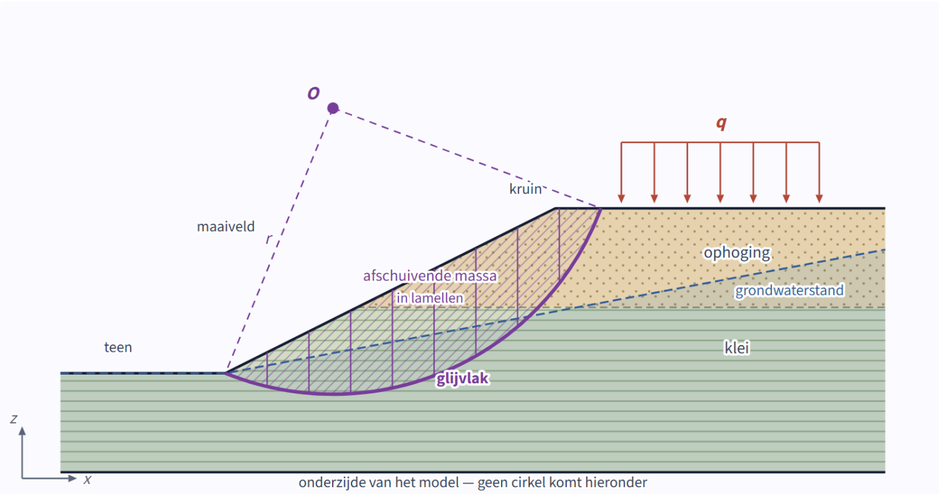
GeoTerva

Geotechnische collegepresentatie · Taludstabiliteit

Taludstabiliteit: evenwicht van de grenstoestand (lamellen)

College: de lamellenmethode volgens het grensevenwicht; een uitgewerkte handberekening van één glijcirkel en één lamel, de overige lamellen en de onderwerpen met tabellen.



- Lamellenmethode
- Gewoon · Bishop · Spencer
- Maatgevende cirkel
- Water · belasting · aardbeving · scheur
- Wapening · Hoek–Brown

Gebaseerd op de Theoriepagina van GeoTerva · geoterva.com

Wat leren we in dit college?

- Het idee van **grensevenwicht**: de massa boven het glijvlak is een star lichaam waarin de sterkte in dezelfde mate wordt gemobiliseerd; **FS = sterkte / vereiste spanning**
- De verdeling van de massa in **lamellen**: het gewicht W van elke lamel, de helling van de basis α, de lengte van de basis L, de waterkracht U
- **De drie methoden** (gewone/Fellenius, vereenvoudigde Bishop, Spencer) in detail door te rekenen op één glijcirkel en voor **één lamel**
- Hoe dezelfde berekening wordt herhaald voor de **resterende 32 lamellen** en de tabellen met resultaten; het zoeken naar de maatgevende glijcirkel
- Effecten van water, belasting, aardbeving, trekscheur, wapening (nagels, ankers, geogrid) en rots (Hoek–Brown)

COLLEGESTRUCTUUR

Eerst de **theorie**, dan een **handberekening** met één cirkel en één lamel:

1 · **Theorie**: FS, lamel, drie methoden

2 · **Opgave**: één cirkel, één lamel

3 · **Oplossing**: lamel 22 met de hand; de overige met de **tabel**

Model: een talud met helling 2:1 en een hoogte van 10 m; bovenin ophoging (γ = 18, c′ = 5, φ′ = 30°), daaronder klei (γ = 17.5, c′ = 20, φ′ = 18°); geen water, belasting of aardbeving. De krachten zijn per meter doorsnede (kN/m).

Gedraineerd, ongedraineerd, toenemend met de diepte

THEORIE

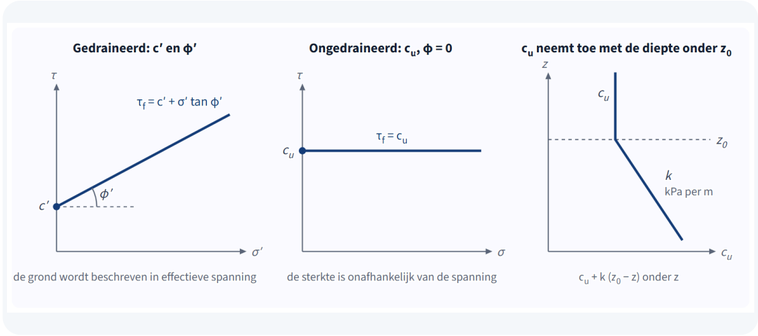
De schuifsterkte van een **gedraineerde** grond wordt gegeven door de Mohr–Coulomb-omhullende in termen van de effectieve spanning σ′ = σ − u en wordt bepaald door de parameters c′ en φ′.

In met water verzadigde klei die sneller wordt belast dan de drainage kan verlopen, is de sterkte de **ongedraineerde schuifsterkte** c_u, onafhankelijk van de normaalspanning, en wordt φ = 0 aangehouden; in veel natuurlijke kleisoorten neemt c_u lineair met de diepte toe.

De sterkte van een lamel wordt afgelezen op het niveau van het midden van de basis; het specifieke criterium voor rots is afzonderlijk, en de keuze gedraineerd of ongedraineerd is aan de ingenieur en vormt de eerste aanname van de analyse.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \qquad \sigma' = \sigma - u \qquad \text{(gedraineerd)}$$

$$\tau_f = c_u \ (\varphi = 0) \qquad c_u(z) = c_u + k\,(z_0 - z) \ \ (z < z_0) \qquad \text{(ongedraineerd)}$$



Sterkte / vereiste spanning; moment om het middelpunt van de cirkel

THEORIE

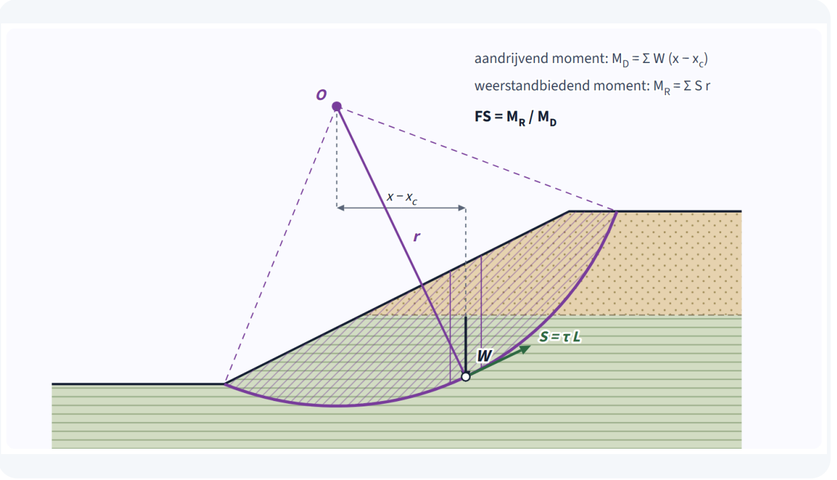
De veiligheidsfactor (FS) is de verhouding van de beschikbare schuifsterkte van de grond tot de voor evenwicht benodigde schuifspanning en wordt langs het glijvlak in elk punt gelijk verondersteld.

Op een cirkelvormig glijvlak is het maatgevende evenwicht het momentenevenwicht om het middelpunt O; de momenten worden door de straal gedeeld en de verhouding wordt geschreven als FS = ΣR / ΣD, waarbij beide sommen in kN/m zijn.

De drie methoden verschillen in de wijze waarop de effectieve normaalkracht (N′) op elk lamelschot wordt bepaald: de gewone lamellenmethode leidt deze alleen uit het gewicht af, Bishop uit het verticale evenwicht en Spencer uit zowel het krachten- als het momentenevenwicht.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \qquad \tau = \frac{c' + \sigma' \tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\sum R}{\sum D} \qquad R = cL + N' \tan\varphi' \qquad D = \frac{M_D}{r}$$



Geometrie, gewicht, krachten op de zool

THEORIE

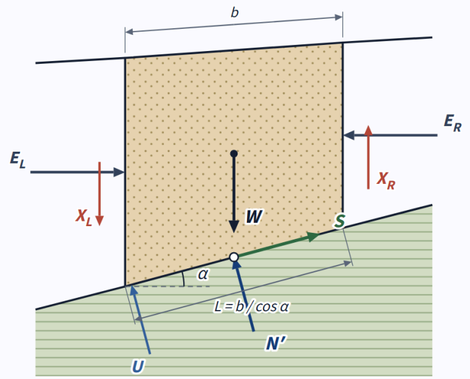
De massa tussen het glijvlak en het maaiveld wordt door verticale lijnen in lamellen verdeeld, volgens het aantal lamellen of de maximale lamellenbreedte.

Elk belangrijk snijpunt in de massa is een verplichte lamelgrens; zo loopt elke basis door één grondsoort en draagt elke lamel één type belasting.

Op de verticaal door het midden van de lamel wordt de helling van de basis α positief genomen aan de zijde van de kruin van het middelpunt en negatief aan de zijde van de teen van het talud.

Effectieve normaalkracht N′ = N – U; een negatieve N′ wijst op een zool onder trek, en bij de eenvoudige lamellenmethode en de methode van Bishop wordt N′ op nul gehouden.

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} \qquad L = \frac{b}{\cos\alpha} \qquad W = \sum_i b\, h_i\, \gamma_i \qquad N' = N - U\ ,\ U = uL$$



W	gewicht van de lamel
N′	effectieve normaalkracht
U = uL	poriënwaterkracht op de basis
S	schuifkracht (benutte sterkte)
E, X	krachten tussen lamellen

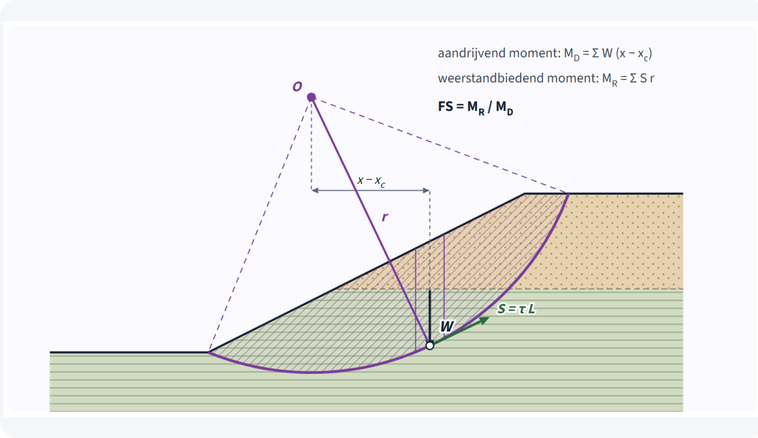
Geen kracht tussen de lamellen

THEORIE

Bij de methode van **Fellenius** (Zweedse methode) worden de krachten tussen de lamellen volledig verwaarloosd en is elke lamel alleen in evenwicht in de richting loodrecht op de zool.

