Spezifikation

Anforderungskatalog für die Durchführung von geotechnischen Untersuchungen und die Erstellung eines Geotechnischen Entwurfsberichts für ENERCON Windenergieanlagen

Deutschland

Status: 2017-08-02

ENERCON
ENERGIE FÜR DIE WELT

Herausgeber

ENERCON GmbH ▪ Dreekamp 5 ▪ 26605 Aurich ▪ Deutschland
Telefon: +49 4941 927-0 ▪ Telefax: +49 4941 927-109
E-Mail: info@enercon.de ▪ Internet: http://www.enercon.de
Geschäftsführer: Hans-Dieter Kettwig, Simon-Hermann Wobben
Zuständiges Amtsgericht: Aurich ▪ Handelsregisternummer: HRB 411
Ust.Id.-Nr.: DE 181 977 360

Urheberrechtshinweis

Die Inhalte dieses Dokuments sind urheberrechtlich sowie hinsichtlich der sonstigen geistigen Eigentumsrechte durch nationale und internationale Gesetze und Verträge geschützt. Die Rechte an den Inhalten dieses Dokuments liegen bei der ENERCON GmbH, sofern und soweit nicht ausdrücklich ein anderer Inhaber angegeben oder offensichtlich erkennbar ist.

Die ENERCON GmbH räumt dem Verwender das Recht ein, zu Informationszwecken für den eigenen, rein unternehmensinternen Gebrauch Kopien und Abschriften dieses Dokuments zu erstellen; weitergehende Nutzungsrechte werden dem Verwender durch die Bereitstellung dieses Dokuments nicht eingeräumt. Jegliche sonstige Vervielfältigung, Veränderung, Verbreitung, Veröffentlichung, Weitergabe, Überlassung an Dritte und/oder Verwertung der Inhalte dieses Dokuments ist – auch auszugsweise – ohne vorherige, ausdrückliche und schriftliche Zustimmung der ENERCON GmbH untersagt, sofern und soweit nicht zwingende gesetzliche Vorschriften ein Solches gestatten.

Dem Verwender ist es untersagt, für das in diesem Dokument wiedergegebene Know-how oder Teile davon gewerbliche Schutzrechte gleich welcher Art anzumelden.

Sofern und soweit die Rechte an den Inhalten dieses Dokuments nicht bei der ENERCON GmbH liegen, hat der Verwender die Nutzungsbestimmungen des jeweiligen Rechteinhabers zu beachten.

Geschützte Marken

Alle in diesem Dokument ggf. genannten Marken- und Warenzeichen sind geistiges Eigentum der jeweiligen eingetragenen Inhaber; die Bestimmungen des anwendbaren Kennzeichen- und Markenrechts gelten uneingeschränkt.

Änderungsvorbehalt

Die ENERCON GmbH behält sich vor, dieses Dokument und den darin beschriebenen Gegenstand jederzeit ohne Vorankündigung zu ändern, insbesondere zu verbessern und zu erweitern, sofern und soweit vertragliche Vereinbarungen oder gesetzliche Vorgaben dem nicht entgegenstehen.

Dokumentinformation

Dokument-ID	PLM-CE-SP001-Anforderung Geotechn. Entwurfsbericht-Rev005de-de.docx
Vorlagen-ID	PLM-VL002-HF_mehrseitig_standard-Rev013de-de.dotx
Vertraulichkeit	--

Datum	Sprache	DCC	Werk / Abteilung
2017-08-02	de	--	ENERCON GmbH / PLM- Civil Engineering

Inhaltsverzeichnis

1 Geltungsbereich 5

2 Vorbemerkungen 5

3 Baugrunduntersuchungen 5

3.1 Planung der geotechnischen Untersuchungen 5
3.1.1 Zugang zum Baufeld 5
3.1.2 Historische Recherche 5
3.1.3 Ortsbesichtigung 6
3.1.4 Kampfmittelfreiheit 6
3.1.5 Medienfreiheit 6
3.1.6 Erdbebennachweis 6
3.2 Felduntersuchungen 6
3.2.1 Baugrundaufschlussbohrungen 6
3.2.2 Sondierungen 7
3.2.3 Schürfe 8
3.2.4 Geophysikalische Messverfahren 8
3.2.5 Spezifischer Erdwiderstand 9
3.3 Bodenmechanische und chemische Laborversuche 9
3.3.1 Bodenmechanische Laborversuche 9
3.3.2 Betonaggressivität 10
3.3.3 Chemische Umweltuntersuchungen 10

4 Darstellung der Untersuchungsergebnisse 10

5 Geotechnische Berechnungen 11

5.1 Vorbemerkung 11
5.2 Setzungsberechnungen 12
5.3 Drehfedersteifigkeit k_φ 13
5.4 Standsicherheit von Böschungen und Hängen 14
5.5 Kippen, Gleiten und klaffende Fuge 14

6 Gründungsempfehlung 14

6.1 Flachgründung 14
6.1.1 Lastfall „ohne Auftrieb“ 15
6.1.2 Lastfall „mit Auftrieb“ 15
6.2 Tiefgründung 15

7 Hinweise zur Bauausführung 17

7.1 Herstellung der Baugrube 17
7.2 Wasserhaltung 17
7.3 Passive Drainage 17

7.4 Erdarbeiten 17
7.4.1 Bodenaustausch 18
7.4.2 Baugrubenverfüllung 18
7.4.3 Spornüberschüttung 18
7.4.4 Baugrundverbesserung 18
7.4.5 Anheben der Gründungsebene 18
7.5 Auswirkungen des Frischbetoneigengewichtes bei Tiefgründungen 19
7.6 Überwachung der Bauausführung 19

8 Zuwegungen und Kranstellflächen 19

9 Verteiler 19

1 Geltungsbereich

Die vorliegende Spezifikation gilt für die geotechnische Untersuchung des Baufeldes von ENERCON Windenergieanlagen (WEA) in Lockergesteinen. Für die Untersuchung von Festgesteinsstandorte ist die ENERCON-Spezifikation „PM-CE-SP002 Anforderung Baugrund Festgestein“ mitgeltend zu berücksichtigen.

Ferner gilt sie für die Erstellung eines geotechnischen Entwurfsberichtes für ENERCON WEA.

