

82213vA De minimale bodemkarakterisering voor de fundering

[TWEE BELASTINGSGEVALLEN BEREKEND VOOR FUNDERING WINDMOLEN
EAZ-13.2 15KW]

[Comments]

Version:	Author:	Chapter:	Info added/changed/deleted:	Date:	Reviewer 1:
V1.0	WH	All	New document	11/01-2021	SV
V2.0	SV		Updated the loading on the foundation: the weight of the turbine is now distributed over all 4 concrete plates	22-02-2021	WH
V3.0	WH		Additional calculations effective foundation area and horizontal carrying capacity	01/07/2021	SV
V4.0	SV		Updated vertical force from the mass of the wind turbine to 49.3 kN	25/01/2021	SV
V5.0	SV		Updated the loads to loadset V174	06/04/2022	SV
vA	SV		Implemented the new concrete plate.	27-10-2022	YZ
vB	SV		Zin over vertrouwelijkheid verwijderd	22-03-2023	

WH:

SV:

1 Inhoud

2 Introductie	1
3 Referenties	1
4 Termen en definities	1
5 Bodemsamenstelling	3
5.1 Belastingsgeval: kanteling windmolenfundering	5
5.2 Belastingsgeval: Verticaal draagvermogen van de bodem in gedraineerde toestand	6
5.3 Belastingsgeval: Horizontaal draagvermogen in gedraineerde situatie	7
6 Conclusie	8
7 Bijlagen	9
7.1 Karakteristieke waarden van de bodemeigenschappen.....	9

2 Introductie

Dit document beschrijft drie belastingsgevallen van de windmolenfundering met een specifieke bodemkarakterisering. De berekening wordt uitgevoerd voor de zwakst mogelijke grondsoort, namelijk zachte klei.

In Tabel 1 zijn de belangrijkste kenmerken van zachte klei weergegeven. Verdere kenmerken zijn te vinden in bijlage 7.1.

Tabel 1: Belangrijkste kenmerken van zachte klei

Soort grond	Kegelweerstand	Specifiek gewicht	Hoek van inwendige wrijving
Zachte klei	0,5 MPa	14 kN/m ³	17,5°

De beoordeling van de bodem gebeurt op basis van de bepalende belastingen. Er wordt naar drie gevallen gekeken: Kanteling windmolenfundering en verticaal draagvermogen van de grond en horizontaal draagvermogen.

3 Referenties

1. **Stoel, dr. ir.** [REDACTED] & **prof. dr. ir.** [REDACTED] *Reader geotechniek voor het hbo*. Den Haag : Werkgroep Waterbouw KIVI afdeling Hoger Onderwijs Techniek, 2014.

4 Termen en definities

De volgende afkortingen, termen en definities zijn van toepassing.

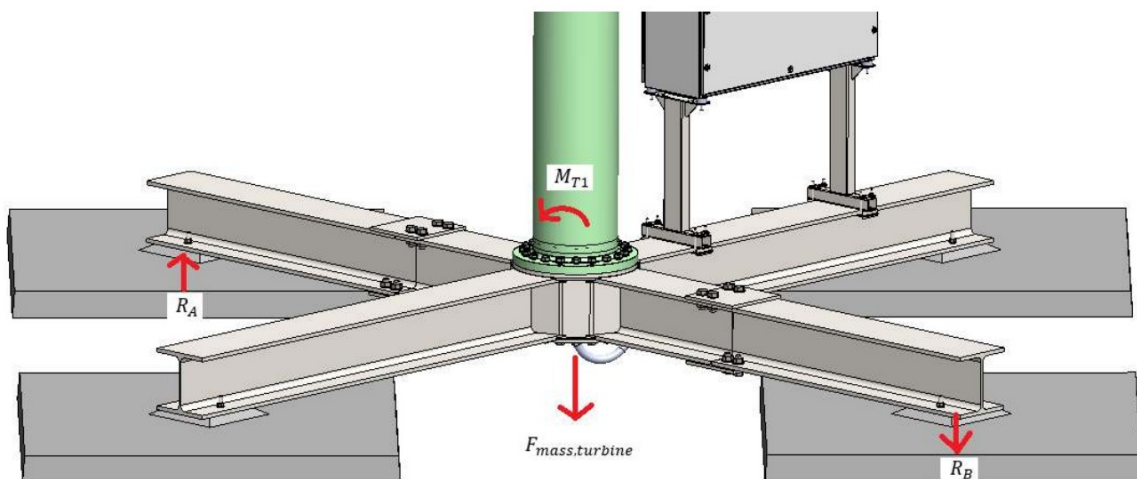
M_{T1}	Moment aan de onderzijde van de eerste torensectie
$F_{mass,turbine}$	Kracht veroorzaakt door de massa van de turbine

