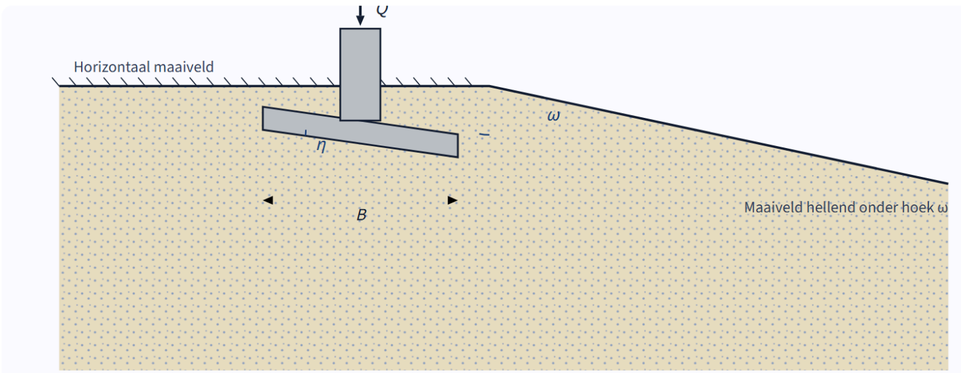
Geotechnische hoorcollegepresentatie · Funderingen

Draagvermogensvergelijking van Hansen

College: van Hansens eigen N_γ-coëfficiënt tot vorm- en dieptecorrecties, van hellingscoëfficiënten afhankelijk van de werkelijke belasting tot zool- en maaiveldhelling; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

- Hansen N_γ
- Vorm · diepte
- Helling afhankelijk van werkelijke belasting
- Zool- en maaiveldhelling
- Ongedraineerde additieve vorm
- Rekenvoorbeelden



Wat leren we in dit college?

- De drie termen van de **vergelijking van Hansen** herkennen en de zes correctiefactoren van elke term (vorm, diepte, helling, zoolhelling, maaiveldhelling)
- Hansen's **eigen N_γ-coëfficiënt** te berekenen en te vergelijken met die van Vesic
- De **vorm**- en **dieptefactoren** toepassen, inclusief de overgang bij $D_f/B = 1$
- De **hellingsfactoren** berekenen met de werkelijke belastingen h en v en de afschuifgrenzen toetsen
- Het gebruik van de coëfficiënten voor **zoolhelling η** en **maaiveldhelling ω**
- Het behandelen van de ongedraineerde ($\varphi = 0$) **totaalspanningsvorm** en de grondwaterstandsituaties
- De bruto en netto toelaatbare gronddruk bepalen en **toetsen**

COLLEGESTRUCTUUR

Elk onderwerp wordt in **drie stappen** behandeld:

1 · **Theorie**: wat is de regel, waarom is dat zo?

2 · **Opgave**: gegeven en gevraagd

3 · **Oplossing**: stap voor stap, met getallen

Voorbeeldfundering, het model dat de module opent: vierkante fundering van 2 m × 2 m op grond met $c = 10$ kPa, $\varphi' = 25°$, $D_f = 1$ m, $\gamma = 18$ kN/m³, geen grondwater.

Drie termen, elk met zes correcties

THEORIE

Hansen (1970) leidde de vergelijking voor het draagvermogen af met een eigen bezwijkmechanisme, onafhankelijk van Vesic. Elke term heeft **zes correctiefactoren** die erin worden vermenigvuldigd:

$$\begin{aligned} q_u = {} & c\, N_c\, s_c d_c i_c b_c g_c \\ & + q\, N_q\, s_q d_q i_q b_q g_q \\ & + \tfrac{1}{2}\gamma B\, N_\gamma\, s_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma \end{aligned}$$

N_c en N_q zijn gelijk aan die in alle methoden van deze paragraaf (de gesloten vormen van Prandtl en Reissner). **N_γ is specifiek voor Hansen** en is bij dezelfde φ′ kleiner dan die van Vesic.

De factoren **vorm** (s), **diepte** (d), **helling** (i), **zoolhelling** (b) en **maaiveldhelling** (g) vormen Hansens eigen set; hellende belasting, hellende zool en hellend maaiveld worden in dezelfde vergelijking behandeld.

Bij een vlakke zool, vlak maaiveld en verticale belasting geldt **i = b = g = 1**: de vergelijking reduceert tot de algemene vergelijking met vorm- en dieptefactoren.

NOTATIES

c, φ′: cohesie, wrijvingshoek

q = γ D_f: deklaagdruk ter hoogte van het stichtingsvlak

B, L: korte en lange zijde; B/L bepaalt de vorm

h, v: de drukken H/A en V/A van de belastingssituatie

η: helling van de funderingszool ten opzichte van de horizontaal

ω: helling van het maaiveld naast de fundering

Hansen's N_γ is kleiner dan die van Vesic

THEORIE

N_c en N_q zijn bij elke methode gelijk:

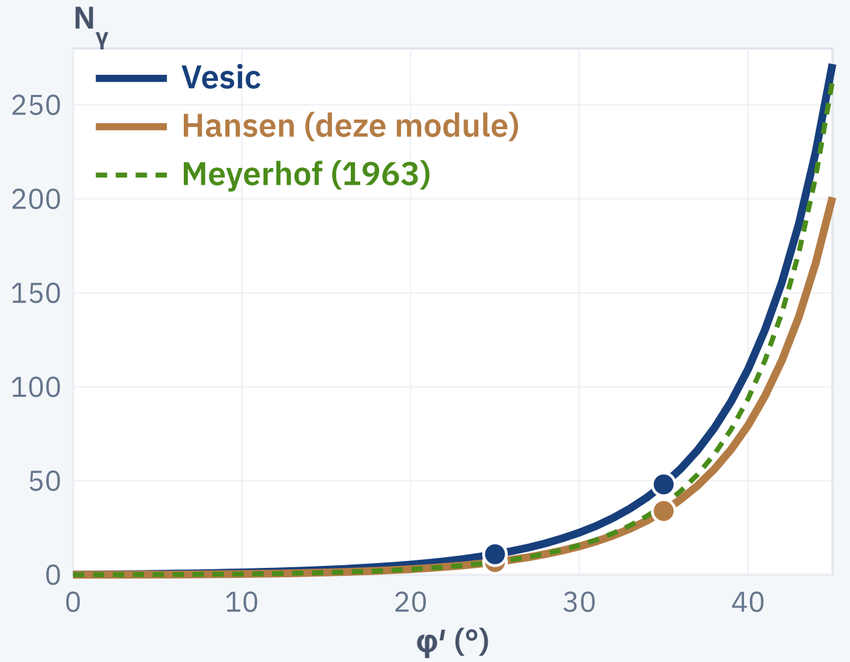
$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \tan^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right) \qquad N_c = (N_q - 1)\cot\varphi$$

Voor N_γ bestaat geen gesloten en algemeen aanvaarde uitdrukking. Door het breukvlak enigszins anders te idealiseren, vond Hansen zijn eigen uitdrukking:

$$N_\gamma^{\text{Hansen}} = 1.5\,(N_q - 1)\tan\varphi \qquad N_\gamma^{\text{Vesic}} = 2\,(N_q + 1)\tan\varphi$$

Beide zijn gerespecteerde afleidingen; geen van beide is in absolute zin "juister". Waar het om gaat is **de factoren van dezelfde methode samen te gebruiken**: Hansens N_γ met Hansens vorm- en hellingsfactoren.