Die Anforderungen und Hinweise in der vorliegenden Spezifikation sind von den projektverantwortlichen geotechnischen Sachverständigen zu berücksichtigen.

2 Vorbemerkungen

Grundlage für das Erstellen des geotechnischen Entwurfsberichtes sind die relevanten Normen und Regelwerke in ihrer jeweils gültigen Fassung. Die aufgeführten Punkte haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sind im Einzelfall vom verantwortlichen geotechnischen Sachverständigen zu bewerten. Zudem ist die Richtlinie für Windenergieanlagen des Deutschen Instituts für Bautechnik, (DIBt) in der aktuellen Fassung zu berücksichtigen. Die Spezifikation soll ergänzend zu den Normen und Richtlinien auf besondere Punkte hinweisen.

In begründeten Fällen kann von diesem Anforderungskatalog abgewichen werden. Dies ist im Vorfeld mit der entsprechenden ENERCON Fachabteilung (Civil Engineering Projects, PLM-CEP) abzustimmen und schriftlich im Gutachten zu begründen.

3 Baugrunduntersuchungen

3.1 Planung der geotechnischen Untersuchungen

Die Planung und der Umfang der Baugrunduntersuchung muss entsprechend der Erstellung eines geotechnischen Entwurfsberichtes der Geotechnischen Kategorie 3 festgelegt und ausgeführt werden. Die Baugrunduntersuchungen sind abschließend auszuführen. Offenen Fragen oder Hinweise für weitere Erkundungen sind im geotechnischen Entwurfsbericht zu vermeiden. Ggf. ist während der Erstellung die Durchführung weiterer Erkundungen mit ENERCON und dem Auftraggeber abzustimmen. Diese sind nach Abstimmung zeitnah durchzuführen.

3.1.1 Zugang zum Baufeld

Die auszuführenden Erkundungsarbeiten sind rechtzeitig mit der ENERCON Projektleitung abzustimmen, um den Zugang zu dem Erkundungsgebiet sicherzustellen. Es ist mit der Projektleitung abzustimmen, ob bzw. in welcher Weise eine Auspflockung (Markierung) des Baufeldes erforderlich ist.

3.1.2 Historische Recherche

Der geotechnische Sachverständige hat sich mit Hilfe von Recherchearbeit über die Baugrundsituation im Untersuchungsgebiet im Vorfeld zu informieren.

Folgende Informationen sind mindestens einzuholen:

- Handelt es sich um natürlich gewachsenen Baugrund oder um anthropogene Auffüllung.
- Liegt der Standort in bzw. im Einflussbereich von Boden- oder Grundwasserverunreinigungen (Altlasten).
- Liegt der Standort in einer Wasserschutzzone. Die Kategorie der Wasserschutzzone ist anzugeben.
- Liegt das Untersuchungsgebiet in einem Bergbaugebiet sind aktive und stillgelegte Stollen im Fundamenteinflussbereich (hier: ~ 2 x Fundamentdurchmesser) im Schnitt und in der Draufsicht darzustellen. Der Einfluss der Stollen auf das Fundament ist zu beschreiben. Zu berücksichtigende Werte sind die prognostizierte Übertagesenkung, die Senkungsgeschwindigkeiten, Senkungsdauer und die zu erwartenden Senkungsneigungen. Zusätzlich ist eine Stellungnahme des Bergbauamtes einzuholen.

3.1.3 Ortsbesichtigung

Der geotechnische Sachverständige hat sich mit den örtlichen Gegebenheiten vertraut zu machen. Auf eine Ortsbesichtigung sollte nur in Ausnahmefällen verzichtet werden. Morphologische anspruchsvolle Standorte sind zwingend vor Ort zu besichtigen.

3.1.4 Kampfmittelfreiheit

Im Vorfeld der Untersuchungen ist vom Bauherrn bei den zuständigen Stellen eine Kampfmittelfreigabe einzuholen und dem geotechnischen Sachverständigen zu übergeben.

Für den Fall, dass zur Erteilung einer Kampfmittelfreigabe weitere Untersuchungen (Bohrungen) zur Kampfmittelfreiheit notwendig werden, sind diese mit dem geotechnischen Sachverständigen abzustimmen, um Auswirkungen auf die Gründung der WEA abzuschätzen.

3.1.5 Medienfreiheit

Der geotechnische Sachverständiger hat sich vor Durchführung der Erkundungsarbeiten über das Vorhandensein von erdverlegten Kabeln und Rohren bei den örtlichen und überregionalen Versorgungsträgern zu informieren.

3.1.6 Erdbebennachweis

Der geotechnische Sachverständiger hat zu prüfen, ob der WEA-Standort in einem Erdbebengebiet liegt. Liegt der Standort gemäß DIN EN 1998-1 in einem Erdbebengebiet so sind die Erdbebenzone, die Baugrundklasse, die Untergrundklasse sowie ggf. die maximal zu erwartende Horizontalbeschleunigung anzugeben.

3.2 Felduntersuchungen

3.2.1 Baugrundaufschlussbohrungen

Es sind direkte Baugrundaufschlüsse gemäß DIN EN 22475-1 in ausreichender Anzahl, siehe Tabelle 1, auszuführen. Das Bohrverfahren und der Bohrdurchmesser sind gemäß der zu erwartenden Baugrundverhältnisse anzupassen.

Die Tiefe der Bohrungen ist so zu wählen, dass alle setzungs- und standsicherheitsrelevanten Bodenschichten erfasst werden. Die geplante Aufschlusstiefe darf jedoch nicht weniger als 10 m unter GOK betragen. Werden bei der Ausführung geringere Tiefen erreicht (Hindernisse, Auslastung) ist zu prüfen, ob die erhaltenen Informationen ausreichen oder ob weitere Bohrungen ggf. mit Änderung des gewählten Verfahrens erforderlich sind.

