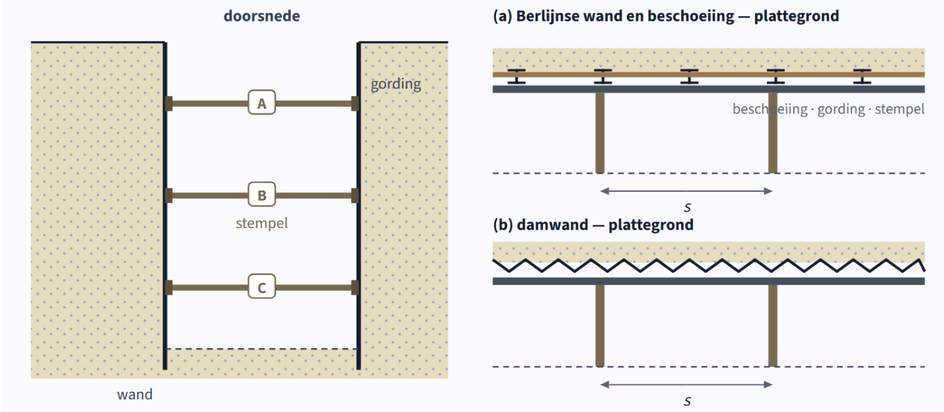
Geotechnisch college · Damwanden en gestempelde bouwputten

Gestempelde bouwput in zand

College: gestempelde bouwput in zand; het schijnbaar gronddrukdiagram volgens Peck, stempelkrachten, dimensionering van damwand en gording, staaltoets en bodemopbolling; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.



- Ontgravingsondersteuning
- Omhullende volgens Peck (zand)
- Stempel · gording · damwand
- EN 1993 · AISC 360
- Piping aan de bodem

Wat leren we in dit college?

- Waarom de druk in een gestempelde bouwput **niet volgens Rankine** verloopt en hoe de **omhullenden** uit gemeten stempelkrachten worden opgebouwd
- Voor zand de **omhullende volgens Peck $\sigma_a = 0.65\ \gamma\ H\ K_a$** en drie regels voor K_a bij meerdere zandlagen
- Het toevoegen van **water** en **bovenbelasting** als afzonderlijke diagrammen naast de omhullende
- Van de omhullende naar **stempelkrachten** (scharnierende delen, reacties A, B_1, B_2, C, $P = R \cdot s$)
- Het dimensioneren van de **damwand** (M_{max}, S) en de **gording** ($M = R\ s^2/8$); het toetsen van het staal volgens **EN 1993-1-1 en AISC 360-22**
- Toets op **piping** aan de onderkant van het zandpakket (uittredende gradiënt, $FS = i_{cr}/i_{uit}$)

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

Voorbeeldontgraving: zand (γ = 17.6 kN/m³, φ' = 32°), diepte H = 8.00 m, breedte B = 6.00 m; stempels op diepten 1.80 · 4.60 · 7.30 m, horizontale onderlinge afstand s = 3.00 m. De krachten gelden per meter wand (stempelkrachten vermenigvuldigd met s).

Stempelsysteem en zijn elementen

THEORIE

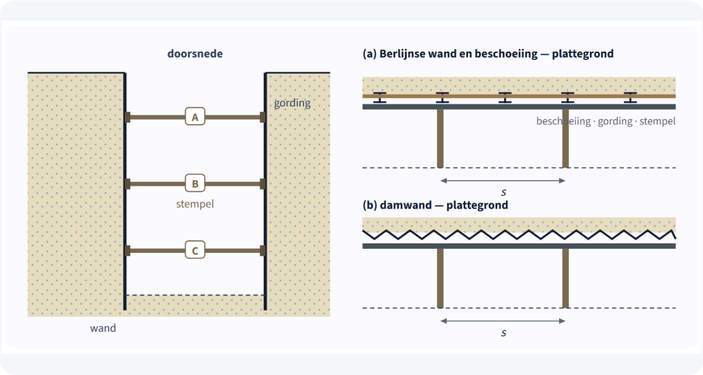
Diepe ontgravingen met een verticaal front (kelders in stedelijk gebied, cut-and-covertunnels) worden opengehouden met een tijdelijk **ondersteuningssysteem**. Twee opstellingen zijn gangbaar: vooraf ingeheide **verticale palen** (staal of hout) waartussen naarmate de ontgraving vordert horizontale houten 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

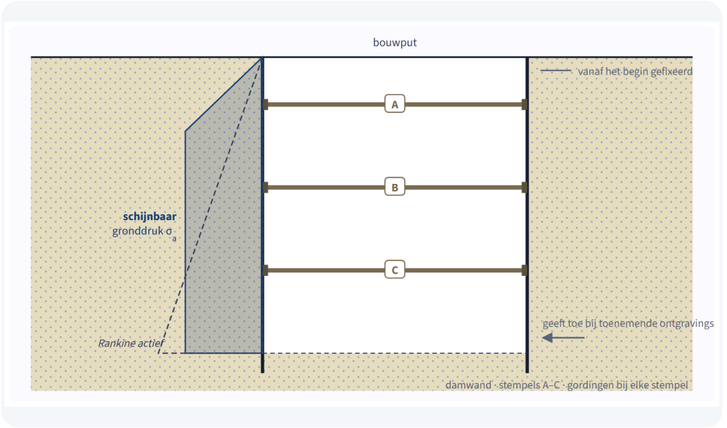
Een hoekkeermuur draait om zijn voet, en de actieve druk volgens Rankine (nul aan de bovenkant, het grootst aan de onderkant) beschrijft dat goed. **Een gestempelde wand beweegt in tegengestelde zin**: de eerste stempel wordt geplaatst terwijl de ontgraving ondiep is, zodat het bovenste deel nauwelijks 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

