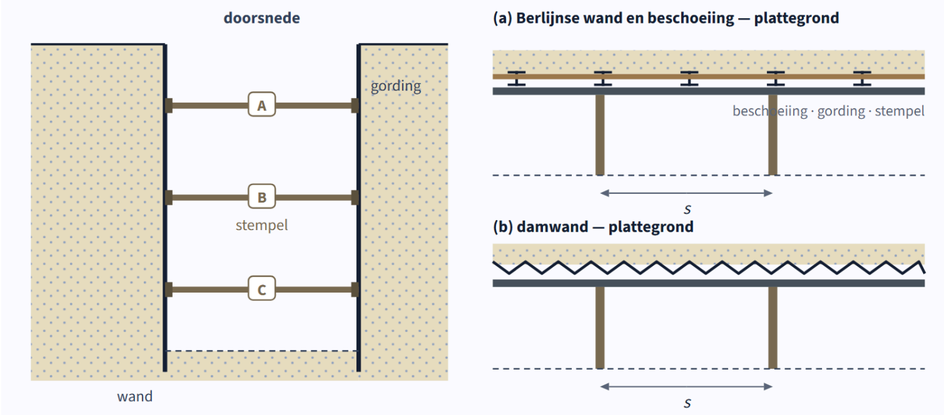
Geotechnisch college · Damwanden en gestempelde bouwputten

Gestempelde bouwput in klei

College: gestempelde bouwput in klei; klei-omhullenden, trekscheur, stempelkrachten, dimensionering van damwand en gording, staaltoets en bodemopbolling; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

- Ontgravingsondersteuning
- Omhullende volgens Peck (klei)
- Trekscheur · eerste stempel
- Stempel · gording · damwand
- Bodemopbolling



Inleiding

Wat leren we in dit college?

waarom de druk in een gestempelde bouwput niet volgens Rankine is en **hoe de omhullenden** uit gemeten belastingen worden opgebouwd

De twee omhullenden van de klei volgens het **stabiliteitsgetal γH/c**: zachte tot middelharde klei (γH/c > 4) en stijve klei (≤ 4)

Dat de **bovenbelasting** als afzonderlijke druk wordt toegevoegd, dat water in klei alleen het volumiek gewicht verandert; de **trekscheur $z_c = 2c/\gamma$** en de eerste ondersteuning

Uit de omhullende de **stempelkrachten** (scharnierende delen), en de dimensionering van de **damwand** en de **gording**

Het staal te toetsen aan **EN 1993-1-1 en AISC 360-22**

De toets op **bodemopbolling** van het ontgravingsvlak in klei (Terzaghi-kolom, correctie van Chang)

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

Voorbeeld ontgraving: klei (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, φ = 0), diepte H = 7.00 m, breedte B = 6.00 m; stempels op diepten van 1.00, 3.50, 6.00 m, horizontale hartafstand s = 3.00 m. De krachten gelden per meter wand (stempelkrachten vermenigvuldigd met s).

Stempelsysteem en zijn elementen

THEORIE

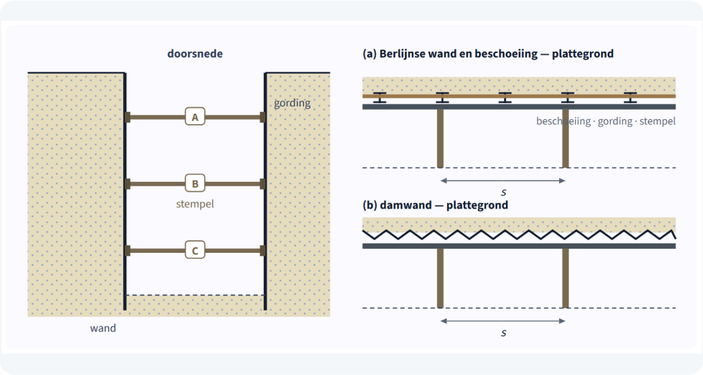
Diepe ontgravingen met een verticaal front (kelders in stedelijk gebied, cut-and-covertunnels) worden opengehouden met een tijdelijk **ondersteuningssysteem**. Twee opstellingen zijn gangbaar: vooraf ingeheide **verticale palen** (staal of hout) waartussen naarmate de ontgraving vordert horizontale houten beschieting wordt aangebracht; of in elkaar grijpende **damwanden** die een doorlopende wand vormen.

Op elk stempelniveau worden horizontale **gordingen** (wale) aangebracht zodra de ontgraving dat niveau bereikt; **stempels** (strut) zijn horizontale stalen drukelementen die de ontgraving van gording tot gording overspannen.

Voor het selecteren van de elementen is de horizontale druk nodig die het ondersteuningssysteem zal opnemen. De theorie geeft de totale stuwkracht, niet de **verdeling** ervan: de verdeling hangt af van de grond, de volgorde en het tempo van de werkzaamheden, het team en het materieel.

De ontwerpdrukken zijn daarom **empirische omhullenden**: ze worden getekend rond de drukken die terug worden berekend uit de in werkelijke ontgravingen gemeten stempelkrachten.

Tijdens de uitvoering moet de stempelafstand verticaal ten minste ongeveer 2.75 m bedragen.



Draait om de bovenkant van de wand

THEORIE

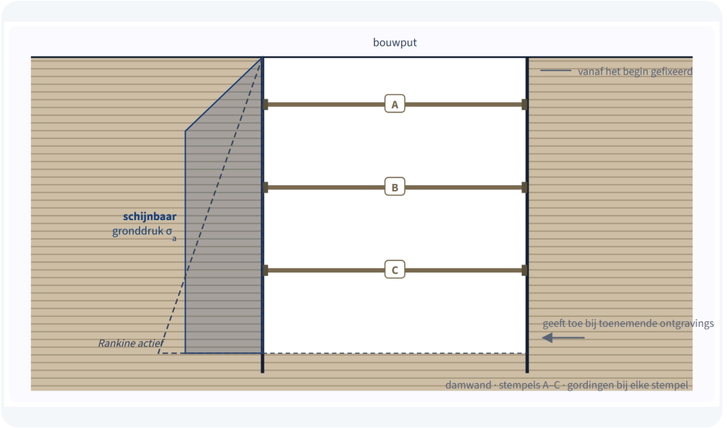
Een hoekkeermuur draait om zijn voet, en de actieve druk volgens Rankine (nul aan de bovenkant, het grootst aan de onderkant) beschrijft dat goed. **Een gestempelde wand beweegt in tegengestelde zin**: de eerste stempel wordt geplaatst terwijl de ontgraving ondiep is, zodat het bovenste deel nauwelijks beweegt; elke volgende fase wordt ontgraven voordat de stempel wordt aangebracht, en het tijdsinterval neemt met de diepte toe, zodat de wand steeds lager doorbuigt: wanneer de ontgraving gereed is, is de wand **om zijn bovenkant gedraaid**.