Naarmate φ′ toeneemt, neemt het verschil evenredig af maar het sluit niet; bij φ′ = 25° is Hansen 62% van Vesic.



Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Grond	$\varphi' = 25°$ **(model waarin de module wordt geopend);** $\varphi' = 35°$ **ter vergelijking**
Methoden	**Hansen:** $N_\gamma = 1.5(N_q - 1)\tan\varphi$ **· Vesic:** $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi$

GEVRAAGD

Bepaal de waarden van **N_q, N_c** en **N_γ** volgens beide methoden; bereken met hoeveel procent de waarde van Hansen kleiner is dan die van Vesic.

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 N_q en N_c ($\varphi' = 25°$, $\tan 25° = 0.4663$)

$$N_q = e^{\pi \tan 25^\circ} \tan^2(57.5^\circ) = e^{1.4649}(2.4639) = \mathbf{10.66} \qquad N_c = \frac{10.66 - 1}{0.4663} = \mathbf{20.72}$$

2 N_γ: Hansen en Vesic

$$N_\gamma^{\text{Hansen}} = 1.5(10.66 - 1)(0.4663) = \mathbf{6.76}$$
$$N_\gamma^{\text{Vesic}} = 2(10.66 + 1)(0.4663) = \mathbf{10.88}$$

De N_γ van Hansen bedraagt **62%** van die van Vesic: in dezelfde grond valt de eigengewichtsterm ongeveer **38% kleiner** uit.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

φ′ (°)	N_q	N_c	N_γ Hansen	N_γ Vesic	Hansen / Vesic
10	2.47	8.34	0.39	1.22	%32
15	3.94	10.98	1.18	2.65	%45
20	6.40	14.83	2.95	5.39	%55
25	10.66	20.72	6.76	10.88	%62
30	18.40	30.14	15.07	22.40	%67
32	23.18	35.49	20.79	30.21	%69
35	33.30	46.12	33.92	48.03	%71
40	64.20	75.31	79.54	109.41	%73
45	134.87	133.87	200.81	271.75	%74

Hetzelfde geldt voor φ′ = 35°: N_γ = 33.92 (Hansen) en 48.03 (Vesic), een verhouding van 71%. De verhouding stijgt van 32% tot 74% naarmate φ′ toeneemt en is nooit 1: **meng de methoden niet**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Drie coëfficiënten afhankelijk van de verhouding B/L

THEORIE

Bij een niet-strookvormige fundering is het bezwijken driedimensionaal. De vormfactoren van Hansen zijn vergelijkbaar met die van De Beer; ze bevatten de **verhouding N_q/N_c**:

$$s_c = 1 + \frac{B}{L}\frac{N_q}{N_c} \qquad s_q = 1 + \frac{B}{L}\sin\varphi \qquad s_\gamma = 1 - 0.4\,\frac{B}{L}$$

Bij ongedraineerde belasting (φ = 0) gedraagt de verhouding N_q/N_c zich slecht; de cohesiecoëfficiënt neemt haar eigen eenvoudige vorm aan. Deze coëfficiënt is **additief**, geen vermenigvuldigingsfactor, daarom wordt s'_c geschreven:

$$s'_c = 0.2\,\frac{B}{L} \qquad (\varphi = 0)$$

Strookfundering (B/L → 0): $s_c = s_q = s_\gamma = 1$ en $s'_c = 0$. Voor vierkante en cirkelvormige funderingen wordt B/L = 1 aangehouden.

Vergelijking met De Beer: s_c en s_γ zijn gelijk; voor s_q gebruikt De Beer tan φ, Hansen sin φ.

VOOR φ′ = 25°

B/L	s_c	s_q	s_γ
0 (strook)	1,000	1,000	1,000
0.5	1.257	1.211	0.800
1 (vierkant)	1.515	1.423	0.600

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Grond	$\varphi' = 25°$: $N_c = 20.72,\ N_q = 10.66,\ \sin 25° = 0.4226$ **(Voorbeeld 1)**
Funderingen	**(a) vierkant 2 × 2 m · (b) rechthoek 2 × 4 m (B/L = 0.5) · (c) strook**
Ongedraineerd	**φ = 0: vierkant en 2 × 4 m**

GEVRAAGD

Bepaal voor elke fundering de waarden van **s_c, s_q, s_γ** (s'_c bij φ = 0); vergelijk voor de vierkante fundering s_q met die van De Beer.

Oplossing

OPLOSSING

1 (a) Vierkante fundering (B/L = 1)

$$s_c = 1 + (1)\frac{10.66}{20.72} = \mathbf{1.515} \qquad s_q = 1 + \sin 25^\circ = \mathbf{1.423} \qquad s_\gamma = 1 - 0.4 = \mathbf{0.600}$$

2 (b) Rechthoek 2 × 4 m (B/L = 0.5)

$$s_c = 1 + 0.5\frac{10.66}{20.72} = \mathbf{1.257} \qquad s_q = 1 + 0.5(0.4226) = \mathbf{1.211} \qquad s_\gamma = 1 - 0.2 = \mathbf{0.800}$$

3 (c) Strook en ongedraineerd geval (φ = 0)

$$\text{strook}: \; s_c = s_q = s_\gamma = 1 \qquad \varphi = 0: \; s_c' = 0.2 \; (\text{vierkant}), \; 0.1 \; (2 \times 4), \; 0 \; (\text{strook})$$

Bij een vierkante fundering neemt de q-term met **42%** toe en neemt de eigengewichts term met 40% af. De s_q van De Beer = 1 + tan φ = 1.466, die van Hansen 1.423: het verschil is ongeveer 3%.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Lineaire vorm en arctangensvorm

THEORIE

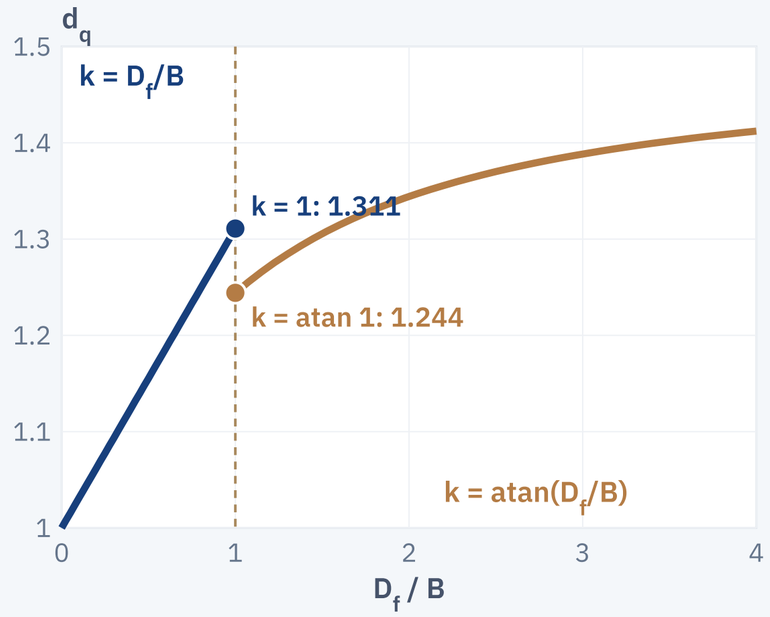
De grond boven de basis draagt bij aan het draagvermogen. De dieptefactoren van Hansen hangen af van de verhouding **k = D_f/B**; wanneer D_f/B groter is dan 1, wordt k als arctangens (in radialen) genomen:

$$d_c = 1 + 0.4\,k \qquad d_q = 1 + 2\tan\varphi\,(1-\sin\varphi)^2\,k \qquad d_\gamma = 1$$

$$k = \frac{D_f}{B}\ \left(\frac{D_f}{B} \le 1\right) \qquad k = \tan^{-1}\frac{D_f}{B}\ \left(\frac{D_f}{B} > 1\right)$$

Bij φ = 0 is d_q = 1; in de ongedraineerde additieve vorm wordt $d'_c = d_c - 1 = 0.4\,k$ geschreven.

