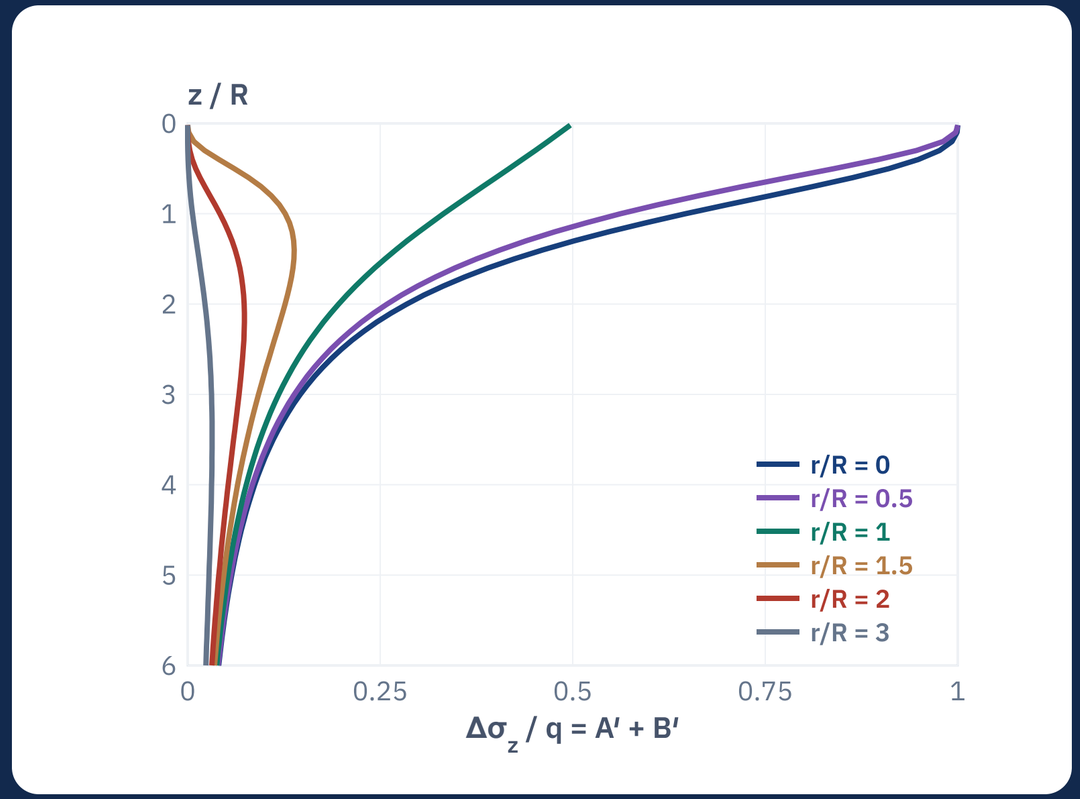
Geotechnisch college · Spanningen in de ondergrond

Spanning onder een cirkelvormige belasting

College: verticale spanning onder een cirkelvormige belasting; gesloten uitdrukking op de as, A′ + B′ buiten de as; met de hand uitgewerkte rekenvoorbeelden.

Op de as | A′ + B′ | Poolintegraal | Buiten de belasting | Meerdere cirkels



Wat leren we in dit college?

De verticale spanningstoename onder een **cirkelvormig gebied** met een gelijkmatig verdeelde belasting (tank, silo, cirkelvormige fundering): $\Delta\sigma_z$

Op de as van de cirkel gesloten uitdrukking: $\Delta\sigma_z = q\{1 - 1/[(R/z)^2 + 1]^{3/2}\}$

Buiten de as, onder de rand en ernaast: $\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$; $A' + B'$ hangt alleen af van z/R en r/R

De uitwerking van de integraal van Boussinesq **in poolcoördinaten in punt A**: de ρ-integraal in gesloten vorm, de φ-integraal numeriek

Dat de spanning buiten de belasting **eerst toeneemt en daarna afneemt**; dat de spanningen van meerdere cirkels **worden gesommeerd**

COLLEGESTRUCTUUR

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

1 · **Theorie**: formule en onderbouwing

2 · **Opgave**: gegeven en gevraagd

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

Voorbeeld cirkel: R = 3 m, q = 100 kN/m²; punt A ligt op r = 4.5 m van de as van de cirkel en op een diepte z = 3 m (buiten het belaste gebied).