Aan de bovenkant blijft de druk dicht bij de **neutrale waarde** (de grond is zeer weinig verschoven).

Onderaan kan de druk dalen tot onder de actieve waarde van Rankine (de grond heeft het plastisch evenwicht allang overschreden).

De resulterende stuwkracht P_a grijpt **hoger** aan dan het een derde punt van de driehoek: op hoogte n_aH boven de basis, $n_a > 1/3$.

De totale stuwkracht wordt gevonden met de wig volgens de logaritmische spiraal ($r = r_o e^{\theta \tan \varphi'}$); in niet-samenhangende grond ligt zij 15–20% boven de waarde van Coulomb. Maar omdat de verdeling en n_a afhangen van de grond en de bouwplaats, worden ontgravingen met **omhullenden** ontworpen.



Hoe zijn de omhullenden opgesteld?

THEORIE

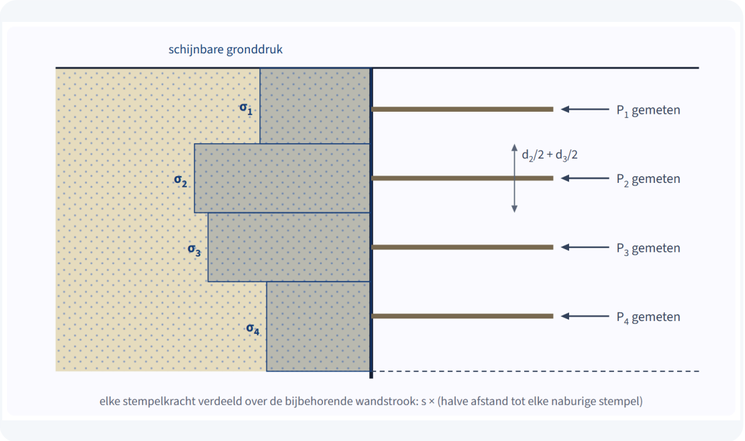
De druk varieert van punt tot punt en elke stempel moet worden gedimensioneerd op de **grootste belasting** die hij kan ondervinden. Daarvoor worden omhullenden opgesteld: in een geïnstrumenteerde ontgraving wordt de belasting op elke stempel gemeten, gedeeld door de damwandstrook die de stempel ondersteunt (horizontale afstand s × de halve afstanden tot de stempels boven en onder), en over deze band omgerekend naar een **schijnbare druk**:

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{s\left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right)} \qquad \sigma_i = \frac{P_i}{s\left(\frac{d_i}{2} + \frac{d_{i+1}}{2}\right)}$$

d_1 is de diepte van de eerste stempel, d_i de afstanden tussen de volgende stempels. De omhullende van alle over elkaar getekende diagrammen is een **schijnbaar gronddrukdiagram**.

De omhullenden van Peck zijn gebaseerd op gemeten zandbelastingen in metrobouwputten in Berlijn, München en New York; hij stelde ze met dezelfde methode op voor zachte tot matige en voor stijve klei.

De omhullende is **niet** de druk die op een willekeurig moment op de wand werkt: de belasting die er voor een bepaalde ondersteuning aan wordt ontleend, is zodanig getekend dat deze aan de veilige zijde van de gemeten belastingen blijft.



elke stempelkracht verdeeld over de bijbehorende wandstrook: s × (halve afstand tot elke naburige stempel)

Zacht–matig of stijf: γH/c

THEORIE

In klei wordt de vorm van de omhullende bepaald door het **stabiliteitsgetal γH/c** (c ongedraineerde cohesie, φ = 0). Een **zachte tot matige klei** met γH/c > 4 wordt door de ontgraving ver boven haar sterkte belast:

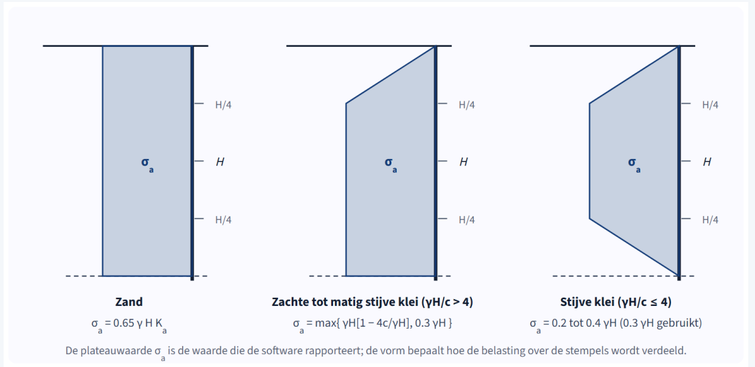
$$\frac{\gamma H}{c} > 4: \quad \sigma_a = \max\left(\gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right],\ 0.3\gamma H\right)$$

De omhullende is nul aan het maaiveld, neemt lineair toe in het bovenste kwart en blijft constant tot aan de basis; de grootste van de twee uitdrukkingen is maatgevend. **Stijve klei** ligt dichter bij het elastische bereik:

$$\frac{\gamma H}{c} \leq 4: \quad \sigma_a = 0.2\gamma H \text{ met } 0.4\gamma H \ \ (\text{gemiddelde } 0.3\gamma H)$$

In stijve klei neemt de omhullende in het bovenste kwart toe, is constant in de middelste helft en keert in het onderste kwart terug naar nul. De voorwaarden zijn dezelfde als bij de omhullende voor zand (≳ 6 m diepte, water onder de basis, klei ongedraineerd).

Als de ontgraving door meerdere kleilagen gaat, middelt de bron deze naar dikte: $c_{av} = \Sigma c_i H_i/H$, $\gamma_{av} = \Sigma \gamma_i H_i/H$, waarna de klei-omhullenden met de gemiddelden worden gebruikt.



Opgave

VOORBEELD

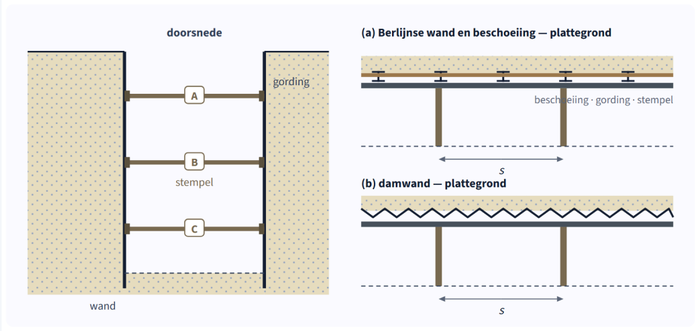
Gegeven

Ontgraving in open put $H = 7.0$ **m,** $\gamma = 18$ **kN/m³,** $c = 35$ **kPa**

Zachtere klei **dezelfde ontgraving,** $c = 20$ **kPa**

GEVRAAGD

Voor beide kleien **γH/c**, het type omhullende en σ_a.