De twee vormen sluiten met een sprong op elkaar aan bij D_f/B = 1: bij k = 1 is d_q = 1.311, net daarboven is $k = \tan^{-1}1 = 0.785$ en d_q = 1.244. Het is daarom raadzaam naburige waarden van D_f te vergelijken.



Opgave

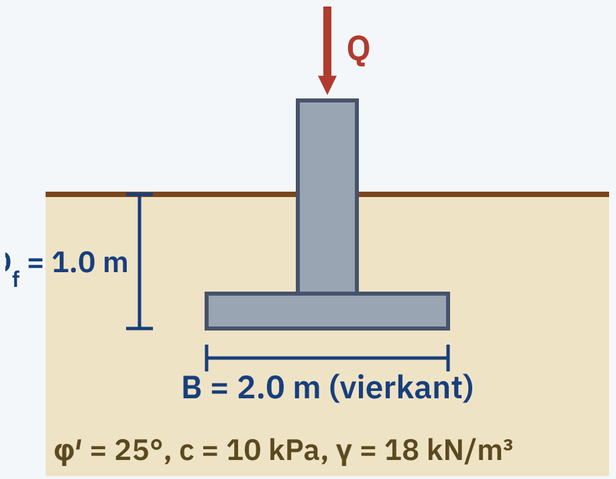
VOORBEELD

Gegeven

Grond	$\varphi' = 25°$: $\tan\varphi = 0.4663,\ (1 - \sin 25°)^2 = 0.3334$
Fundering	**B = 2 m; D_f = 1 m (voorbeeld), vergelijking D_f = 2 m en 3 m**
Ongedraineerd	**φ = 0: D_f = 1.5 m**

GEVRAAGD

Bepaal voor elke situatie de waarden van **d_c, d_q** en d_γ; verklaar wat er gebeurt wanneer D_f toeneemt van 2 m naar 3 m.



Oplossing

OPLOSSING

1 D_f = 1 m (D_f/B = 0.5 ≤ 1: k = 0.5)

$$d_q = 1 + 2(0.4663)(0.3334)(0.5) = \mathbf{1.155} \qquad d_c = 1 + 0.4(0.5) = \mathbf{1.200} \qquad d_\gamma = 1$$

2 D_f = 2 m (D_f/B = 1: lineair, k = 1) en D_f = 3 m (D_f/B = 1.5: k = $\tan^{-1}1.5$ = 0.9828)

$$D_f = 2: \; d_q = 1 + 2(0.4663)(0.3334)(1) = \mathbf{1.311}, \; d_c = \mathbf{1.400}$$

$$D_f = 3: \; d_q = 1 + 2(0.4663)(0.3334)(0.9828) = \mathbf{1.306}, \; d_c = \mathbf{1.393}$$

3 Ongedraineerd (φ = 0): D_f/B = 1.5/2 = 0.75

$$d_c = 1 + 0.4(0.75) = \mathbf{1.300} \quad (d'_c = 0.3) \qquad d_q = 1$$

D_f = 2 m → 3 m: d_q **neemt af** van 1.311 naar 1.306, omdat k overgaat van 1 naar $\tan^{-1}1.5$ = 0.98 (stap). Voor D_f = 1 → 2 m neemt deze echter toe van 1.155 naar 1.311.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Met de werkelijke belasting, niet met de hoek

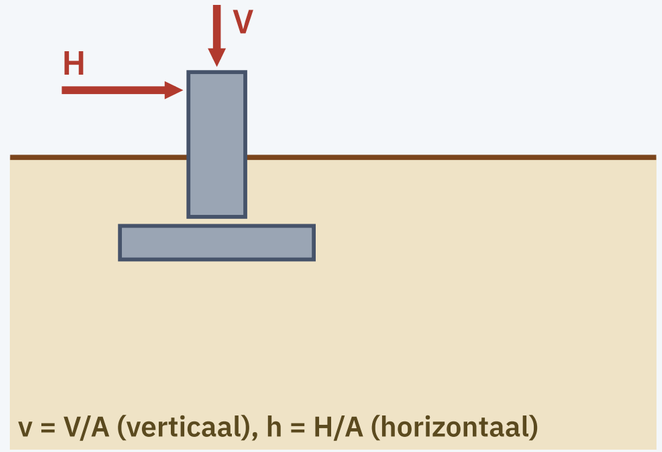
THEORIE

De hellingscoëfficiënten van Meyerhof hangen alleen af van de hoek van de belasting met de verticaal. Die van Hansen hangen af van de **werkelijke horizontale en verticale spanningen**; h = H/A en v = V/A zijn de spanningen van hetzelfde belastingsgeval (v = q_{app}):

$$i_q = \left(1 - \frac{0.5\,h}{v + c\cot\varphi}\right)^5 \qquad i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \;\; (\geq 0)$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{0.7\,h}{v + c\cot\varphi}\right)^5$$

$$\eta > 0: \;\; 0.7 \to 0.7 - \frac{\eta^\circ}{450^\circ}\;(i_\gamma) \qquad \varphi = 0: \;\; i'_c = 0.5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{h}{c}}\right),\; i_q = i_\gamma = 1$$



Als h > 0, moet $q_{opgelegd}$ worden ingevoerd: de toets van de fundering met de hellingsfactoren gebruikt **dezelfde belasting**.

Naarmate h/(v + c cot φ) groter wordt, naderen alle drie de factoren tot nul; een fundering die het glijden nadert, heeft geen draagvermogen meer.

De zool bereikt het draagvermogen voordat glijden optreedt

THEORIE

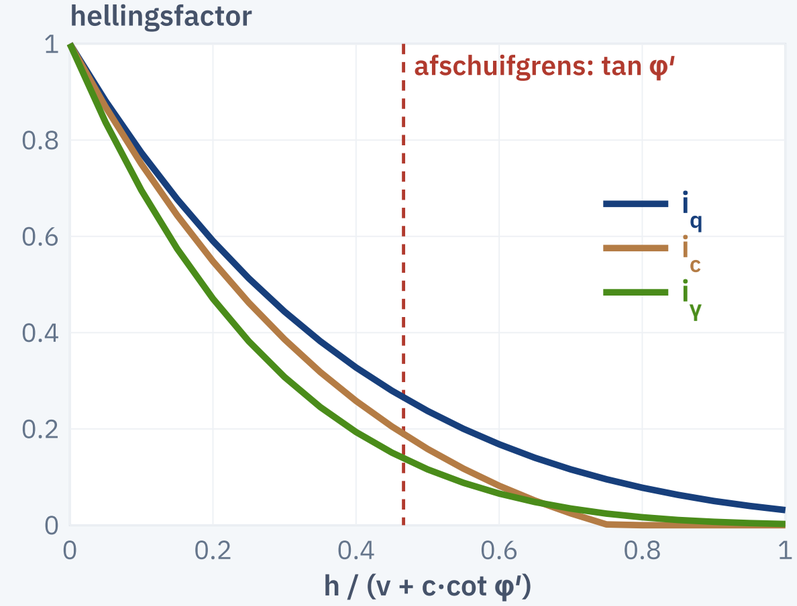
De fundering **glijdt** wanneer de horizontale belasting de wrijvings- en kleefweerstand van de zool overschrijdt. Bovengrens (met zoolwrijving φ en kleef c):

$$h_{shear} = v\tan\varphi + c = \tan\varphi\,(v + c\cot\varphi)$$

h > v tan φ + c: de module waarschuwt dat een glijdende fundering het draagvermogen niet kan bereiken; toets het glijden afzonderlijk voor het werkelijke funderingsvlak. In de grafiek is deze grens de lijn **h/(v + c cot φ) = tan φ**.