R_A	Reactiekracht van betonplaat
R_B	Reactiekracht van betonplaat
F_{cp}	Kracht betonplaat
W_{cp}	Gewicht betonplaat
g	Zwaartekracht
l	Lengte betonplaat
l'	Effectieve lengte betonplaat
b	Breedte betonplaat
b'	Effectieve breedte betonplaat
h	Dikte betonplaat
$\gamma_{G;stb}$	Permanente belasting ongunstig, betrouwbaarheidsklasse RC2/CC2
$\gamma_G \times \zeta$	Permanente belasting gunstig, betrouwbaarheidsklasse RC2/CC2
γ_d	Soortelijk gewicht van droge grond
h_c	Hoogte zachte-kleilaag
F_{cp}	Kracht zachte klei
F_{cp1}	Kracht zachte klei, kanteling windmolenfundering
F_{cp2}	Kracht zachte klei, draagkracht van de bodem
h_s	Dikte zandbed
φ_s	De hoek van interne wrijving van vastzittend zand
φ_c	De hoek van inwendige wrijving van zachte klei
l_{punch}	Lengte van de perforatieafstand
l_a	Gemiddelde breedte van de perforatieafstand
F_s	Kracht van zandbed
b_a	Breedte van de perforatieafstand
h_{wc}	Hoogtedekking op laagste zijde
γ_γ	Parameter volumegewicht voor draagvermogen
γ_w	Volumegewicht van water
c'_{avg}	Gemiddelde cohesie

N_c, N_q, N_γ	Gronddrukfactor voor cohesie, bedekking en grondmassa
s_c, s_q, s_γ	Reductiefactoren voor de vorm van de fundering
i_c, i_q, i_γ	Reductiefactoren voor de richting van de belasting
b_c, b_q, b_γ	Reductiefactoren voor hellingen onderzijde fundering
$\lambda_c, \lambda_q, \lambda_\gamma$	Reductiefactoren voor hellingen van het maaiveld (dekking)
b'	Effectieve breedte van de betonplaat
$\gamma'_{avg;d}$	Gemiddeld volumegewicht
$\sigma_{v;z;d}$	Bodembedekking op laagste zijde
$\sigma'_{v;max;d}$	Verticaal draagvermogen
$R_{v;d}$	Verticaal draagvermogen
V'_d	Verticale belasting
$R_{h;d}$	Horizontaal draagvermogen

5 Bodemsamenstelling

De bepalende belasting van de fundering is weergegeven in Figuur 1. Deze belastingen worden berekend bij de structurele beoordeling van de fundering. (Bron: 82206 Structural Evaluation Foundation (Structurele beoordeling fundering EAZ-13.2))



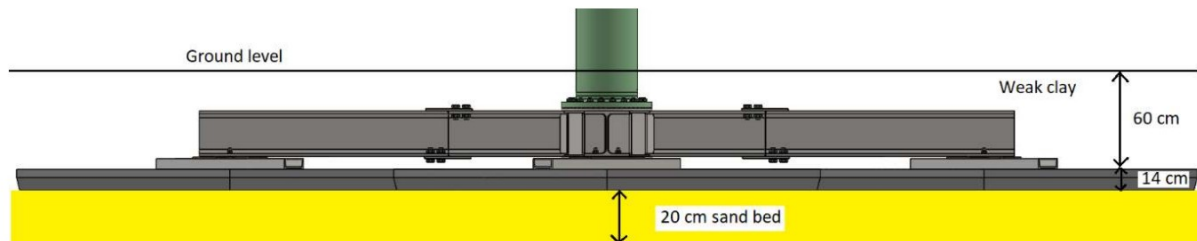
Figuur 1: Overzicht van de fundering met belastingen

Onderstaand het overzicht van belastingen. Hierbij zijn de waardes van R_A en R_B afgerond.