Gelijkmatig verdeelde belasting op een cirkelvormig oppervlak

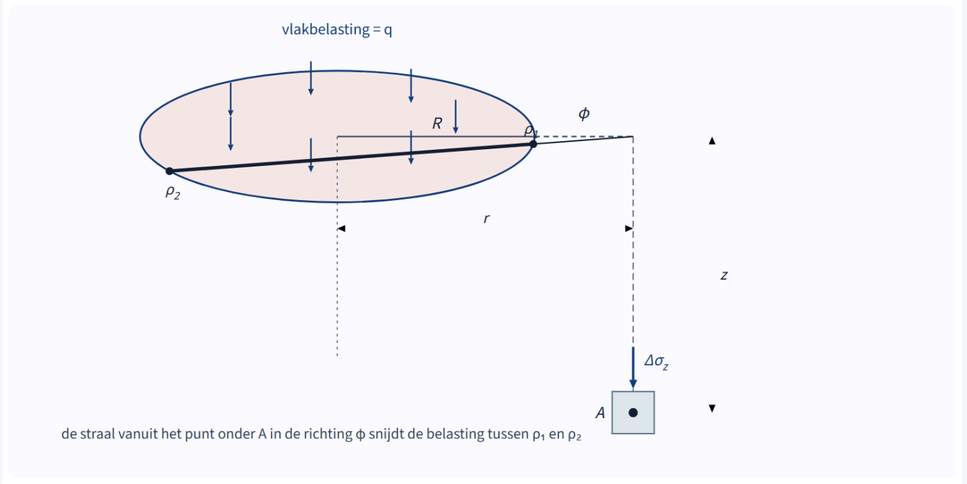
THEORIE

Flexibel cirkelvormig vlak met straal **R** dat een gelijkmatig verdeelde druk **q** draagt (tank, silo, cirkelvormige fundering)

De grond is een **homogeen, isotroop en lineair elastisch** halfoneindig medium; $\Delta\sigma_z$ is uitsluitend de toename ten gevolge van de belasting

Het probleem is **axisymmetrisch**: de spanning hangt alleen af van de horizontale afstand tot het midden **r** en de diepte **z**, niet van de richting

Onder het midden (r = 0) bestaat een **gesloten uitdrukking**; buiten de as, onder en naast de rand, hebben Ahlvin en Ulery (1962) de integraal berekend en als **A′ en B′** getabelleerd



Onder het middelpunt van de cirkel: gesloten oplossing

THEORIE

$$\Delta\sigma_z = q\left\{1 - \frac{1}{[(R/z)^2 + 1]^{3/2}}\right\}$$

Aan het oppervlak ($z \to 0$) is $\Delta\sigma_z = q$; met de diepte **neemt de waarde monotoon af** en op grote diepte gaat zij naar nul

De spanning hangt alleen af van de verhouding **R/z**: voor dezelfde z/R geven een grote en een kleine cirkel dezelfde waarde van $\Delta\sigma_z/q$

INVLOEDSDIEPTE

$\Delta\sigma_z/q$	z/R
0.50	1.30
0.20	2.50
0.10	3.71
0.05	5.36

Op een diepte van 3.7R daalt de spanning tot slechts een tiende van de waarde aan het oppervlak.

$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$

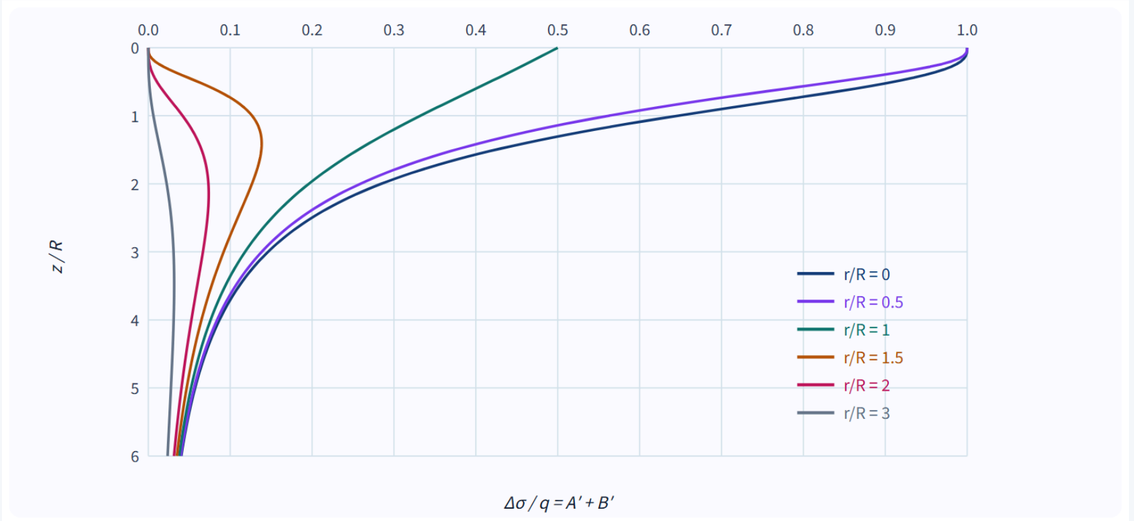
THEORIE

$$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$$

A′ en B′ zijn twee delen die afhangen van de verhoudingen **z/R** en **r/R**; ze ontstaan uit de opsplitsing van de integraal, en voor $\Delta\sigma_z$ is alleen hun **som** nodig