Dit evenwicht levert de normaalkracht uit het gewicht en de belastingen; de veiligheidsfactor volgt uit de momentenverhouding en reduceert in homogene grond tot FS = Σ [c b / cos α + W cos α tan φ] / Σ W sin α.

De methode is eenvoudig, stabiel en veilig aan de conservatieve zijde; de fout neemt toe met de diepte van de cirkel en de poriënwaterspanning, en bij een diepe cirkel kan zij een resultaat geven dat duidelijk onder dat van de andere twee methoden ligt.



$$N' = W\cos\alpha - uL \qquad R = cL + N'\tan\varphi' \qquad D = W\sin\alpha$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{\sum \left[cL + (W\cos\alpha - uL)\tan\varphi'\right]}{\sum W\sin\alpha}$$

Verticale evenwicht van elke lamel; iteratieve oplossing

THEORIE

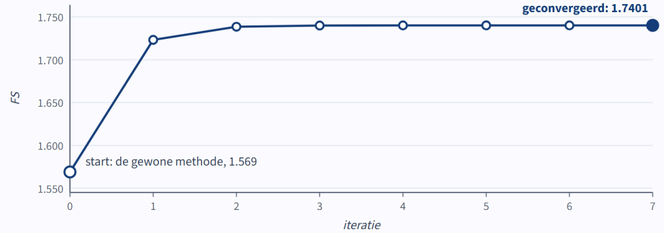
Bij de vereenvoudigde methode van Bishop worden de schuifkrachten tussen de lamellen verwaarloosd, maar het verticale evenwicht van elke lamel wordt voldaan en de schuifkracht aan de basis wordt gelijk gesteld aan de gemobiliseerde sterkte.

Omdat FS aan beide zijden van de vergelijking voorkomt, wordt de vergelijking iteratief opgelost, uitgaande van de waarde van de gewone lamellenmethode; enkele stappen volstaan.

Negatieve **N′** wordt op nul gehouden en $\mathbf{m_\alpha}$ mag niet onder 0.2 dalen; deze beperking is van belang in het teengebied van diepe cirkels.

$$N' = \frac{W - uL\cos\alpha - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha} \qquad m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{\sum [cL + N'\tan\varphi']}{\sum D}$$



Krachten- en momentenevenwicht; krachten tussen parallelle lamellen

THEORIE

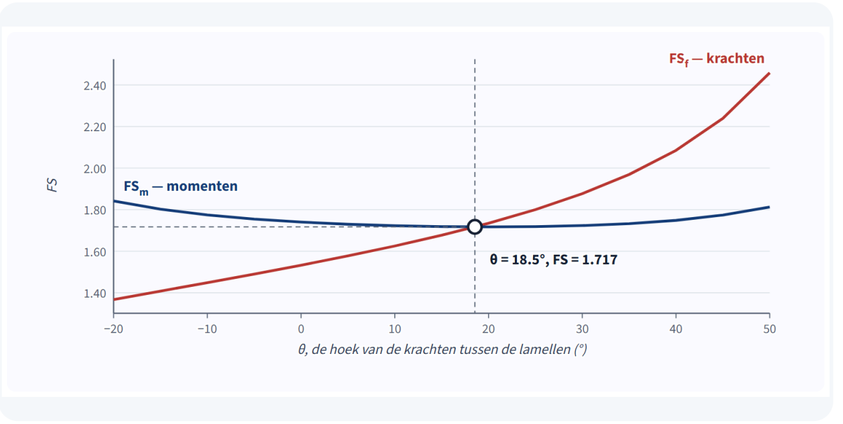
De methode van **Spencer** voldoet zowel aan het krachten- als aan het momentenevenwicht; de krachten tussen de lamellen zijn evenwijdig aan elkaar en de schuifkracht is een constante fractie van de normaalkracht.

Omdat de zijvlakken aan de twee uiteinden van het massief vrij zijn, levert ΣΔE = 0 het krachtenevenwicht en wordt voor elke hoek θ een veiligheidsfactor FS_f verkregen.

Momenten om het middelpunt van de cirkel geven een tweede waarde: $FS_m = \Sigma[c\,L + N' \tan\varphi] / \Sigma\,D$; $FS_f(\theta)$ en $FS_m(\theta)$ snijden elkaar bij één hoek en dit vormt de oplossing.

$$X = E\tan\theta \qquad \Delta E = \frac{cL + \tan\varphi'\,(W\cos\alpha - U) - FS\,W\sin\alpha}{FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) - \tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha)}$$

$$N' = W\cos\alpha - U + \Delta E\,(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) \qquad \sum \Delta E = 0 \;\Rightarrow\; FS_f(\theta)$$



Wat het biedt, wat het verwaarloost

THEORIE

Methode	Kracht tussen lamellen	Krachtenevenwicht	Momentevenwicht	Oppervlak	FS (zelfde cirkel)
Gewone methode (Fellenius)	geen	alleen normaalkracht op de basis	✓	cirkel	**1.569**
Eenvoudige Bishop	alleen normaal (geen schuifspanning)	verticaal per lamel	✓	cirkel	**1.740**
Spencer	parallel: X = E tanθ	horizontaal + verticaal	✓	elk oppervlak	**1.717**

De gewone lamellenmethode is de standaardmethode die met de hand kan worden gecontroleerd en die conservatief is; het resultaat is het laagste van de drie methoden.

De methode-Bishop is de gebruikelijke keuze voor cirkelvormige glijvlakken; het resultaat wijkt op een cirkelvormig glijvlak slechts enkele procenten af van dat van de methode-Spencer.

De methode van Spencer voldoet aan het volledige evenwicht en wordt gebruikt voor niet-cirkelvormige glijvlakken; het is de rekenintensiefste methode en voor sommige cirkels wordt geen oplossing gevonden.

Opgave

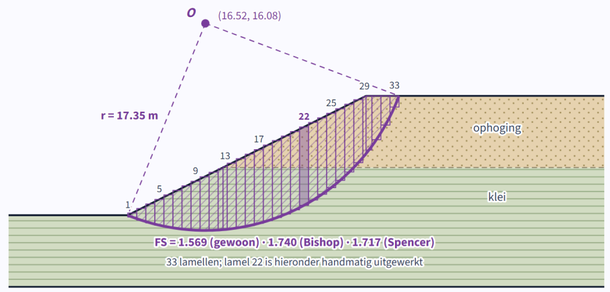
VOORBEELD

Gegeven

Doorsnede	**maaiveld** $(0;0)$–$(10;0)$–$(30;10)$–$(50;10)$ **m; basis** $z = -6$ **m; boven** $z = 4$ **m ophoging, daaronder klei**
Gronden	**aanvulling** $\gamma = 18$ **kN/m³,** $c' = 5$ **kPa,** $\varphi' = 30°$**; klei** $\gamma = 17.5$ **kN/m³,** $c' = 20$ **kPa,** $\varphi' = 18°$**; geen water, belasting of aardbeving**
Glijcirkel	**middelpunt** $x_c = 16.52$ **m,** $z_c = 16.08$ **m; straal** $r = 17.35$ **m (maatgevende cirkel, zie wat bij het zoeken is gevonden)**

GEVRAAGD

De punten $\mathbf{x_a}$ en $\mathbf{x_b}$ waar de cirkel de grond snijdt, het laagste punt ervan en het **verdelen in lamellen**.



Oplossing

OPLOSSING

1 Snijpunt van de cirkel met het maaiveld: $(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$

$$x_a = x_c - \sqrt{r^2 - (z_a - z_c)^2} = 16.518 - \sqrt{301.08 - (0 - 16.080)^2} = \mathbf{10.00}\ \mathrm{m} \quad (z_a = 0)$$

$$x_b = x_c + \sqrt{r^2 - (z_b - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (10 - 16.080)^2} = \mathbf{32.77}\ \mathrm{m} \quad (z_b = 10)$$

2 Laagste punt en lamellering

$$z_{min} = z_c - r = 16.080 - 17.352 = -1.27\ \mathrm{m} \ \ (> -6\ \mathrm{m})$$

$$b = \frac{x_b - x_a}{30} = \frac{22.771}{30} = 0.759\ \mathrm{m} \ \Rightarrow\ 30\ \mathrm{lamel}$$

De cirkel snijdt het grondmassief tussen x = 10.00 (teen) en 32.77 m (top); de randen op x = 10, 18 en 30 m splitsen nog 3 lamellen: **33 lamellen**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

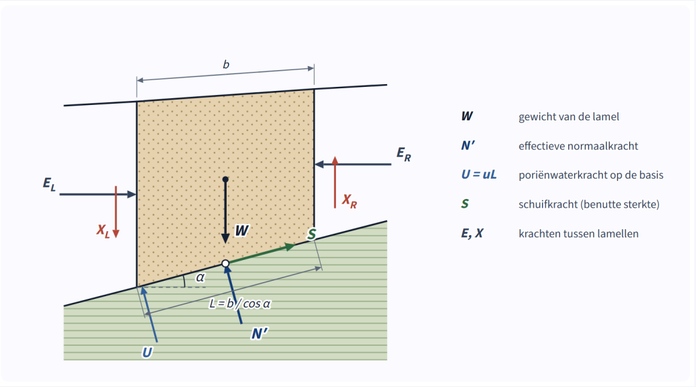
VOORBEELD

Gegeven

Lamel	**Lamel 22 van de cirkel in voorbeeld 1: middelpunt op $x_m = 24.800$ m, breedte $b = 0.759$ m**
Grond	**ophoging $\gamma = 18$ kN/m³ ($z > 4$ m); klei $\gamma = 17.5$ kN/m³, $c' = 20$ kPa, $\varphi' = 18°$ (zool in klei); $u = 0$**

GEVRAAGD

De waarden **α**, **L**, **W** van de lamel; **N′**, **R** en **D** (gewone methode).



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Zoolhelling en lengte

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} = \frac{24.800 - 16.518}{17.352} = 0.4773 \;\Rightarrow\; \alpha = \mathbf{28.51}^\circ,\ \cos\alpha = 0.8787$$

$$L = \frac{b}{\cos\alpha} = \frac{0.759}{0.8787} = \mathbf{0.864}\ \text{m}$$

2 Kolomhoogte en -gewicht (ophoging + klei)

$$z_{surface} = \frac{x_m - 10}{2} = 7.3998\ \text{m};\quad z_{base} = z_c - r\cos\alpha = 0.8327\ \text{m}$$

$$h_1 = 7.3998 - 4 = 3.3998\ \text{m (ophoging)};\quad h_2 = 4 - 0.8327 = 3.1673\ \text{m (klei)}$$

$$W = b\,(h_1\gamma_1 + h_2\gamma_2) = 0.7590(3.3998 \cdot 18 + 3.1673 \cdot 17.5) = \mathbf{88.52}\ \text{kN/m}$$

Lamel 22 is **de zwaarste lamel** (W = 88.52 kN/m); haar basis helt onder 28.5° en blijft in de klei (c′ = 20 kPa, φ′ = 18°).