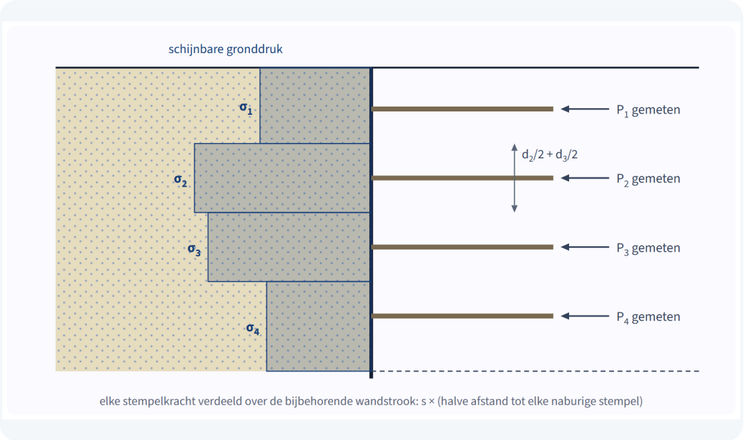
De druk varieert van punt tot punt en elke stempel moet worden gedimensioneerd op de **grootste belasting** die hij kan ondervinden. Daarvoor worden omhullenden opgesteld: in een geïnstrumenteerde ontgraving wordt de belasting op elke stempel gemeten, gedeeld door de damwandstrook die de stempel ondersteunt (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.



$\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$, over de volledige hoogte

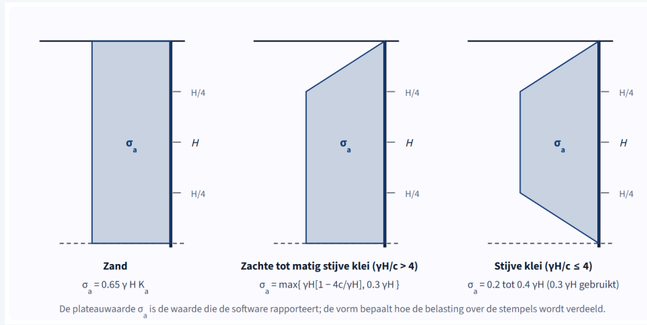
THEORIE

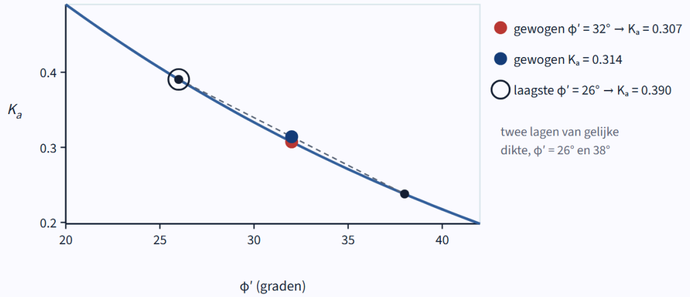
In zand is de omhullende volgens Peck een **rechthoek**: één druk over de volledige ontgravingshoogte, 65% van de grootste ordinaat van de actieve driehoek van Rankine:

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a \qquad K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

De omhullenden gelden onder de volgende voorwaarden: ontgravingsdiepte groter dan ongeveer 6 m; **grondwater onder het ontgravingsniveau**; gedraineerd zand (poriënwaterspanning nul).

De omhullende vereist één enkele K_a; voor **meerdere zandlagen** geeft de bron geen regel. Er worden drie regels gebruikt en ze komen niet overeen, omdat K_a een convexe functie van φ' is (het gemiddelde binnen de kromme ligt onder de kromme): $K_a(\bar{\varphi} = \Sigma\varphi H/H)$, het gemiddelde $K_a = \Sigma K_{a,i} H/H$ en $K_a(\varphi'_{min})$.





Opgave

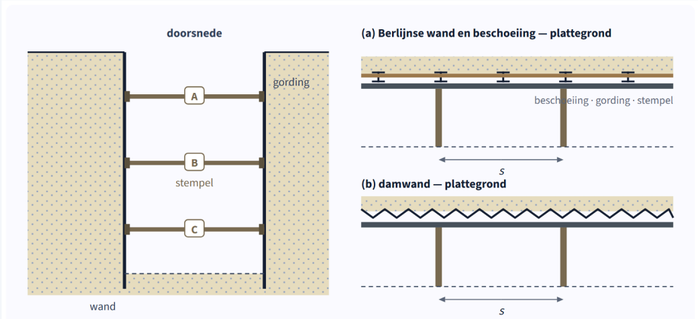
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	$H = 8.00$ **m, één zandlaag** $\gamma = 17.6$ **kN/m³,** $\varphi' = 32^\circ$
Profiel met drie lagen	**0–3 m:** $\gamma = 17$, $\varphi' = 28^\circ$**; 3–6 m:** 18, 38°**; onder 6 m:** 18.5, 33° **(dezelfde ontgraving)**

GEVRAAGD

(a) **K_a** en **σ_a**; (b) de K_a- en σ_a-waarden van de drie regels voor het profiel met drie lagen.