Op de as (r = 0) reduceert dit tot een volledige gesloten uitdrukking; **onder de rand** (r/R = 1) begint het aan het oppervlak bij 0.5

Naast de belasting begint de waarde bij nul, neemt eerst toe en daarna af



Poolintegraal ten opzichte van het punt

THEORIE

Er wordt niet geïnterpoleerd tussen tabellen: de Boussinesq-oplossing wordt direct over de cirkel geïntegreerd in de **ρ, φ** poolcoördinaten met als middelpunt het punt onder punt A

In elke φ-richting snijdt de straal de belaste cirkel tussen **ρ_1** en **ρ_2** (ρ_1 = 0 als A onder de belasting ligt); het belastingselement is q ρ dρ dφ

$$d\sigma_z = \frac{3q}{2\pi}\,\frac{z^3\,\rho}{(\rho^2+z^2)^{5/2}}\,d\rho\,d\varphi$$

$$\int_{\rho_1}^{\rho_2}\frac{3z^3\rho\,d\rho}{(\rho^2+z^2)^{5/2}} = \frac{z^3}{(\rho_1^2+z^2)^{3/2}} - \frac{z^3}{(\rho_2^2+z^2)^{3/2}}$$

A′ + B′ en numerieke som

THEORIE

$$A' + B' = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{z^3}{(\rho_1^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{z^3}{(\rho_2^2 + z^2)^{3/2}} \right] d\varphi$$

$$\rho_{1,2} = -r \cos\varphi \mp \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2\varphi}$$

De integrand van de resterende φ-integraal is continu en wordt numeriek gesommeerd over **2880 richtingen**; bij r = 0 geldt $\rho_1 = 0$ en $\rho_2 = R$, en gaat de uitdrukking over in de **gesloten oplossing**

WAARDEN A′ + B′

z/R	r/R	A′ + B′
1.0	1.0	0.33224
1.0	1.5	0.12664
2.0	0.4	0.26781
2.0	2.0	0.07334
0.5	0.8	0.64625
4.0	1.5	0.06487

Superpositie

THEORIE

Elke cirkel wordt gedefinieerd door zijn eigen **q, R** en het middelpunt op het maaiveld (x_L, y_L) (in de module ten hoogste acht cirkels)

De twee cirkels **mogen elkaar raken maar niet overlappen**: de afstand tussen de middelpunten is ten minste $R_1 + R_2$

Omdat de grond elastisch is, wordt de spanning van elke cirkel bepaald met **de eigen radiale afstand r van punt A tot het midden van die cirkel**, en worden de spanningen gesommeerd

$$\Delta\sigma_z = \sum_k q_k \left(A' + B'\right)_k \qquad r_k = \sqrt{(x - x_{L,k})^2 + (y - y_{L,k})^2}$$

Opgave

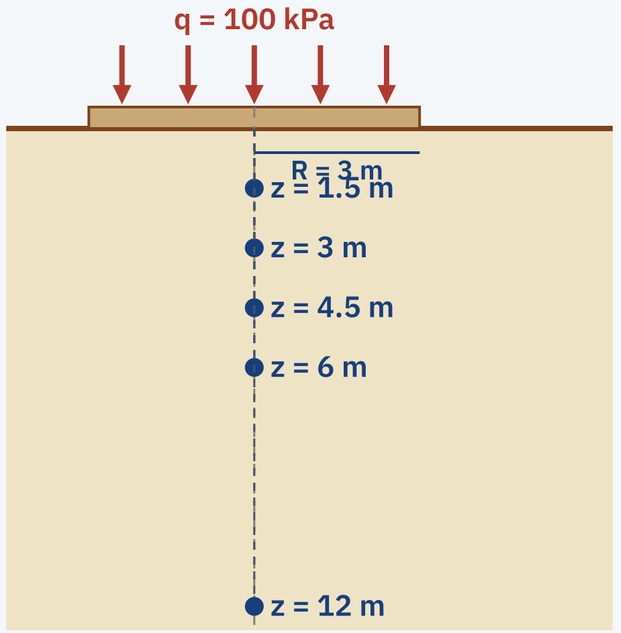
VOORBEELD

GEVRAAGD

Gesloten vorm voor $\Delta\sigma_z$ (eerst uitgewerkt bij z = 1.5 m), **A′ + B′**; de diepte waarbij $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$.