Die Mindestanzahl der Bohrungen richtet sich nach der Größe des Fundamentes, siehe Tabelle 1. Hierbei sollte mindestens eine Bohrung im Nahbereich (~ 2m Abstand) einer Drucksondierung, zur besseren Kalibrierung, abgeteuft werden. Der Abstand zum Fundamentrand sollte 2m nicht überschreiten:

Fundamentdurchmesser D	Anzahl	Anordnung
< 20m	1 Stück	im Nahbereich einer CPT(~ 2 m Abstand)
≥ 20m	2 Stück	1 x Fundamentrand Richtung Kranstellfläche 1 x gegenüberliegender Fundamentrand
≥ 25m	3 Stück	1 x Fundamentrand Richtung Kranstellfläche restliche Bohrungen gleichmäßig über den Fundamentrand verteilen (120°)

Tab. 1: Anzahl und Anordnung der Bohrungen

Von den Baugrundaufschlussbohrungen sind farbige Bohrsäulenprofile gemäß DIN 4023 / EN ISO 14688 dem Gutachten beizufügen. Bei der Darstellung der Bohrergebnisse sind die Bodenarten voll ausgeschrieben anzuführen. Die Bodenfeuchte und der angetroffenen Grundwasserstände sind anzugeben. Die Hinweise der DIN EN ISO 22475 sind zu beachten.

3.2.2 Sondierungen

Ergänzend zu den direkten Baugrundaufschlussbohrungen sind an jedem Standort Sondierungen nach DIN EN ISO 22476 durchzuführen.

Hierbei sind Drucksondierungen (Cone Penetration Test, CPT) aufgrund der größeren Aussagekraft gegenüber Rammsondierungen (Dynamic Probing Heavy, DPH) zu bevorzugen. Zur Dimensionierung von Pfahltragfähigkeiten oder Baugrundverbesserungen (z.B. Rüttelstopfsäulen) ist die Durchführung von Drucksondierungen (CPT) zwingend erforderlich.

Die Tiefe der Drucksondierungen (CPT) ist so zu wählen, dass alle setzungs- und standsicherheitsrelevanten Bodenschichten erfasst werden. Die geplante Aufschlusstiefe unter GOK darf jedoch nicht weniger als 1,5 x dem Fundamentdurchmesser betragen. Werden bei der Ausführung geringere Tiefen erreicht (Hindernisse, Auslastung) ist zu prüfen, ob die erhaltenen Informationen ausreichen oder ob weitere Untersuchungen erforderlich sind.

Die Mindestanzahl der Ansatzpunkte je Fundament für Drucksondierungen sind der Tabelle 2 zu entnehmen:

Fundamentdurchmesser D	Anzahl	Anordnung
< 20m	3 Stück	1 x Fundamentrand Richtung Kranstellfläche restliche Ansatzpunkte gleichmäßig über den Fundamentrand verteilen (120°)

≥ 20m	4 Stück	1 x Fundamentrand Richtung Kranstellfläche restliche Ansatzpunkte gleichmäßig über den Fundamentrand verteilen (90°)

Tab. 2: Anzahl und Anordnung der Drucksondierungen

Bei der Darstellung der Drucksondierungsergebnisse (CPT) ist neben dem Spitzendruck, die Mantelreibung, das Reibungsverhältnis sowie die Neigung anzugeben.

Bei der Planung der Baugrunduntersuchung ist zu prüfen, ob der Einsatz spezieller Drucksondierspitzen (S-CPT, CPT-U) sinnvoll ist.

In begründeten Fällen sind in Absprache mit ENERCON Rammsondierungen nach DIN EN ISO 22476-2 (2012-03) mit der schweren Rammsonde (DPH) durchzuführen. Leichte und Mittelschwererammsondierung (DPL und DPM) sind nicht zulässig.

Die Anzahl der Ansatzpunkte der Rammsondierungen (DPH) entsprechen den Angaben in der Tabelle 2.

3.2.3 Schürfe

Bei gering mächtigen Lockergesteinsschichten über Festgestein oder zur Klärung der Grundwassersituation können Schürfe nach DIN EN 1997-2 und DIN EN ISO 22475-1 angelegt und ausgewertet werden. Dem Baugrundgutachten sind Fotos der Schürfe und des Baggergutes beizulegen.

Die Mindestanzahl der Schürfe ist der Tabelle 3 zu entnehmen.

Fundamentdurchmesser D	Anzahl	Anordnung
< 20m	2 Stück	~ 1m vom Fundamentrand
≥ 20m	3 Stück	~ 1m vom Fundamentrand

Tab. 3: Anzahl und Anordnung der Schürfe

Von den Schürfen sind farbige Bohrsäulenprofile gemäß DIN 4023 / DIN EN ISO 14688 dem Baugrundgutachten beizufügen. Bei der Darstellung der Ergebnisse sind die Bodenarten voll ausgeschrieben anzuführen. Die Bodenfeuchte und der angetroffene Grundwasserstand sind anzugeben. Die Hinweise der DIN EN ISO 22475 sind zu beachten.

3.2.4 Geophysikalische Messverfahren

Geophysikalische Messverfahren können, ergänzend zu den Baugrundaufschlussbohrungen und den Sondierungen, ausgeführt werden.

Geophysikalische Messverfahren bieten sich insbesondere an, um flächenhafte Aussagen über den Untergrundaufbau und Inhomogenitäten zu erhalten.

Der Einsatz von geophysikalischer Messungen sollten bei Verdacht auf

- Verkarstungen, Dolinen, Hohlräumen, Erdfällen
- Störungs- und Kluftzonen im Festgestein,
- Moorkörper oder Toteislöcher in Lockersedimenten,

in Betracht gezogen werden.

Sollen über geophysikalische Untersuchungen Steifemodule, Schubmodule und/oder Querdehnzahlen ermittelt werden, ist das angewandte Verfahren mit ENERCON abzustimmen. Die Eignung des Verfahrens für die jeweils anstehenden Böden ist nachzuweisen.

3.2.5 Spezifischer Erdwiderstand

Zur Auslegung der Blitzschutzerdung ist an allen Fundamentstandorten der spezifische Erdwiderstand [ρ_s] mittels des Wenner-Verfahrens zu messen. Die Messung des spezifischen Erdwiderstandes ist gemäß dem Dokument *„PM-EW-DC094-Messung des spezifischen Erdwiderstandes“* durchzuführen und zu protokollieren. Das Ergebnis ist dem Bodengutachten anzuhängen.