Als **h ≥ v + c cot φ** (h ≥ c bij φ = 0), stopt de module: de hellingscoëfficiënten verliezen hun betekenis.

Zodra i_c, i_q onder $1/N_q$ dalen, worden zij op nul gehouden; de cohesieterm wordt nooit negatief.



Opgave

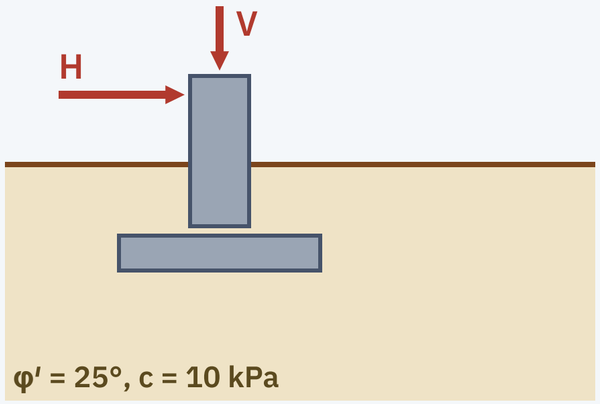
VOORBEELD

Gegeven

Fundering, grond	**modulemodel:** $c = 10\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ,\ N_q = 10.66$
Belastingsgeval	$v = q_{apply} = 150\ \mathrm{kPa},\ h = 30\ \mathrm{kPa}$ **(ek: 60, 90, 120)**
Basis	**recht (η = 0)**

GEVRAAGD

Bepaal de coëfficiënten i_c, i_q, i_γ en toets de glijgrens.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Verhouding: v + c cot φ = 150 + 10 (2.1445) = 171.45 kPa

$$x = \frac{h}{v + c\cot\varphi} = \frac{30}{171.45} = \mathbf{0.1750}$$

2 Coëfficiënten

$$i_q = (1 - 0.5 \cdot 0.175)^5 = \mathbf{0.633} \qquad i_\gamma = (1 - 0.7 \cdot 0.175)^5 = \mathbf{0.520}$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} = 0.633 - \frac{0.367}{9.66} = \mathbf{0.595}$$

3 Glijgrens

$$v\tan\varphi + c = 150(0.4663) + 10 = \mathbf{79.9}\ \text{kPa} \geq h = 30 \ \Rightarrow\ \text{geen slip}$$

$$v + c\cot\varphi = 171.4\ \text{kPa} > h$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

h (kPa)	h/(v + c cot φ)	i_c	i_q	i_γ	toets op glijden
0	0.000	1.000	1.000	1.000	gaat door
30	0.175	0.595	0.633	0.520	gaat door
60	0.350	0.318	0.382	0.245	gaat door
90	0.525	0.137	0.218	0.101	**waarschuwing: h > 79.9**
120	0.700	0.025	0.116	0.035	**waarschuwing: h > 79.9**

h = 30 kPa (20% van v) verlaagt de q-term met **37%**, de c-term met **41%** en de term voor het eigen gewicht met **48%**. Is de funderingszool 10° hellend, dan wordt $i_\gamma = (1 - (0.7 - 10/450)\cdot 0.175)^5 = 0.532$. Bij h = 90 en 120 kPa, die de grens overschrijden, glijdt de fundering: de factoren worden nog steeds berekend, maar glijden moet afzonderlijk worden getoetst.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Niet-vlakke zool en hellend maaiveld

THEORIE

Werkelijke funderingen hebben niet altijd een vlakke zool en staan niet altijd op een horizontaal maaiveld: de zool kan bewust hellend zijn uitgevoerd of de fundering kan op de kruin van een talud liggen. De factoren van Hansen omvatten beide (η en ω in graden; in exponentiële uitdrukkingen in radialen):

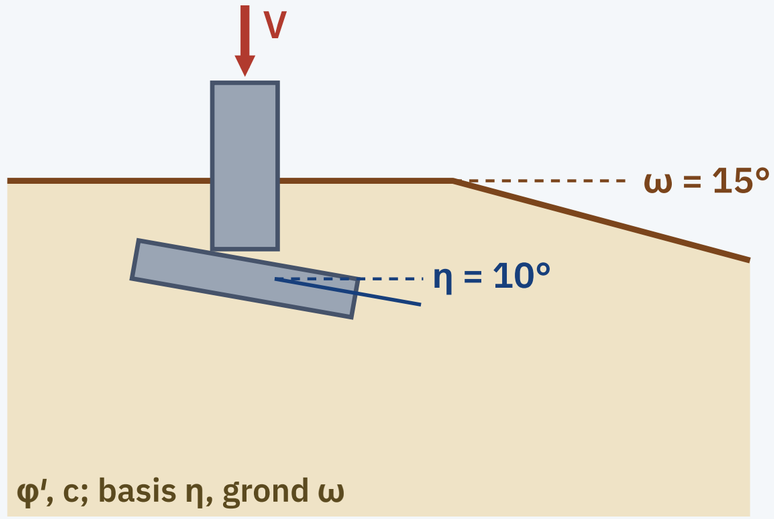
$$b_c = 1 - \frac{\eta^\circ}{147^\circ} \qquad b_q = e^{-2\eta \tan\varphi} \qquad b_\gamma = e^{-2.7\,\eta \tan\varphi}$$

$$g_c = 1 - \frac{\omega^\circ}{147^\circ} \qquad g_q = g_\gamma = (1 - 0.5\tan\omega)^5$$

De exponent van b_γ (2.7) is groter dan die van b_q (2): een hellende zool benadeelt de term voor het eigen gewicht meer dan de term voor de bovenbelasting.

η en ω worden ten hoogste 45° ingevoerd; als ω > φ is het talud op zichzelf niet in evenwicht en stopt de module.

$(1 - \tan\omega)^2$ is de vorm van **Vesic**, niet van Hansen, en is iets groter: bij ω = 5° geeft dit 0.833; die van Hansen geeft 0.800. Deze mag niet met de vergelijking van Hansen worden verward.