Oplossing

OPLOSSING

1 (a) Enkel zand

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0.3073}$$

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a = 0.65(17.6)(8.00)(0.3073) = \mathbf{28.12}\ \text{kPa}$$

2 (b) Drie lagen: gewogen gemiddelde $\bar{\gamma} = 17.75$ kN/m³ naar de ontgravingshoogte (laagdikten 3 + 3 + 2 m)

Regel	K_a	$\sigma_a = 0.65\,\bar{\gamma} H K_a$ (kPa)	P_{max} (kN)
$K_a(\bar{\varphi} = 33.0°)$	0.2948	27.21	308.5
gemiddelde $K_a = \Sigma K_{a,i} H_i / H$	0.2983	27.53	312.1
$K_a(\varphi'_{min} = 28°)$	0.3610	33.32	377.7

In één zand is de omhullende **28.12 kPa**. De K_a-waarden van de drie regels variëren tussen 0.295 – 0.361: de berekening met de laagste φ′ (σ_a = 33.3 kPa) geeft een waarde die 22% groter is dan de gemiddelden; de regels die het gemiddelde nemen blijven binnen de kromme, en **de conservatieve is φ'_{min}**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

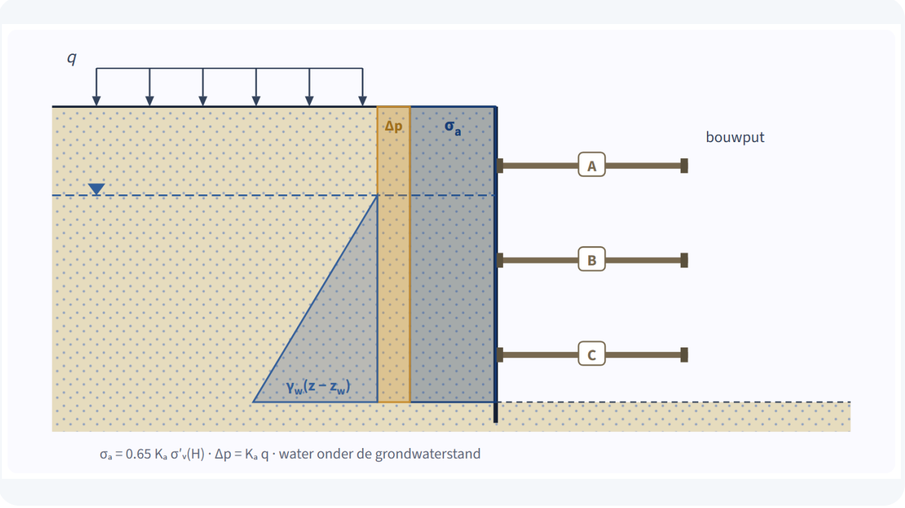
Naast de omhullende toegevoegd, niet erin

THEORIE

De omhullenden zijn opgesteld uit ontgravingen zonder belasting onder de bodem en naast de bouwput. De module voegt beide naast de omhullende toe als **afzonderlijke diagrammen**; de omhullende wordt niet geschaald buiten het bereik waarin zij is gemeten.

Water: de zandomhullende van Peck is een effectief-spanningsdiagram. Bevindt het water zich in de ontgraving, dan wordt de deklaagspanning op het niveau van de putbodem effectief genomen (natuurlijk volumiek gewicht boven water, effectief volumiek gewicht onder water); het water drukt bovendien over de volledige hoogte op de wand en de stempels dragen beide samen.

Bovenbelasting q wordt niet in de omhullende opgenomen (de empirische 0.65 zou er ook op worden toegepast); zij wordt over de volledige hoogte als eigen gelijkmatige druk gedragen.



$$\sigma'_v(H) = \sum \gamma_i h_i + \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \sigma_a = 0.65 K_a \sigma'_v(H) \qquad u(z) = \gamma_w (z - z_w)$$

$$\Delta p_q = K_a q \qquad R = \sigma_a H + \Delta p_q H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2$$

Opgave

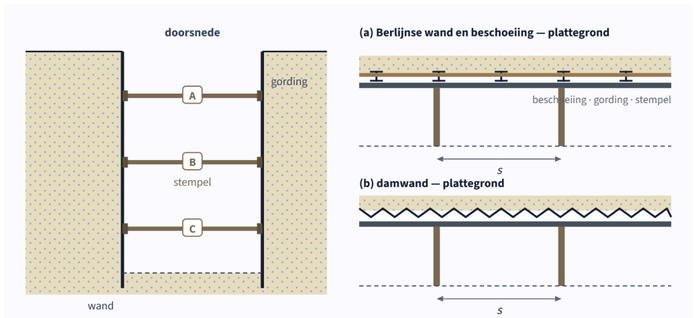
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	**De ontgraving uit voorbeeld 1(a) ($H = 8$ m, $\gamma = 17.6$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m³, $\varphi' = 32°$)**
Gevallen	**(a) geen water, geen bovenbelasting; (b) grondwater op $z_w = 3$ m; (c) gelijkmatig verdeelde bovenbelasting $q = 10$ kPa**