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Normaalkracht en weerstand (u = 0)

$$N' = W\cos\alpha = 88.52 \times 0.8787 = \mathbf{77.79}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0.864) + 77.79(0.3249) = 17.27 + 25.27 = \mathbf{42.55}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Aandrijvend effect

$$D = W\sin\alpha = 88.52 \times 0.4773 = \mathbf{42.25}\ \mathrm{kN/m}$$

Lamel 22: **R = 42.55** kN/m, **D = 42.25** kN/m. De R- en D-waarden van elke lamel worden met **dezelfde drie stappen** gevonden; de veiligheidsfactor is de verhouding van hun sommen: **FS = ΣR/ΣD** (tabel op de volgende pagina's).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

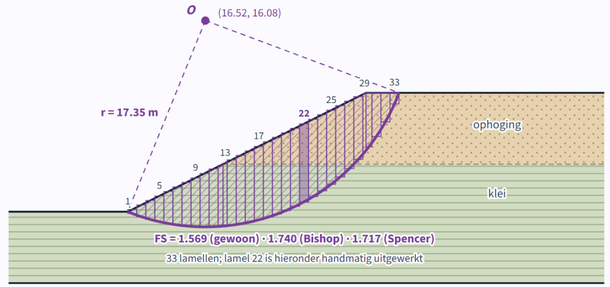
VOORBEELD

Gegeven

Lamellen	**De cirkel uit Voorbeeld 1, 33 lamellen; elke lamel wordt opgelost met de drie stappen uit Voorbeeld 2**
Methode	**Gewoon (Fellenius): geen krachten tussen de lamellen**

GEVRAAGD

Tabel van alle lamellen: **W, N′, R, D** en hun sommen; **FS = ΣR / ΣD**.



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
1	10.00	0.001	−22.1	0.001	0.00	20	18	0.00	0.03	−0.00
2	10.38	0.758	−20.7	0.810	4.49	20	18	4.20	17.57	−1.59
3	11.14	0.759	−18.1	0.798	13.08	20	18	12.43	20.01	−4.06
4	11.90	0.759	−15.4	0.787	21.15	20	18	20.39	22.37	−5.63
5	12.66	0.759	−12.9	0.779	28.74	20	18	28.02	24.67	−6.40
6	13.41	0.759	−10.3	0.771	35.84	20	18	35.27	26.89	−6.41
7	14.17	0.759	−7.8	0.766	42.49	20	18	42.10	29.00	−5.74
8	14.93	0.759	−5.2	0.762	48.68	20	18	48.47	30.99	−4.45
9	15.69	0.759	−2.7	0.760	54.42	20	18	54.36	32.86	−2.59
10	16.45	0.759	−0.2	0.759	59.72	20	18	59.72	34.59	−0.23
11	17.21	0.759	2.3	0.760	64.58	20	18	64.53	36.16	2.57
12	17.79	0.411	4.2	0.412	36.85	20	18	36.75	20.19	2.71
13	18.17	0.348	5.5	0.349	32.15	20	18	32.01	17.39	3.07
14	18.73	0.759	7.3	0.765	73.11	20	18	72.51	38.87	9.31
15	19.49	0.759	9.9	0.770	76.77	20	18	75.64	39.98	13.13
16	20.25	0.759	12.4	0.777	79.97	20	18	78.11	40.92	17.18
17	21.00	0.759	15.0	0.786	82.70	20	18	79.89	41.67	21.38

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

No	x_m (m)	b (m)	α (°)	L (m)	W (kN/m)	c′ (kPa)	φ′ (°)	N′ (kN/m)	R (kN/m)	D (kN/m)
18	21.76	0.759	17.6	0.796	84.94	20	18	80.97	42.23	25.68
19	22.52	0.759	20.2	0.809	86.67	20	18	81.32	42.60	29.99
20	23.28	0.759	22.9	0.824	87.86	20	18	80.91	42.77	34.25
21	24.04	0.759	25.7	0.842	88.49	20	18	79.74	42.76	38.37
22	**24.80**	**0.759**	**28.5**	**0.864**	**88.52**	**20**	**18**	**77.79**	**42.55**	**42.25**
23	25.56	0.759	31.4	0.889	87.89	20	18	75.02	42.16	45.80
24	26.32	0.759	34.4	0.920	86.56	20	18	71.43	41.60	48.89
25	27.08	0.759	37.5	0.956	84.44	20	18	67.00	40.90	51.38
26	27.84	0.759	40.7	1.001	81.43	20	18	61.72	40.08	53.11
27	28.59	0.758	44.1	1.056	77.34	20	18	55.53	39.17	53.83
28	29.35	0.760	47.7	1.129	72.09	5	30	48.51	33.65	53.33
29	29.87	0.267	50.3	0.418	23.72	5	30	15.15	10.84	18.25
30	30.25	0.492	52.3	0.805	40.15	5	30	24.55	18.20	31.76
31	30.87	0.759	55.8	1.351	50.12	5	30	28.16	23.01	41.46
32	31.63	0.759	60.6	1.545	33.40	5	30	16.41	17.20	29.09
33	32.39	0.759	66.2	1.878	12.72	5	30	5.14	12.36	11.64
Σ					**1,841.11**			**1,613.77**	**1,006.25**	**641.34**

Oplossing (3/3)

OPLOSSING

1 Sommaties en veiligheidsfactor

$$\sum R = 1{,}006.25\ \text{kN/m} \qquad \sum D = 641.34\ \text{kN/m} \qquad \sum W = 1{,}841.1\ \text{kN/m}$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{1{,}006.25}{641.34} = \mathbf{1.569}$$

Voor deze cirkel geeft de gewone methode **FS = 1.569**. In de lamellen aan de teenzijde (α < 0) helt de basis tegen het glijden in: D is negatief en verkleint ΣD. Lamel 22 is rij 22 van de tabel en komt overeen met de handmatig berekende waarden.

ΣR/ΣD: verhouding van **weerstandbiedende** effecten tot aandrijvende effecten; als FS > 1 wordt langs deze cirkel geen glijden verwacht.

De gewone methode geeft de laagste waarde; Bishop en Spencer zijn hoger op dezelfde cirkel (volgende voorbeelden).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

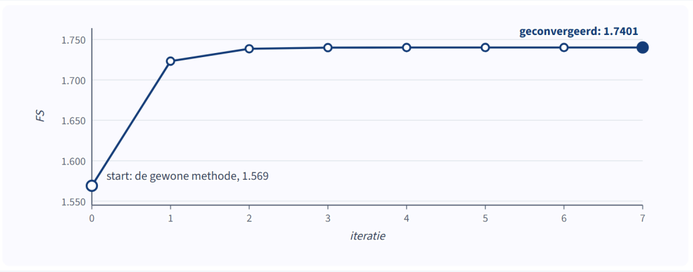
VOORBEELD

Gegeven

Lamel en cirkel	**De 22e lamel in Voorbeeld 2 en de cirkel in Voorbeeld 1; beginwaarde $FS_0 = 1.569$ in Voorbeeld 3**
Methode	$N' = \dfrac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha}$, $m_\alpha = \cos\alpha + \dfrac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$ **(u = 0)**

GEVRAAGD

Voor lamel 22: **m_α**, **N′**, **R**; **iteratie** en **FS** voor de gehele cirkel.



Oplossing (1/4)

OPLOSSING

1 Eerste iteratie (FS_0 = waarde van de gewone methode = 1.5690)

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS_0} = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.5690} = 0.9776$$

$$N' = \frac{W - cL\sin\alpha/FS_0}{m_\alpha} = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.5690}{0.9776} = 85.17\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 85.17(0.3249) = 44.95\ \mathrm{kN/m}$$

Oplossing (2/4)

OPLOSSING

2 Met de convergerende waarde (FS = 1.7401)

$$m_\alpha = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.7401} = \mathbf{0.9679}$$

$$N' = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.7401}{0.9679} = \mathbf{86.56}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = cL + N' \tan\varphi' = 20(0.864) + 86.56(0.3249) = \mathbf{45.40}\ \mathrm{kN/m} \qquad D = 42.25\ \mathrm{kN/m}$$

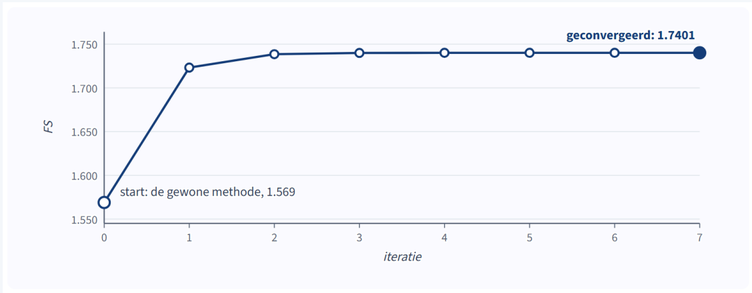
De normaalkracht van lamel 22 stijgt van 77.79 in de gewone methode tot **86.56** kN/m (verticaal evenwicht tussen lamellen); de weerstand van 42.55 → **45.40** kN/m. Dezelfde stappen worden herhaald voor 33 lamellen.

Oplossing (3/4)

OPLOSSING

2 Bij elke iteratie wordt ΣR opnieuw berekend, $FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$

Iteratie k	FS_k	Verschil
0 (gewoon)	1.5690	
1	1.7232	0.1542
2	1.7385	0.0153
3	1.7399	0.0014
4	1.7401	0.0001
5	1.7401	0.0000
6	1.7401	0.0000
7	**1.7401**	0.0000



In 7 iteraties **FS = 1.740**; ΣR = 1,115.97, ΣD = 641.34 kN/m. Dit is 10.9% hoger dan de gewone methode (1.569).