Opgave

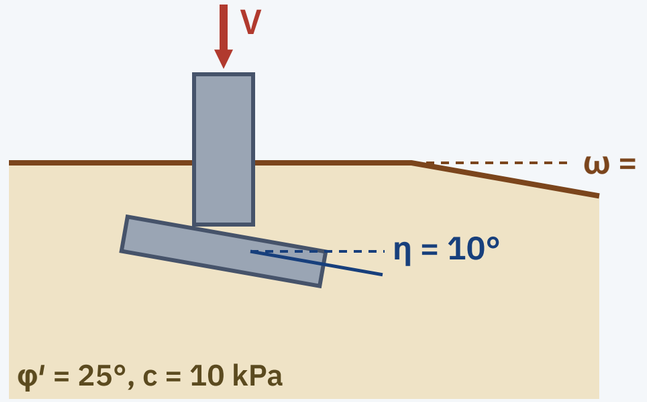
VOORBEELD

Gegeven

Grond	$\varphi' = 25^\circ,\ \tan\varphi = 0.4663$
Zoolhelling	**η = 10°**
Maaiveldhelling	**ω = 10° en ω = 15°**

GEVRAAGD

Bepaal de waarden van $\mathbf{b_c}$, $\mathbf{b_q}$, $\mathbf{b_\gamma}$ en $\mathbf{g_c}$, $\mathbf{g_q}$, $\mathbf{g_\gamma}$; vergelijk g_q met de vorm $(1 - \tan\omega)^2$ van Vesic.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Zoolhelling η = 10° (0.1745 rad)

$$b_c = 1 - \frac{10}{147} = \mathbf{0.932} \quad b_q = e^{-2(0.1745)(0.4663)} = \mathbf{0.850} \quad b_\gamma = e^{-2.7(0.1745)(0.4663)} = \mathbf{0.803}$$

2 Maaiveldhelling ω = 10° (tan 10° = 0.1763)

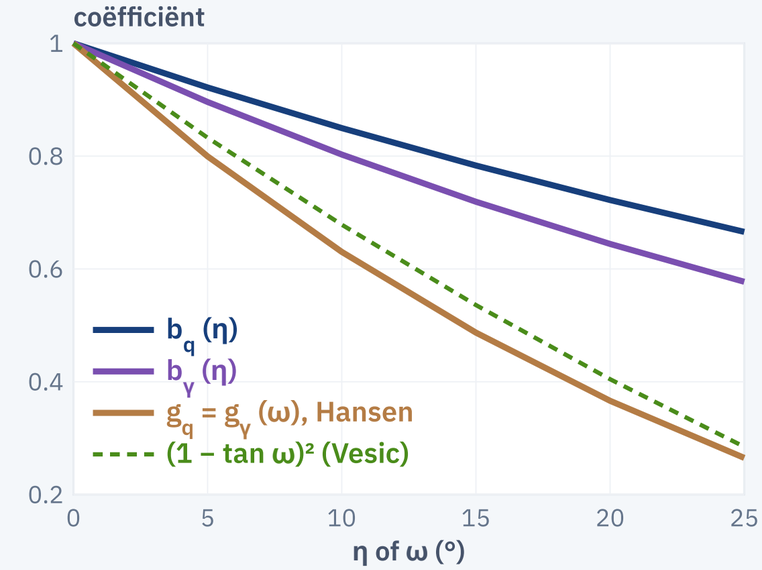
$$g_c = 1 - \frac{10}{147} = \mathbf{0.932} \quad g_q = g_\gamma = (1 - 0.5 \cdot 0.1763)^5 = (0.9118)^5 = \mathbf{0.630}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

ω (°)	g_c	$g_q = g_\gamma$ Hansen	g_q Vesic $(1 - \tan \omega)^2$
10	0.932	0.630	0.678
15	0.898	0.487	0.536

De g_q van Hansen is kleiner dan die van Vesic (ω = 10°: 0.630 en 0.678): zij is **conservatiever**. Een zoolhelling van η = 10° verlaagt de eigen-gewichtsterm met 20% en de deklaagdrukterm met 15%.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De zes coëfficiënten combineren

THEORIE

Hoewel de zes coëfficiënten ontmoedigend lijken, zijn **ze in het gewone geval allemaal 1**; de volledige vergelijking komt pas in beeld wanneer een aanname niet geldt. q_u is de verticale druk bij bezwijken; de module houdt bruto en netto druk gescheiden:

$$q_{u,net} = q_u - q \qquad q_{all,g} = \frac{q_u}{FS} \qquad q_{all,n} = \frac{q_{u,net}}{FS}$$

De opgelegde druk $q_{opgelegd}$ is de **verticale bruto druk aan de basis** voor hetzelfde belastingsgeval (V/A). De fundering voldoet onder de volgende voorwaarden:

$$q_{apply} \leq q_{all,g} \qquad FS_{\text{werkelijk}} = \frac{q_u}{q_{apply}} \qquad q_{apply} - q \leq q_{all,n}$$

Veilige verticale belasting $Q_{all} = q_{all,g} \cdot A$. Als $h > 0$ en $q_{opgelegd}$ niet is ingevoerd, kan de module niet alleen de draagvermogens niet berekenen, maar ook de hellingsfactoren niet.

WANNEER IS DE COËFFICIËNT 1?

Coëfficiënt	situatie waarin deze 1 is
s	strookfundering (B/L = 0)
d	$D_f = 0$ (zool aan het maaiveld)
i	h = 0 (verticale belasting)
b	η = 0 (gladde zool)
g	ω = 0 (vlak maaiveld)

Coëfficiënten ongewijzigd; q en γ veranderen

THEORIE

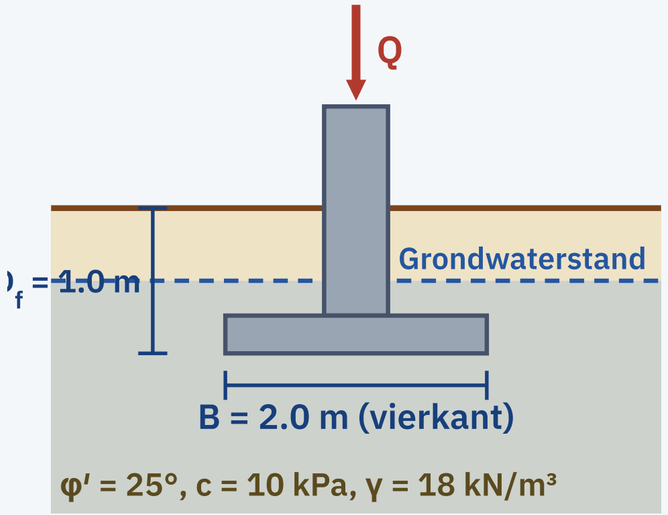
De module van Hansen behandelt het grondwater met **dezelfde drie gevallen** als de andere draagvermogenmodules. Onder de grondwaterstand is het effectieve volumieke gewicht γ′ = γ_{sat} − γ_w (γ_w = 9.81). D_w is de diepte van het grondwater vanaf het maaiveld:

$$\text{I } (D_w \le D_f):\ q = \gamma D_w + \gamma'(D_f - D_w),\ \ \gamma \to \gamma' \text{ (derde term)}$$

$$\text{III } (D_f < D_w \le D_f + B):\ q = \gamma D_f,\ \ \bar{\gamma} = \frac{1}{B}\left[\gamma D + \gamma'(B - D)\right],\ D = D_w - D_f$$

Voor D_w = D_f geldt q = γ D_f en wordt γ′ in de derde term gebruikt.

Water dieper dan één B onder de basis is **niet van invloed**. Water komt alleen binnen via **q en γ**; s, d, i, b, g blijven gelijk.