GEVRAAGD

In elk geval σ_a, de bovenbelasting en de waterdruk; de **totale belasting R** en de grootste stempelkracht.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 (b) Water: effectieve deklaagspanning en omhullende; water drukt bovendien over de volledige hoogte

$$\sigma'_v(H) = 17.6(3) + (20 - 9.81)(5) = 103.75\ \text{kPa}$$

$$\sigma_a = 0.65(0.3073)(103.75) = 20.72\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2 = 20.72(8) + \tfrac{1}{2}(9.81)(5)^2 = \mathbf{288.41}\ \text{kN/m}$$

Onder water neemt de effectieve deklaag af (σ_a 28.12 → 20.72 kPa), maar het water drukt over de volle hoogte op de damwand: R = **288.4 kN/m**.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 (c) Bovenbelasting: afzonderlijke gelijkmatig verdeelde druk; samenvatting van (a), (b), (c)

$$\Delta p_q = K_a q = 0.3073(10) = 3.073\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \Delta p_q H = 28.12(8) + 3.073(8) = 249.52\ \text{kN/m}$$

Toestand	σ_a (kPa)	Ek (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)	M_{max} damwand (kN·m/m)
(a) Geen water, q = 0	28.12	—	224.96	318.8	45.55
(b) water z_w = 3 m	20.72	u(H) = 49.05	288.38	376.7	37.09
(c) q = 10 kPa	28.12	Δp_q = 3.07	249.52	353.5	50.53

De wateromhullende **verkleint** deze maar voegt waterdruk toe: R 225.0 → **288.4 kN/m**. Bovenbelasting beïnvloedt de omhullende niet; deze voegt Δp_q = 3.07 kPa toe (R = 249.5 kN/m).

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:

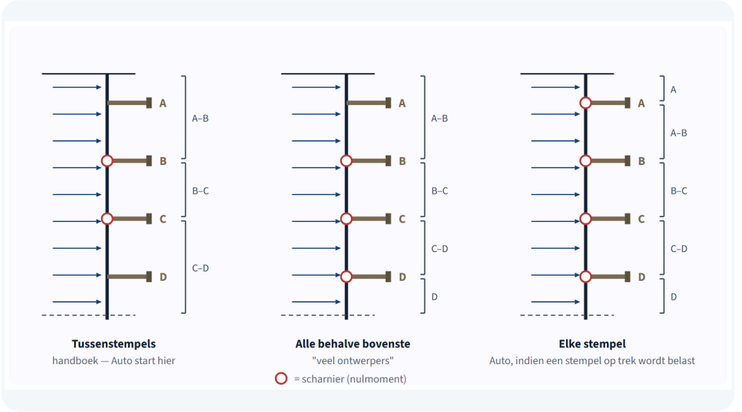
Teken de drukomhullende en de stempelniveaus. Beschouw de damwand **scharnierend in elk stempelniveau**, behalve het bovenste en het onderste (veel ontwerpers doen dit in alle niveaus behalve het bovenste).

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

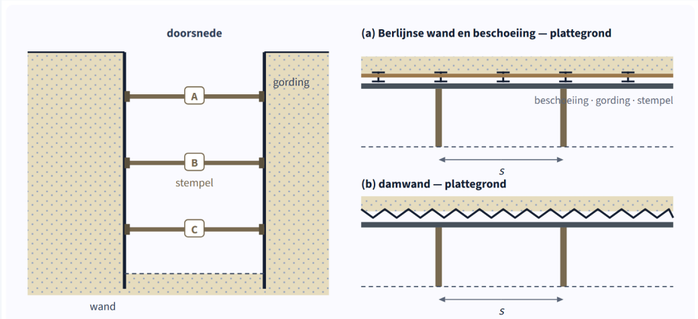
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	$H = 8.00$ m; $B = 6$ m; stempels $z = 1.80, 4.60, 7.30$ m (A, B, C); horizontale afstand $s = 3.00$ m
Druk	Voorbeeld 1(a): continue rechthoekige omhullende $\sigma_a = 28.12$ kPa; 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 – 4.60	129.35	2.300	A (z = 1.80), B (z = 4.60)
2	4.60 – 8.00	95.61	6.300	B (z = 4.60), C (z = 7.30)

2 Eerste deel: momentenevenwicht om de eerste stempel

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{129.35(2.300 - 1.80)}{4.60 - 1.80} = \mathbf{23.10} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{106.25}\ \mathrm{kN/m}$$

Het eerste deel draagt de twee steunpunten met 106.25 en 23.10 kN/m; de reactie van het bovenste steunpunt (A) is groter omdat deze ook de belasting van het uitkragende deel omvat.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Tweede deel

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{95.61(6.300 - 4.60)}{7.30 - 4.60} = \mathbf{60.20} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{35.41}\ \mathrm{kN/m}$$

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	1.80	106.25	106.25	**318.75**
B	4.60	23.10 + 35.41	58.51	**175.53**
C	7.30	60.20	60.20	**180.60**

Grootste stempelkracht **P_A = 318.75 kN** (niveau A): 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

