






Ersatzdokument

Konzept zur Bemessung zyklischer Einwirkungen - Bemessung der Monopile-Gründungen

03.06.2022

REVISION	ERSTELLT		GEPRÜFT		FREIGEGEREN	
	Name	Datum	Name	Datum	Name	Datum
1	 Colline Behr	25.05.2022	 Stefanie Lorenz	03.06.2022	 Andreas Iffländer	03.06.2022

Gedruckte Ausfertigungen unterliegen keiner Dokumentenkontrolle.



Inhalt

Abkürzungen	1
Abbildungsverzeichnis.....	2
Revisionshistorie	3
Ergänzende / Mitgeltende Unterlagen	3
1 Veranlassung	4
2 Zweck des Ersatzdokuments	5
3 Konzept zur Berücksichtigung zyklischer Lasten	5
3.1 Angewandte Regelwerke, Normen und Standards	5
3.2 Umfang und Gegenstand der Prüfung.....	6
3.3 Ergebnis	9
4 Inhaltsverzeichnis des Originals	9



**Änderungsantrag
Offshore Windpark Gennaker**
- Ersatzdokument Zykliskonzept
OWEA Monopile-Pfähle -



Abkürzungen

KÜRZEL	BEDEUTUNG
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnungen
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
GBG	Geschäfts- und Betriebsgeheimnisse
JBO	JÖRSS BLUNCK ORDEMANN GmbH
LEP M-V	Landesraumentwicklungsprogramm Mecklenburg-Vorpommern 2016
OSS	Offshore Substation / Umspannplattform
OWEA	Offshore Windenergieanlage
OWP	Offshore Windpark
StUK	Standarduntersuchungskonzept des BSH
USP	Umspannplattformen
TdV	Träger des Vorhabens
WEA	Windenergieanlage, hier: Offshore-Windenergieanlage

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Inhaltsverzeichnis des Originals, Seite 1 9
Abb. 2: Inhaltsverzeichnis des Originals, Seite 2 10
Abb. 3: Inhaltsverzeichnis des Originals, Seite 3 10



Revisionshistorie

REVISION	KAPITEL	ÄNDERUNG	VON
1	1, 2	Aktualisierung gem. Änderungsantrag	CBE

Allgemeiner Hinweis:

© Dies ist ein vertrauliches Dokument. Die Urheberrechte liegen bei der OWP Gennaker GmbH (wpd); das Dokument darf nicht ohne schriftliche Genehmigung verwendet oder vervielfältigt werden. Sollten Ihnen Unstimmigkeiten zwischen den von wpd bereitgestellten Dokumenten / Informationen und projektspezifischen Normen, Richtlinien und Regeln (z.B. in der Design Basis) oder Dokumenten / Informationen, die von anderen Vertragspartnern oder Dritten bereitgestellt werden, auffallen oder Sie Unstimmigkeiten innerhalb der Dokumente von wpd bemerken, informieren Sie wpd bitte unverzüglich.

Ergänzende / Mitgeltende Unterlagen

DOKUMENTENTITEL	STAND

Wenn nicht anders hier genannt, gilt immer die aktuelle Version der hier aufgeführten Dokumente

1 Veranlassung

Die OWP Gennaker GmbH besitzt seit dem 15.05.2019 eine Baugenehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) zur Errichtung und zum Betrieb des OWP Gennaker im Wind-Vorranggebiet „Darß“. Der geplante Standort des OWP Gennaker liegt auf einem im Juni 2016 durch das Land Mecklenburg-Vorpommern im Landesraumentwicklungsprogramm (LEP M-V) ausgewiesenen Vorranggebiet für die Offshore-Windenergie in der westlichen Ostsee, ca. 15 km nördlich der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst. Das Vorhaben umschließt den bereits bestehenden OWP EnBW Baltic 1.

Das genehmigte Konzept des Vorhabens basiert auf der zum Planungszeitpunkt größtmöglichen Turbine der Fa. Siemens Wind Power SWT-8.0-154 mit einer Leistung von max. 8,4 MW inkl. Power Boost. Dieser Turbinentyp stand zum Zeitpunkt des Genehmigungsantrags an der Schwelle zur Markteinführung.

Höchste Standards und Komplexität sind kennzeichnend für das Projekt.