Oplossing (4/4)

OPLOSSING

No	α (°)	W	m_α	N′	R
1	−22.1	0.00	0.8566	0.01	0.03
2	−20.7	4.49	0.8693	8.95	19.11
3	−18.1	13.08	0.8928	17.83	21.76
4	−15.4	21.15	0.9141	25.78	24.12
5	−12.9	28.74	0.9333	32.92	26.27
6	−10.3	35.84	0.9505	39.38	28.22
7	−7.8	42.49	0.9656	45.23	30.02
8	−5.2	48.68	0.9788	50.55	31.67
9	−2.7	54.42	0.9900	55.39	33.20
10	−0.2	59.72	0.9993	59.80	34.61
11	2.3	64.58	1.0066	63.81	35.93
12	4.2	36.85	1.0110	36.10	19.98
13	5.5	32.15	1.0133	31.35	17.18
14	7.3	73.11	1.0156	70.88	38.34
15	9.9	76.77	1.0172	73.99	39.45
16	12.4	79.97	1.0168	76.77	40.49
17	15.0	82.70	1.0143	79.24	41.46
18	17.6	84.94	1.0097	81.39	42.37
19	20.2	86.67	1.0028	83.22	43.22
20	22.9	87.86	0.9937	84.71	44.01
21	25.7	88.49	0.9821	85.83	44.74
22	**28.5**	**88.52**	**0.9679**	**86.56**	**45.40**
23	31.4	87.89	0.9508	86.84	46.00
24	34.4	86.56	0.9307	86.59	46.53
25	37.5	84.44	0.9072	85.70	46.98
26	40.7	81.43	0.8798	84.02	47.33
27	44.1	77.34	0.8480	81.24	47.52
28	47.7	72.09	0.9183	75.89	49.46
29	50.3	23.72	0.8941	25.50	16.81
30	52.3	40.15	0.8741	43.83	29.33
31	55.8	50.12	0.8363	56.09	39.14
32	60.6	33.40	0.7803	37.85	29.58
33	66.2	12.72	0.7076	11.00	15.74
Σ		**1,841.11**			**1,115.97**

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

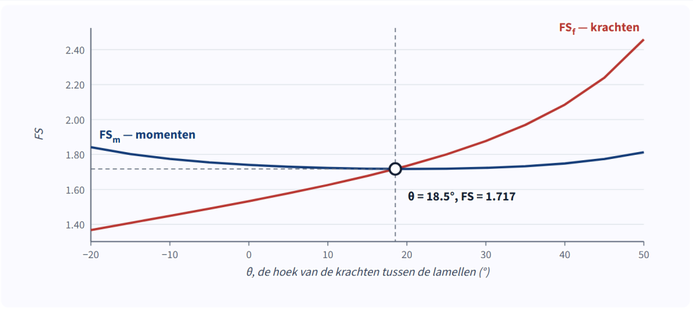
VOORBEELD

Gegeven

Lamel en cirkel	**Lamel 22 uit Voorbeeld 2, de cirkel uit Voorbeeld 1; de krachten tussen de lamellen zijn evenwijdig, $X = E \tan\theta$**
Oplossingshoek	**$\theta = 18.54°$ (de hoek waarin de twee onderstaande krommen elkaar snijden), $FS = 1.717$**

GEVRAAGD

Voor lamel 22: **ΔE**, **N′**, **R**, **E** en **X**; θ–FS-krommen en de gehele cirkel.



Oplossing (1/4)

OPLOSSING

1 Verschil in normaalkracht van de lamel ΔE (θ = 18.54°, tan θ = 0.3354, FS = 1.717)

$$\text{marge} = cL + \tan\varphi' \, W\cos\alpha - FS\, W\sin\alpha = 17.275 + 25.274 - 72.542 = -29.99$$

$$\text{noemer}_1 = FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) = 1.7837$$

$$\text{noemer}_2 = -\tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 0.0593$$

$$\Delta E = \frac{\text{marge}}{\text{noemer}_1 + \text{noemer}_2} = \frac{-29.99}{1.8430} = \mathbf{-16.27}\ \text{kN/m}$$

Oplossing (2/4)

OPLOSSING

2 Normaalkracht, weerstand en krachten tussen de lamellen

$$N' = W\cos\alpha + \Delta E(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 77.786 + (-16.27)(-0.1826) = \mathbf{80.76}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = \mathbf{43.51}\ \mathrm{kN/m}$$

$$E_{foot} = 254.69\ \mathrm{kN/m} \quad \Rightarrow \quad E_{top} = E_{foot} + \Delta E = 238.41\ \mathrm{kN/m}$$

$$X_{foot} = E\tan\theta = \mathbf{85.42}$$

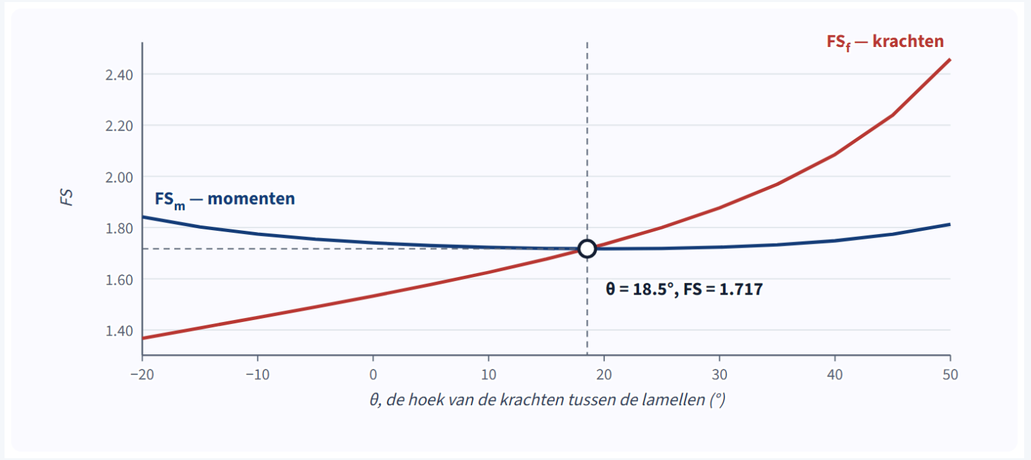
In Spencer is de normaalkracht op lamel 22 **80.76** kN/m (gewone methode 77.79, Bishop 86.56); als kracht tussen de lamellen werkt E = 254.69 kN/m naar de teen toe.

Oplossing (3/4)

OPLOSSING

3 FS_f ($\Sigma\Delta E = 0$) en FS_m (moment) voor elke θ; het snijpunt is de oplossing

θ (°)	FS_m (moment)	FS_f (kracht)
-20	1.842	1.367
-15	1.802	1.408
-10	1.774	1.449
-5	1.755	1.490
0	1.740	1.533
5	1.730	1.577
10	1.723	1.625
15	1.718	1.677
20	1.717	1.735
25	1.718	1.800
30	1.723	1.877
35	1.733	1.969
40	1.748	2.085
45	1.774	2.239
50	1.812	2.458
18.54	**1.717**	**1.717**



Oplossing (4/4)

OPLOSSING

No	ΔE	E (voet)	N′	R
1	0.02	−0.00	0.02	0.03
2	17.12	0.02	15.62	21.28
3	21.59	17.14	26.01	24.42
4	24.46	38.73	34.81	27.06
5	26.08	63.19	42.35	29.33
6	26.67	89.27	48.84	31.30
7	26.41	115.94	54.44	33.01
8	25.43	142.35	59.29	34.51
9	23.87	167.78	63.49	35.83
10	21.80	191.65	67.12	36.99
11	19.32	213.45	70.24	38.01
12	9.30	232.78	39.17	20.97
13	7.19	242.08	33.72	17.95
14	13.38	249.26	75.26	39.76
15	10.03	262.64	77.24	40.50
16	6.48	272.67	78.84	41.16
17	2.77	279.15	80.07	41.73
18	−1.03	281.92	80.95	42.23
19	−4.89	280.89	81.47	42.65
20	−8.75	276.01	81.62	43.01
21	−12.57	267.25	81.39	43.29
22	**−16.27**	**254.69**	**80.76**	**43.51**
23	−19.80	238.41	79.67	43.67
24	−23.06	218.61	78.07	43.76
25	−25.94	195.55	75.88	43.79
26	−28.29	169.61	72.98	43.74
27	−29.89	141.32	69.14	43.59
28	−30.84	111.42	64.36	42.80
29	−11.02	80.59	21.27	14.37
30	−19.70	69.57	36.10	24.87
31	−26.62	49.87	45.17	32.83
32	−18.69	23.25	29.61	24.82
33	−4.56	4.56	8.70	14.41
Σ	0.00			**1,101.18**

θ = 18.54°; ΣR = 1,101.18, ΣD = 641.34 → **FS = 1.717**. E_{max} = 281.9 kN/m.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Gewicht, poriënwaterspanning, water in het talud

THEORIE

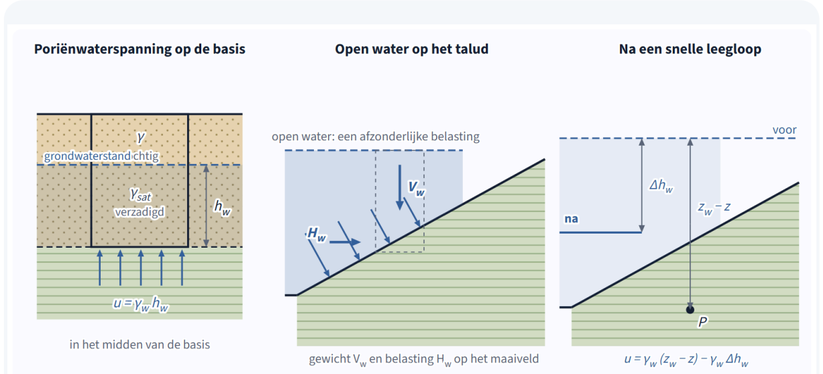
Water komt op drie manieren in de analyse: het gewicht van de verzadigde grond, de poriënwaterspanning die de sterkte aan de basis van elke lamel vermindert, en het water dat op het talud staat op de plaats waar het zich bevindt als een belasting op zich.

Onder de grondwaterlijn is de poriënwaterspanning hydrostatisch; omdat kwel niet wordt geanalyseerd, is een hellende grondwaterstand een benadering van een stromingsnet en wordt het effectief volumiek gewicht onder water nooit gebruikt.

Wanneer de poriënwaterspanning bekend is als een deel van de deklaagdruk, wordt aan de grond een verhouding $\mathbf{r_u}$ toegekend; dit geldt voor een ophoging in de bouwfase of voor een ophoging op zachte klei.