Gegeven

Cirkel	**flexibel, $R = 3$ m, $q = 100$ kN/m²**
Punten	**op de as van de cirkel ($r = 0$): $z = 1.5; 3; 4.5; 6; 12$ m**



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 Verhoudingen

$$R/z = 3/1.5 = 2 \qquad (R/z)^2 + 1 = 4 + 1 = \mathbf{5}$$

2 Exponent en inverse waarde

$$5^{3/2} = 11.1803 \qquad 1/11.1803 = 0.08944$$

3 Verticale spanning

$$\Delta\sigma_z = q\,(1 - 0.08944) = 100\,(0.91056) = \mathbf{91.06}\ \mathrm{kPa}$$

Op z = 1.5 m diepte is **A′ + B′ = 0.91056** en **$\Delta\sigma_z$ = 91.06 kPa**: 91.1% van de belasting aan het oppervlak wordt overgedragen.

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

z (m)	z/R	$(R/z)^2 + 1$	$[\ldots]^{3/2}$	$1 - 1/[\ldots]^{3/2}$	$\Delta\sigma_z$ (kPa)
1.5	0.50	5.000	11.1803	0.91056	**91.06**
3.0	1.00	2.000	2.8284	0.64645	**64.64**
4.5	1.50	1.444	1.7360	0.42397	**42.40**
6.0	2.00	1.250	1.3975	0.28446	**28.45**
12.0	4.00	1.062	1.0952	0.08692	**8.69**

Op de as neemt de spanning in één richting af: **91.1 → 8.7 kPa** (z = 1.5 m → 12 m). De rij z = 1.5 m is de met de hand uitgewerkte berekening; elke rij wordt met dezelfde uitdrukking gevonden. Bij z = 3 m bedraagt de spanning ongeveer 65% van de belasting aan het maaiveld, bij z = 12 m is dat 9%.

Oplossing (3/3)

OPLOSSING

4 Diepte waarbij $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$

$$\left[(R/z)^2 + 1\right]^{3/2} = 1/0.90 \;\Rightarrow\; (R/z)^2 = 1.0728 - 1 = 0.0728$$

$$z/R = 1/\sqrt{0.0728} = \mathbf{3.707} \;\Rightarrow\; z = 3\,(3.707) = \mathbf{11.12}\ \mathrm{m}$$

De diepte waarop $\Delta\sigma_z = 0.10\ q$ bedraagt **11.12 m** (z/R = 3.707): op deze diepte is de spanning op de as gedaald tot een tiende van de belasting aan het maaiveld. De halve waarde (0.50 q) ligt op z/R = 1.305, dus op 3.91 m.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

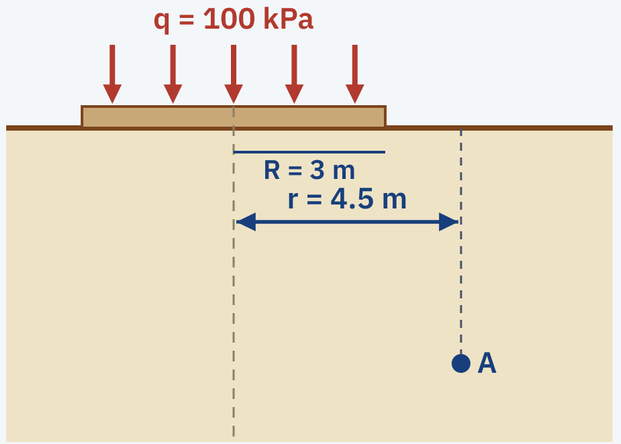
VOORBEELD

Gegeven

Cirkel	**flexibel, $R = 3$ m, $q = 100$ kN/m²**
Punt A	**$r = 4.5$ m vanaf het midden ($r/R = 1.5$; buiten de belasting), $z = 3$ m ($z/R = 1$)**
Methode	**poolintegraal: eerst met de hand, de richting $N = 36$; daarna de 2880 richtingen van de module**

GEVRAAGD

A′ + B′ en **$\Delta\sigma_z$**; de invloed van het aantal richtingen op het resultaat.



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 Afstanden waarop de straal de cirkel snijdt

$$\rho_{1,2} = -r\cos\varphi \mp \sqrt{R^2 - r^2\sin^2\varphi} = -4.5\cos\varphi \mp \sqrt{9 - 20.25\sin^2\varphi}$$

2 In welke richtingen treffen de stralen de cirkel?

$$R^2 - r^2\sin^2\varphi \geq 0 \;\Rightarrow\; |\sin\varphi| \leq R/r = 0.6667 \;\text{ en }\; \rho > 0 \;\Rightarrow\; \cos\varphi < 0$$

Omdat A buiten de cirkel ligt, dragen alleen de richtingen die naar de cirkel wijzen bij: **138.19° < φ < 221.81°**.

De straal treft de cirkel alleen in het bereik **138.19° < φ < 221.81°**. Worden **N = 36** richtingen gekozen, dan is φ_i = 5°, 15°, 25°, …; daarvan liggen er slechts **8** in dit bereik: 145°, 155°, 165°, 175° en hun symmetrische tegenhangers 185°, 195°, 205°, 215°.