Im Zuge der Vorverhandlungen hat der Turbinenlieferant nun darüber informiert, dass der in der Genehmigung festgelegte Turbinentyp zum Zeitpunkt der geplanten Installation im Jahre 2026 nicht mehr zur Verfügung stehen wird, weil in dem entsprechenden Fertigungswerk bereits jetzt eine Umstellung auf die 15-MW-Turbinenklasse erfolgt ist.

Alternativ hat die Fa. Siemens Gamesa Renewable Energy (SG RE, vorher Siemens Wind Power) angeboten aus einem Fertigungswerk in Frankreich eine zu diesem Zeitpunkt verfügbare, aber weiterentwickelte Turbinenversion auf Grundlage der gleichen Plattform, aber mit einem Rotordurchmesser von D=167m, hier die **SG 167-DD**, zu liefern.

Aufgrund dessen ist die Änderung der bestehenden Genehmigung auf den zum geplanten Installationszeitraum der Turbine verfügbaren Anlagentyp SG 167-DD unumgänglich, weshalb die Trägerin des Vorhabens (TdV) ein Änderungsverfahren gem. §16 BImSchG (wesentliche Änderung) durchführt.

Es ist die Installation von 103 Offshore-Windenergieanlagen (WEA) der 9,0 MW Klasse vorgesehen. Die Bauhöhe der OWEA wird max. 190 m betragen. Die Rotoren der OWEA besitzen einen Rotordurchmesser von 167 m. Zu Nebeneinrichtungen gehören zwei Umspannplattformen und die interne Parkverkabelung.

Für die Genehmigung des Vorhabens ist ein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren mit obligatorischer Umweltverträglichkeitsuntersuchung durchzuführen. Im Zuge des Genehmigungsverfahrens werden entsprechend der

Regelungsbereiche verschiedener Fachgesetze und untergesetzlicher Regelwerke die jeweils betroffenen Fachbehörden am Verfahren beteiligt. Entsprechend § 13 BImSchG schließt die Genehmigung die Entscheidungen und Prüfungen der beteiligten Behörden mit konzentrierender Wirkung mit ein.

Bestandteil des Genehmigungsantrags sind u. a. die Baulichen Unterlagen und damit in Verbindung stehende Studien und Fachgutachten. Diese Dokumente sind überwiegend rein technischer Natur oder, wie z. B. im Falle der Geotechnik, enthalten Informationen, die als Grundlage für die technische Planung und Dimensionierung erforderlich sind.

Der TdV hat speziell Antragsdokumente dieser Kategorie nach § 10 Abs. 2 BImSchG als Geschäfts- und Betriebsgeheimnisse (GBG) gekennzeichnet und getrennt eingereicht. Damit werden sie als vertraulich eingestuft und nur den zuständigen Fachbehörden bekannt gemacht.

2 Zweck des Ersatzdokuments

Die im Antrag als GBG vertraulich eingestuften Dokumente für die Öffentlichkeitsbeteiligung werden nicht ersatzlos gestrichen. Vielmehr tritt an diese Stelle ein Ersatzdokument, in dem der wesentliche Inhalt des Originals zusammengefasst wird. Der Inhalt der Ersatzdokumente ist so dargestellt, dass es Dritten möglich ist, zu beurteilen, ob und in welchem Umfang sie von den Auswirkungen der Anlage betroffen sein können.

Nachfolgend wird der Inhalt des als GBG gekennzeichneten Dokuments „**Konzept zur Berücksichtigung zyklischer Einwirkungen – Bemessung der Monopile-Gründungen**“ (ACP Grundbauplanung, 01.08.2017) zusammenfassend dargestellt.

Die Änderung des Turbinentyps hat keinen Einfluss auf die im o.g. Dokument dargestellten Ergebnisse. Es ergeben sich keine Änderungen. Alle Aussagen behalten weiterhin uneingeschränkt ihre Gültigkeit.

3 Konzept zur Berücksichtigung zyklischer Lasten

3.1 Angewandte Regelwerke, Normen und Standards

Nachstehende Standards/Richtlinien und Empfehlungen wurden von JBO als maßgebend festgelegt:

- [R01] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Standard Baugrunderkundung für Offshore-Windenergieparks, 1. Fortschreibung, 9th April 2008
- [R02] Federal Maritime Agency – BSH (2015): „Standard Design“, Edition 28th July 2015
- [R03] „EA-Pfähle“: Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, Verlag ernst & Sohn, 2. Auflage, 2012
- [R04] American Petroleum Institute (API), Recommended Practice 2 GEO, Geotechnical and Foundation Design Considerations, 1st Edition, April 2011 and Addendum 1st October 2014
- [R05] DNVGL (2016): Standard DNVGL-ST-0126, Support structures for wind turbines, Edition April 2016
- [R06] Det Norske Veritas, Classification Notes No. 30.4, Foundations, 2. 1992

3.2 Umfang und Gegenstand der Prüfung

Das Konzept dokumentiert die Berücksichtigung zyklischer Einwirkungen in der geotechnischen Bemessung der OWEA Monopile Gründungen.