Opgave

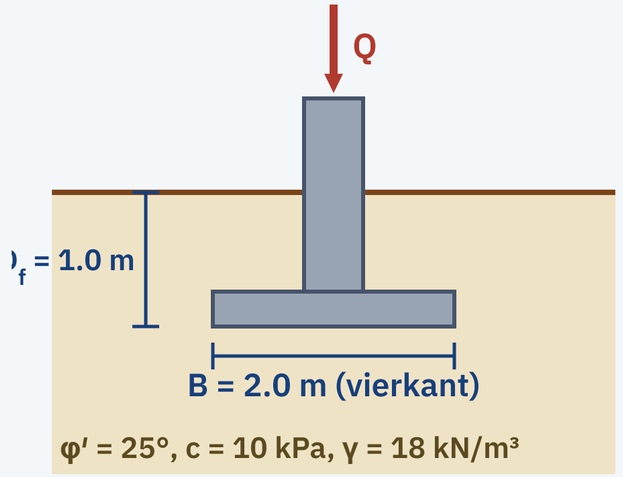
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**vierkant, B = L = 2.0 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 10\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$**; geen grondwater**
Belasting	**verticaal, centrisch**
Veiligheid	**FS = 3**

GEVRAAGD

q_u, bruto en netto q_{all} en de toelaatbare belasting Q_{all}; bepaal het aandeel van elke term.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Draagvermogensfactoren (φ′ = 25°)

$$N_c = \mathbf{20.72}, \quad N_q = \mathbf{10.66}, \quad N_\gamma = 1.5(10.66 - 1)(0.4663) = \mathbf{6.758}$$

2 Correctiecoëfficiënten (B/L = 1; D_f/B = 0.5; h = η = ω = 0)

$$s_c = 1.515,\ s_q = 1.423,\ s_\gamma = 0.6 \qquad d_c = 1.200,\ d_q = 1.155,\ d_\gamma = 1 \qquad i = b = g = 1$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Draagvermogen ($q = \gamma D_f = 18$ kPa)

$$q_u = 10(20.72)(1.515)(1.200) + 18(10.66)(1.423)(1.155)$$
$$+ \tfrac{1}{2}(18)(2)(6.758)(0.6) = 376.6 + 315.5 + 73.0 = \mathbf{765.05}\ \text{kPa}$$

4 Toelaatbare gronddruk en belasting ($A = 2^2 = 4$ m²)

$$q_{all,g} = \frac{765.05}{3} = \mathbf{255.02}\ \text{kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{765.05 - 18}{3} = 249.02\ \text{kPa}$$

$$Q_{all} = 255.02(4) = \mathbf{1{,}020}\ \text{kN}$$

49% van het draagvermogen komt van cohesie, **41%** van bovenbelasting en slechts **10%** van het eigen gewicht: de kleine N_γ en $s_\gamma = 0.6$ verzwakken de term voor het eigen gewicht.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

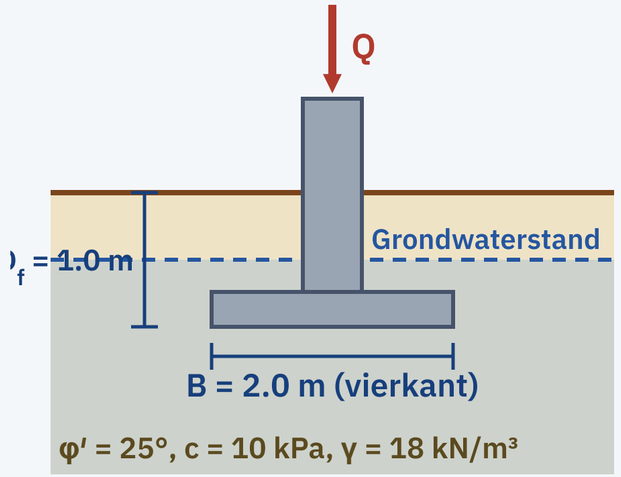
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**vierkant, B = L = 2.0 m, D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 10\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 18$ **(boven),** $\gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$ **(onder de grondwaterstand)**
Grondwater	**D_w = 0.5; 1.0; 2.0 en 4.0 m**

GEVRAAGD

Bepaal voor elke situatie **q**, het volumiek gewicht in de derde term en de waarden van **q_u**. (Factoren als in Voorbeeld 6.)



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Geval I ($D_W \leq D_f$): $\gamma' = 19 - 9.81 = 9.19$ kN/m³

$$D_w = 0.5: \;\; q = 18(0.5) + 9.19(0.5) = \mathbf{13.595}\ \mathrm{kPa}$$

$$D_w = 1.0: \;\; q = 18(1.0) = \mathbf{18.0}\ \mathrm{kPa}$$

2 Geval III ($D_W = 2.0 \Rightarrow D = 1.0 \leq B$) en water zonder effect ($D_W = 4.0 \Rightarrow D = 3.0 > B$)

$$D_w = 2.0: \;\; \bar{\gamma} = \frac{1}{2}\left[18(1) + 9.19(1)\right] = \mathbf{13.595}\ \mathrm{kN/m^3},\ q = 18\ \mathrm{kPa}$$

$$D_w = 4.0: \;\; q = 18\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

D_w (m)	Toestand	q (kPa)	γ derde term	q_u (kPa)
0.5	I	13.59	9.19	**652.1**
1.0	I	18.00	9.19	**729.3**
2.0	III	18.00	13.59	**747.2**
4.0	verwaarloosbaar	18.00	18.00	**765.1**

Bij water op 0.5 m is q_u = 652, bij diep water 765 kPa (15% verschil). De oorzaak van het verschil is **uitsluitend q en γ**: de cohesieterm (376.6 kPa) verandert in het geheel niet.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

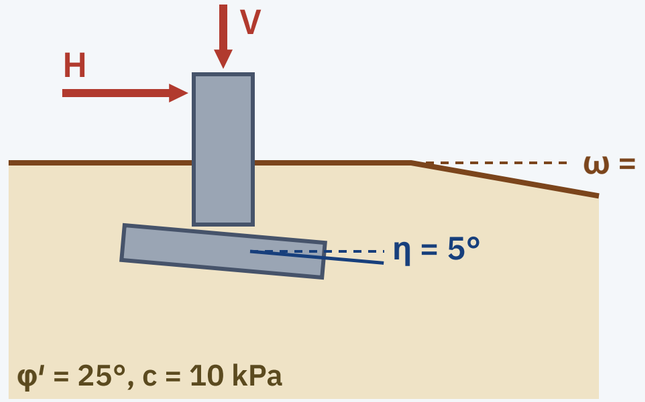
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**vierkant, B = L = 2.0 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 10\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$**; geen grondwater**
Belastingsgeval	$v = q_{apply} = 150\ \mathrm{kPa},\ h = 30\ \mathrm{kPa}$
Zool, grond	**η = 5°, ω = 10°**
Veiligheid	**FS = 3**

GEVRAAGD

Bepaal de waarden van $\mathbf{q_u}$ en $\mathbf{q_{all}}$; toets of de fundering voldoet voor q_{uyg} = 150 kPa; toets het glijden.