3.3 Bodenmechanische und chemische Laborversuche

3.3.1 Bodenmechanische Laborversuche

Aufgrund der Einstufung von WEA in die Geotechnische Kategorie 3 (GK 3) sind die für die Beurteilung und Berechnung erforderlichen Baugrundkenngrößen versuchstechnisch und / oder mit Hilfe von Korrelationen zu bestimmen. Eine Festlegung der Bodenkennwerte über Literaturangaben ist nicht zulässig.

Zur Bestimmung der Bodenkennwerte sind u. a. folgende Untersuchungen in den maßgebenden Bodenschichten vorzunehmen und zu dokumentieren, sofern keine Bodenkennwerte korreliert werden können.

Bodenkennwert	**Untersuchung**
Wichte γ/γ'	Dichtebestimmung
Reibungswinkel φ'	Scherversuche, Triaxalversuche
Kohäsion c’	Scherversuche, Triaxalversuche
undrainierte Scherfestigkeit c_u	Flügelsondierungen, Triaxalversuche
stat. Steifemodul $E_{s,stat}$	Oedometerversuch, Triaxalversuche
dyn. Steifemodul $E_{s,dyn}$	Zyklische Triaxalversuche

Tab. 4: Laboruntersuchungen zu Ermittlung der Bodenkennwerte

Zur Festlegung der Bodenart sind ggf. folgende weiteren Untersuchungen erforderlich:

- Sieb- und Schlämmanalyse
- Ggf. Scherversuche
- Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen
- Bestimmung des natürlichen Wassergehaltes.
- Bestimmung des organischen Anteils

Die vorgenannten Untersuchungen haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sind bei Bedarf vom geotechnischen Sachverständigen entsprechend projektspezifisch zu erweitern.

Die nachfolgend aufgeführten, geforderten Bodenkennwerte sind für alle Bodenschichten tabellarisch anzugeben.

Bodenart	**Wichte** γ/γ'	**Reibungswinkel** φ'	**Kohäsion** c'	**undrainierte Scherfestigkeit** c_u	**Querdehnzahl** ν	**stat. Steifemodul** $E_{s,stat}$	**dyn. Steifemodul** $E_{s,dyn}$
Einheit	[kN/m³]	[°]	[kN/m²]	[kN/m²]	[-]	[MN/m²]	[MN/m²]

Tab. 5: Geforderte Bodenkennwerte

Die Boden- und Festgesteinsarten sind gemäß ihrer Lösbarkeit nach DIN 18300 zu klassifizieren. Für die anstehenden Böden sind Homogenbereiche festzulegen. Die Anzahl der Homogenbereiche sollte so gering wie möglich gehalten werden. Die Homogenbereiche sind entsprechend mit den Tiefen bezogen auf m u. GOK tabellarisch anzugeben. Für die einzelnen Homogenbereiche sind Einsatzgeräte zum Lösen und Abbauen anzugeben.

3.3.2 Betonaggressivität

Das Grundwasser und / oder die anstehenden Böden sind nach DIN 4030 / DIN EN 206 gemäß ihrer Betonaggressivität für den Fundamentkörper und ggf. die Tiefgründung einzustufen.

Ferner ist eine Bestimmung des Eisengehaltes im Grundwasser durchzuführen.

Die Beprobung ist an jedem Standort durchzuführen. Aufgrund örtlicher Gegebenheiten kann von dieser Regelung in Absprache mit der entsprechenden ENERCON Fachabteilung abgewichen werden.

In jedem Fall ist eine Aussage zur Betonaggressivität vom verantwortlichen geotechnischen Sachverständigen zu treffen. Ohne eine entsprechende Angabe ist eine Freigabe der Beton-rezeptur nicht möglich.

Die Ergebnisse der Grundwasseranalysen mit dem Probenahmeprotokoll sind dem geotechnischen Entwurfsbericht beizufügen

3.3.3 Chemische Umweltuntersuchungen

Bei Verdacht auf kontaminierte Bodenschichten bzw. sulfatsaure Böden sind nach Rücksprache mit ENERCON weitere umweltschutztechnische Untersuchungen durchzuführen und geeignete Gegenmaßnahmen vorzuschlagen.

Die Ergebnisse von chemischen Analysen sind in einem separaten Bericht darzustellen. Die Probenahmeprotokolle und Prüfberichte der Laboranalysen sind dem Bericht beizufügen.

4 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Der geotechnische Entwurfsbericht mit sämtlichen Anhängen ist ENERCON farblich und in digitaler Form als einzelne Datei zur Verfügung zu stellen. Die Dateigröße darf 10 MB nicht überschreiten. Zur weiteren Bearbeitung ist das Baugrundgutachten frühzeitig zu erstellen und bei ENERCON PLM-CEP einzureichen. Der Fertigstellungstermin wird im Liefervertrag geregelt. Unabhängig davon sollte das Baugrundgutachten möglichst 16 Wochen vor Baubeginn eingereicht werden.

Das Untersuchungsgebiet ist in einem Übersichtplan, aus dem die überregionale Lage ersichtlich ist, darzustellen. Die Standort-Koordinaten sind auf dem Plan oder im Berichtsteil anzugeben.

Die die Ansatzpunkte der Bohrungen und Sondierungen sind auf einem gesonderten Lageplan erkenntlich einzutragen. Dies gilt für jeden Standort.

Die Bohr- und Sondieransatzpunkte sind höhenmäßig einzumessen und auf Höhe Geländeoberkante (GOK) im Fundamentmittelpunkt mit ± 0,0m zu beziehen. Die Höhen sind auf den Bohr- bzw. Sondierprofilen anzugeben. Ggf. ist die Topographie in 1 bis 2 Geländeschnitten graphisch darzustellen.

Eine aussagekräftige Fotodokumentation der örtlichen Gegebenheiten ist beizufügen.

Die angewendeten Untersuchungsverfahren und -geräte sind anzugeben um mögliche Abweichungen und Fehlerquellen zu dokumentieren.

5 Geotechnische Berechnungen

5.1 Vorbemerkung

ENERCON verfügt über typengeprüfte Fundamente. Über die Typenprüfung sind die Fundamentgeometrie sowie die auftretenden Lasten festgelegt. Die maßgebenden Fundamentlasten für den jeweiligen Anlagentyp sind dem Fundamentdatenblatt zu entnehmen.