$M_{T1} =$	211,5 kN.m
$F_{mass,turbine} =$	49.3 kN
$R_A =$	54,63 kN -> 55,0 kN
$R_B =$	29,98 kN -> 30,0 kN
$F_h =$	211,5 kN.m / 15m (tower length) = 14.1 kN
$F_{hb} =$	13,38 kN / 4 (aantal betonplaten) = 3,53 kN

De reactiekrachten worden uitgeoefend op de betonplaten. Voor de grondbelasting moeten drie componenten in aanmerking worden genomen, namelijk:

- De massa van een betonplaat;
- De grondmassa (zachte klei) bovenop de betonplaat;
- De massa van het zandbed;



Figuur 2: Overzicht van de fundering in het veld

In Kader 1 worden de belastingen berekend die voortvloeien uit de massa van de betonplaat, de massa van de grond (zachte klei), en de massa van het onderliggende zandbed. De berekeningsmethode is gebaseerd op de *Reader geotechniek voor het hbo (1)*. Specificaties van de bodemeigenschappen zijn te vinden in bijlage 6.1

Kader 1: Berekening van de extra belastingen op de bodem

Massa betonplaat:

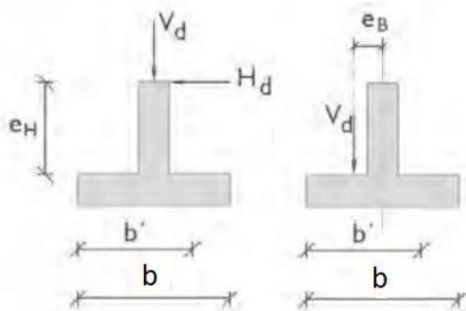
$$F_{cp} = W_{cp} \times g$$

$$F_{cp} = 972 \times 9,81 = 9535 \text{ (N)} = \mathbf{9,54 \text{ (kN)}}$$

Afmetingen betonplaat:

$$l \times b \times h = 1,8 \times 1,8 \times 0,125 \text{ m}$$

Effectieve funderingsoppervlak betonplaat:



$$e_B = \frac{H_d \times e_H}{V_d}$$

$$e_H = h + h_s = 0,125 + 0,2 = 0,315 \text{ m}$$

$$e_B = \frac{3,53 \times 0,315}{129,3} = 0,009m$$

De excentriciteit op het effectieve funderingsoppervlak ten gevolge van de horizontale belasting is zeer laag en is daarom verwaarloosbaar.

$$b' = b, l' = l$$

Grondmassa (zwakke klei) op betonplaat:

Parameters:

$\gamma_{G,stb} = 0,9 \rightarrow$ permanente belasting ongunstig, betrouwbaarheidsklasse RC2/CC2

$\gamma_G \times \zeta = 1,2 \rightarrow$ permanente belasting gunstig, betrouwbaarheidsklasse RC2/CC2

$\gamma_d = 14 \text{ (kN/m}^3\text{)}$

$h_p = 0,6m$

$$F_{wp} = \gamma_{G,stb} \times \gamma_d \times l \times b \times h_p + 2 \times \gamma_{G,stb} \times \gamma_d \times l \times h_p \times \tan(17,5)$$

$$F_{wp1} = 0,9 \times 14 \times 1,8 \times 1,8 \times 0,6 + 2 \times 0,9 \times 14 \times 1,8 \times 0,6 \times 0,32 = \mathbf{33,1 \text{ (kN)}} \rightarrow$$

belastingsgeval: kanteling van de windmolenfundering

$$F_{wp2} = 1,2 \times 14 \times 1,8 \times 1,8 \times 0,6 = \mathbf{32,7 \text{ (kN)}} \rightarrow \text{belastingsgeval: draagvermogen van de bodem}$$