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

3 Bijdrage van één straal en gemiddelde

$$F(\rho) = \frac{z^3}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{27}{(\rho^2 + 9)^{3/2}} \qquad g(\varphi) = F(\rho_1) - F(\rho_2)$$

$$A' + B' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} g(\varphi_i) \qquad \varphi_i = \left(i - \tfrac{1}{2}\right) \frac{360^\circ}{N}$$

φ (°)	cos φ	$R^2 - r^2 \sin^2\varphi$	ρ_1	ρ_2	$F(\rho_1)$	$F(\rho_2)$	$g = F(\rho_1) - F(\rho_2)$
145	−0.8192	2.3380	2.1571	5.2152	0.5352	0.1240	**0.4112**
155	−0.9063	5.3832	1.7582	6.3986	0.6422	0.0765	**0.5657**
165	−0.9659	7.6435	1.5820	7.1114	0.6921	0.0587	**0.6334**
175	−0.9962	8.8462	1.5086	7.4571	0.7131	0.0520	**0.6611**

De stralen 185°, 195°, 205°, 215° zijn de symmetrische tegenhangers van 175°, 165°, 155°, 145°: ze geven dezelfde g-waarden. g(145°) = 0.4112 en g(175°) = 0.6611.

Oplossing (3/3)

OPLOSSING

4 Totaal (N = 36)

$$\sum g = 2\,(0.4112 + 0.5657 + 0.6334 + 0.6611) = 4.5427$$

$$A' + B' \approx \frac{4.5427}{36} = 0.12619 \quad \Rightarrow \quad \Delta\sigma_z \approx 100\,(0.12619) = \mathbf{12.62}\ \mathrm{kPa}$$

5 Het resultaat convergeert naarmate het aantal richtingen toeneemt

N	6	12	24	36	72	180	720	2880
$\Delta\sigma_z$ (kPa)	16.856	10.556	13.200	12.619	12.541	12.688	12.667	12.664

De module gebruikt **2880 richtingen**: **A′ + B′ = 0.12664**, **$\Delta\sigma_z$ = 12.664 kPa**. De getabelleerde waarde voor hetzelfde punt is 0.12663; de handmatige uitkomst met 36 richtingen (12.62) wijkt hiervan slechts 0.4% af.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

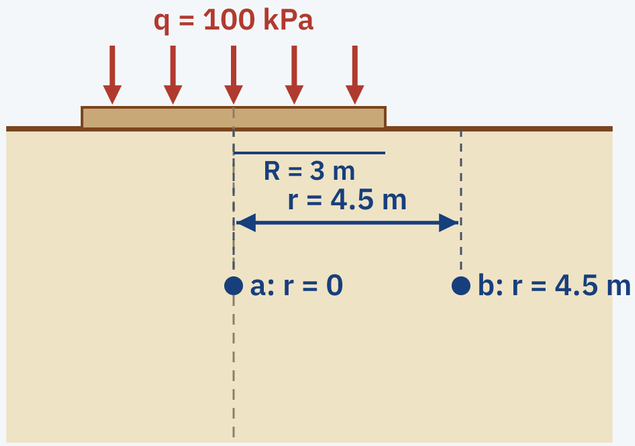
VOORBEELD

Gegeven

Cirkel	**flexibel,** $R = 3$ **m,** $q = 100$ **kN/m²**
Punten	**(a) as,** $r = 0$**; (b)** $r = 4.5$ **m (**$r/R = 1.5$**)**
Diepten	$z = 1.5; 3; 4.5; 6; 12$ **m**

GEVRAAGD

$\Delta\sigma_z$ op beide lijnen; op lijn (b) de **maximale spanning** en de diepte daarvan.



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

z (m)	z/R	(a) A′ + B′	(a) $\Delta\sigma_z$ (kPa)	(b) A′ + B′	(b) $\Delta\sigma_z$ (kPa)
1.5	0.50	0.91056	91.06	0.06044	**6.04**
3.0	1.00	0.64645	64.64	0.12664	**12.66**
4.5	1.50	0.42397	42.40	0.13793	**13.79**
6.0	2.00	0.28446	28.45	0.12646	**12.65**
12.0	4.00	0.08692	8.69	0.06487	**6.49**

As: 91.1 → 8.7 kPa, neemt in één richting af. **Buiten de belasting (r = 4.5 m):** 6.04 → 13.79 → 6.49 kPa; eerst **neemt de spanning toe**, daarna af: de belasting spreidt zich met de diepte zijwaarts uit.

Elke rij is een A′ + B′-waarde voor de richting 2880; de rij z = 3 m in kolom (b) is het resultaat van Voorbeeld 2.