Oplossing

OPLOSSING

1 Openingsklei (c = 35 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{18(7)}{35} = \mathbf{3.60} \leq 4 \Rightarrow \text{stijve klei}$$

$$\sigma_a = 0.3\gamma H = 0.3(18)(7) = \mathbf{37.80}\ \text{kPa}$$

2 Zachtere klei (c = 20 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{126}{20} = \mathbf{6.30} > 4 \Rightarrow \text{zachte tot matige klei}$$

$$\sigma_a = \gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right] = 126(1 - 0.635) = \mathbf{46.00}\ \text{kPa} \geq 0.3\gamma H = 37.8$$

De klei bij aanvang wordt als stijf beschouwd: σ_a = **37.80 kPa** (grootste stempelkracht P = 271.3 kN). Wanneer de cohesie daalt tot 20 kPa, gedraagt de ontgraving zich als zachte tot matige klei: σ_a = **46.0 kPa** en wordt de voet van de omhullende een constant plateau (P = 338.1 kN).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Naast de omhullende; met volumiek gewicht; plaats van de eerste stempel

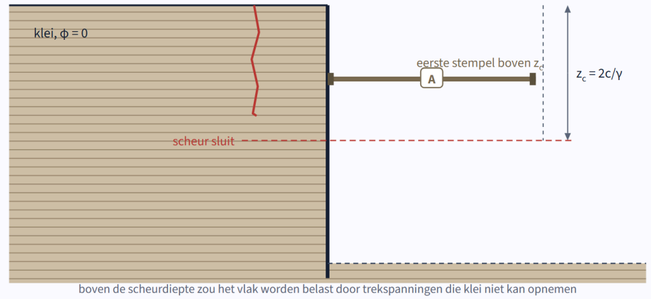
THEORIE

Bovenbelasting q wordt niet in de omhullende opgenomen (de empirische coëfficiënten zouden dan ook daarop van toepassing zijn); deze wordt over de volledige hoogte als eigen gelijkmatige druk overgedragen, en in ongedraineerde klei geldt $K_a = 1$: $\Delta p_q = q$.

Water: klei-omhullenden zijn ongedraineerde beschouwingen met totale spanning; het water in de klei zit al in het volumiek gewicht en in de ongedraineerde sterkte. Water boven de basis wordt getekend en vermeld, niet als aparte belasting toegevoegd; het verandert alleen het grondgewicht: onder water het verzadigde volumiek gewicht, en in de laag die door water wordt doorsneden het met de dikte gewogen gemiddelde van beide waarden, $\gamma = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$.

Trekscheur: het kleifront kan ongesteund standhouden tot de diepte waarop de trekscheur zich sluit (de diepte waarop de cohesieve actieve Rankine-druk nul is). Bij $\varphi = 0$ is $K_a = 1$; de eerste stempel moet **boven** deze diepte worden geplaatst, zodat de wand niet op een open front steunt dat de klei niet kan vasthouden.

$$\Delta p_q = q \qquad z_c = \frac{2c}{\gamma}\ (q = 0), \qquad z_c = \frac{2c - q}{\gamma}\ (\text{bovenbelasting q})$$



Opgave

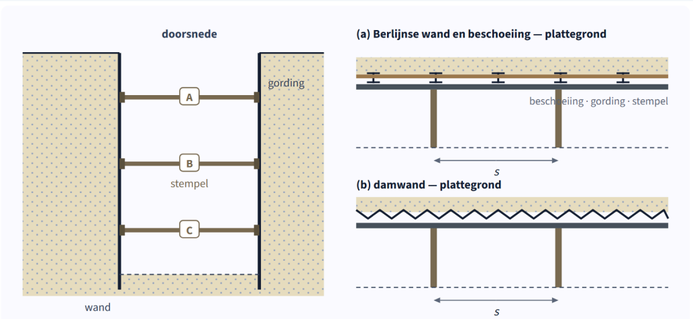
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	**De open ontgraving uit Voorbeeld 1 ($H = 7$ m, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m³, $c = 35$ kPa); eerste stempel op $z = 1.0$ m**
Gevallen	**(a) q = 0, geen water; (b) bovenbelasting $q = 10$ kPa; (c) grondwaterstand $z_w = 3$ m**

GEVRAAGD

z_c, of de plaats van de eerste ondersteuning geschikt is; in (c) $\bar{\gamma}$ en $\bar{\gamma}H/c$; in elk geval de totale belasting R en de grootste oplegreactie.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Trekscheur en eerste ondersteuning

$$z_c = \frac{2c}{\gamma} = \frac{2(35)}{18} = \mathbf{3.889}\ \mathrm{m}\ > 1.00\ \mathrm{m}\ \checkmark$$

$$z_c = \frac{2c - q}{\gamma} = \frac{70 - 10}{18} = 3.333\ \mathrm{m}\ \ (q = 10\ \mathrm{kPa})$$

De eerste ondersteuning (z = 1.0 m) ligt ruim boven de diepte van de trekscheur (3.89 m): geschikt. Met bovenbelasting daalt de scheur tot 3.33 m.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Water (c): $\bar{\gamma} = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$; samenvatting van de drie gevallen

$$\bar{\gamma} = \frac{18(3) + 19(4)}{7} = 18.571\ \mathrm{kN/m^3} \qquad \frac{\bar{\gamma}H}{c} = \frac{18.571(7)}{35} = 3.714$$

$$\sigma_a = 0.3\bar{\gamma}H = 39.00\ \mathrm{kPa}$$

Toestand	γH/c	σ_a (kPa)	z_c (m)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
(a) q = 0, geen water	3.60	37.80	3.89	198.4	271.3
(b) q = 10 kPa	3.60	37.80	3.33	268.4	334.3
(c) water z_w = 3 m	3.71	39.00	—	204.8	279.8

Bovenbelasting voegt alleen $\Delta p_q = q = 10$ kPa toe (R 198.4 → 268.4 kN/m); water verhoogt alleen $\bar{\gamma}$ tot 18.57 kN/m³ (σ_a 37.8 → 39.0 kPa).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Van omhullende naar stempellasten

THEORIE

Stempels zijn horizontale liggers: zij dragen de druk langs hun as en buigen door hun eigen gewicht; de capaciteit hangt af van de slankheid, en bij brede ontgravingen kan extra ondersteuning nodig zijn. De bron geeft een eenvoudige en conservatieve methode voor de belasting:

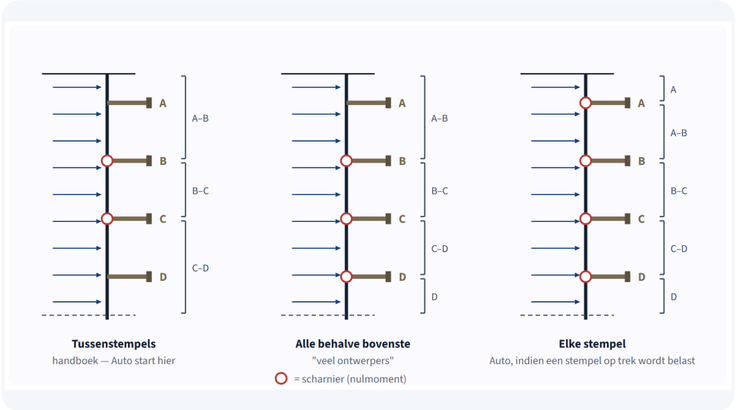
Teken de drukomhullende en de stempelniveaus. Beschouw de damwand **scharnierend in elk stempelniveau**, behalve het bovenste en het onderste (veel ontwerpers doen dit in alle niveaus behalve het bovenste).

Deel de wand bij de scharnieren op in **vrije consoles aan de uiteinden envoudige liggers daartussen**; bepaal de reacties van elk deel met de statica (bij een gestempelde bouwput met vier steunpunten: A, B_1, B_2, C_1, C_2, D).

De belasting van een stempel is de som van de opgenomen reacties × de horizontale hart-op-hartafstand s.

$$P_A = A\,s \quad P_B = (B_1 + B_2)\,s \quad P_C = (C_1 + C_2)\,s \quad P_D = D\,s$$

Elk segment is statisch bepaald: het draagt twee steunpunten; moment- en horizontaal krachtenevenwicht om een van de steunpunten levert beide. Omdat het scharniersteunpunt tot beide zijden behoort, verzamelt het **twee reacties**. De reacties gelden per eenheid van lengte van de wand (kN/m); s zet ze om in een steunpuntbelasting.



Opgave

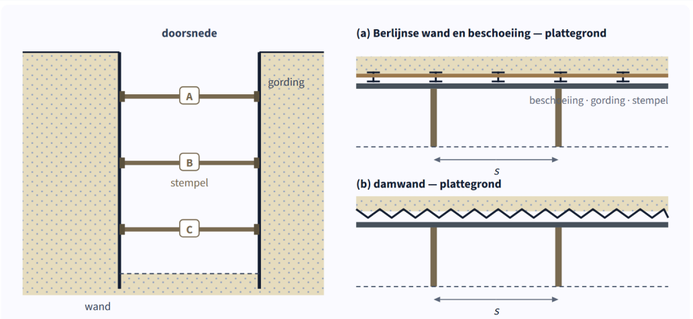
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	$H = 7.00$ m; $B = 6$ m; stempels $z = 1.00, 3.50, 6.00$ m (A, B, C); horizontale afstand $s = 3.00$ m
Druk	Voorbeeld 1: stijve klei (γH/c = 3.6): trapeziumvormige omhullende $\sigma_a = 0.3\gamma H = 37.8$ kPa (neemt toe in het bovenste kwart, daalt tot nul in het onderste kwart); damwand scharnierend bij stempel B (behalve bovenaan en onderaan)

GEVRAAGD

De **resultante W** van de delen en haar arm **z̄**; de reacties **A, B_1, B_2, C**; de oplegbelastingen **P_A, P_B, P_C**.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Deel de omhullende in delen op bij de scharnieren; de resultante en de momentarm van elk deel (diepte vanaf het bovenvlak)

Deel	Bereik (m)	W (kN/m)	z̄ (m)	Opleggingen
1	0.00 – 3.50	99.23	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	3.50 – 7.00	99.23	4.861	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

2 Eerste deel: momentenevenwicht om de eerste stempel

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.23(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.20} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{54.02}\ \mathrm{kN/m}$$

De eerste overspanning draagt de twee stempels met 54.02 en 45.21 kN/m; de reactie van de bovenste ondersteuning (A) is groter omdat deze ook de belasting van het uitkragende deel omvat.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Tweede deel

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{99.23(4.861 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{54.02} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{45.20}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Elke stempel sommeert de reacties die hij opneemt; belasting = totaal × s (s = 3.00 m)

Niveau	z (m)	Opgenomen reacties (kN/m)	Totaal (kN/m)	P = R·s (kN)
A	1.00	54.02	54.02	**162.06**
B	3.50	45.21 + 45.21	90.42	**271.26**
C	6.00	54.02	54.02	**162.06**

Grootste stempelkracht **P_B = 271.26 kN** (niveau B): deze belasting is maatgevend voor de dimensionering van de stempel. Omdat stempel B tot twee delen behoort, sommeert deze twee reacties.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Maximaal moment en vereiste weerstandsmoment

THEORIE

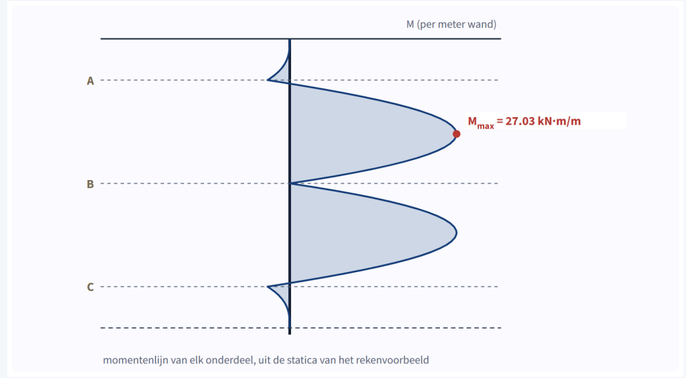
De **damwand** wordt uit dezelfde delen ontworpen: in elk deel wordt het maximale buigende moment bepaald (waar de dwarskracht van teken wisselt: binnen de overspanning of bij de stempel waar de uitkraging op de stempel aansluit); het grootste is het ontwerpmoment per strekkende meter wand. Het vereiste weerstandsmoment volgt uit de toelaatbare buigspanning en uit de tabel wordt een profiel met ten minste die waarde gekozen:

$$M_{max} = \max_{parts} |M| \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

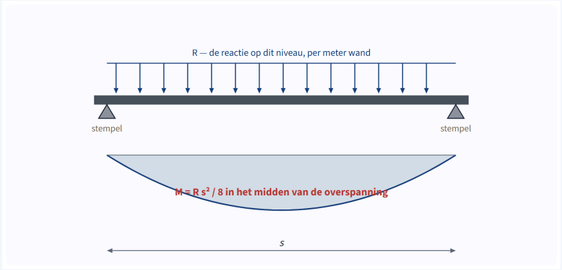
Stempels mogen als continu worden beschouwd indien op de juiste wijze verbonden; conservatief worden zij bij de steunpunten als **scharnierend** aangenomen: eenvoudig opgelegde balk met overspanning s, met de reactie R van het niveau (per eenheid van wandlengte) als verdeelde belasting:

$$M_{max} = \frac{R\,s^2}{8} \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