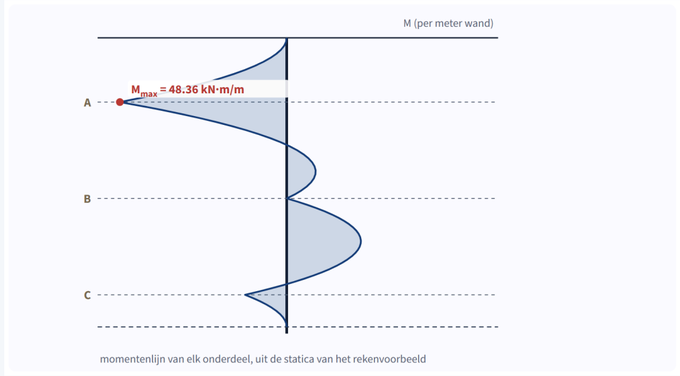
De **damwand** wordt uit dezelfde delen ontworpen: in elk deel wordt het maximale buigende moment bepaald (waar de dwarskracht van teken wisselt: binnen de overspanning of bij de stempel waar de uitkraging op de stempel aansluit); het grootste is het ontwerpmoment per strekkende meter wand. Het vereiste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

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

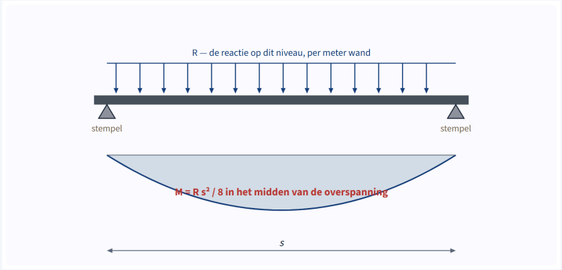
Stempels mogen als continu worden beschouwd indien op de juiste wijze verbonden; conservatief worden zij bij de steunpunten als **scharnierend** aangenomen: eenvoudig opgelegde balk met overspanning s, met de reactie R van het niveau (per eenheid van wandlengte) als verdeelde belasting:

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

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

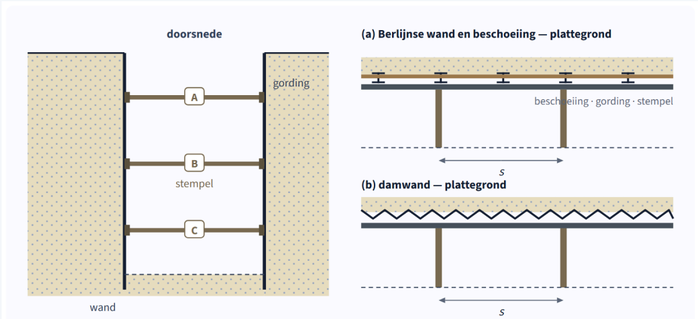
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	**diepte $H = 27$ ft (8.23 m), zand $\gamma = 17.59$ kN/m³, $\varphi' = 32^\circ$; stempels op 6, 15, 24 ft (1.83; 4.57; 7.32 m); horizontale hartafstand 12 ft (3.66 m); scharnier bij B**
Staal	**toelaatbare buigspanning $\sigma_{allow} = 165\,474$ 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 – 4.57	48.36	1.83
2	4.57 – 8.23	21.49	5.79

2 Vereist weerstandsmoment

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{48.36}{165{,}474} = 0.0002923\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{292.3}\ \mathrm{cm^3/m}$$

In de damwand **M_{max} = 48.36 kN·m/m** (segment 1, z = 1.83 m): **S ≥ 292.3 cm³/m**.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Gording: eenvoudige ligger per niveau (s = 3.658 m)

Niveau	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{toel} (cm³)
A	110.18	184.25	1,113
B	57.30	95.82	579
C	70.52	117.93	713

De grootste reactie treedt op **ter hoogte van niveau A** (R = 110.18 kN/m): de gording wordt gedimensioneerd met **M_{max} = 184.25 kN·m**, **S ≥ 1,113 cm³**; de gordingen op de andere niveaus kunnen kleiner zijn.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Rekentechnische effecten, klasse, buiging en knik

THEORIE

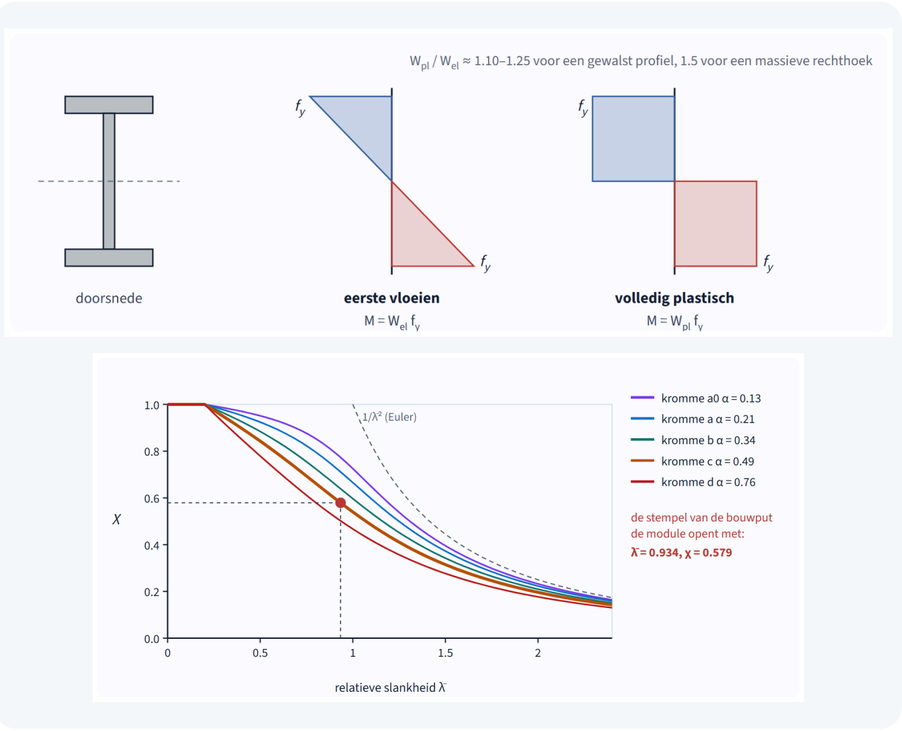
De belastingen uit de omhullende zijn **representatieve waarden** (de omhullende volgens Peck is een bovengrens voor de gemeten belastingen); zij worden één keer omgerekend naar de rekenwaarde: $E_d = \gamma_F E_k$. Elk element wordt getoetst met de vloeigrens van zijn eigen staalsoort (f_y); de doorsnede 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