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

1 A′ + B′ langs de lijn r/R = 1.5, uitgezet tegen de diepte

z/R	z (m)	A′ + B′	$\Delta\sigma_z$ (kPa)
1.00	3.00	0.12664	**12.66**
1.20	3.60	0.13569	**13.57**
1.41	4.23	0.13833	**13.83**
1.60	4.80	0.13670	**13.67**
1.80	5.40	0.13238	**13.24**
2.00	6.00	0.12646	**12.65**

Op de lijn r/R = 1.5 bevindt de **grootste spanning zich op een diepte van z ≈ 4.23 m** (z/R = 1.41) en bedraagt **13.83 kPa**: buiten het belaste gebied bereikt de spanning op diepte haar grootste waarde en neemt daarna af.

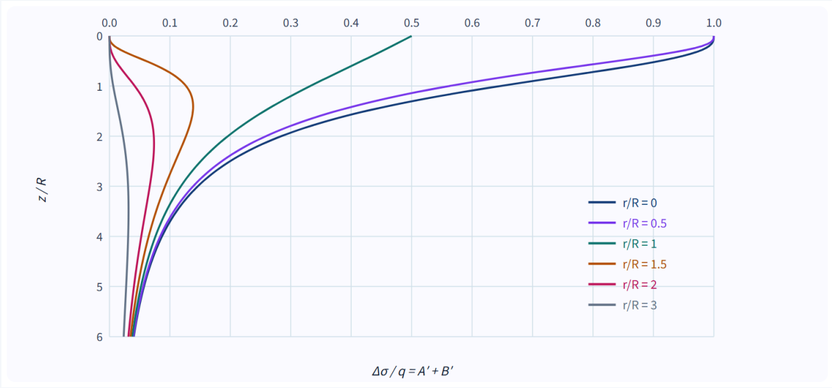
Oplossing (3/3)

OPLOSSING

2 Grootste waarde naar buiten

r/R	grootste A′ + B′	diepte z/R
1.5	0.1383	1.41
2.0	0.0737	2.15
3.0	0.0317	3.48

Naarmate het punt zich van de cirkel verwijdert, is de maximale spanning **dieper en kleiner**: voor r/R = 1.5 is z/R = 1.41, voor r/R = 3 is z/R = 3.48.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Tabel	**Waarden van $A' + B'$: $z/R = 0.25$ … 6; $r/R = 0$ … 3**
Andere cirkel	$R = 5$ **m,** $q = 120$ **kN/m²; punt** $r = 7.5$ **m,** $z = 5$ **m**

GEVRAAGD

Tabel A′ + B′; in de tweede cirkel **$\Delta\sigma_z$** (uit de tabel) en via directe berekening.

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

z/R \ r/R	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
0.25	0.9857	0.9658	0.4596	0.0142	0.0016	0.0001
0.50	0.9106	0.8396	0.4175	0.0604	0.0105	0.0010
1.00	0.6464	0.5622	0.3322	0.1266	0.0418	0.0062
1.50	0.4240	0.3750	0.2562	0.1379	0.0650	0.0146
2.00	0.2845	0.2589	0.1960	0.1265	0.0733	0.0225
3.00	0.1462	0.1384	0.1181	0.0919	0.0666	0.0309
4.00	0.0869	0.0840	0.0761	0.0649	0.0526	0.0311
6.00	0.0403	0.0396	0.0377	0.0349	0.0314	0.0236

De kolom **r/R = 0** is de gesloten oplossing; bij **r/R = 1** nadert de waarde dicht bij het maaiveld tot 0.5 (0.4596 bij z/R = 0.25); in de kolommen **r/R ≥ 1.5** neemt de waarde eerst toe en daarna af. Elk getal in de tabel is een integraal over 2880 richtingen.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

1 Verhoudingen

$$\frac{z}{R} = \frac{5}{5} = 1.0 \qquad \frac{r}{R} = \frac{7.5}{5} = 1.5$$

2 Coëfficiënt en spanning uit de tabel

$$A' + B' \,(z/R = 1;\; r/R = 1.5) = 0.12664$$

$$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B') = 120\,(0.12664) = \mathbf{15.20}\ \mathrm{kPa}$$

$\Delta\sigma_z/q$ hangt alleen af van **z/R** en **r/R**: voor R = 5 m in de cirkel geven dezelfde verhoudingen de coëfficiënt van de cirkel met R = 3 m uit Voorbeeld 2 (**0.12664**); de spanning schaalt alleen met q (15.20 kPa).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