Het niveau met de grootste reactie is maatgevend. Stempels worden soms aan de damwand verbonden op punten waar ze de benodigde zijdelingse ondersteuning kunnen bieden.



momentenlijn van elk onderdeel, uit de statica van het rekenvoorbeeld



Opgave

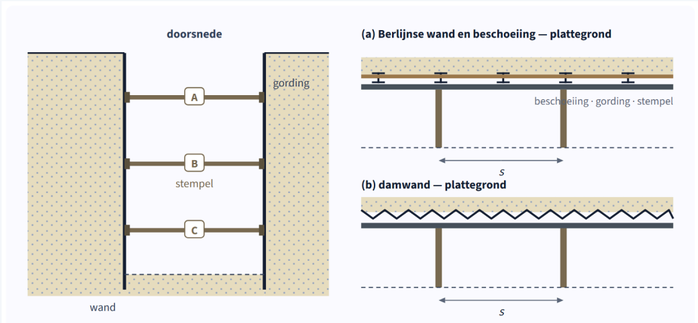
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	**De ontgraving uit Voorbeeld 1 ($H = 7$ m, stijve klei, $\sigma_a = 37.8$ kPa); stempels op 1.0 · 3.5 · 6.0 m; horizontale hartafstand $s = 3.0$ m; scharnier in B**
Staal	**toelaatbare buigspanning $\sigma_{allow} = 170\,000$ kPa**

GEVRAAGD

De **M_{max}** van de damwand en de vereiste **S** (cm³/m); op het niveau met de grootste reactie de **M_{max}** en **S** (cm³) van de gording.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Damwand: maximaal moment in elk deel

Deel	Bereik (m)	M_{max} (kN·m/m)	Locatie z (m)
1	0.00 – 3.50	27.03	2.30
2	3.50 – 7.00	27.03	4.70

2 Vereist weerstandsmoment

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{27.03}{170{,}000} = 0.0001590\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{159.0\ cm^3/m}$$

In de damwand **M_{max} = 27.03 kN·m/m** (segment 1, z = 2.30 m): **S ≥ 159.0 cm³/m**.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Gording: eenvoudige ligger per niveau (s = 3.000 m)

Niveau	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{toel} (cm³)
A	54.02	60.77	357
B	90.42	101.72	598
C	54.02	60.77	357

De grootste reactie treedt op **ter hoogte van niveau B** (R = 90.42 kN/m): de gording wordt gedimensioneerd met **M_{max} = 101.72 kN·m**, **S ≥ 598 cm³**; de gordingen op de andere niveaus kunnen kleiner zijn.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Rekentechnische effecten, klasse, buiging en knik

THEORIE

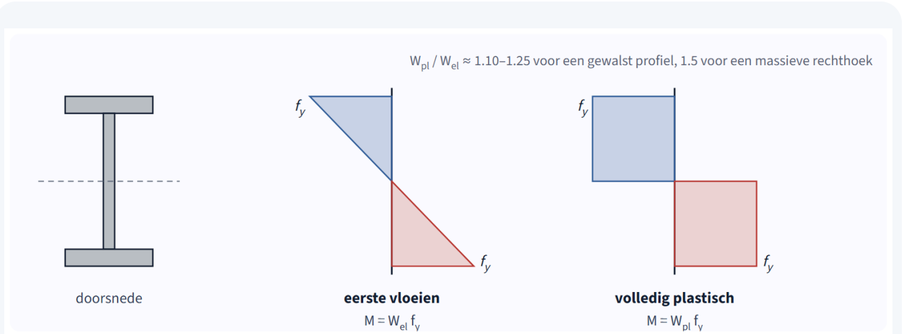
De belastingen uit de omhullende zijn **representatieve waarden** (de omhullende volgens Peck is een bovengrens voor de gemeten belastingen); zij worden één keer omgerekend naar de rekenwaarde: $E_d = \gamma_F E_k$. Elk element wordt getoetst met de vloeigrens van zijn eigen staalsoort (f_y); de doorsnede wordt gegeven door het **weerstandsmoment** van het element (damwand: W_{el} per meter; gording: W; stempel: A en I om de zwakke as).

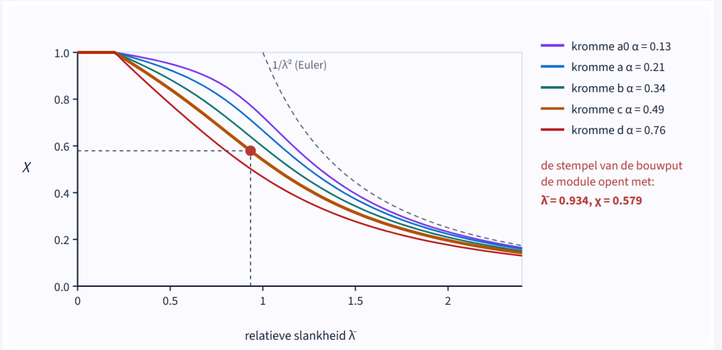
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{klasse 1–2}),\ W_{el}\ (\text{klasse 3})$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \qquad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \qquad \Phi = 0.5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\right] \qquad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1 \qquad N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

De stempel bezwijkt op knik om zijn zwakke as: I is het kleine traagheidsmoment, $L_{cr} = K\,L_b$ de effectieve lengte (de ontgravingsbreedte, indien er geen koningspaal of kruisverband tussen doorloopt). α volgt uit de knikkromme (kromme c: 0.49).

Voor damwanden geldt dezelfde weerstand per eenheid breedte (EN 1993-5; koppelverplaatsing β_B bij U-profielen, 1.0 bij Z-profielen). Omdat de drukflens van de gording tegen de wand steunt, is kiptorsie niet maatgevend.





Opgave

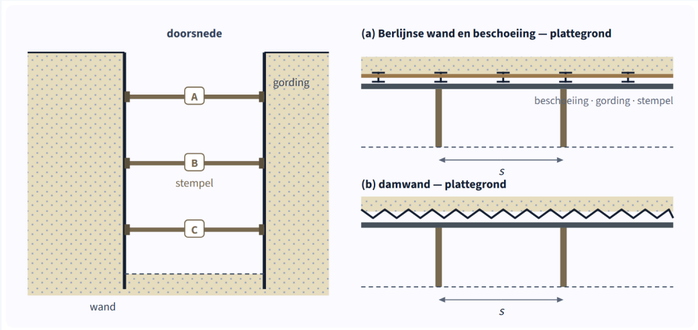
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving en belastingen	**De ontgraving uit voorbeeld 1 en de belastingen uit voorbeeld 3: $P_{max} = 271.26$ kN (stempel B)**
Elementen	**S275 ($f_y = 275$ MPa), $\gamma_F = 1.35$, $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.00$: damwand $W_{el} = 600$ cm³/m; gording $W_{el,y} = 1\,000$ cm³; stempel $A = 65.7$ cm², $I = 3\,598$ cm⁴, curve c, $L_{cr} = 6.00$ m**

GEVRAAGD

η voor de damwand, de zwaarst belaste gording en de zwaarst belaste stempel (≤ 1).



