Strukturen bildet die Basis und somit einen essenziellen Beitrag zum Ausbilden leistungsfähiger Technologien als Modular- oder Komplettsystem im Kernbereich Offshore Wind bzw. für Offshore Windparks.

Mit dem Einrichten vertikaler Entwicklungsstrukturen für das Design der Gründungsstrukturen für Windenergieanlagen mit ganzheitlichem Objektdesign und Objektplanung inklusive Wartungs- und Inspektionskonzepten sind die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten in der Marktintegration abgesichert.

Die methodischen und wissensbasierten Ergebnisse für die Entwicklungen der Gründungsstruktur gewährleisten ein validiertes Überwinden der Soll-Ist-Differenzen sowie bestehender Markt-Hemmnisse. Die entwickelten Konzepte für selbstschwimmende Offshore Gründungsstrukturen für den Tiefenwassereinsatz ermöglichen die Weiterentwicklung sowie Skalierung von modularen und standardisierten Lösungen.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Anschlussfähigkeit basiert auf den erfolgreichen Ergebnissen der einzelnen Teilaufgaben in den Themenbereichen 1 und 7. In Korrelation zu den gesetzten Meilensteinen für jeden Teilbereich liegen mit Abschluss des Vorhabens wissenschaftliche, wirtschaftliche Anwendungen und anschlussfähige Verwertungen vor.

Für die marktfähigen Applikation sind unmittelbare Entwicklungen von Produktanwendungen an die Kunden entsprechend der vorliegenden Bedarfe bereitgestellt. Unmittelbare Erkenntnisse vom Markt und vom Kunden gewährleisten problemorientierte Adaptionen und sichern den Wettbewerbsvorteil. Die zielorientierten Anwendungen fokussieren sich auf nachgewiesene Erkenntnisse für prototypische Ergebnisse zur Formgebung der Gründungsstrukturen der Windenergieanlagen und der Einzelapplikation für die entwickelten Gründungsstrukturen.

Erkenntnisse aus den Eingangsanalysen, den konzeptionellen Überlegungen sowie den umfangreichen Entwurfsprozessen und Berechnungen können in weiterführende (Teil-) Projekte einfließen. Durch die Entwicklung von einzelnen Modulen ist auch die Anwendung einzelner Komponenten für neue Konzepte möglich, was die Diversität streut und somit das Marktpotential erhöht. Darüber hinaus können Designgrundsätze, die im Rahmen des Vorhabens entwickelt wurden – Form- und Funktionsgestaltung der schwimmenden Unterstrukturen, adaptive Quer-Modul-Baumethodik, Objekt-Design und die reduzierte Transport- und Errichter-Technologie – der maritimen Industrie zur Verfügung gestellt werden.

Die Überführung der Erkenntnisse in die marktorientierte Projektentwicklung ermöglicht neue Anwendungen im Bereich Offshore-Wind und erschließt neue Märkte. Diese Ergebnisse können auch außerhalb von OWS^{plus} Anwendung finden.

4 Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Es konnten zu allen im Projektantrag formulierten Aufgaben Lösungen erarbeitet werden.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden ein Fachvortrag im Rahmen der Zukunftskonferenz „Wind und Maritim“ geplant. Die Konferenz wurde jedoch auf Grund der Corona-Pandemie abgesagt und auf das Jahr 2022 verschoben.

In diesem Jahr hat die Konferenz „Wind und Maritim“ ihren Fokus auf andere Themengebiete gesetzt. Das Forschungsprojekt konnte in diesem Jahr nicht präsentiert werden. Somit ist die Präsentation des Forschungsprojektes OWS^{plus} auf der Zukunftskonferenz „Wind und Maritim“ für das Jahr 2023 geplant.

Das Unternehmen Neue Warnow Design & Technology GmbH führt eine auf die Forschungsergebnisse ausgerichtete, zeitgemäße Kampagne über die eigene, neu gestaltete Website durch. Die spiegelt die Highlights der FuE-Ergebnisse wieder und dient als Baustein zur Akquise für die Verwertungsphase. Zudem erfolgt ein Vermitteln der aktuellen Inhalte auf der Unternehmensseite auf LinkedIn, um die Multiplikation in der Vernetzung mit unseren Kontakten zu erzielen.

6 Einhaltung der Ausgaben und Zeitplanung

Bezüglich des Budgetumfangs für das Projekt waren keine Änderungen notwendig. Der Kostenrahmen wurde eingehalten.