Massa zandbed:

Parameters:

$h_s = 0,2m$

$\varphi_s = 35^\circ$

$\varphi_c = 17,5^\circ$

$$l_{punch} = l + 2 \times h \times \tan(\varphi_s - \varphi_c)$$

$$l_{punch} = 1,8 + 2 \times 0,2 \times \tan(35 - 17,5) = 1,93(m)$$

$$l_a = \frac{(l_{punch} - l)}{2} + l$$

$$l_a = \frac{(1,93 - 1,8)}{2} + 1,8 = 1,87 \text{ (m)}$$

$\gamma_G \times \zeta = 1,2$

$\gamma_d = 20 \text{ (kN/m}^3\text{)}$

$$F_s = \gamma_G \times \zeta \times \gamma_d \times l_a \times b_a \times h_s$$

$$F_s = 1,2 \times 20 \times 1,87 \times 1,87 \times 0,2 = \mathbf{16,78 \text{ (kN)}}$$

5.1 Belastingsgeval: kanteling windmolenfundering

In dit belastingsgeval wordt de situatie van kanteling onderzocht. Dit is afhankelijk van de grondmassa en de massa van de betonplaat. Het gewicht van de betonplaat en de bedekkingsgrond moet groter zijn dan de reactiekracht van de fundering. Als dat niet het geval is, zal de fundering van de windmolen gaan kantelen. De beoordeling is weergegeven in Kader 2.

Kader 2: Beoordeling van kanteling

Equation of tilt:

$$F_{cp} + F_{wp1} \geq R_B$$

$$9,54 + 33,1 = \mathbf{42,64 \text{ (kN)}} > \mathbf{30 \text{ (kN)}} \rightarrow \text{agreed}$$

De conclusie is dat de massa van de betonplaat en de bovenliggende zachte klei op de betonplaat groter is dan de reactiekracht van de windmolenbelasting. De fundering kantelt niet.

5.2 Belastingsgeval: Verticaal draagvermogen van de bodem in gedraineerde toestand
 In dit belastingsgeval wordt de verticale draagkracht van de zachte klei onderzocht. De berekeningen zijn gebaseerd op de *Reader geotechniek voor het hbo* (1), en zijn weergegeven in Kader 3.

Kader 3: Berekening van het verticale draagvermogen van zachte klei

Bodembedekking aan de laagste zijde:

$$h_{wp} = 0,6 \text{ (m)}$$

$$\gamma_d = 14 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$\gamma_\gamma = 1,1$$

$$\sigma_{v,z;d} = h_{cc} \times \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_\gamma} \right)$$

$$\sigma_{v,z;d} = 0,6 \times \left(\frac{14}{1,1} \right) = 7,64 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Effectief volumegewicht:

$$\gamma_d = 14 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$\gamma_\gamma = 1,1$$

$$\gamma_w = 10 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$\gamma'_{avg;d} = \frac{\gamma_d}{\gamma_\gamma} - \gamma_w$$

$$\gamma'_{avg;d} = \frac{14}{1,1} - 10 = 2,73 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

Verticale draagkracht in gedraineerde situatie:

Parameters:

$$c'_{avg} = 0$$

$$N_c = 9,55$$

$$s_c = 1,37$$

$$i_c = 1$$

$$b_c = 1$$

$$\lambda_c = 1$$

$$\sigma_{v,z;d} = 7,63 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$N_q = 5,15$$

$$s_q = 1,30$$

$$i_q = 1$$

$$b_q = 1$$

$$\lambda_q = 1$$

$$b' = 2 \text{ (m)}$$

$$\gamma'_{avg;d} = 2,73 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$N_\gamma = 2,75$$

$$s_\gamma = 0,7$$

$$i_\gamma = 1$$

$$b_\gamma = 1$$

$$\lambda_\gamma = 1$$

$$\sigma'_{v,max;d} = c'_{avg;d} N_c s_c i_c b_c \lambda_c + \sigma_{v,z;d} N_q s_q i_q b_q \lambda_q + \frac{1}{2} \times b' \times \gamma'_{avg;d} N_\gamma s_\gamma i_\gamma b_\gamma \lambda_\gamma$$