Bei den Fundamenten handelt es sich um Kreisringfundamente. Die geotechnische Nachweise sind entsprechend für Kreisringfundamente zu führen. In den Fundamentdatenblättern ist jeweils der Außen- und Innendurchmesser angegeben. Bei Stahlfundamenten ist als Innendurchmesser der Durchmesser der kompressiblen Lage anzusetzen.

Die Einbindetiefe in den Baugrund ist die im Fundamentdatenblatt angegebene Fundamenthöhe abzüglich der Differenz Fundamentoberkante – GOK. Bei geneigter Baufläche ist die Geländehöhe im Mittelpunkt der WEA maßgebend anzusetzen.

Ein Anheben der Gründungsebene kann aus geotechnischer Sicht sinnvoll und ausführbar sein. Um die Gültigkeit der Typenprüfung und Baugenehmigung nicht zu verletzen und die Auswirkungen auf weitere Gewerke zu prüfen, darf eine Anhebung der Gründungssohle nur nach Freigabe durch ENERCON erfolgen. Weitere Hinweise zum Anheben der Gründungsebene gibt die ENERCON Spezifikation „PM-CE-SP651 Anheben Gründungsebene“.

Gemäß Typenprüfung werden folgende drei Fundamenttypen unterschieden:

1. Flachgründung ohne Belastung aus Auftrieb
2. Flachgründung mit Belastung aus Auftrieb
3. Tiefgründung mit Belastung aus Auftrieb

Zu 1.) Flachgründung ohne Belastung aus **Auftrieb**

Eine Auftriebswirkung durch Grundwasser/Stauwasser ist gemäß Typenprüfung nicht zulässig. Der Bemessungswasserstand muss während der gesamten Lebensdauer der WEA dauerhaft unterhalb der Gründungssohle liegen.

Für die geotechnischen Nachweise sind die in dem Fundamentdatenblatt angegebene charakteristischen Lastfälle bzw. die Bemessungswerte der Lastfälle heranzuziehen.

Zu 2.) Flachgründung mit Belastung aus **Auftrieb**

Bei dem Fundamenttyp ist eine Auftriebswirkung bis 0,2 m bzw. 0,15 m unterhalb der Fundamentoberkante in der Typenprüfung nachgewiesen. Eine Auftriebswirkung muss jedoch nicht zwingend vorhanden sein.

In den Fundamentdatenblättern sind Vertikallasten Fz für die Lastfälle „ohne Auftrieb“ und „mit Auftrieb“ angeben. Bei dem Lastfall „ohne Auftrieb“ wurde ein Bemessungswasserstand unterhalb der Gründungssohle angesetzt. Bei dem Lastfall „mit Auftrieb“ wurde der volle Auftrieb angesetzt. Die geotechnischen Nachweise sind für jeweils beide Lastfälle zu führen.

Zu 3.) Tiefgründung mit Belastung aus **Auftrieb**

Bei dem Tiefgründungsfundament sind die unter 2.) bereits beschriebenen Auftriebsbelastungen durch Typenstatik abgedeckt.

Für die Pfahlvorbemessung durch den geotechnischen Sachverständigen sind die in dem Fundamentdatenblatt für die verschiedenen Pfahlvarianten angegebenen Druck und Zuglasten der Bemessungslasten zu verwenden.

Für alle Fundamenttypen sind in der Typenprüfung keine Verkehrslasten auf dem Fundament statisch berücksichtigt. Das Überfahren, das Parken, sowie das Lagern von Lasten ist somit nicht zulässig.

Die Erdüberdeckung auf dem Fundament ist in der Typenprüfung statisch berücksichtigt. Die geforderte Bodenauflast ist dauerhaft herzustellen.

5.2 Setzungsberechnungen

Die Setzungsberechnungen sind für jeden im Fundamentdatenblatt aufgeführten Lastfall (charakteristische Werte maßgebend) durchzuführen. Bei Ausführung des Fundamenttyps „Flach mit Auftrieb“ sind die Berechnungen dabei jeweils für die Lastfälle „mit“ und „ohne Auftrieb“ durchzuführen. Für die Berechnung sind in allen betrachteten Lastfällen die statischen Bodenkennwerte anzusetzen.

Die auf dem Fundamentdatenblatt angegeben maximalen Setzungsdifferenzen beziehen sich auf Außenkante Fundament.

Zur Berechnung der zulässigen Schiefstellung der WEA sind Steifemodulwerte zu verwenden. Eine Berechnung mit Elastizitätswerte und Querdehnzahl ist nicht empfehlenswert.

Ferner sind die in den Fundamentdatenblättern der WEA angegebenen Dimensionen und Lastangaben unverändert zu verwenden. Eine Reduzierung der Werte ist nicht zulässig. Sofern ein Herausziehen der WEA geplant ist, ist die geänderte Gründungsebene entsprechend zu berücksichtigen.

Bei der Berechnung der Setzungsdifferenzen ist inhomogener Baugrund sowie der Einfluss des auftretenden Momentes zu berücksichtigen.

Bei dem Extremlastfall DLC 6.2 bzw. N/A/T handelt es sich um einen außergewöhnlichen Lastfall, der nur kurzzeitig (Windböen) wirkt. Die nur kurzeitige Einwirkung der Last kann bei der Ermittlung der Setzungsdifferenzen auf bindigem Boden berücksichtigt werden. Eine Zeit-Setzungs-Betrachtung führt zu einer deutlichen Reduzierung der Setzungswerte. Eine Reduzierung der im Extremlastfall nach DIN 4019 ermittelten Setzungswerte um 25% kann aufgrund des kurzfristigen Ereignisses aus Sicht von ENERCON auch ohne aufwendige Zeit-Setzungs-Berechnung pauschal angesetzt werden.

Ob dieser pauschale Ansatz übernommen werden kann ist abhängig vom Baugrund und liegt im Ermessen und in der Verantwortung des geotechnischen Sachverständigen. Im Bedarfsfall kann ENERCON eine Zeitsetzungsberechnung vom Geotechnischen Sachverständigen zur Bestätigung anfordern.