Wanneer het water vóór het talud snel daalt omdat het kan draineren, verdwijnt de ondersteuning, blijft de poriënwaterspanning behouden en behoort de veiligheidsfactor bij de laagste waarde onmiddellijk na de waterdaling.

$$u = \gamma_w h_w \qquad u = r_u \frac{W}{b} \qquad H_w = \frac{\gamma_w}{2}\left[(z_w - z_L)^2 - (z_w - z_R)^2\right]$$



Opgave

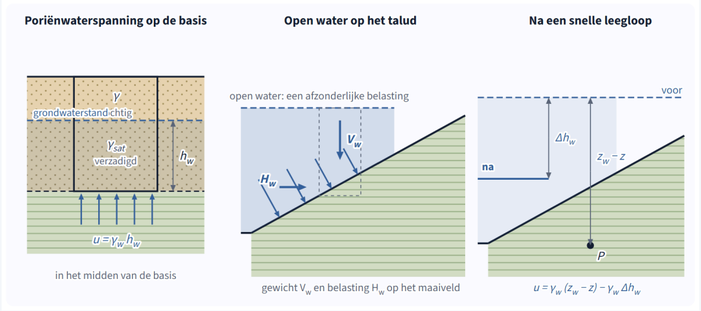
VOORBEELD

Gegeven

Waterlijn	$(0;0)$–$(20;2.5)$–$(50;7)$ **m, hydrostatisch;** $\gamma_w = 9.81$ **kN/m³; verzadigde volumieke gewichten aanvulling 20, klei 19.5 kN/m³**
Lamel	**dezelfde cirkel; de lamel op** $x_m = 24.800$ **m (met water wordt het de 24e lamel, niet de 33e)**

GEVRAAGD

In de lamel **z_w, h_w, u, U**; de nieuwe **W, N′, R, D**; over de gehele cirkel **FS**.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Waterhoogte en poriënwaterspanning

$$z_w = 2.5 + \frac{24.800 - 20}{30}(4.5) = 3.2199 \text{ m}$$

$$h_w = z_w - z_{base} = 3.2199 - 0.8327 = \mathbf{2.3872} \text{ m}$$

$$u = \gamma_w h_w = 9.81(2.3872) = \mathbf{23.42} \text{ kPa} \qquad U = uL = 23.42(0.864) = \mathbf{20.23} \text{ kN/m}$$

2 Gewicht: vochtig boven water, verzadigd onder water

$$W = b\left[h_1\gamma_1 + h_{dry}\gamma_{moist} + h_w\gamma_{sat}\right]$$

$$W = 0.7590[3.3998(18) + 0.7801(17.5) + 2.3872(19.5)] = \mathbf{92.14} \text{ kN/m}$$

Water verhoogt zowel het gewicht van 88.52 kN/m droog naar **92.14** kN/m als dat het aan de basis een waterkracht **U = 20.23** kN/m opwekt.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Effectieve normaalkracht, weerstand, aandrijvend effect (lamel 22)

$$N' = W\cos\alpha - U = 92.14(0.8787) - 20.23 = \mathbf{60.74}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 60.74(0.3249) = \mathbf{37.01}\ \mathrm{kN/m} \qquad D = W\sin\alpha = \mathbf{43.98}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Volledige cirkel (36 lamellen, dezelfde cirkel) en vergelijking met de droge situatie

Methode	ΣU	ΣR	ΣD	FS (water)	FS (droog)
Gewoon	476.94	879.96	655.41	**1.343**	1.569
Bishop	476.94	981.07	655.41	**1.497**	1.740
Spencer	476.94	970.22	655.41	**1.480**	1.717

Voor dezelfde cirkel verlaagt water FS van 1.569 naar **1.343** (gewone methode); als de maatgevende cirkel opnieuw wordt gezocht met de waterlijn, wordt deze ondieper en bedraagt **1.255 / 1.568 / 1.564** (gewoon / Bishop / Spencer).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Strook- en puntbelasting; verticaal, loodrecht, schuin

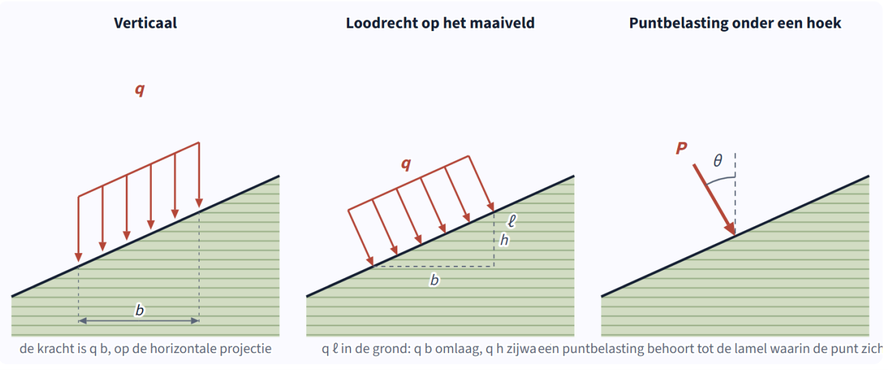
THEORIE

Een verticale of schuine strookbelasting wordt op de horizontale projectie beschouwd, en de kracht op het deel met horizontale breedte b is q b.

Een loodrecht op het oppervlak werkende belasting wordt over de lengte van het oppervlak genomen; de kracht op een segment met lengte ℓ is q ℓ, met verticale component q b en horizontale component q h.

Elke lamel draagt het deel van een belasting dat tussen haar randen valt, verdeeld naar horizontale breedte, en de puntlast wordt toegekend aan de lamel die het aangrijpingspunt bevat.

$$F = q\,b \qquad F_n = q\,\ell \;\Rightarrow\; F_z = q\,b,\; F_x = q\,h \qquad P_x = P\sin\theta,\; P_z = P\cos\theta$$



de kracht is q b, op de horizontale projectie — q ℓ in de grond: q b omlaag, q h zijwaa — een puntbelasting behoort tot de lamel waarin de punt zich

Traagheidskrachten in het zwaartepunt van de lamel

THEORIE

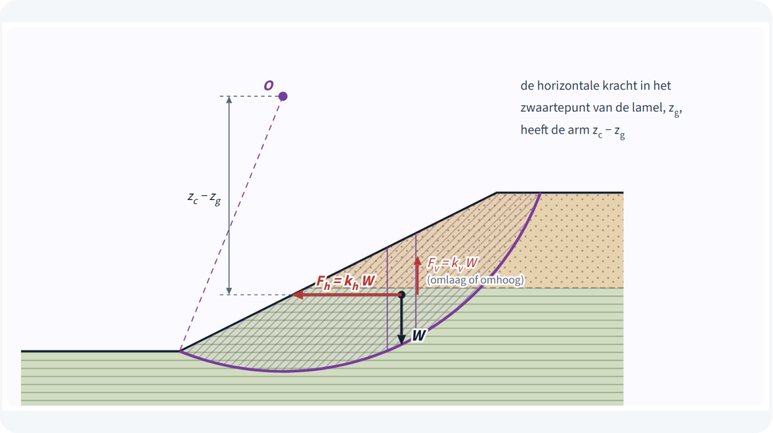
In de **pseudostatische** benadering wordt de aardbevingsschudding voorgesteld door een constante versnelling die op de afschuivende massa wordt uitgeoefend en als een fractie van g wordt uitgedrukt.

In elke lamel worden de traagheidskrachten van de grondmassa ($\mathbf{W_{soil}}$) aangebracht in het zwaartepunt ($\mathbf{z_g}$) dat wordt bepaald uit de vochtige en verzadigde delen van de grond binnen de lamel, omdat het op de lamel verzamelde water deze kracht niet draagt.

Bij de optie kritieke situatie worden zowel beide horizontale als beide verticale richtingen getoetst en wordt de laagste veiligheidsfactor aangehouden; de coëfficiënten worden door de gebruiker opgegeven en de statische en **pseudostatische** FS worden samen gerapporteerd.

$$F_h = k_h W_{soil} \qquad F_v = k_v W_{soil}$$

$$N = (W + F_v)\cos\alpha \mp F_h \sin\alpha \qquad D = (W + F_v)\sin\alpha + F_h \frac{z_c - z_g}{r}$$



Opgave

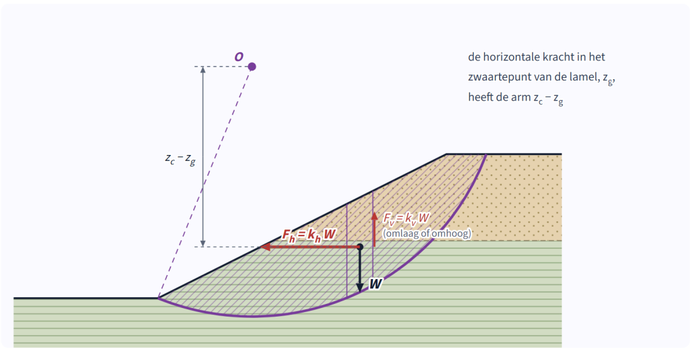
VOORBEELD

Gegeven

Aardbeving	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; **horizontale kracht in de richting van de teen (maatgevende richting)**
Lamel en cirkel	**Lamel 22 en de glijcirkel uit Voorbeeld 2; het zwaartepunt is nodig voor de momentarm z_g**

GEVRAAGD

In lamel 22: **F_h, N′, R, D**; voor de gehele cirkel **$FS_{aardbeving}$** volgens drie methoden.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Traagheidskracht en momentarm

$$F_h = k_h W = 0.15(88.52) = \mathbf{13.28}\ \mathrm{kN/m}$$

$$z_g = \sum W_i z_{g,i}/W = (46.45(5.700) + 42.07(2.416))/88.52 = 4.139\ \mathrm{m}$$

$$\mathrm{momentarm} = (z_c - z_g)/r = (16.080 - 4.139)/17.352 = 0.6882$$

2 Normaalkracht, weerstand, aandrijvende werking

$$N' = W\cos\alpha - F_h \sin\alpha = 77.79 - 6.34 = \mathbf{71.45}\ \mathrm{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 71.45(0.3249) = \mathbf{40.49}\ \mathrm{kN/m}$$

$$D = W\sin\alpha + F_h\,\frac{z_c - z_g}{r} = 42.25 + 13.28(0.6882) = \mathbf{51.39}\ \mathrm{kN/m}$$

Het aandrijvende effect gaat van 42.25 → **51.39** kN/m (+22%), de weerstand van 42.55 → **40.49** kN/m: de horizontale kracht verkleint de normaalkracht en voegt een glijmoment toe.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Drie methoden op dezelfde cirkel (k_h = 0.15, k_v = 0)

Methode	ΣR	ΣD	FS (statisch)	FS (aardbeving)
Gewoon	967.97	840.48	1.569	**1.152**
Bishop	1,083.01	840.48	1.740	**1.289**
Spencer	1,069.09	840.48	1.717	**1.272**

k_h = 0.15 verlaagt FS met ongeveer 27% (gewoon 1.569 → **1.152**). Onder aardbevingsbelasting verandert ook de maatgevende glijcirkel: in het model op de pagina (k_h = 0.15, k_v = 0.05, kritieke richtingen) wordt het zoekresultaat 1.138 / 1.265 / 1.250.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Water in de scheur en op diepte

THEORIE

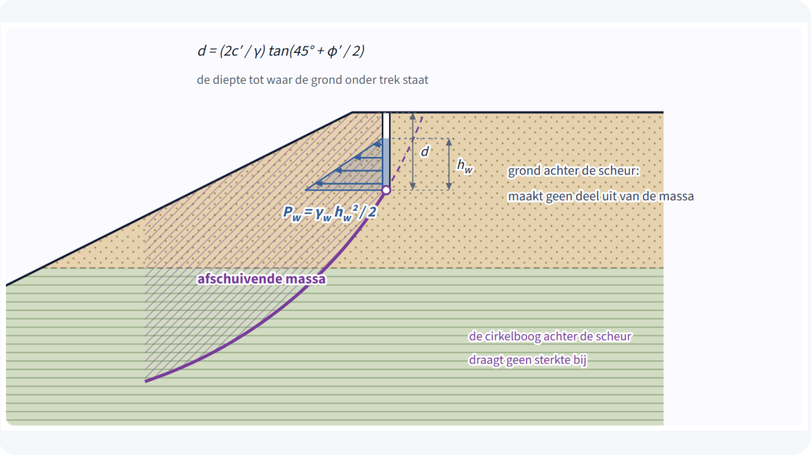
De diepte van de trekscheur wordt gevonden als d = 2c′/γ·tan(45° + φ′/2); in het ongedraineerde geval wordt deze diepte $2c_u/\gamma$.