ACP wurde durch JBO beauftragt, die geotechnische Vorbemessung der OWEA Monopile-Gründungen vorzunehmen. Gemäß den Erläuterungen des Prüfsachverständigen ist bereits im Rahmen des Vorentwurfs ein vorläufiges Konzept zur Berücksichtigung zyklischer Einwirkungen „Zyklikkonzept“ vorzulegen. Abstimmungsgemäß ist dieses vorläufige Konzept im Rahmen des Basic Designs fortzuschreiben.

ACP legt in diesem vorläufigen Konzept zur Berücksichtigung zyklischer Einwirkungen zunächst das Tragverhalten und die Widerstände bei zyklischen Einwirkungen dar. Im Rahmen dessen werden die unterschiedlichen bodenmechanischen Effekte bei unterschiedlichen Bodenlagerungsdichten und deren Reaktion auf zyklische Einwirkungen dargestellt. Basierend auf den bodenmechanischen Eigenschaften lassen sich grundsätzlich zwei Schädigungsmechanismen unterscheiden, die Tragfähigkeitsdegradation sowie die Verformungsakkumulation.

Nach Darstellung der grundsätzlichen Prinzipien werden die zyklischen Einwirkungen und daraus resultierende Lastszenarien dargestellt. Für die geotechnische Analyse sind zyklische Belastungen für das maßgebliche Sturmereignis (hier: BSH 35 h Sturm) und für die gesamte Lebensdauer der Anlage zu ermitteln. Gemäß [R02] ist zu berücksichtigen, dass das Extremlastereignis (z. B. die 50-Jahreswelle) nicht autark auftritt, sondern in einem 35 Stunden andauernden Sturmereignis eingebettet ist. Gemäß den Spezifikationen in [R02] sind die gesamten zyklischen Belastungen des Sturmereignisses beim Nachweis der Tragfähigkeit explizit zu berücksichtigen. In [R02] wird der 35-stündige Bemessungssturm definiert, welcher sich über 17,5 Stunden aufbaut, bevor das Bemessungsereignis eintritt und sich der Sturm anschließen über 17,5 Stunden abschwächt. Das Sturmereignis kann dabei in fünf Phasen mit konstanten Umweltbedingungen unterteilt werden. Die zyklischen Belastungen des Sturmereignisses sind am Gesamtmodell bestehend aus Monopile, Turm und Windturbine im Zeitbereich zu simulieren.

Für die Ermittlung der zyklischen Belastung der gesamten Lebensdauer sind die über die Lebensdauer auftretenden Betriebslastfälle auszuwerten und aufzusummieren. Dieses sogenannte FLS Lastkollektiv beinhaltet explizit nicht die zyklische Belastung aus dem 35 Stunden Sturm. Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (SLS Nachweis) sind daher die Auswirkungen des ULS und FLS Lastkollektivs getrennt zu analysieren und nachfolgend zu superponieren. Betriebslastfälle für den SLS-Nachweis sind in den Design Load Cases (DLC) nicht separat definiert. Daher wird in Anlehnung an die Bemessungspraxis auf die stahlbaulichen FLS Lastkollektive zurückgegriffen, deren zugehörige Schädigungen im Allgemeinen als konservativ anzusehen sind. Die Auswertung der Betriebslastfälle (bzw. Betriebsfestigkeitslastfälle) erfolgt analog zur Auswertung des 35-Stundensturms.