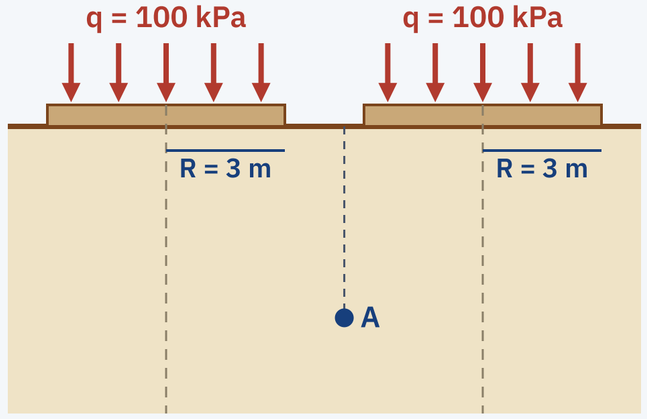
VOORBEELD

Gegeven

Cirkel 1	$R = 3$ m, $q = 100$ kN/m², middden $x = 0$
Cirkel 2	$R = 3$ m, $q = 100$ kN/m², middelpunt $x = 8$ m
Punt A	$x = 4.5$ m, $y = 0$; $z = 3$ m (ook 1.5; 4.5; 6; 12 m)

GEVRAAGD

Afzonderlijke en gecombineerde $\Delta\sigma_z$ voor de twee cirkels; diepteprofiel.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Overlapcontrole (de cirkels overlappen niet; 2 m ertussen) en onderlinge afstanden

$$d = 8\ \text{m} \ \geq R_1 + R_2 = 6\ \text{m}$$

$$r_1 = 4.5\ \text{m}\ (r_1/R = 1.5) \qquad r_2 = 8 - 4.5 = 3.5\ \text{m}\ (r_2/R = 1.1667)$$

2 Invloedsfactor en spanning voor elke cirkel (z/R = 1)

$$A' + B'_{(1)} = 0.12664 \ \Rightarrow\ \Delta\sigma_{z(1)} = 100\,(0.12664) = 12.664\ \text{kPa}$$

$$A' + B'_{(2)} = 0.25049 \ \Rightarrow\ \Delta\sigma_{z(2)} = 100\,(0.25049) = 25.049\ \text{kPa}$$

3 Superpositie

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z(1)} + \Delta\sigma_{z(2)} = 12.664 + 25.049 = \mathbf{37.714}\ \text{kPa}$$

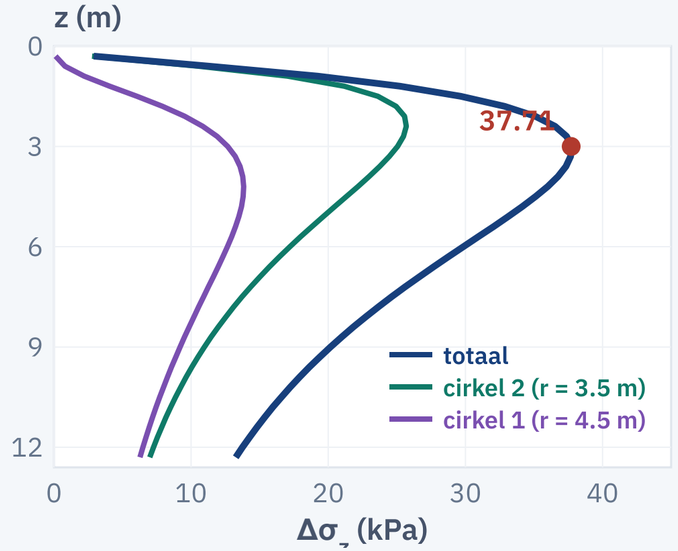
A ligt dichter bij de tweede cirkel (3.5 m en 4.5 m): **cirkel 2 levert 66% van het totaal**. Totaal $\Delta\sigma_z$ = **37.71 kPa**; de waarde voor één cirkel was 12.66 kPa.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

z (m)	z/R	$r_1/R = 1.5$	$r_2/R = 1{,}167$	$\Delta\sigma_{z(1)}$	$\Delta\sigma_{z(2)}$	Totaal
1.5	0.50	0.06044	0.23608	6.04	23.61	**29.65**
3.0	1.00	0.12664	0.25049	12.66	25.05	**37.71**
4.5	1.50	0.13793	0.21324	13.79	21.32	**35.12**
6.0	2.00	0.12646	0.17204	12.65	17.20	**29.85**
12.0	4.00	0.06487	0.07258	6.49	7.26	**13.75**

De totale spanning op z = 3 m is **37.71 kPa**; de bijdrage van cirkel 2 neemt met de diepte af, terwijl die van cirkel 1 tot 4.5 m toeneemt. Het resultaat is de som van de waarden die met de eigen afstand r van elke cirkel zijn bepaald.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