Wanneer de scheur actief is, eindigt het glijvlak in het punt waar de diepte van het afglijdende massief gelijk is aan de scheurdiepte; de grond achter de scheur behoort niet tot het afglijdende massief en het deel van de cirkelboog binnen de scheur levert geen weerstand.

Water dat in de trekscheur staat tot hoogte h_W oefent druk uit met een hydrostatische kracht; een met water gevulde trekscheur verlaagt de veiligheidsfactor, en deze situatie wordt vaker over het hoofd gezien.

$$d = \frac{2c'}{\gamma}\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad d = \frac{2c_u}{\gamma}$$

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} \qquad z_f = z_{base} + \frac{h_w}{3} \qquad D_{crack} = \frac{P_w\,(z_c - z_f)}{r}$$



Opgave

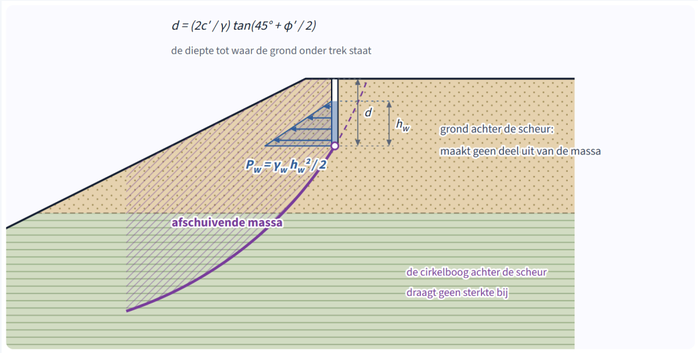
VOORBEELD

Gegeven

Scheur	**bovenaan een verticale trekscheur op $d = 2$ m diepte (de beginwaarde van het model); twee situaties, droog en met water gevuld ($h_w = 2$ m)**
Cirkel	**De cirkel uit Voorbeeld 1; eindigt aan de basis van de trekscheur**

GEVRAAGD

De **x**-positie van de scheur; **P_w**, **z_f**, **D_{scheur}**; **FS** volgens drie methoden.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Locatie van de scheur: deze eindigt waar de cirkel het niveau z = 10 − 2 = 8 m bereikt

$$x = x_c + \sqrt{r^2 - (8 - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (8 - 16.080)^2} = \mathbf{31.87}\ \mathrm{m}$$

2 Water in de scheur (h_w = 2 m): kracht en moment

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} = \frac{9.81(2)^2}{2} = \mathbf{19.62}\ \mathrm{kN/m} \qquad z_f = 8 + \frac{2}{3} = 8.667\ \mathrm{m}$$

$$D_{crack} = \frac{P_w(z_c - z_f)}{r} = \frac{19.62(16.080 - 8.667)}{17.352} = \mathbf{8.38}\ \mathrm{kN/m}$$

De Rankine-diepte bedraagt 0.96 m in de ophoging en 3.15 m in de klei; de module neemt de scheurdiepte over zoals door de ingenieur ingevoerd (hier 2 m). Een met water gevulde scheur voegt **8.38** kN/m toe aan ΣD.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Ongescheurd, droge scheur en met water gevulde scheur (dezelfde cirkel; 34 lamellen in de scheur)

Methode	FS zonder trekscheur	ΣR	ΣD (droog)	FS droge scheur	ΣD (water)	FS gevulde scheur
Gewoon	1.569	991.18	625.52	**1.585**	633.91	**1.564**
Bishop	1.740	1,096.39	625.52	**1.753**	633.91	**1.727**
Spencer	1.717	1,083.00	625.52	**1.731**	633.91	**1.702**

Een droge scheur verandert FS nauwelijks (de aandrijvende massa erboven en de weerstand in de cirkelboog veranderen samen: 1.569 → 1.585); een **met water gevulde scheur** verlaagt FS (1.564). Water in de scheur is het meest vergeten geval.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Hartrooster, stralen, verfijning

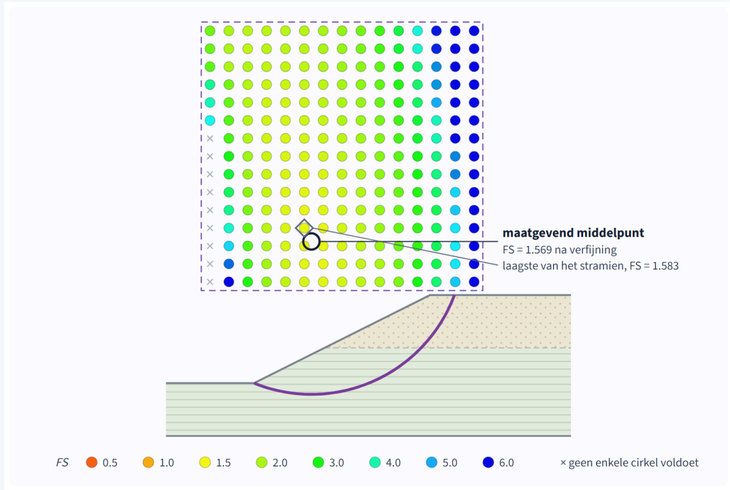
THEORIE

De zoektocht naar de maatgevende glijcirkel wordt uitgevoerd over een raster van $n_X \times n_Z$ middelpunten boven het talud, waarbij in elk middelpunt een reeks gelijkmatig verdeelde stralen wordt beproefd.

Elke cirkel wordt in lamellen verdeeld en doorgerekend, en de laagste veiligheidsfactor die voor elk middelpunt wordt gevonden, wordt samen met de bijbehorende straal opgeslagen; in het uitgewerkte model zijn 4650 cirkels getoetst met een raster van 15 × 15 middelpunten en 12 stralen.

$$FS(x_c, z_c) = \min_j FS(x_c, z_c, r_j) \qquad FS_{crit} = \min_{x_c, z_c} FS(x_c, z_c)$$

Uitgewerkt model	Waarde
Raster ($n_X \times n_Z \times$ straal)	15 × 15 × 12
Beproefde / aangenomen cirkel	4,650 / 3,487
Laagste van het rooster	FS = 1.583
Na verfijning	**FS = 1.569**
Maatgevende glijcirkel	x_c = 16.52, z_c = 16.08, r = 17.35 m



Gebroken lijn, alleen Spencer

THEORIE

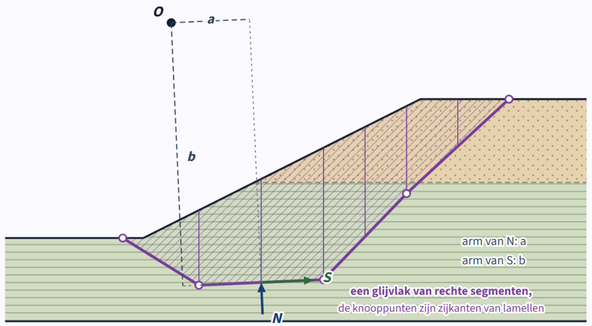
Een niet-cirkelvormig oppervlak kan een zwakke laag volgen met wiggen die vanaf de taludtop afdalen en naar de teen toe stijgen, en is een polygonaal oppervlak waarvan beide uiteinden aan het maaiveld liggen.

De momentenvergelijking op een meervoudig lineair glijvlak wordt opgesteld om een punt O dat boven de teen van het massa wordt gekozen; de momentarm van N is a en die van S is b.

Het oppervlak met de laagste veiligheidsfactor wordt gezocht als een stuksgewijs lineair oppervlak met n segmenten; de verplaatsing wordt alleen gehandhaafd wanneer het oppervlak toelaatbaar blijft, en de convexiteitsbeperking voorkomt dat naar zigzagvormige oppervlakken wordt afgedreven.

$$a = (X - X_O)\cos\alpha - (z - z_O)\sin\alpha \qquad b = (X - X_O)\sin\alpha + (z - z_O)\cos\alpha$$

$$\sum [Na + Sb] - \sum V(X - X_O) - \sum A(z_A - z_O) + M_{reinforcement} + M_{crack} = 0$$



Bijdrage van het passieve en actieve element aan FS

THEORIE

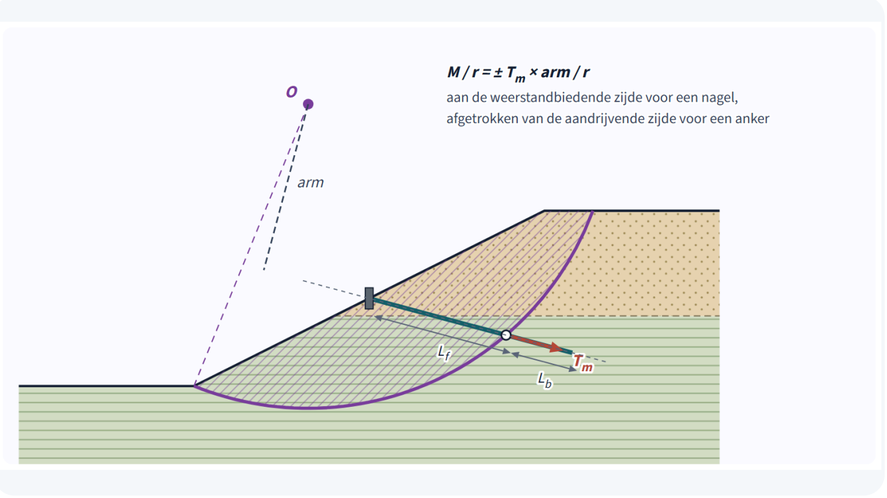
Het wapeningselement is een lijn die het glijvlak snijdt; de lengte van het glijvlak vóór het snijpunt met de cirkelboog wordt met L_f aangeduid, de aangehechte lengte achter dit punt met L_b.