$$\sigma'_{v,max;d} = 0 \times 9,55 \times 1,37 \times 1 \times 1 \times 1 + 7,63 \times 5,15 \times 1,30 \times 1 \times 1 \times 1 + 0,5 \times 2 \times 2,73 \times 2,75 \times 0,7 \times 1 \times 1 \times 1 = 56,4 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Verticaal draagvermogen:

$$R_{v;d} = \sigma'_{v;max;d} \times b' \times l'$$

$$R_{v;d} = 56,4 \times 1,8 \times 1,8 = \mathbf{182,7 \text{ (kN)}}$$

De verticale draagkracht van de zachte klei moet groter zijn dan de reactiekracht van de fundering van de windmolen. Als dat niet het geval is, komt de fundering van de windmolen scheef te staan. De beoordeling van het draagvermogen van de bodem is weergegeven in Kader 4.

Kader 4: Beoordeling van draagkracht

Vergelijking van doorzakking:

$$R_{v;d} \geq R_A + F_{cp} + F_{wp2} + F_s$$

$$182,7 \text{ (kN)} > 55,0 + 9,54 + 32,6 + 16,8 \text{ (kN)}$$

$$\mathbf{182,7 \text{ (kN)} > 113,84 \text{ (kN)} \rightarrow \text{akoord}}$$

De conclusie is dat de verticale draagkracht groter is dan de gezamenlijke krachten van de windmolen, de betonplaat, de zachte kleigrond en het zandbed. De fundering komt niet scheef te staan.

5.3 Belastingsgeval: Horizontaal draagvermogen in gedraineerde situatie

In dit belastingsgeval wordt het horizontaal draag vermogen van zwakke klei beoordeeld. De berekeningen zijn gebaseerd op de *Reader geotechniek voor het hbo* (1), en zijn weergegeven in Kader 5.

Kader 5: Berekening van horizontale draagvermogen voor zwakke klei

Berekening verticale belasting:

$$V'_d = R_A + F_{cp} + F_{wp2} + F_s$$

$$V'_d = 55,00 + 9,54 + 32,6 + 16,8 = \mathbf{113,94 \text{ (kN)}}$$

Horizontaal draagvermogen in gedraineerde situatie:

$$R_{h;d} = V'_d \times \tan \varphi'_c$$

$$R_{h;d} = 113,94 \times \tan 17,5^\circ = \mathbf{35,9 \text{ kN}}$$

Het horizontale draagvermogen van de zwakke klei moet hoger zijn dan de horizontale kracht van de windmolen, Als dat niet zo is zal de windmolen verplaatsen. De evaluatie van het draagvermogen van de bodem is weergegeven in Kader 6.

Kader 6: Evaluatie van draagvermogen

Berekening van verplaatsing:

$$R_{h;d} > F_{hb}$$

$$\mathbf{35,9 \text{ (kN)} > 3,35 \text{ (kN)} \rightarrow \text{akkoord}}$$

De conclusie is dat het horizontale draagvermogen groter is dan de horizontale kracht op de windmolen. De fundering zal niet verschuiven.

6 Conclusie

Er werd een beoordeling van de fundering uitgevoerd voor een grondsoort "zachte klei". Dit blijkt de minimale bodemsoort voor deze fundering te zijn.

7 Bijlagen

7.1 Karakteristieke waarden van de bodemeigenschappen

Table 1 – NEN 8740 (page 18)