Bei rolligen Böden und den damit verbunden Sofortsetzung bei Lasterhöhung sind die im Extremlastfall 6.2 nach DIN 4019 ermittelten Setzungswerte ohne eine Zeit-Setzungs-Betrachtung nicht zu reduzieren. Berücksichtigt werden können hingegen die durch die Vertikallasten im Lastfall 1.0 auftretenden Sofortsetzungen, ohne Berücksichtigung des auftretenden Momentes. Die ermittelten Setzungen im Extremlastfall können um den Betrag reduziert werden.

5.3 Drehfedersteifigkeit kφ

Zur Vermeidung von Schwingungsresonanzen des Turmes beim Zusammenwirken von Fundament und Baugrund darf die geforderte Drehfedersteifigkeit kφ nicht unterschritten werden. Die einzuhaltende Drehfedersteifigkeit ist dem jeweiligen Fundamentdatenblatt zu entnehmen. Der Nachweis ist bei geschichtetem Baugrund für alle relevanten Schichten nachvollziehbar zu führen.

Hinweis zur Berechnung der Drehfedersteifigkeit über die geschlossene Formel:

Grundlage der Berechnungen ist die Formel auf dem Fundamentdatenblatt:

$$k_{phi} = E_s * \frac{4}{3} * r^3 * \frac{1 - \nu - 2 * \nu^2}{(1 + \nu) * (1 - \nu)^2}$$

Für tiefere Schichten wird r als der zugehörige Ersatzradius betrachtet. Die Vergrößerung des Ersatzradius ergibt sich aus dem Reibungswinkel über die Höhe der betrachteten Bodenschicht.

Die Nachweisführung der Drehfedersteifigkeit ist schichtenbezogen auszuwerten und tabellarisch aufzuführen.

Die Rechenansätze für die Berechnung der dynamischen Drehfeder bei ENERCON haben gezeigt, dass eine hohe Übereinstimmung mit den tatsächlichen Gegebenheiten vorliegt.

Bei einer Berechnung der dynamischen Drehfedersteifigkeit auf Grundlage des Schubmoduls G_{dyn} ist die dynamische Schubverzerrungsamplitude zu berücksichtigen. Der Abminderungsfaktor liegt im Bereich für $\gamma = 10^{-3}$ bei ~0,3.

Hinweis zur Berechnung der Drehfedersteifigkeit über das Moment:

Die Berechnung der Setzungsdifferenzen ist mit den statischen bzw. dynamischen Steifemodulwerten sowie unter Berücksichtigung des zugehörigen Momentes durchzuführen. Alle setzungsempfindlichen Bodenschichten sind zu berücksichtigen.

Der für die Bemessung der Drehfedersteifigkeiten maßgebende Lastfall ist DLC 1.0 (Produktion). Die Drehfedersteifigkeiten sind unter Berücksichtigung der wirkenden Vertikallast und dem wirkenden Moment zu bestimmen.

Grundlage der Berechnungen ist die Formel:

$$k_{phi} = \frac{M[\mathrm{kNm}]}{\alpha\,[\mathrm{rad}]}; \text{wobei } \alpha \text{ aus } \frac{\mathrm{ds}}{\mathrm{d}} \text{ ermittelt werden kann}$$

M = Moment
ds = Setzungsdifferenz bei dem wirkenden Moment und Vertikallast
d = Fundamentdurchmesser

Die Laständerungen im Produktionsbetrieb einer Windenergieanlage liegt im Frequenzbereich < 2Hz. Es handelt sich somit nicht um eine dynamische Belastung des Baugrundes, sondern um eine länger andauernde zyklische Belastung.

Die in der Literatur angebenden dynamische Steifemodulwerte sowie die angebenden Erhöhungswerte zur Umrechnung von statischen Steifemodulwerten auf dynamische Steifemodulwerte sind für diese zyklischen Frequenzbereiche somit nicht gültig. Die für die Berechnung der dynamischen Drehfedersteifigkeit verwendeten Steifemodulwerte sind entsprechend vorsichtig zu wählen.

Der Nachweis der Drehfedesteifigkeit bei Tiefgründungen ist vom Aufsteller der Pfahlstatik am Gesamtsystem zu führen. Ein Nachweis der Drehfedersteifigkeit des Pfahlsystems durch den geotechnischen Sachverständigen ist nicht erforderlich.

5.4 Standsicherheit von Böschungen und Hängen

Bei Fundamenten im Einflussbereich oberhalb einer Böschung ist die Standsicherheit der Böschung nach DIN 4084 / DIN EN 1997-1 nachzuweisen.

5.5 Kippen, Gleiten und klaffende Fuge

Die geotechnischen Nachweise für Kippen, Gleiten und die klaffende Fuge ist bereits durch die Typenstatik abgedeckt. Um die Gültigkeit der geotechnische Berechnung der Typenstatik zu wahren, dürfen keine Maßnahmen ausgeführt werden, die zu einer Veränderung der Vertikal- und Horizontallasten führen.

Eine unzulässige Veränderung der Vertikallasen erfolgt z.B. bei Auftriebswirkung durch Wasser bei dem Fundamenttyp „ohne Auftrieb“ oder einer nicht ausreichende Erdauflast. Eine unzulässige Veränderung der Horizontallasten kann durch ein Anheben der Gründungsebene ohne Prüfung der Windgeschwindigkeiten und Turbulenzen erfolgen.

Der Nachweis für das Gleiten wurde mit einem Reibungswinkel von 20° geführt.Der geotechnische Sachverständige hat zu bestätigen, dass der Reibungswinkel von 20° nicht unterschritten wird.

6 Gründungsempfehlung

6.1 Flachgründung

Bei Flachgründungen sind grundsätzlich die rechnerischen Nachweise für die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit zu führen. Die zulässigen Bodenpressungen sind auf den Datenblättern angegeben. Es sind grundsätzlich alle im Fundamentdatenblatt angegebenen Lastfälle zu untersuchen.

Die maximal zulässige Bodenpressung und die zu erwartenden Setzungen sind anzugeben und die setzungsbedingte Schiefstellung ist der maximal erlaubten Schiefstellung für die gesamte Lebensdauer von min. ≥ 20 Jahren gegenüberzustellen.

Bei nicht ausreichend tragfähigem Baugrund sind Vorschläge zu erforderlichen Bodenverbesserungs- oder Bodenaustauschmaßnahmen zu unterbreiten.

