FACHBEITRAG WINDENERGIE · FLACHGRÜNDUNG · BAUGRUNDSTEIFIGKEIT

Drehfedersteifigkeit von WEA-Flachgründungen

Was die Typenprüfung fordert – und was der Baugrund unter dem Fundament beiträgt

GeoStudys Consulting, Ingenieurbüro für Geotechnik, Umwelt und Geothermie, Berlin

KURZFASSUNG

Die Typenprüfung einer Windenergieanlage setzt für die Gründung eine Mindest-Drehfedersteifigkeit voraus, getrennt für statische und dynamische Beanspruchung. Der Beitrag erläutert den Halbraumansatz, die Wahl des Schubmoduls aus Drucksondierungen und zeigt an einem Standort in Sachsen-Anhalt, wie groß die Reserve ist – und wo sie verloren geht.

SCHLAGWÖRTER · Windenergieanlage · Flachgründung · Drehfedersteifigkeit · Schubmodul · Drucksondierung

1 Ausgangslage

Die Turmbemessung geht von einer bestimmten Einspannung am Fundament aus. Ist der Baugrund weicher, sinkt die Eigenfrequenz von Turm und Gründung und rückt an die Anregung durch den Rotor heran. Das typengeprüfte Fundamentdokument des Herstellers nennt deshalb zwei Mindestwerte: $k_{\varphi,dyn}$ für den Betrieb und $k_{\varphi,stat}$ für die Verdrehung unter Dauerlast; die Nachweisform regelt die DIBt-Richtlinie [1], [4]. Beide Werte sind standortbezogen nachzuweisen.

2 Halbraumansatz

Für eine starre Kreisplatte auf dem elastisch-isotropen Halbraum gilt bei voll gedrückter Sohle [2], [3]:

$$k_\varphi = 8 \cdot G \cdot R^3 / (3 \cdot (1 - \nu)) = G \cdot D^3 / (3 \cdot (1 - \nu)) \qquad (1)$$

G Schubmodul · R, D Radius, Durchmesser des Fundaments · ν Querdehnzahl (hier 0,30)

D geht in dritter Potenz ein, G linear. Maßgebend ist der Baugrund bis etwa 0,5 · D unter der Sohle; über dieses Fenster wird G gemittelt. Die Einbindung wird nicht angerechnet und bleibt Reserve. Klafft die Sohlfuge, sinkt k_φ deutlich.

3 Welcher Schubmodul?

Statisch folgt G aus dem Steifemodul; $E_s = 0{,}5 \cdot M$ aus der Drucksondierung [5] setzen wir als vorsichtigen Erfahrungswert an. Dynamisch folgt G aus der Scherwellengeschwindigkeit, abgemindert auf das Dehnungsniveau im Betrieb [7]:

$$G_{stat} = E_s \cdot (1 - 2\nu) / (2 \cdot (1 - \nu)) \quad G_{dyn} = f_G \cdot \rho \cdot v_s^2 \qquad (2)$$

ρ Dichte · v_s Scherwellengeschwindigkeit · f_G Abminderung auf Betriebsdehnung (hier als Ansatz 0,80; genauer aus der Dehnung im Lastfall [1], [7])

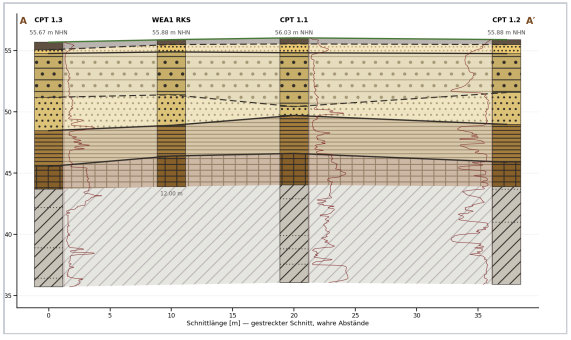


Bild 1. Baugrundschnitt eines WEA-Standorts in Sachsen-Anhalt aus Schlüsselbohrung und drei Drucksondierungen (anonymisiert). Schluffige Sande über Geschiebemergel der Grundmoräne.

STANDORT IM ÜBERBLICK

Fundament	Kreis, D = 29,1 m
Einbindung	2,9 m
Mittelungsfenster	0,5 · D ≈ 14,6 m
Querdehnzahl ν	0,30
$k_{\varphi,stat}$ gefordert	52 000 MNm/rad
$k_{\varphi,dyn}$ gefordert	260 000 MNm/rad
Gründungsschicht	stark schluffiger Sand

4 Beispiel Sachsen-Anhalt

Standort und Anforderungen zeigt der Kasten neben Bild 1. Nach G umgestellt zeigt Gl. (1), was der Baugrund leisten muss:

$$G_{erf} = 3 \cdot (1 - \nu) \cdot k_{\varphi,erf} / D^3 \;\rightarrow\; 4{,}4 \text{ bzw. } 22 \text{ MN/m}^2 \qquad (3)$$

Dynamisch sind 22 MN/m² der Wert G_{dyn}, also $G_0 \approx 28$ MN/m². Statisch entspricht die Forderung nur rd. 15 MN/m² Steifemodul; an diesem Standort mit schluffigem Sand über Geschiebemergel ist die Drehfeder daher nicht maßgebend (Tabelle 1). Kritisch wird sie bei Mudde, Torf oder lockeren Sanden im Fenster 0,5 · D und bei kleineren Fundamenten.

Tabelle 1. Drehfedersteifigkeit je Sondierung, Mittel über 0,5 · D; $G_{dyn} = 0{,}8 \cdot G_0$

Sondierung	G_{stat} [MN/m²]	k_{stat} [MNm/rad]	G_0 [MN/m²]	G_{dyn} [MN/m²]	k_{dyn} [MNm/rad]
CPT 1	22,0	257 869	190	152	1 782 111
CPT 2	20,2	236 524	197	158	1 846 310
CPT 3	16,2	190 602	165	132	1 553 510
gefordert	4,4	52 000	≈ 28	22	260 000
Reserve		3,7-fach			6,0-fach

5 Empfehlungen

- Mindestens drei Drucksondierungen je Fundament, über den Umfang verteilt, bis 0,5 · D unter die Sohle oder Fortschreibung begründen.
- Statischen und dynamischen Nachweis getrennt führen, mit dem ungünstigsten Einzelwert, nicht dem Standortmittel.
- E_s vorsichtig ansetzen, Einbindung nicht anrechnen; Weichschichten im Fenster früh erkennen.

NORMEN UND LITERATUR

[1] **DIBt (2015)** Richtlinie für Windenergieanlagen, Turm und Gründung. Fassung Okt. 2012, korr. März 2015

[2] **DNV/Risø (2002)** Guidelines for Design of Wind Turbines. 2nd ed., Kopenhagen/Roskilde

[3] **Gazetas, G. (1991)** Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. J. Geotech. Eng. 117(9), 1363–1381

[4] **Quast, A. (2015)** Ansatz der Baugrundsteifigkeit bei der gesamtdynamischen Berechnung von WEA. Aktuelle Forschung in der Bodenmechanik, Springer

[5] **Robertson, P. K. (2009)** Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. Can. Geotech. J. 46, 1337–1355

[6] **DIN EN 1997-1** mit **DIN 1054** · **DIN 4019** · **DIN EN ISO 22476-1**

[7] **DGGT (2018)** Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugrunddynamik". 2. Aufl., Ernst & Sohn