Type of soil		Representative mean value for the soil properties													c' (kPa)	f _{undr} (kPa)	
Gravel	Admixture	Consistency 1)	γ (kN/m3) 2)	γ _{sat} (kN/m3)	q _c (Mpa) 3/6)	C _u p	C's	C _c	Ca ₅	C _{SW}	E _x (Mpa) 8)	φ' (°)					
Gravel	weak silty	loose	17	18	15	500	-	0,008	0	0,003	75	32,5	-	-			
	moderate	moderate	18	20	25	1000	-	0,004	0	0,002	125	35	-	-			
	fixed/solid	fixed/solid	19 or 20	20 or 21	30	1200 or 1400	-	0,003 or 0,002	0	0,001 or 0	150 or 200	37,5 or 40	-	-			
	strong silty	loose	18	20	10	400	-	0,009	0	0,003	50	30	-	-			
Sand	moderate	moderate	19	21	15	600	-	0,006	0	0,002	75	32,5	-	-			
	fixed/solid	fixed/solid	20 or 21	22 or 22,5	25	100 or 1500	-	0,003 or 0,002	0	0,001 or 0	125 or 150	35 or 40	-	-			
	clean	loose	17	19	5	200	-	0,021	0	0,007	25	30	-	-			
	moderate	moderate	18	20	15	600	-	0,006	0	0,003	75	32,5	-	-			
Loam 4)	fixed/solid	fixed/solid	19 or 20	21 or 22	25	1000 or 1500	-	0,003 or 0,002	0	0,001 or 0	125 or 150	35 or 40	-	-			
	weak silty clayey	weak	18 or 19	20 or 21	5 or 20	450 or 650	-	0,008 or 0,005	0	0,003 or 0,001	25 or 35	27 or 32,5	-	-			
	strong silty clayey	strong	18 or 19	20 or 21	2 or 15	200 or 400	-	0,019 or 0,009	0	0,006 or 0,001	20 or 30	25 or 30	-	-			
	weak sandy	weak	-	19	1	25	650	0,168	0,004	0,056	2	27,5 or 30	0	50			
Clay	moderate	moderate	-	20	2	45	1300	0,084	0,002	0,028	5	27,5 or 32,5	2	100			
	fixed/solid	fixed/solid	-	21 or 22	3	70 or 100	1900 or 2500	0,049 or 0,030	0,001	0,017 or 0,005	10 or 20	27,5 or 35	5 or 7,5	200 or 300			
	strong sandy clean	weak	-	19 or 20	2	45 or 70	1300 or 2000	0,092 or 0,055	0,002	0,031 or 0,005	5 or 10	27,5 or 35	0 or 2	50 or 100			
	moderate	moderate	-	14	0,5	7	80	1,357	0,013	0,452	1	17,5	0	25			
Peat	fixed/solid	fixed/solid	-	17	1	15	160	0,362	0,006	0,121	2	17,5	10	50			
	weak sandy	weak	-	19 or 20	2	25 or 30	320 or 500	0,168 or 0,126	0,004	0,056 or 0,042	4 or 10	17,5 or 25	25 or 30	100 or 200			
	moderate	moderate	-	15	0,7	10	110	0,759	0,009	0,253	1,5	22,5	0	40			
	strong sandy organic	moderate	-	18	1,5	20	240	0,237	0,005	0,079	3	22,5	10	80			
Peat	fixed/solid	fixed/solid	-	20 or 21	2,5	30 or 50	400 or 600	0,126 or 0,069	0,003	0,042 or 0,014	5 or 10	22,5 or 27,5	25 or 30	120 or 170			
	strong sandy	weak	-	18 or 20	1	25 or 140	320 or 1680	0,190 or 0,027	0,004	0,063 or 0,025	2 or 5	27,5 or 32,5	0 or 2	0 or 10			
	moderate	moderate	-	13	0,2	7,5	30	1,68	0,015	0,55	0,5	15	0 or 2	10			
	not preloaded moderate loaded	moderate	-	15 or 16	0,5	10 or 15	40 or 60	0,760 or 0,420	0,012	0,25 or 0,14	1 or 2	15	0 or 2	25 or 30			
Peat	weak	weak	-	10 or 12	0,1 or 0,2	5 or 7,5	20 or 30	7,59 or 1,81	0,023	2,530 or 0,6	0,2 or 0,5	15	2 or 5	10 or 20			
	moderate loaded	moderate	-	12 or 13	0,2	7,5 or 10	30 or 40	1,81 or 0,900	0,016	0,6 or 0,3	0,5 or 1	15	5 or 10	20 or 30			
Variation coefficient		0,05												0,1		0,2	
		0,25															