6.1.1 Lastfall „ohne Auftrieb“

Der Fundamenttyp „Flachgründung ohne Auftrieb“ darf nur ausgeführt werden, wenn eine ausreichende Durchlässigkeit in Gründungsebene gegeben ist. oder die Ausführung einer drucklosen Drainage gemäß *„PM-CE-SP007-Ausfuehrung drucklose Drainage“* möglich ist. Andere Möglichkeiten zur Reduzierung des Wasseranfalls (z.B. Verfüllung des Arbeitsraumes mit stark bindigem Material, Einbau von Folien und anderen Wassersperren) in Gründungsebene sind von ENERCON ausgeschlossen.

Es ist sicherzustellen, dass der höchste anzunehmende Grundwasserstand die Gründungssohle nicht übersteigt. Insbesondere zu folgenden Punkten ist im Gutachten eine Aussage zu treffen:

- Innerhalb der Lebensdauer von mind. ≥ 20 Jahren darf sich kein Stauwasserspiegel bilden (Badewanneneffekt).
- Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f muss innerhalb der gesamten Gründungsebene ausreichend hoch sein, um eine sofortige Versickerung von anfallendem Niederschlagswasser gewährleisten zu können.
- Ausführungsmöglichkeit einer drucklosen Drainage gemäß ENERCON Spezifikation *„PM-CE-SP007-Ausfuehrung drucklose Drainage“* sowie den dazugehörigen Anlagen *„PM-CE-SP007A-Anlage 1 Drucklose Drainage SRT“* und *„PM-CE-SP007B-Anlage 2 Drucklose Drainage Lehrrohrgraben BFT“.* Die Drainage ist für die vollständige Lebensdauer der WEA wartungsfrei auszulegen. Die Verantwortlichkeit für die Ausführung der passiven Drainage liegt bei dem verantwortlichen Planer bzw. dem Kunden.
- Bei Ausführung einer drucklosen Drainage: Topographischen Gegebenheiten im Umfeld des Standortes

6.1.2 Lastfall „mit Auftrieb“

Bei Fundamenten im Lastfall „mit Auftrieb“ ist der max. Wasserstand anzugeben. Es ist zu beachten, dass Wasserstände über GOK nicht erlaubt sind.

6.2 Tiefgründung

Es sind alle auf dem Fundamentdatenblatt aufgeführten Pfahltypen zu untersuchen und vergleichend aufzuführen. Die Eignung und Nichteignung bzw. Gründungsrisiken der Pfahlsysteme sind zu erläutern. Abschließend ist eine Aussage über das favorisierte Pfahlsystem für den jeweiligen Standort zu treffen. Die in den Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EA-Pfähle, aktuelle Ausgabe) angegebenen Einbindetiefen für die Pfahlsysteme sind zu berücksichtigen. Abweichungen sind zu begründen.

Nachfolgend sind die erforderlichen Angaben aufgeführt:

- Pfahlquerschnitt
- Absetztiefe, bezogen auf m u. Geländeoberkante (GOK)
- Einbringverfahren
- Abschätzung der Ausführbarkeit (z B. Einschätzung der Rammarbeit, Gesteinsblöcke im Untergrund)
- ermittelte aufnehmbare Pfahllasten (Druck- und Zuglasten)

- Horizontaler Bettungsverlauf entlang des Pfahles (Regelprofil)
- Negative Mantelreibung
- Seitenschub aus Auflast

Für die Vorbemessung der Pfahltragfähigkeit sind die auf dem Fundamentdatenblatt angegebenen Bemessungswerte der auftretenden axialen Pfahllasten zu verwenden.

Die angegebenen Bemessungslasten beinhalten alle erforderlichen Teilsicherheitswerte gemäß DIBt. Aus diesem Grund sind bei der Vorbemessung die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen auf $\gamma_G = \gamma_Q = 1{,}0$ zu setzen.

7 Hinweise zur Bauausführung

7.1 Herstellung der Baugrube

Für die Herstellung der Baugrube sind standortbezogene Hinweise zu geben. Der für die anstehenden Böden max. zulässige Böschungswinkel ist anzugeben. Es sind zudem Angaben zur Sicherung der Böschung und Baugrubensohle zu machen. Bei bereits aufgeweichten Böden oder unregelmäßiger Baugrubensohle sind Maßnahmen vor Einbringen der Sauberkeitsschicht (Unterbeton) vorzuschlagen.

7.2 Wasserhaltung

Wird eine Wasserhaltung zur Trockenhaltung der Baugrube während des Fundamentbaus erforderlich, so sind geeignete Verfahren anzugeben und zu beschreiben. Die zu erwartende Wassermenge ist abzuschätzen.

Bei gespanntem Grundwasser ist ein hydraulischer Grundbruchnachweis zu führen. Besteht Gefahr eines hydraulischen Grundbruches in der Baugrube sind geeignete Gegenmaßnahmen anzugeben.

7.3 Passive Drainage

Bei notwendigen Fragen der Versickerung, sind prinzipiell Versickerungsnachweise auf Fundamentunterkante zu führen. Für den Nachweis der Versickerung ist die Fläche unter der Sauberkeitsschicht als nicht versickerungsfähig zu berücksichtigen.

Um für die Versickerung von Oberflächen- oder Schichtenwässer anfallende Wässer zeitabhängig zu stauen, kann unter dem Fundament eine Schotterschicht angeordnet werden. Nachweise sind erforderlich.

Bei geschlossenen Baugruben von Fundamenten ohne Auftriebswirkung kann ggf. temporär anfallendes Schichten- und Oberflächenwasser mittels einer drucklosen / passiven Drainage entwässert werden.

Empfehlungen zur Ausführung der drucklosen / passiven Drainage sind der ENERCON Spezifikation *„PM-CE-SP007-Ausfuehrung drucklose Drainage“* zu entnehmen.

Die Ausführungsunterlagen sind dem geotechnischen Entwurfsbericht beizufügen. Planung und Dimensionierung müssen von dem zuständigen geotechnischen Sachverständigen vor Ausführung freigegeben werden. Bei unzureichenden Ausführungsunterlagen ist der Fundamenttyp „Flach mit Auftrieb“ auszuführen.