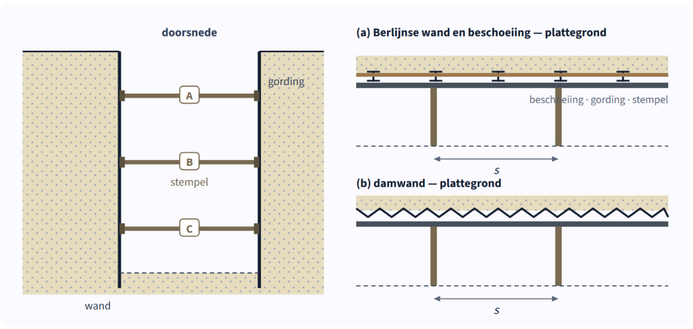
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving en belastingen	**De ontgraving in Voorbeeld 1(a) en de belastingen in Voorbeeld 3: $P_{max} = 318.75$ kN (stempel A)**
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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(45.55)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{61.50}{165.0} = \mathbf{0.373}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(119.53)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{161.37}{275.0} = \mathbf{0.587}$$

Damwand η = **0.373**, gording η = **0.587**: beide zijn voldoende ($\eta \leq 1$).

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Stempel (knik): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(318.75) = 430.31$ kN

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

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

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

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

$\eta_{stempel}$ = 430.3 / 1,046.4 = **0.411**. 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

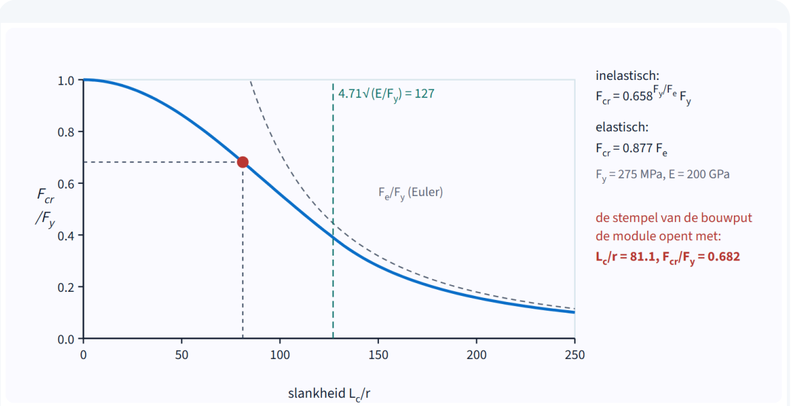
THEORIE

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

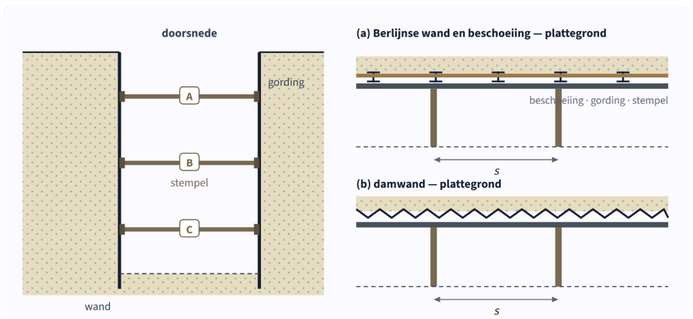
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving en belastingen	**De ontgraving in Voorbeeld 1(a) en de belastingen in Voorbeeld 3: $P_{max} = 318.75$ kN (stempel A)**
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 = 318.75 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(318.75) = 510.0\ \text{kN} \ \leq\ \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.460}$$

$$\text{ASD: } P_a = 318.75\ \text{kN} \ \leq\ \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.432}$$

Stempel: LRFD η = **0.460**, ASD η = **0.432**. Damwand (LRFD) 0.491, gording 0.773; in EN 1993-1-1 waren dat 0.373, 0.587 en 0.411.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Uittredingsgradiënt en kritieke gradiënt