Het moment van een passief element (spijker, geogrid) wordt aan de weerstandbiedende zijde toegevoegd; omdat een actief element (anker) zijn belasting al vóór de beweging draagt, wordt zijn moment van de aandrijvende zijde afgetrokken.

Voor dezelfde kracht verhoogt een actief element de veiligheidsfactor meer dan een passief element; de kracht is in het statische en het pseudostatische geval gelijk genomen.

$$\frac{M}{r} = \pm \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r}$$

$$FS = \frac{\sum R + \sum M_{passive}/r}{\sum D - \sum M_{active}/r}$$



Kleinste van de drie waarden

THEORIE

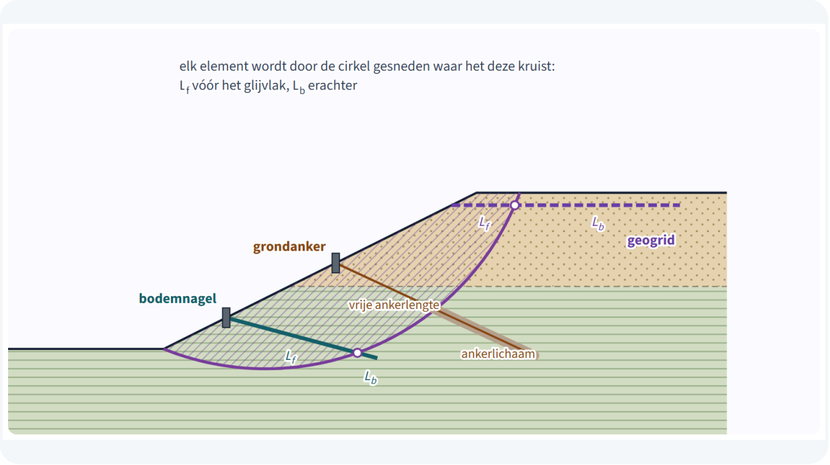
De trekkracht van de grondnagel is $T = \min[T_t, q_u \pi D_h L_b, q_u \pi D_h L_f + T_h]$, de kleinste van de drie waarden.

Een nagel is een passief element: het wordt geactiveerd naarmate de grondmassa beweegt, en de nagelkracht gedeeld door de hartafstand S_h wordt uitgedrukt als $T_m = T/S_h$.

Een spijker waarvan de kop buiten de cirkel ligt of waarvan het uiteinde binnen het grondmassief ligt, levert voor die cirkel geen kracht.

In de vrije ankerlengte wordt geen hechting gevormd; het anker wordt door de wortel vastgehouden en de kracht die het anker overdraagt door een glijcirkel te snijden is de kleinste van drie waarden: **$T = \min[P, T_t, q_u \pi D_h L_b]$**.

Het anker is een actief element: de belasting zit in de ankerstang voordat de massa beweegt, en in de vergelijkingen van Spencer is het anker een gegeven kracht; daar wordt deze niet gedeeld door **FS**.



$$\text{spijker: } T = \min\left[T_t,\ q_u \pi D_h L_b,\ q_u \pi D_h L_f + T_h\right] \qquad T_m = \frac{T}{S_h}$$

$$\text{anker: } T = \min\left[P,\ T_t,\ q_u \pi D_h L_b\right] \qquad T_m = \frac{T}{S_h}$$

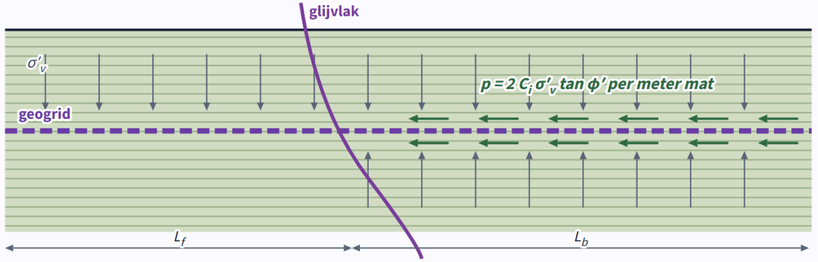
Rekenvastheid ontwerp, uittrekken, aansluiting

THEORIE

Het geogrid wordt gedefinieerd door de lengte L, de langdurige ontwerpsterkte per meter doorsnede T_d, de interactiecoëfficiënt tussen grond en geogrid C_i en de verbindingssterkte T_c wanneer het aan de bekleding is bevestigd.

De uittrekweerstand per meter lengte ontstaat uit de wrijving op beide vlakken onder de effectieve deklaagdruk σ'_v; het geogrid is een passief element en werkt in het vlak van de folie.

σ'_v wordt verkregen uit het gewicht van de grond boven de plaat — met verzadigd volumiek gewicht onder de grondwaterstand — verminderd met de poriënwaterspanning; oppervlaktebelastingen zijn niet meegerekend en blijven aan de veilige kant.



$$p = 2\,C_i\,\sigma'_v\,\tan\varphi' \qquad T_m = \min\left[T_d,\ \int_{L_b} p\,dl,\ \int_{L_f} p\,dl + T_c\right]$$

Opgave

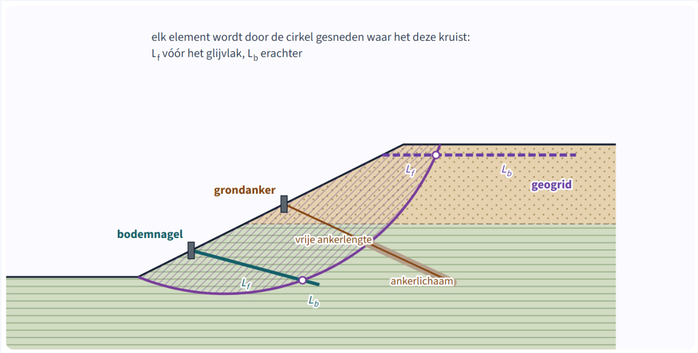
VOORBEELD

Gegeven

Spijkers	**vier spijkers, koppen op $x = 14, 18, 22, 26$ m (aan het oppervlak), 15° hellend, $L = 14$ m;** $T_t = 250$ **kN,** $q_u = 120$ **kPa,** $D_h = 120$ **mm,** $S_h = 1.5$ **m**
Cirkel	**cirkel gevonden door de zoekprocedure in het genagelde model: middelpunt** $(18.29;\ 13.90)$**,** $r = 18.18$ **m**

GEVRAAGD

Voor elke nagel **L_f, L_b, T** en **T_m**; de momentbijdrage; **FS**.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Hechtsterkte (per lengte-eenheid) en nagel N3

$$q_u \pi D_h = 120\pi(0.120) = \mathbf{45.239}\ \text{kN/m}$$

$$L_f = 11.282\ \text{m},\ L_b = 2.718\ \text{m} \qquad P(32.90;\ 3.08)$$

$$T = \min[250,\ 45.239(2.718) = 122.94,\ 45.239(11.282) = 510.4] = \mathbf{122.94}\ \text{kN}$$

$$T_m = \frac{T}{S_h} = \frac{122.94}{1.5} = \mathbf{81.96}\ \text{kN/m}$$

2 Moment van de kracht om het cirkelmiddelpunt

$$F_x = T_m \cos 15^\circ = 79.17, \quad F_z = -T_m \sin 15^\circ = -21.21\ \text{kN/m}$$

$$\frac{M}{r} = \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r} = \frac{(14.606)(-21.21) - (-10.822)(79.17)}{18.178} = \mathbf{30.09}\ \text{kN/m}$$

Nage N3 draagt een belasting van **81.96** kN/m die het massief tegenhoudt; het moment ervan voegt 30.09 kN/m toe aan ΣR (passief element).

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Krachten van vier nagels (zelfde methode)

Spijker	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	Maatgevend	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	punt in de massa: draagt geen belasting	0	0
N2	13.13	0.87	39.32	uittrekken aan de achterzijde	26.21	13.90
N3	11.28	2.72	122.94	uittrekken aan de achterzijde	81.96	30.09
N4	8.82	5.18	234.18	uittrekken aan de achterzijde	156.12	31.82

4 Genageld model: FS op de cirkel die de zoekprocedure vindt

Methode	Zonder nagel (ontgraving)	Genageld
Gewoon	1.569	**1.753**
Bishop	1.740	**2.018**
Spencer	1.717	**2.031**

De spijkers verhogen FS met ongeveer 12% (gewoon 1.569 → 1.753; Bishop 1.740 → 2.018).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Gebogen sterkteomhullende en de raaklijn aan elke basis

THEORIE

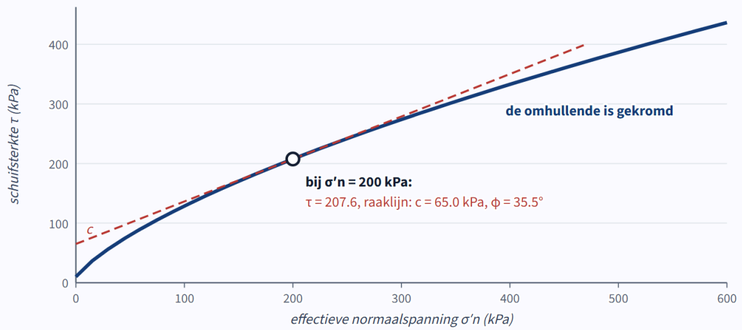
In het veralgemeende Hoek–Brown-criterium wordt de rotsmassa gedefinieerd door σ_{ci}, GSI, m_i en D; voor een ongestoorde massa wordt D = 0 aangehouden, bij zwaar schieten of loskomen D = 1.