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 Hellingcoëfficiënten (v + c cot φ = 171.45 kPa; zool hellend: 0.7 → 0.7 − 5/450 = 0.6889)

$$x = \frac{30}{171.45} = 0.175 \qquad i_q = (1 - 0.5x)^5 = \mathbf{0.633} \qquad i_c = \mathbf{0.595}$$

$$i_\gamma = (1 - 0.6889x)^5 = \mathbf{0.526}$$

2 Factoren voor zool- en maaiveldhelling (η = 5°, ω = 10°)

$$b_c = 0.966,\ b_q = 0.922,\ b_\gamma = 0.896$$

$$g_c = 0.932,\ g_q = g_\gamma = (1 - 0.5\tan 10^\circ)^5 = 0.630$$

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

3 Drie termen (vorm- en dieptefactoren als in Voorbeeld 6)

$$c\text{ term} = 10(20.72)(1.515)(1.20)(0.595)(0.966)(0.932) = 201.6$$

$$q\text{ term} = 18(10.66)(1.423)(1.155)(0.633)(0.922)(0.630) = 116.0$$

$$\gamma\text{ term} = \tfrac{1}{2}(18)(2)(6.758)(0.6)(1)(0.526)(0.896)(0.630) = 21.7$$

4 Draagvermogen en toelaatbare gronddruk

$$q_u = 201.6 + 116.0 + 21.7 = \mathbf{339.3}\ \text{kPa} \qquad q_{all,g} = \frac{339.3}{3} = \mathbf{113.1}\ \text{kPa}$$

Oplossing (3/3)

OPLOSSING

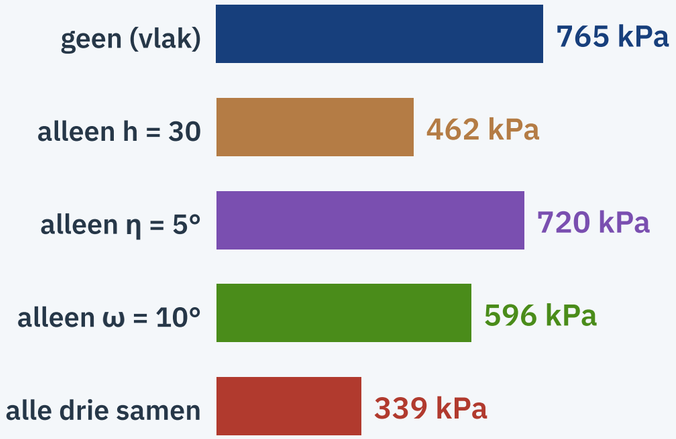
5 Toets (q_{app} = 150 kPa)

$$q_{apply} = 150 > q_{all,g} = 113.1 \;\Rightarrow\; \textbf{voldoet niet}$$

$$FS_{\text{werkelijk}} = \frac{339.3}{150} = \mathbf{2.26} < 3$$

6 Glijgrens

$$h = 30 \leq v\tan\varphi + c = 79.9\ \text{kPa} \;\Rightarrow\; \text{geen waarschuwing voor glijden}$$



q_u, die 765 kPa bedraagt voor het vlakke model, daalt onder deze belastingssituatie tot **339 kPa** (56%). Afzonderlijk: horizontale belasting **–40%**, maaiveldhelling –22%, zoolhelling –6%. De fundering voldoet niet (FS = 2.26 < 3); oplossingen: B of D_f vergroten, h verkleinen, de zool vlak maken.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

φ = 0: de cohesieterm wordt additief geschreven

THEORIE

Bij φ = 0 wordt de multiplicatieve cohesieterm niet gebruikt. Hansen schrijft hem **additief**: de correcties worden bij 1 opgeteld of ervan afgetrokken, zodat de cohesieterm niet verdwijnt wanneer h, η en ω nul zijn. N_c = 5.14, N_q = 1, N_γ = 0:

$$q_u = c\,N_c\,(1 + s'_c + d'_c - i'_c - b'_c - g'_c) + q\,g_q$$

$$s'_c = 0.2\frac{B}{L} \quad d'_c = 0.4k \quad i'_c = 0.5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{h}{c}}\right) \quad b'_c = \frac{\eta^\circ}{147^\circ} \quad g'_c = \frac{\omega^\circ}{147^\circ}$$

De bovenbelastingsterm reduceert tot q g_q: op een vlak maaiveld alleen q. Er is geen term voor het eigen gewicht (N_γ = 0).

h < c moet gelden; als h ≥ c, glijdt de basis weg en stopt de module. Ook het haakje moet positief blijven (als h, η en ω samen zeer groot zijn, zou de cohesieterm negatief worden).

VOORBEELD: c = 40 kPa, vierkant van 2 m, D_f = 1 m

Coëfficiënt	Waarde
s'_c = 0.2(B/L)	0.2
d'_c = 0.4 k (k = 0.5)	0.2
i'_c, b'_c, g'_c	0
haakje	1.4

q_u = 40 × 5.14 × 1.4 + 18 = **305.84 kPa**

Opgave

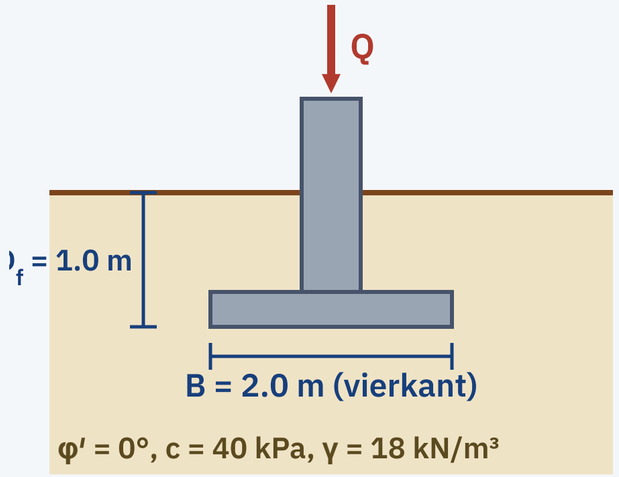
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**vierkant B = L = 2 m, D_f = 1 m**
Grond	**klei:** $\varphi = 0,\ c_u = 40\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **; geen grondwater**
Gevallen	**(a) verticale belasting** · **(b)** $v = 100,\ h = 10\ \mathrm{kPa}$ · **(c)** $h = 10$ **en** $\eta = \omega = 10^\circ$

GEVRAAGD

Bepaal voor elke situatie de waarde van q_u.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 (a) Verticale belasting: haakje $1 + s'_c + d'_c = 1 + 0.2 + 0.2$

$$q_u = 40(5.14)(1.4) + 18 = 287.84 + 18 = \mathbf{305.84}\ \text{kPa}$$

2 (b) h = 10 kPa (h/c = 0.25 < 1)

$$i'_c = 0.5\left(1 - \sqrt{0.75}\right) = 0.0670 \;\Rightarrow\; q_u = 40(5.14)(1.4 - 0.0670) + 18 = \mathbf{292.07}\ \text{kPa}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 (c) h = 10 kPa, η = ω = 10°: $b'_c = g'_c = 10/147 = 0.068$; $g_q = (1 - 0.5 \tan 10°)^5$

$$1.4 - 0.067 - 0.068 - 0.068 = 1.197$$

$$q_u = 40(5.14)(1.197) + 18(0.630) = 246.1 + 11.3 = \mathbf{257.4}\ \mathrm{kPa}$$

Toestand	haakje	c N_c(...)	q g_q	q_u (kPa)
(a) verticaal	1,400	287.8	18.0	**305.8**
(b) h = 10	1.333	274.1	18.0	**292.1**
(c) h, η, ω	1.197	246.1	11.3	**257.4**