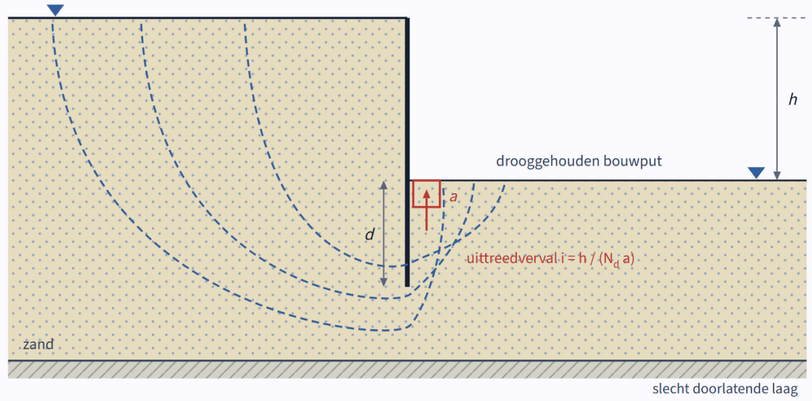
THEORIE

Een zandbasis is over het algemeen stabiel, en blijft dat zolang het water in de ontgraving niet lager staat dan het grondwater buiten. Wanneer de ontgraving wordt drooggelegd, stroomt het water onder de damwand door en via de basis naar boven; de hoge opwaartse gradiënt bij het uittreepunt kan de korrels losmaken: **de basis kookt (piping)**. De grootste uittreegradiënt naast de damwand wordt uit het stromingsnet afgelezen:

$$i_{exit(max)} = \frac{h/N_d}{a} = \frac{h}{N_d\, a} \qquad FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} \qquad i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

h is het verval in het stromingsnet, N_d het aantal potentialstappen en a de lengte van het stroomelement waarin het water naast de wand uit de grond treedt. i_{cr} bedraagt in de meeste gronden 0.9–1.1 (gemiddeld 1); de vereiste FS **≈ 1.5**.

De uittreegradiënt voor een gestempelde bouwput in diep zand is theoretisch opgelost: uit twee nomogrammen worden de modulus m (met $2L_2/B$ en $2L_1/B$) en $L_2 i_{uittree}/h$ verkregen; $i = (L_2 i/h)_{nomogram} \cdot h/L_2$. L_1 is de diepte van het uitwendige zand tot het niveau van de basis, en L_2 is de insteekdiepte van de damwand onder de basis.



Opgave

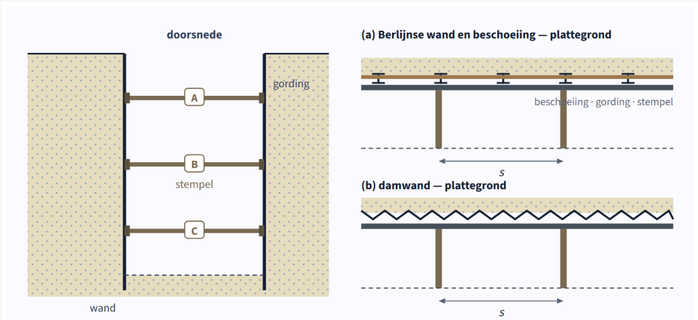
VOORBEELD

Gegeven

Stromingsnet (openingsontgraving)	**verlieshoogte** $h = 3.0$ **m, aantal treden** $N_d = 8$**, uittrede-element** $a = 1.0$ **m;** $i_{cr} = 1.0$**;** $FS_{required} = 1.5$
Nomogramvoorbeeld (handboek)	$h = 4.5$ **m,** $L_1 = 5$ **m,** $L_2 = 4$ **m,** $B = 5$ **m:** $2L_1/B = 2$**,** $B/2L_2 = 0.625$**,** $m \approx 0.033$**,** $L_2 i_{exit}/h = 0.54$

GEVRAAGD

$i_{uittrede}$ en **FS** volgens beide methoden; beoordeling tegen de vereiste 1.5.



Oplossing

OPLOSSING

1 Stromingsnet: $i_{uit} = h/(N_d\, a)$

$$i_{exit(max)} = \frac{h}{N_d a} = \frac{3.0}{8(1.0)} = \mathbf{0.375}$$

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} = \frac{1.0}{0.375} = \mathbf{2.67} \;\geq 1.5\;\checkmark$$

2 Nomogrammethode (diep zand)

$$i_{exit(max)} = \left(\frac{L_2 i_{exit}}{h}\right)_{nomograph} \frac{h}{L_2} = 0.54 \cdot \frac{4.5}{4} = 0.6075$$

$$FS = \frac{1.0}{0.6075} = \mathbf{1.646} \;\geq 1.5\;\checkmark$$

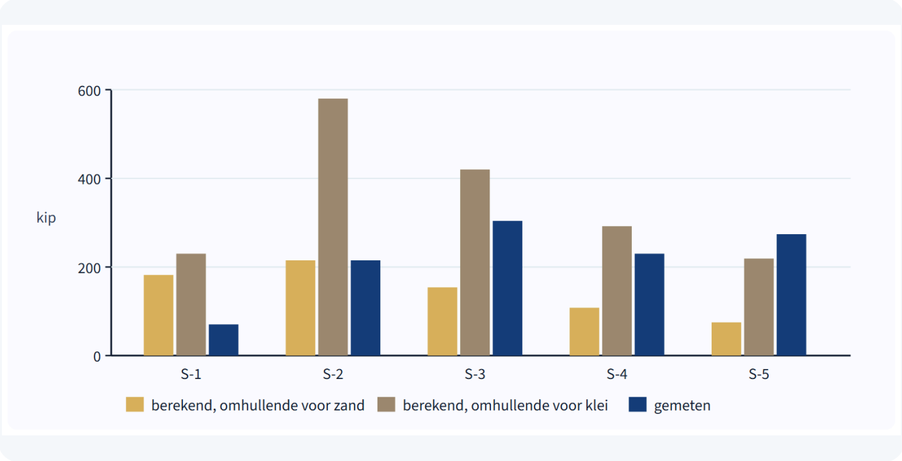
In het stromingsnet is de veiligheidsfactor tegen piping **2.67**, volgens het nomogram **1.65**: beide liggen boven de vereiste 1.5.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Praktijkgevallen Boston en Chicago