Im Abschnitt 7 werden die axialen Bodenwiderstände dargelegt. Die Ableitung zyklischer axialer Pfahltragfähigkeiten und Verformungen sollte im Idealfall auf Basis von zyklischen Pfahlversuchen im Originalmaßstab auf dem vorgesehenen Baufeld erfolgen. Dieses Vorgehen ist nach Einschätzung von ACP jedoch weder technisch noch wirtschaftlich darstellbar. Alternativ wird daher in Anlehnung an die Offshore-Praxis eine Bemessung auf Basis von empirischen Verfahren vorgesehen. Diese Vorgehensweise wird in der Offshore-Windindustrie ohne dokumentierte Schäden seit über einer Dekade erfolgreich praktiziert. Daher werden im Kapitel 7 zunächst die statischen Bodenwiderstände für unterschiedliche Bodenarten erläutert. Darauf aufbauend wird auf die Ableitung zyklischer Bodenwiderstände im allgemeinen und projektspezifisch dargelegt. Eine Abminderung der Mantelreibung ist nur für Pfähle mit relevanter zyklischer Belastung (zyklische Amplitude > 0,1·Tragfähigkeit) vorgesehen. Konstruktionsbedingt sind derart hohe zyklisch axiale Belastungen bei Monopile-

Gründungen nicht zu erwarten. Folglich werden keine dezidierten Nachweise hinsichtlich der zyklisch axialen Belastung vorgenommen.

Im Abschnitt 9 werden die lateralen Bodenwiderstände dargelegt. Die Ableitung zyklischer lateraler Pfahltragfähigkeiten und Verformungen sollte im Idealfall auf Basis von zyklischen Pfahlversuchen im Originalmaßstab auf dem vorgesehenen Baufeld erfolgen. Dieses Vorgehen ist nach unserer Einschätzung jedoch hier weder technisch noch wirtschaftlich darstellbar. Alternativ wird daher in Anlehnung an die Offshore-Praxis eine Bemessung auf Basis von empirischen Verfahren vorgesehen. Diese Vorgehensweise wird in der Offshore-Windindustrie ohne dokumentierte Schäden seit über einer Dekade erfolgreich praktiziert.

Daher werden im Kapitel 9 zunächst die statischen lateralen Bodenwiderstände für unterschiedliche Bodenarten erläutert. Darauf aufbauend wird auf die Ableitung zyklischer Bodenwiderstände im allgemeinen und projektspezifisch dargelegt. Die Berücksichtigung zyklischer Lasteffekte erfolgt hier wie praxisüblich durch Anwendung zyklischer p-y Kurven, d.h. durch Modifizierungen der statischen p-y Kurven welche der Tragfähigkeitsdegradation und Verformungsakkumulation Rechnung tragen. Die in der Bemessung berücksichtigten Modifikation der p-y Kurven sind im Kapitel 9 für die einzelnen Bodenarten separat dargelegt.

Im Abschnitt 10 werden die notwendigen Nachweisführungen für zyklisch laterale Lasten an OWEA Monopile-Gründungen vorgestellt. Eine Vorbemessung kann anhand des Pfahllängenkriteriums erfolgen. Die Anwendung des Pfahllängenkriteriums dient der Sicherstellung der Stabilität des Pfahl-Boden-Systems unter zyklischen Einwirkungen. Obgleich es sich hierbei um ein Vorbemessungskriterium handelt sind die Erfordernisse des Kriteriums in der Bemessung zu berücksichtigen, d. h. resultieren aus den ULS und SLS Nachweisen geringere erforderliche Pfahllängen als aus dem Pfahllängenkriterium (wie üblicherweise der Fall) ist dennoch die (größere) Pfahllänge des Kriteriums maßgebend. Hinsichtlich der Formulierung des Pfahllängenkriteriums soll den Empfehlungen des Baugrund- und Gründungsgutachten (Entwicklungsphase) gefolgt werden.

Zudem werden die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit vorgestellt und diskutiert. Die Analyse im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) dient der Sicherstellung einer ausreichenden Standsicherheit der Gesamtstruktur. Der Nachweis einer ausreichenden Standsicherheit lässt sich durch den Abgleich von integrierten Bemessungspressungen B_d und Bemessungswiderständen E_{phk} führen. Hierbei sind die jeweils gültigen p-y Kurven entsprechend des vorliegenden Bodens anzuwenden. Die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit lässt sich durch Abgleich der zulässigen permanenten Pfahlkopfverdrehung $\theta_{perm,zul}$ mit der ermittelten permanenten

Pfahlkopfverdrehung θ_{perm} realisieren. Beim Nachweis der permanenten Kopfverdrehung werden die zyklischen Belastungen des ULS Lastkollektivs (35 Stunden BSH Sturm) und des FLS Lastkollektivs (gesamte Lebensdauer ohne BSH Sturm) getrennt betrachtet.