Bezüglich des Zeitplans ergaben sich gegenüber dem Projektantrag keine Änderungen. Eventuell auftretende Verschiebungen der Bearbeitungsschwerpunkte konnten innerhalb des Projektablaufs ausgeglichen werden. Das Projektziel wurde durch die Anpassung nicht gefährdet.

Eine detaillierte Auflistung der resultierenden Selbstkosten und Aufwendungen ist im Verwendungsnachweis erfasst.

Neue Warnow Design & Technology GmbH

Dr.-Ing. Thomas Schuricht

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart <div style="text-align: center;">Schlussbericht</div>	
3. Titel <div style="text-align: center;"> OWS^{plus} – Floating Offshore Wind Solution VP1 – Schwimmende Unterstrukturen / TP1.B – System- und Objekttechnologie zur Entwicklung schwimmender Unterstrukturen </div>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Schuricht, Thomas	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juli 2022	
	6. Veröffentlichungsdatum	
	7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Neue Warnow Design & Technology GmbH Am Strande 18 18055 Rostock	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen <div style="text-align: center;">03WKDC1B</div>	
	11. Seitenzahl 68	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Kapelle-Ufer 1 10117 Berlin </div> <div> Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich </div> </div>	13. Literaturangaben 0	
	14. Tabellen 1	
	15. Abbildungen 74	
16. Zusätzliche Angaben Keine		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung <div> 1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik Die Technologie für die Installation von Offshore Windenergieanlagen ist derzeit nur für Offshore Lokationen mit Wassertiefen bis maximal 80 m entwickelt. Für Meerestiefen $d \gg 100\text{m}$ liegen nur wenige Systemlösungen vor. Die Hindernisse resultieren aus weiter entfernten Offshore Lokation, den vorherrschenden extremen Umweltbedingungen, die mit der Meerestiefe ansteigenden Kosten, hohen Anforderungen an Zustandsdiagnose für Wartung / Instandhaltung. Eine Serienfertigung und Standardisierung basiert bislang nur für sehr wenige Pilotprojekte. </div> <div> 2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung Gegenstand des innovativen regionalen Wachstumskerns OWS^{plus} ist die Entwicklung schwimmender Unterstrukturen zur Aufnahme von Offshore Windenergieanlagen mit einer Turbinenleistung von mindestens 15MW. Die Zielsetzung des Teilvorhabens umfasst die Entwicklung zum Design, Verankerung, Auftriebskörper und die Übergangskomponenten des Turms. Dabei werden Umwelt- und Technologielasten einer Floating Offshore Windenergie Anlage (FOWEA) mit $P=15\text{MW}$ mit einbezogen sowie die Einsatzwassertiefe für $d \gg 100\text{m}$ bei unterschiedlichem Baugrund. </div> <div> 3. Methode Es ergeben sich Aufgaben auf dem Gebiet der Analyse, Konzeption, Entwicklung und der Integration zur Auslegung einer tiefwassertauglichen schwimmenden Unterstruktur für FOWEA (Applikation von CFD und FEM). Die Entwicklung der Unterstruktur erfolgt mit Hilfe eines modular aufgebauten Baukastensystems für die vernetzte Planung unterschiedlicher Systeme. Die entwickelten Methoden finden Anwendung im adaptiven Modul-Design und in der Anwendung auf numerische Schadensdetektionen für Messwertsysteme. </div> <div> 4. Ergebnis Ergebnisse sind die Erarbeitung einer tiefwassertauglichen, standardisierten und modular aufgebauten Unterstruktur für Offshore Windenergieanlagen. Des Weiteren sind numerische Vorhersage-Modelle für Schadensereignisse erarbeitet. Für das Condition Monitoring System (CMS) sind effizient gewählte abtastpunkte der Messwertsysteme realisiert. </div> <div> 5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten Für die Neue Warnow Design & Technology GmbH ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten der Projektergebnisse: <ul style="list-style-type: none"> - Design Basis und Design Brief mit CFD- und FEM-Nachweisführung der Unterstruktur-Systemmodule - Konzeptionierung und Projektierung mit Messwert-Vorbereitung für Zustandsvorhersagen - Aufstellen von CAD-Modellen für Lösungen mit minimalen Footprint auf Basis des Zentralankers Die Neue Warnow Design & Technology GmbH beabsichtigt, sich weiterhin auf dem Markt für Entwurfsleistungen von T&I-Systemen und numerischen Schadensdiagnosemethoden für OWEA-Komponenten zu etablieren. </div>		
19. Schlagwörter Floating Offshore Wind, Floating Offshore Windturbine, Minimaler Footprint, Zentralanker, Catenary		
20. Verlag	21. Preis	