7.4 Erdarbeiten

In der Baugrubensohle anstehende nicht tragfähige bzw. aufgeweichte bindige Bodenschichten sind gegen kornabgestuftes Material auszutauschen. Lockere Sandschichten sind nachzuverdichten. Die Baugrubensohle ist vor dem weiteren Verfüllen und Verdichten von einem geotechnischen Sachverständigen abzunehmen und schriftlich freizugeben.

Im Bodengutachten ist eine erste Einschätzung über die Eignung der Aushubböden zum Wiedereinbau als Baugrubenverfüllung/ Fundamentüberschüttung anzugeben. Insbesondere ist eine Aussage über die Eignung zum verdichteten Wiedereinbau in dem Bereich zwischen Kranstellfläche und Fundament zu treffen. Die Einschätzungen sind bei der Baugrubensohlabnahme zu verifizieren und schriftlich freizugeben.

7.4.1 Bodenaustausch

Ist ein Bodenaustausch erforderlich, sind Empfehlungen zum Austauschmaterial, Verdichtungsgrad und zur Ausführung anzugeben. Grundsätzlich ist das Bodenaustauschmaterial lagenweise verdichtet einzubauen Ein Einbau von Ziegelbruch (Rotstein-Material) und anderem mürben Material unterhalb des Fundamentes ist unzulässig. Weitere Hinweise sind der ENERCON Spezifikation *„PM-CE-SP005-Ausfuehrung Bodenaustausch“* zu entnehmen

7.4.2 Baugrubenverfüllung

Hinweise zur Baugrubenverfüllung sind der der ENERCON Spezifikation *„PM-CE-SP005-Ausfuehrung Bodenaustausch“* zu entnehmen Die Baugrube muss mit verdichtbarem Bodenmaterial (Verdichtungsgrad $D_{Pr} \geq 100$ %) aufgefüllt werden.

Zwischen Kranstellfläche und Fundament ist im Verfüllbereich des Fundamentes die SLKW-Befahrbarkeit während der gesamten Betriebszeit sicherzustellen. In diesem Bereich ist auf Höhe des Kranstellflächenplanums ein Verformungsmodul von $E_{v2} \geq 45$MN / m² mit Hilfe von ≥ 2 statischen Plattendruckversuchen nach DIN 18134 nachzuweisen. Die Ergebnisse der Versuche sind zu dokumentieren.

7.4.3 Spornüberschüttung

Für die Erdauflast auf dem Fundamentsporn ist dauerhaft und erosionssicher eine Trockenwichte von 16 bis 18kN/m³ ≤ γ gemäß ENERCON Fundamentschalplan sicherzustellen. Die maximale Trockenwichte der Spornüberschüttung sollte 22kN/m³ nicht überschreiten. Bei einer erhöhten Auflast (z.B. durch Aufbau der Kranstellfläche auf dem Fundament ist eine gesonderte Stellungnahme seitens ENERCON erforderlich (siehe auch Punkt 5.1 – letzter Absatz).

Die Auflast ist statisch erforderlich. Die Eignung des verwendeten Materials ist vom geotechnischen Sachverständigen sicherzustellen und schriftlich zu bestätigen.

7.4.4 Baugrundverbesserung

Zur nachträglichen Prüfung einer Baugrundverbesserung sind die Art der Prüfung, die zu kontrollierenden Kenngrößen, die Prüfpositionen, die Prüfhäufigkeit und die Annahmekriterien vor Ausführung der Prüfungen durch den geotechnischen Sachverständigen festzulegen und im Gutachten zu vermerken. Weitere Hinweise sind der ENERCON Spezifikation „*PM-CE-SP201-Hinweise Baugrundverbesserung*“ zu entnehmen.

7.4.5 Anheben der Gründungsebene

Fundamente mit vom Fundamentdatenblatt abweichender, angehobener Gründungsebene sind mit ENERCON abzustimmen und im Baugrundgutachten anzugeben. Weitere Hinweise sind der ENERCON Spezifikation „„PM-CE-SP651 Anheben Gründungsebene““ zu entnehmen

7.5 Auswirkungen des Frischbetoneigengewichtes bei Tiefgründungen

Der Baugrund darf während der Betonage keine Muldenbildung (Setzungsdifferenz größer 1 cm) erfahren. Bei der Ermittlung der Setzungen ist die Vorbelastung durch den Erdaushub zu berücksichtigen. Die zulässigen Betonierhöhen bei abschnittsweiser Betonage sind gemäß Typenstatik vorgegeben und den ENERCON Schalplänen zu entnehmen.

7.6 Überwachung der Bauausführung

Die Baugrubensohle, sowie etwaige weitere Bodenverbesserungs- bzw. Austauschmaßnahmen (insbesondere die zugehörigen statischen Nachweise & Herstellprotokolle) sind vom verantwortlichen geotechnischen Sachverständigen abzunehmen und schriftlich freizugeben.

Bei der Ausführung besonderer Maßnahmen wie z. B. dem Verfüllen von Hohlräumen sind die Arbeiten vom geotechnischen Sachverständigen zu überwachen und nach Abschluss gesondert, schriftlich freizugeben.

Bei Tiefgründungen sind die Ramm- / Herstellprotokolle der Bauwerkspfähle auf Übereinstimmung mit dem geotechnischen Entwurfsbericht durch den geotechnischen Sachverständigen zu überprüfen. Die Rammprotokolle und die Integritätstestergebnisse sind zu beurteilen. Die Tiefgründung ist schriftlich freizugeben.

8 Zuwegungen und Kranstellflächen

Der Einfluss der Herstellung und der Nutzung der Kranstellfläche auf die Gründung der WEA ist zu begutachten. Bei Auftreten von negativer Mantelreibung und Seitendruck auf Bauwerkspfähle sind entsprechende Vorgaben zur statischen Berücksichtigung zu geben.

Erforderliche Informationen zur Kranstellfläche sind der ENERCON Spezifikationen für Zuwegung und Kranstellfläche für den entsprechenden Anlagentyp zu entnehmen.

9 Verteiler

- Projektmanagement (PM)
- Vertrieb
- Kunde durch Vertrieb/ PM
- Geotechnischer Sachverständiger durch Kunde/ PM
- WRD - Fundamente
- QS - Fundamente