THEORIE

Boston (testdoorsnede B): 17.7 m diep, vijf stempels (onderlinge afstand 3.66 m); het profiel werd begrensd door twee omhullenden voor zand en klei: de zandomhullende 53.5 kPa, de omhullende voor zachte tot matige klei 146.1 kPa; de gemeten belastingen bleken sterk af te wijken van beide schattingen (de grondparameters zijn onzeker) en de stempels waren ontworpen voor belastingen ver boven de gemeten waarden. **Chicago, National Plaza**: 21.3 m diep, zes stempels, klei onder 13 ft zandophoging; het profiel werd omgerekend 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 keer** de waargenomen waarde: een omhullende die rond veel ontgravingen wordt getrokken, is aan de veilige kant voor één enkele ontgraving; veldervaring in dezelfde grond kan overdimensionering aanzienlijk beperken.



Wat de methode aanneemt

THEORIE

De omhullenden zijn samengesteld uit ontgravingen dieper dan ongeveer 6 m; ondiepere ontgravingen vallen buiten de gegevens, en de module vermeldt dit. **Een omhullende is niet de werkelijke druk die op enig moment op de wand werkt**: zij geeft een veilige stempellast, geen wandverplaatsing.

Grondwater wordt onder de zool aangenomen; de module houdt de zandenvelop binnen de effectieve deklaag en voegt, als het water hoger staat, de hydrostatische druk daarnaast toe; inzijging in de ontgraving wordt aan de bodem getoetst.

De **damwand** wordt beschouwd als een keten van scharnierend opgelegde liggers op de opgegeven steunniveaus; de eigen stijfheid en de inklemming onder de basis worden niet gebruikt. De **gordingen** zijn enkelvoudige overspanningen tussen de stempels (conservatief voor een doorgaande gording over meerdere stempels).

Staal wordt getoetst volgens EN 1993-1-1; klasse 4-doorsneden worden niet ontworpen, kip van de gordingen wordt niet getoetst. Er is een AISC 360-22 LRFD/ASD-optie.

Een zekere horizontale verplaatsing van de damwand is te verwachten: de grootte hangt af van de tijd tussen het ontgraven van een bouwfase en het aanbrengen van de gordingen en stempels. De verplaatsing veroorzaakt **grondverlies** in de omliggende ondergrond; uit 150 gevallen blijkt de maximale zetting ≈ 1.1% van de ontgravingsdiepte in zachte klei, 0.2% in stijve klei en 0.3% in niet-samenhangende grond.

Samenvatting

Belangrijkste punten

Omhullende: draait om de bovenkant van de gestempelde wand; de druk is niet de Rankine-waarde, maar een empirisch diagram rond de gemeten belastingen. **Rechthoekig in zand**: $\sigma_a = 0.65\ \gamma\ H\ K_a$ (voorbeeld: 28.12 kPa)

Meerdere zandlagen: $K_a(\bar{\varphi})$, de gemiddelde K_a en $K_a(\varphi'_{min})$ komen niet overeen (convex); φ'_{min} is conservatief

Water en bovenbelasting afzonderlijk: water verkleint de effectieve deklaag maar voegt volledige hydrostatische druk toe (R: 225 → 288 kN/m); q voegt $\Delta p = K_a q$ toe

Stempelkracht: de omhullende wordt bij de scharnieren in delen verdeeld, de reacties worden met de statica bepaald, P = (gesommeerde reacties)·s; in het voorbeeld P_A = 318.75 kN

Dimensionering: $S = M_{max}/\sigma_{toelaatbaar}$ (damwand), gording $M = R\ s^2/8$; in de ontgraving uit het boek is de damwand 292 cm³/m, de gording 1 113 cm³

Staal: EN 1993-1-1 η = 0.373 / 0.587 / 0.411 (damwand / gording / stempelknik); AISC LRFD stempel 0.460, ASD 0.432

Piping: $FS = i_{cr}/i_{uit} \geq 1.5$; in het voorbeeld 2.67 (stroomnet) en 1.65 (abak)

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.

Harr, M.E. (1962). Groundwater and Seepage. McGraw-Hill, New York.

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 geproduceerd met de eigen berekeningsmodule van de module; de module geeft dezelfde waarden. Het rekenvoorbeeld op de modulepagina betreft ook deze ontgravingen (ontgraving uit het boek: 27 ft, $\gamma = 112$ pcf, $\varphi' = 32°$; de openingsontgraving van de module: 8 m).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Voer uw eigen ontgravingsprofiel, stempelniveaus, grondwaterstand, bovenbelasting en constructieve elementen in GeoTerva in; de module geeft tegelijk de omhullende, 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