Omdat de schuifsterkte aan de basis van de lamel afhankelijk is van de normaalspanning, wordt de kromlijnige omhullende met de betrekkingen van Balmer omgezet naar het τ–σ′$_n$-vlak; de raaklijn levert de waarden van c_i en φ_i aan de basis.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

$$m_b = m_i\, e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \qquad s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \qquad a = \frac{1}{2} + \frac{e^{-GSI/15} - e^{-20/3}}{6}$$

$$d = \frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} \qquad \sin\varphi_i = \frac{d-1}{d+1} \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i$$



Opgave

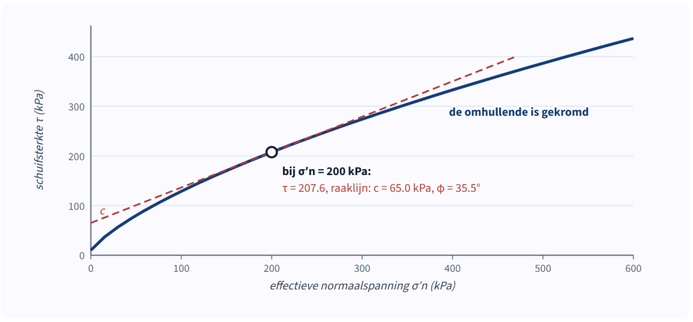
VOORBEELD

Gegeven

Rotsmassa	$\sigma_{ci} = 5$ **MPa,** $GSI = 30$**,** $m_i = 8$**,** $D = 0$
Basis	**effectieve normaalspanning** $\sigma'_n = 200$ **kPa**

GEVRAAGD

m_b, s, a; bij deze spanning **τ**, **φ_i** en **c_i**.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Constanten van de rotsmassa

$$m_b = 8\,e^{(30-100)/28} = 0.6567 \qquad s = e^{(30-100)/9} = 0.000419$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{-2} - e^{-20/3}}{6} = 0.5223$$

2 Voor σ'_n = 200 kPa geldt σ'_3 = 93.05 kPa (iteratief bepaald)

$$d = 1 + a\,m_b \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a-1} = 3.767$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a} = 602.9\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\,\frac{d-1}{d+1} = 200.0\ \text{kPa}\ \checkmark$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Schuifsterkte en gelijkwaardige Mohr–Coulomb-parameters

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3')\frac{\sqrt{d}}{d+1} = \mathbf{207.6}\ \mathrm{kPa}$$

$$\varphi_i = \arcsin\frac{d-1}{d+1} = \mathbf{35.48}^\circ \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i = 207.6 - 200(0.7128) = \mathbf{65.0}\ \mathrm{kPa}$$

Op deze basis gedraagt de rots zich volgens Mohr–Coulomb met **c_i = 65.0 kPa, φ_i = 35.5°** (τ = 207.6 kPa); wanneer de spanning verandert, veranderen deze waarden mee: elke lamel gebruikt zijn eigen c en φ.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

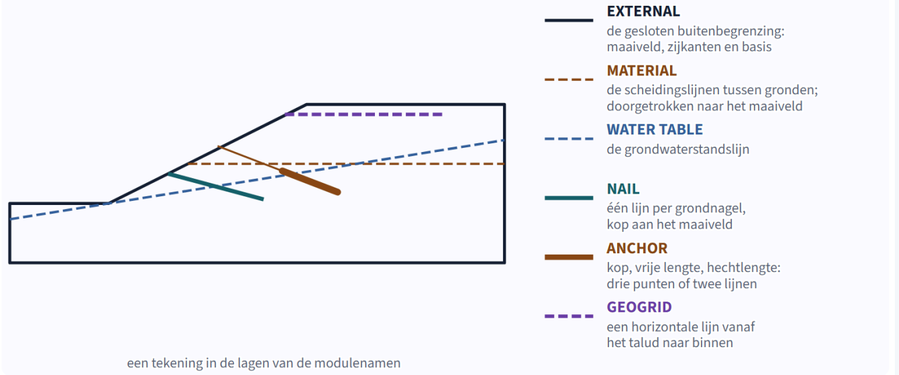
Aflezen op laagnamen

THEORIE

DXF-doorsnedelaagnamen worden ingelezen zonder onderscheid naar hoofd- en kleine letters, spaties, koppeltekens en underscores; **EXTERNAL** geeft het maaiveld, de twee zijkanten en de basis als één gesloten polylijn.

MATERIAL-lijnen zijn de lijnen tussen de grondlagen; een lijn die binnen de doorsnede eindigt, wordt langs het maaiveld verlengd en aan elke zone tussen twee grenzen wordt een afzonderlijke grond toegekend.

WATER TABLE is de grondwaterlijn; **NAIL**, **ANCHOR** en **GEOGRID** zijn wapeningen, en het volumiek gewicht, de sterkte, de capaciteit, de belasting en de aardbeving die niet in de tekening staan, worden in het tabblad Model ingevoerd.

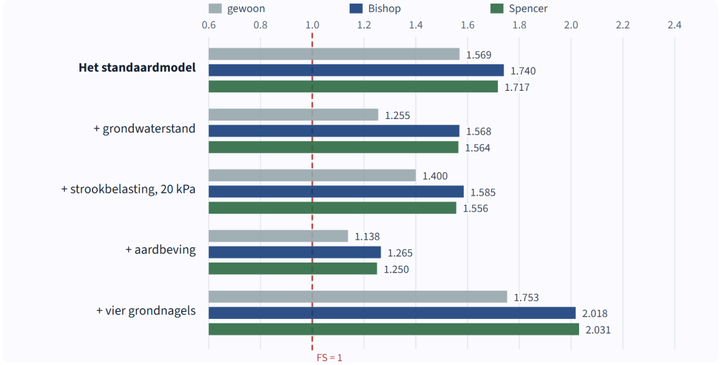


een tekening in de lagen van de modulenamen

Resultatentabel

Dezelfde doorsnede, vijf modellen, drie methoden

Model (er wordt iets toegevoegd, de cirkel wordt opnieuw gezocht)	Middelpunt (x_c; z_c)	r (m)	Lamel	Gewoon	Bishop	Spencer
Model bij opening (statisch)	16.52; 16.08	17.35	33	**1.569**	**1.740**	**1.717**
+ grondwaterstand die stijgt naar het binnengebied van het talud	17.12; 11.45	16.85	36	**1.255**	**1.568**	**1.564**
+ 20 kPa strookbelasting, x = 25 – 32 m	16.25; 15.44	16.66	35	**1.400**	**1.585**	**1.556**
+ aardbeving, kh 0.15, kv 0.05 (maatgevend)	16.72; 17.45	18.70	34	**1.138**	**1.265**	**1.250**
+ vier grondnagels, 14 m lang	18.29; 13.90	18.18	34	**1.753**	**2.018**	**2.031**



De gewone methode is altijd de laagste; Bishop en Spencer liggen dicht bij elkaar (enkele procenten verschil voor een cirkel).

Water en aardbeving verlagen FS het meest (1.255 en 1.138, gewoon); vier nagels verhogen FS tot 1.753. Met nagels komen Bishop en Spencer boven 2.0 uit.

Uitgangspunten

Wat het model wel en niet veronderstelt

Het **model** veronderstelt vlakke vervorming: één meter van een oneindig lang talud, dezelfde sterkte in elke richting (behalve bij het isotrope rotcriterium) en een star grondmassief totdat de beweging begint.

Voor **water** wordt onder een bepaalde lijn een hydrostatische lijn of de r_u-verhouding van de deklaagdruk gebruikt; er wordt geen kwelanalyse uitgevoerd, en bij snelle verlaging wordt $\bar{B} = 1$ aangenomen als een onmiddellijke verlaging.

Voor **lamellen** worden alle grootheden op de verticale middellijn van de lamel bepaald, een negatieve effectieve normaalkracht wordt op nul gehouden; aardbevingen worden met pseudostatische coëfficiënten behandeld en de traagheid van water dat zich aan het oppervlak verzamelt wordt verwaarloosd.

De methode-**Spencer** gaat ervan uit dat de krachten tussen de lamellen voor de gehele massa onder één enkele hoek evenwijdig aan elkaar zijn; het momentenevenwicht wordt bij alle drie de methoden vervuld, het krachtenevenwicht alleen bij Spencer.

De **zoekactie** vindt nabij de startoppervlakken het oppervlak met de laagste veiligheidsfactor; het is niet bewezen dat dit de laagste is van alle oppervlakken.

WAT HET NIET DOET

- Driedimensionale effecten (uiteinde van het glijvlak, breedte van het talud)
- Vervorming, progressief bezwijken, spanningverweking
- Kwelse en consolidatie: de poriënwaterspanning wordt gegeven, niet berekend
- Dynamische analyse (Newmark): de pseudostatische berekening is een toets
- Bepaling: FS wordt gegeven; de ingenieur en de specificatie bepalen de toereikende waarde

Samenvatting

Belangrijkste punten

FS = ΣR/ΣD; R = cL + N′ tan φ′, D = W sin α (moment om het middelpunt van de cirkel). De drie methoden verschillen alleen in de manier waarop **N′** wordt bepaald

Lamel 22 (voorbeeld): α = 28.51°, L = 0.864, W = 88.52 → gewone methode N′ = 77.79, R = 42.55, D = 42.25; Bishop N′ = 86.56, R = 45.40; Spencer N′ = 80.76, R = 43.51 kN/m

Dezelfde cirkel: **1.569 (gewoon) · 1.740 (Bishop) · 1.717 (Spencer)**; de maatgevende cirkel werd gevonden door 4650 cirkels te beproeven op een raster van 15 × 15 × 12

Water: $u = \gamma_w h_w$ vermindert N′; **aardbeving**: F_h vermindert de normaalkracht en voegt een moment toe; **water in de scheur** voegt een moment P_w toe aan ΣD′

Wapening: passieve wapening (nagels, geogrid) wordt aan de weerstandbiedende zijde meegerekend, actieve wapening (anker) aan de glijdende zijde in mindering gebracht; **Hoek–Brown**: per laagbodem de raaklijnwaarden c_i, φ_i

Literatuur

Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, 4, 445–463.

Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5(1), 7–17.

Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Géotechnique, 17(1), 11–26.

Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79–93.

Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L. (2014). Soil Strength and Slope Stability, 2nd ed. Wiley.

Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides. In Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of America, 83–123.

Rankine, W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9–27.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion — 2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, 1, 267–273.

Balmer, G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. Proceedings ASTM, 52, 1260–1271.

Lazarte, C.A., Robinson, H., Gómez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R. (2015). Soil Nail Walls — Reference Manual. Geotechnical Engineering Circular No. 7, FHWA-NHI-14-007.

Sabatini, P.J., Pass, D.G. and Bachus, R.C. (1999). Ground Anchors and Anchored Systems. Geotechnical Engineering Circular No. 4, FHWA-IF-99-015.

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Geotechnical Engineering Circular No. 11, FHWA-NHI-10-024.

OPMERKING

Alle numerieke voorbeelden zijn geproduceerd met de eigen berekeningsbibliotheken van de module; de module geeft dezelfde waarden. Het uitgewerkte model op de modulepagina is ook deze doorsnede (2:1-talud van 10 m hoog, klei op ophoging).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Teken uw eigen doorsnede of lees deze in vanuit DXF; voer de gronden, het water, de belastingen, de aardbeving en de wapening in. De module zoekt de maatgevende glijcirkel en levert de veiligheidsfactoren van de drie methoden, de lameltabellen, de stapsgewijze oplossing en het rapport.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

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