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Damwand en gording (buiging): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(27.03)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.49}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(101.72)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{137.33}{275.0} = \mathbf{0.499}$$

Damwand η = **0.221**, gording η = **0.499**: beide zijn voldoende ($\eta \leq 1$).

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Stempel (knik): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(271.26) = 366.20$ kN

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(210\,000\,000)(3\,598 \cdot 10^{-8})}{6.00^2} = 2{,}071.5\ \text{kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,806.8}{2{,}071.5}} = 0.9339$$

$$\Phi = 0.5\left[1 + 0.49(0.9339 - 0.2) + 0.9339^2\right] = 1.1159$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.5791 \quad N_{b,Rd} = \chi A f_y = 1{,}046.4\ \text{kN}$$

$\eta_{stempel}$ = 366.2 / 1,046.4 = **0.350**. Alle drie de elementen voldoen ($\eta \le 1$); bij de stempel is **knik** maatgevend ($N_{c,Rd}$ = 1,806.8 kN, $N_{b,Rd}$ = 1,046.4 kN).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

LRFD of ASD; klassen, buiging, afschuiving, kolomkromme

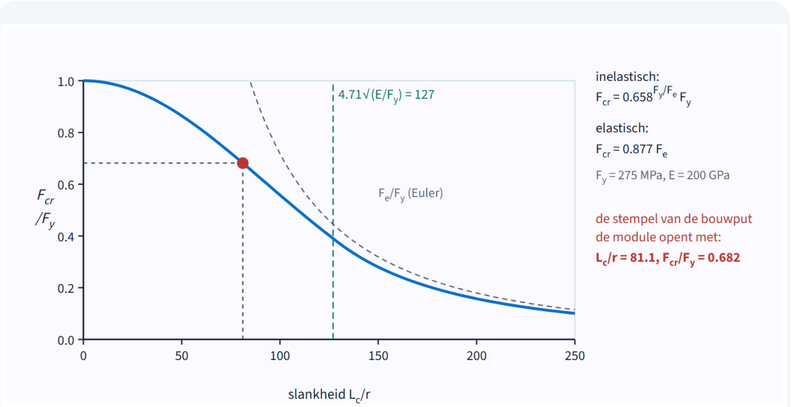
THEORIE

Elk element wordt getoetst met de **nominale sterkte R_n** volgens de voorschriften voor druk, buiging en afschuiving. Bij LRFD wordt de belasting gefactoriseerd en de sterkte met φ gereduceerd; bij ASD wordt de werkbelasting vergeleken met de sterkte gedeeld door de veiligheidsfactor Ω:

$$R_u \le \phi R_n \ (\text{LRFD}) \qquad R_a \le \frac{R_n}{\Omega} \ (\text{ASD}) \qquad P_u = \gamma_H P,\ M_u = \gamma_H M,\ \gamma_H = 1.6$$

De belastingen die uit de omhullende volgen zijn de **horizontale gronddruk H** van ASCE 7-22: in LRFD-combinaties wordt deze met 1.6 ingevoerd overal waar zij bij de belasting wordt opgeteld (bij het stempelen van een bouwput altijd), en met 1.0 in ASD. De damwand en de gording die met de module worden verkregen, worden genomen met de sterkte die de module aanhoudt: F_yZ bij compact, F_yS bij eerste vloeien. Omdat de gording zijdelings door de wand wordt gesteund, geldt $L_b = 0$ en is zijdelingse torsieknik geen grenstoestand.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} \quad F_{cr} = 0.658^{F_y/F_e} F_y \ \left(\tfrac{L_c}{r} \le 4.71\sqrt{E/F_y}\right) \ \text{anders } 0.877F_e \quad P_n = F_{cr} A_g$$



Eén kolomkromme volstaat voor elke doorsnede (geen kromme die moet worden gekozen zoals in EN 1993-1-1); r is de kleine traagheidsstraal, $L_c = K\,L_b$ de effectieve lengte; $L_c/r \le 200$ wordt aanbevolen. AISC verlaagt, anders dan EN 1993-1-1, de buigsterkte niet als gevolg van de dwarskracht.

Opgave

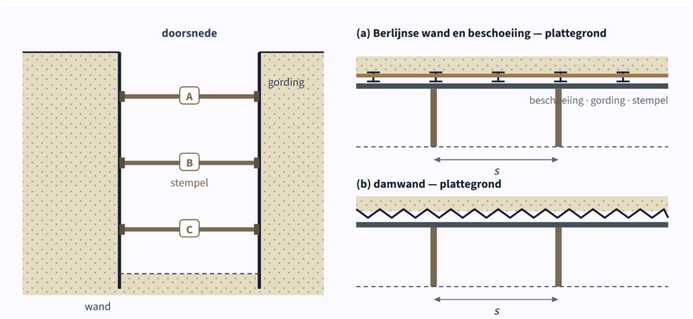
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving en belastingen	**De ontgraving uit voorbeeld 1 en de belastingen uit voorbeeld 3: $P_{max} = 271.26$ kN (stempel B)**
Elementen	**Elementen uit Voorbeeld 5 (S275, $F_y = 275$ MPa); $E = 200$ GPa; LRFD $\gamma_H = 1.6$, $\phi_c = \phi_b = 0.90$; ASD $\Omega_c = 1.67$, $\Omega_b = 1.67$ ($M_n = F_y S$)**

GEVRAAGD

Voor de zwaarst belaste stempel: **L_c/r, F_e, F_{cr}, P_n**; LRFD- en ASD-ratio's; LRFD-ratio voor de damwand en de gording.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Ondersteuning: kolomkromme (A_g = 65.7 cm², r = 7.40 cm, L_c = 6.00 m)

$$\frac{L_c}{r} = \frac{600}{7.40} = 81.1 \;\leq 4.71\sqrt{E/F_y} = 127$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} = \frac{\pi^2(200\,000)}{(81.1)^2} = 300.3\ \text{MPa}$$

$$F_{cr} = 0.658^{275/300.3}(275) = 187.4\ \text{MPa}$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 187.4 \times 6\,570\ \text{mm}^2 = \mathbf{1{,}231.5}\ \text{kN}$$

Bij de stempel **nominale sterkte P_n = 1,231.5 kN**; slankheid L_c/r = 81.1, in het gebied van inelastisch knikken (grens 127).