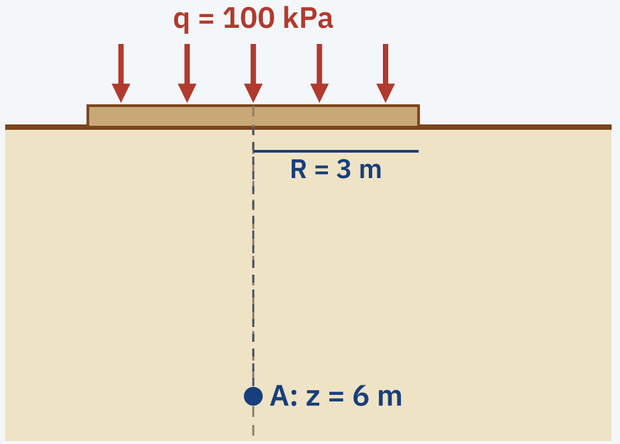
VOORBEELD

Gegeven

Cirkel	$R = 3$ m, $q = 100$ kN/m²; totale belasting $Q = q\pi R^2 = 2827.4$ kN
Puntbelasting	in het middelpunt van dezelfde cirkel Q: $\Delta\sigma_z = Q\, I_1/z^2$, $I_1 = \frac{3}{2\pi}[(r/z)^2 + 1]^{-5/2}$
Punten	op de as bij ($r = 0$) en bij $r = 2R$; $z/R = 1$; 2; 3; 5; 10

GEVRAAGD

Verhouding van de twee oplossingen; vanaf welke diepte is de benadering met een puntbelasting aanvaardbaar?



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Totale belasting

$$Q = q\pi R^2 = 100\,\pi\,(3)^2 = \mathbf{2{,}827.4}\ \mathrm{kN}$$

2 Puntbelasting (Boussinesq), op de as r = 0

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2}\,\frac{3}{2\pi} = \frac{2{,}827.4}{36}\,(0.4775) = \mathbf{37.50}\ \mathrm{kPa}$$

3 Cirkel (gesloten uitdrukking, z = 6 m)

$$\Delta\sigma_z = 100\left(1 - \frac{1}{(0.25+1)^{3/2}}\right) = \mathbf{28.45}\ \mathrm{kPa}$$

Op diepte z = 2R geeft de benadering met een puntbelasting de spanning **1.318 maal** groter (31.8%): 28.4 kPa in plaats van 37.5 kPa.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

r/R	z/R	Cirkel $\Delta\sigma_z$ (kPa)	Puntbelasting $\Delta\sigma_z$ (kPa)	Puntlast / cirkelvormig
0	1	64.645	150.000	**2.320**
0	2	28.446	37.500	**1.318**
0	3	14.619	16.667	**1.140**
0	5	5.713	6.000	**1.050**
0	10	1.481	1.500	**1.013**
2	1	4.181	2.683	**0.642**
2	2	7.334	6.629	**0.904**
2	3	6.663	6.647	**0.997**
2	5	4.048	4.140	**1.023**
2	10	1.346	1.360	**1.010**

Op de as bij z/R = 1 overschat de puntlast de spanning met een factor **2.32**; bij z = 5R bedraagt het verschil 5.0% en bij z = 10R nog slechts 1.3%. Bij r = 2R is de benadering nabij het maaiveld **te laag** (0.64), terwijl bij z ≥ 3R het verschil niet groter is dan 3%.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Samenvatting

Belangrijkste punten

Op de as: $\Delta\sigma_z = q\{1 - 1/[(R/z)^2 + 1]^{3/2}\}$; voor z = 1.5 m geeft dit 91.06 kPa (A′ + B′ = 0.91056); de diepte waarbij $\Delta\sigma_z$ = 0.10 q is **3.71R** (11.12 m)

Algemeen punt: $\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$; A′ + B′ hangt alleen af van z/R en r/R. **Voorbeeld (r = 4.5 m; z = 3 m):** A′ + B′ = 0.12664, **$\Delta\sigma_z$ = 12.664 kPa**

Berekening: de integraal van Boussinesq in poolcoördinaten in punt A; ρ in gesloten vorm, φ numeriek (2880 richtingen). Met de hand met 36 richtingen: 12.62 kPa

Buiten de belasting (r/R = 1.5) neemt de spanning eerst toe: maximale waarde 13.83 kPa bij z ≈ 4.23 m; onder de rand 0.5 q aan het oppervlak

Twee cirkels: de spanningen worden met de eigen afstand r van elke cirkel bepaald en gesommeerd: 12.66 + 25.05 = 37.71 kPa. De benadering met een **puntlast** is onjuist nabij de belasting (×1.32 bij z = 2R) en aanvaardbaar bij z ≥ 5R

Literatuur

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning.

Ahlvin, R.G. and Ulery, H.H. (1962). Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains, and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space. Highway Research Bulletin 342, 1–13.

OPMERKING

Alle numerieke voorbeelden zijn geproduceerd met de eigen berekeningsmodule van de module; de module geeft dezelfde waarden. De module opent met R = 3 m, q = 100 kN/m² cirkelvormige belasting en punt A (r = 4.5 m; z = 3 m).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Voer uw cirkels (q, R, middelpunt), punt A en de diepte in GeoTerva in; de module levert A′ + B′, de waarde $\Delta\sigma_z$, de iso-spanningscontouren, het diepteprofiel, de stapsgewijze oplossing en het rapport samen.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone
Proefmodules vereisen geen registratie.

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