Alleen al de bovenbelasting h = 10 kPa verlaagt het draagvermogen met 5%, en samen met h verlagen de zool- en maaiveldhelling het met 16%. Dankzij de additieve vorm verdwijnt de cohesieterm in het vlakke, verticale geval niet: 305.84 kPa.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

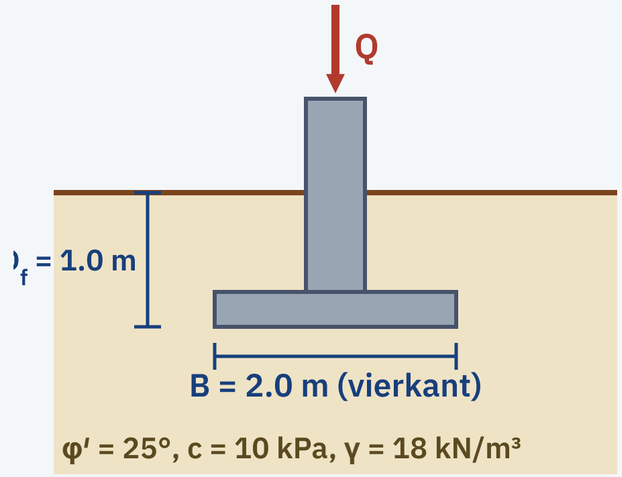
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**vierkant, B = L = 2.0 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 10\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$**; geen grondwater**
Vergelijking	**Vergelijking van Vesic: vormfactor van De Beer, N_γ volgens Vesic, $d_c = d_q - (1 - d_q)/(N_c \tan \varphi)$**
Belastinggeval (aanvullend)	**Voorbeeld 8: $q_{toegepast}$ = 150, h = 30 kPa, η = 5°, ω = 10°**

GEVRAAGD

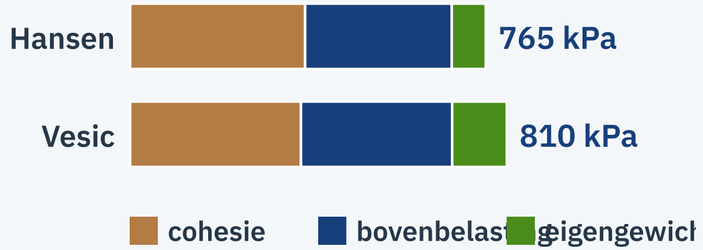
Vergelijk de q_u-waarden van de twee vergelijkingen term voor term; daarna ook voor het belastingsgeval van Voorbeeld 8.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

	Hansen	Vesic
N_γ	6.76	10.88
s_q	1.423	1.466
d_c	1.200	1.172
c-term	376.6	367.7
q-term	315.5	325.2
γ-term	73.0	117.5
q_u (kPa)	**765.1**	**810.3**



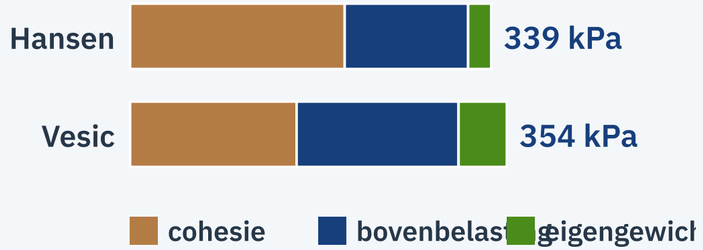
Hansen is **5.6% kleiner** (765 en 810 kPa). Het verschil ligt vrijwel geheel in de eigen-gewichtsterm (73 en 117 kPa): N_γ is klein.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

Coëfficiënt	Hansen	Vesic
i_c, i_q, i_γ	0.595 · 0.633 · 0.526	0.723 · 0.749 · 0.618
b_c, b_q, b_γ	0.966 · 0.922 · 0.896	0.912 · 0.920 · 0.920
g_c, g_q, g_γ	0.932 · 0.630 · 0.630	0.645 · 0.678 · 0.678
q_u (kPa)	**339.3**	**354.0**

Bij hetzelfde belastingsgeval bedraagt het verschil 4.3%: de hellingsexponenten van Vesic m = 1.5 (vierkant) en de vormen b = (1 − η tan φ)², g = (1 − tan ω)² geven een iets **kleinere straf** dan die van Hansen. Verwar de twee vergelijkingen niet; de coëfficiënten van elke methode zijn consistent met de eigen N_γ.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Samenvatting

Belangrijkste punten

Vergelijking van Hansen: $q_u = cN_c(s\ d\ i\ b\ g) + qN_q(s\ d\ i\ b\ g) + \tfrac{1}{2}\gamma BN_\gamma(s\ d\ i\ b\ g)$; in het gewone geval is i = b = g = 1

$N_\gamma = 1.5(N_q - 1)\tan\varphi$: kleiner dan die van Vesic ($\varphi' = 25°$: 6.76 en 10.88); de coëfficiënten van de methode worden samen gebruikt

Vorm: $s_c = 1 + (B/L)(N_q/N_c)$, $s_q = 1 + (B/L)\sin\varphi$, $s_\gamma = 1 - 0.4\ B/L$ · **Diepte**: $k = D_f/B$ of $\tan^{-1}(D_f/B)$; sprong bij $D_f/B = 1$

Hellingsfactoren: met de werkelijke h en v; $i_q = (1 - 0.5h/(v + c\cot\varphi))^5$, $i_\gamma = (1 - 0.7h/(\ldots))^5$; waarschuwing voor glijden bij $h > v\tan\varphi + c$, stopzetting bij $h \geq v + c\cot\varphi$

Zoolhelling $b_q = e^{-2\eta\tan\varphi}$, $b_\gamma = e^{-2.7\eta\tan\varphi}$; **maaiveldhelling** $g_q = g_\gamma = (1 - 0.5\tan\omega)^5$ (Vesic' $(1 - \tan\omega)^2$ verschilt)

Ongedraineerd ($\varphi = 0$): $cN_c(1 + s' + d' - i' - b' - g') + qg_q$; $N_c = 5.14$, $N_\gamma = 0$; $h < c$

Grondwater verandert alleen q en γ; **toets**: $q_{opgelegd} \leq q_{all,g}$, $FS_{werkelijk}$ en netto

Literatuur

Hansen's volledige draagvermogensvergelijking — zijn eigen Nγ, vormfactoren, belastingshellingsfactoren, zoolhellingsfactoren en maaiveldhellingsfactoren — volgt Hansen, J.B., A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity, Danish Geotechnical Institute Bulletin 28, 1970, zoals eenduidig overgenomen in standaard geotechnische literatuur. De dieptefactoren die in deze gehele sectie worden gebruikt zijn die van Hansen, zoals uiteengezet in Das, B.M., Principles of Geotechnical Engineering, 9e druk, Cengage Learning, 2018 (hoofdstuk 16).

OPMERKING

Een deel van de figuren in deze presentatie is overgenomen van de Theoriepagina van GeoTerva; alle numerieke voorbeelden zijn geproduceerd met de eigen berekeningsbibliotheek van de module, en de module geeft dezelfde waarden.

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Bereken de voorbeeldfundering uit dit college stap voor stap in GeoTerva: de module opent met dit model.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

Wilt u ze in uw colleges gebruiken: info@geoterva.com