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 LRFD- en ASD-verhoudingen (P = 271.26 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(271.26) = 434.0\ \text{kN} \ \leq\ \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.392}$$

$$\text{ASD: } P_a = 271.26\ \text{kN} \ \leq\ \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.368}$$

Stempel: LRFD η = **0.392**, ASD η = **0.368**. Damwand (LRFD) 0.291, gording 0.658; in EN 1993-1-1 waren dat 0.221, 0.499 en 0.350.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Terzaghi-kolom, correctie van Chang

THEORIE

Een gestempelde bouwput kan ook bezwijken zonder dat de stempels bezwijken: het gewicht van de grond naast de ontgraving en van de bovenbelasting perst de klei onder de bodem naar binnen en omhoog. De grondkolom met breedte B′ draagt op het niveau van de bodem op de klei met een draagvermogen cN_c (N_c = 5.7); de schuifweerstand cH op de zijvlakken verlicht dit:

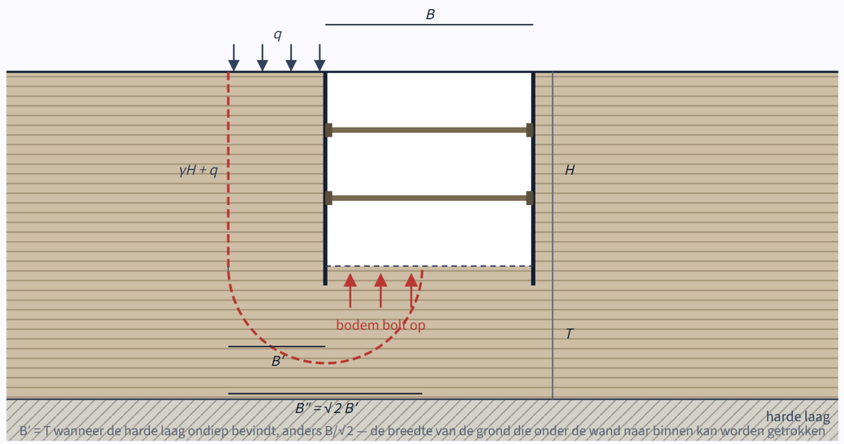
$$FS = \frac{cN_c}{\gamma H + q - cH/B'}$$

De vergelijking is **op drie punten gecorrigeerd**: de zijschuifbelasting vermindert niets, zij **voegt weerstand toe**; de strook van breedte B″ in de funderingszool gedraagt zich als een opwaarts belaste fundering; omdat de ontgravingsbodem onbegrensd is, geldt N_c = 5.14 (gladde fundering):

$$FS = \frac{5.14\,c\left(1 + 0.2\dfrac{B''}{L}\right) + \dfrac{cH}{B'}}{\gamma H + q} \qquad B' = \min\left(T, \frac{B}{\sqrt{2}}\right),\ B'' = \sqrt{2}\,B'$$

B is de ontgravingsbreedte, L de lengte in bovenaanzicht, T de kleidikte onder de bodem; q is de bovenbelasting naast de ontgraving. Bij volledig bezweken ontgravingen wordt FS ≈ 1, bij gedeeltelijk of nauwelijks bezweken ontgravingen iets hoger; de vereiste FS ≈ **1.5**.

In homogene klei worden de damwanden dieper ingeheid als FS < 1.5 (doorgaans niet meer dan B/2 onder de basis); de ingeheide lengte draagt een kracht die uit gepubliceerde ontwerpgrafieken wordt afgelezen.



Opgave

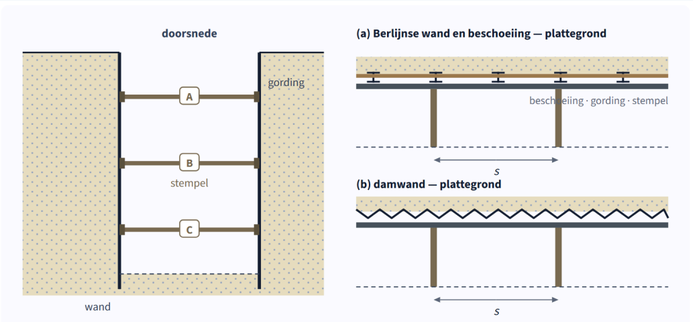
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving in open put	$H = 7$ m, $B = 6$ m, $L = 20$ m; klei $\gamma = 18$, $c = 35$ kPa, kleidikte onder het funderingsvlak $T = 4$ m; geen bovenbelasting
Ontgraving volgens boek	4 m breed, 15 m lang, 6 m diep; $\gamma = 17$, $c = 40$ kPa; stijve laag 2 m onder de basis

GEVRAAGD

Voor beide ontgravingen: **B′**, **B″** en **FS** (≥ 1.5?); bij de open ontgraving, als er geen harde laag is en de breedte 10 m is?



Oplossing

OPLOSSING

1 Ontgraving onder een hoek: B/√2 = 4.24 m > T = 4 m, daarom B′ = T

$$B' = T = 4.00\ \text{m} \qquad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{35(7)}{4.00}}{18(7)} = \frac{190.1 + 61.2}{126} = \mathbf{1.99} \ \geq 1.5\ \checkmark$$

2 Keldersleuf (T = 2 m ≤ B/√2 = 2.83 m: B′ = T = 2.00 m, B″ = 2.83 m)

$$FS = \frac{5.14(40)\left(1 + 0.2\frac{2.83}{15}\right) + \frac{40(6)}{2.00}}{17(6)} = \mathbf{3.27}$$

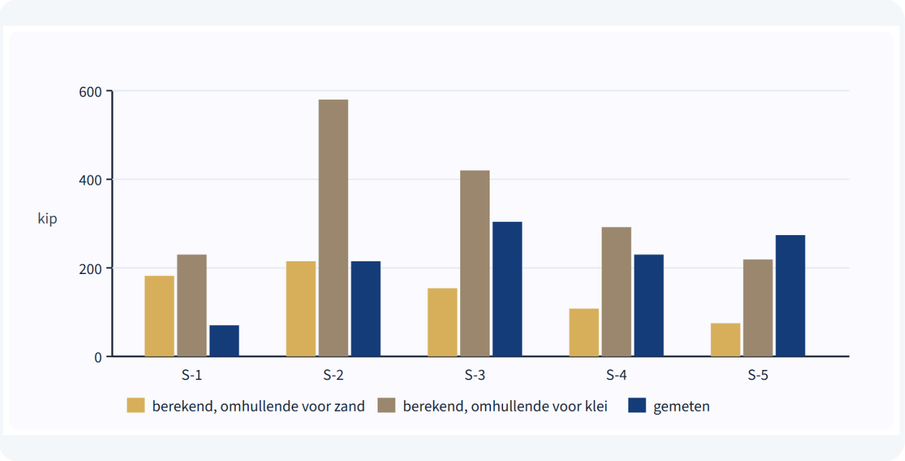
De open ontgraving geeft **FS = 1.99**, de ontgraving volgens het boek **3.27**: beide ≥ 1.5. Wordt de stijve laag niet aangeboord (B′ = B/√2), dan daalt FS bij de ontgraving volgens het boek tot 2.96; de open ontgraving daalt bij een breedte van 10 m en zonder stijve laag tot 1.80 (zij neemt af in de conservatieve richting): bodemopbolling verslechtert met de breedte en met het ontbreken van de stijve laag.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Praktijkgevallen Boston en Chicago