3.3 Ergebnis

Das vorliegende Zyklikkonzept erfüllt die Vorgaben des Prüfsachverständigen für Geotechnik zur Erlangung der ersten Freigabe [U05] und wurde unter Beachtung der Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle erstellt.

4 Inhaltsverzeichnis des Originals

Im Folgenden wird das Inhaltsverzeichnis des Originals aufgeführt.

Inhalt	Seite	
1	Veranlassung	6
2	Umfang und Zweck des Dokuments	7
3	Referenzen	8
4	Projektbeschreibung	10
4.1	Allgemeine Projektbeschreibung	10
4.2	Baugrundverhältnisse	10
4.3	Pfahlgeometrie	10
5	Tragverhalten und Widerstände bei zyklischer Belastung	11
5.1	Bodenmechanische Effekte	11
5.2	Zyklisch lateral belastete Pfähle	11
6	Einwirkungen	12
6.1	35h BSH Sturm (ULS Lastkollektiv)	12
6.2	Gesamte Lebensdauer exklusive des 35h Sturms (FLS Lastkollektiv)	13
7	Axiale Bodenwiderstände	14
7.1	Ermittlung statisch axialer Bodenwiderstände	14
7.1.1	Allgemeines	14
7.1.2	Statisch axialer Bodenwiderstand in Sand	14
7.1.2.1	Mantelreibung	14
7.1.2.2	Spitzenwiderstand	16
7.1.3	Statisch axialer Bodenwiderstand in Ton	16
7.1.3.1	Mantelreibung	16
7.1.3.2	Spitzenwiderstand	17
7.1.4	Statisch axialer Bodenwiderstand in Schluff	17
7.1.4.1	Mantelreibung	17
7.1.4.2	Spitzenwiderstand	18
7.1.5	Statisch axialer Bodenwiderstand in Geschiebemergel	18

Abb. 1: Inhaltsverzeichnis des Originals, Seite 1

7.1.5.1	Mantelreibung	18
7.1.5.2	Spitzenwiderstand	18
7.1.6	Statisch axialer Bodenwiderstand in Kreide	18
7.1.6.1	Mantelreibung	18
7.1.6.2	Spitzenwiderstand	19
7.2	Ermittlung zyklisch axialer Bodenwiderstände	19
8	Nachweisführung zyklisch axiale Lasten	20
9	Laterale Bodenwiderstände	21
9.1	Ermittlung statisch lateraler Bodenwiderstände	21
9.1.1	Allgemeines	21
9.1.2	Statisch laterale Bodenwiderstand in Sand	21
9.1.3	Statisch lateraler Bodenwiderstand in weichem Ton	22
9.1.4	Statisch lateraler Bodenwiderstand in steifem Ton	23
9.1.5	Statisch lateraler Bodenwiderstand in Geschiebemergel	24
9.1.6	Statisch lateraler Bodenwiderstand in Schluff	24
9.1.7	Statisch lateraler Bodenwiderstand in Kreide	25
9.1.8	Kalibrierung statisch lateraler Bodenwiderstände	25
9.2	Ermittlung zyklisch lateraler Bodenwiderstände	25
9.2.1	Anwendung zyklischer p-y Ansätze	25
9.2.1.1	Grundlagen	25
9.2.1.2	p-y Ansatz für Sand	25
9.2.1.3	p-y Ansatz für weichen Ton	26
9.2.1.4	p-y Ansatz für steifen Ton	27
9.2.1.5	p-y Ansatz in Geschiebemergel	28
9.2.1.6	p-y Ansatz für Schluff	28
9.2.1.7	p-y Ansatz für verwitterte Kreide	28
9.2.1.8	p-y Ansatz für unverwitterte Kreide	28
10	Nachweisführung zyklisch laterale Lasten	29

Abb. 2: Inhaltsverzeichnis des Originals, Seite 2

10.1	Vorbemessung durch Pfahllängenkriterium	29
10.2	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	30
10.2.1	Allgemeines	30
10.2.2	Verifizierung der Gültigkeit der zyklischen p-y Kurven	31
10.2.3	Detaillierte Analyse hinsichtlich der Tragfähigkeitsdegradation	31
10.3	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	31
10.3.1	Allgemeines	31
10.3.2	Verifizierung der Gültigkeit zyklischer p-y Kurven	33
10.3.3	Detaillierte Analyse hinsichtlich der Verformungsakkumulation	33
11	Zusammenfassung / Schlussbemerkung	35

Abb. 3: Inhaltsverzeichnis des Originals, Seite 3