THEORIE

Boston (testdoorsnede B): 17.7 m diep, vijf stempels; het profiel werd begrensd door twee omhullenden voor zand en klei (zandomhullende 53.5 kPa, omhullende voor zachte tot matige klei 146.1 kPa); de gemeten krachten bleken sterk te verschillen van beide schattingen (de grondparameters zijn onzeker), en de stempels waren ontworpen voor krachten ver boven de gemeten waarden. **Chicago, National Plaza**: 21.3 m diep, zes stempels; het profiel werd omgezet naar een equivalente klei (c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, γH/c = 12.08 > 4, σ_a = 282.0 kPa). De omhullende volgens Peck gaf een druk van ongeveer **1.8 maal** de waargenomen waarde: een omhullende die rond vele ontgravingen wordt getrokken, is conservatief voor één enkele ontgraving; bij dezelfde grond kan veldervaring overdimensionering aanzienlijk beperken.



Wat de methode aanneemt

THEORIE

De omhullenden zijn verzameld uit ontgravingen dieper dan ongeveer 6 m; **de omhullende is op geen enkel moment de werkelijke druk op de wand**: ze geeft een veilige stempelkracht, geen wandverplaatsing. De klei is **ongedraineerd**; poriënwaterspanning wordt niet afzonderlijk in rekening gebracht.

Meerdere kleilagen worden naar dikte gemiddeld (c_{av}, γ_{av}); $\gamma H/c$ wordt met deze gemiddelden gekozen. De bovenbelasting wordt naast de omhullende opgeteld ($\Delta p = q$); water verandert alleen het volumiek gewicht.

Een **damwand** wordt beschouwd als een keten van afzonderlijke scharnieren; de eigen stijfheid en de inklemming onder de basis worden niet gebruikt. De **gordingen** zijn enkelvoudige overspanningen tussen de stempels (opsluitingen). Staal wordt getoetst volgens EN 1993-1-1 (klasse 4 wordt niet ontworpen) of volgens AISC 360-22.

Bodemopbolling wordt getoetst met de gecorrigeerde vergelijking van Chang; de insteek van de damwand onder de bodem wordt niet meegerekend (conservatief). Bij meerdere lagen wordt de formule gebruikt met de gelaagde uitbreiding van GeoTerva.

Tijdens de uitvoering worden horizontale verplaatsing en grondverlies rond de ontgraving verwacht; als er een stijve laag aanwezig is, worden de damwanden daarin ingeklemd. In zachte klei kunnen bij $\gamma H/c \approx 8$ grote verplaatsingen en bezwijken van de stempels optreden.

Samenvatting

Belangrijkste punten

Omhullende: $\gamma H/c > 4$ zacht–halfvast ($\sigma_a = \max(\gamma H[1 - 4c/\gamma H], 0.3\gamma H)$); ≤ 4 vast ($\approx 0.3\gamma H$). Voorbeeld: $\gamma H/c = 3.6$, $\sigma_a = 37.8$ kPa

Bovenbelasting en water: $\Delta p = q$ wordt afzonderlijk toegevoegd; water verandert alleen $\bar{\gamma}$. **Trekscheur** $z_c = 2c/\gamma = 3.89$ m; de eerste ondersteuning (1.0 m) ligt erboven

Stempelkracht: de omhullende wordt bij de scharnieren in delen gesplitst, de reacties worden met de statica gevonden; in het voorbeeld P_B = 271.26 kN (som van de twee reacties)

Dimensionering: damwand $M_{max} = 27.03$ kN·m/m ($S = 159$ cm³/m), gording $M = R\,s^2/8 = 101.72$ kN·m ($S = 598$ cm³; $\sigma_{toelaatbaar} = 170$ MPa)

Staal: EN 1993-1-1 $\eta = 0.221 / 0.499 / 0.350$ (damwand / gording / stempel); AISC LRFD stempel 0.392, ASD 0.368

Bodemopbolling: $FS = (5.14c(1 + 0.2B''/L) + cH/B')/(\gamma H + q) \geq 1.5$; 2.00 bij de open ontgraving, 3.27 bij de ontgraving uit het boek

Literatuur

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8e druk. Cengage Learning — Hoofdstuk 15, “Braced Cuts”; deze pagina volgt deze tekst.

Peck, R.B. (1943). Earth pressure measurements in open cuts, Chicago (Ill.) subway. Transactions, ASCE, 108, 1008–1058.

Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Volume, 225–290.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

Lambe, T.W. (1970). Braced excavations. Proceedings, Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining Structures, ASCE, 149–218.

Swatek, E.P., Asrow, S.P. and Seitz, A. (1972). Performance of bracing for deep Chicago excavation. Proceedings, Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 2, 1303–1322.

Bjerrum, L. and Eide, O. (1956). Stability of strutted excavations in clay. Géotechnique, 6(1), 32–47.

Chang, M.F. (2000). Basal stability analysis of braced cuts in clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126(3), 276–279.

U.S. Department of the Navy (1971). Design Manual — Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, NAVFAC DM-7, Washington, D.C.

Moormann, C. (2004). Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. Soils and Foundations, 44(1), 87–98.

EN 1990:2002, Eurocode — Basis of structural design. CEN.

EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN.

EN 1993-5:2007, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 5: Piling. CEN.

ANSI/AISC 360-22, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2022.

ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, 2022.

OPMERKING

Alle numerieke voorbeelden zijn met de eigen berekeningsmotor van de module gegenereerd; de module geeft dezelfde waarden. Het rekenvoorbeeld op de modulepagina is ook deze ontgraving (H = 7 m, γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, stempels op 1 · 3.5 · 6 m).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Voer het kleiprofiel, de stempelniveaus, de bovenbelasting, het water en de elementen van uw eigen ontgraving in GeoTerva in; de module geeft tegelijk de omhullende, de trekscheur, de stempelkrachten, de momenten in damwand en gording, de staaltoets en de bodemopbolling.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

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