Geotechnisch college · Damwanden en gestempelde bouwputten

Klei op zand: gestempelde bouwput

College: zand en klei in dezelfde ontgraving (equivalente cohesie volgens Peck); omhullende, stempelkrachten, dimensionering van damwand en gording, staaltoets en bodemopbolling; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

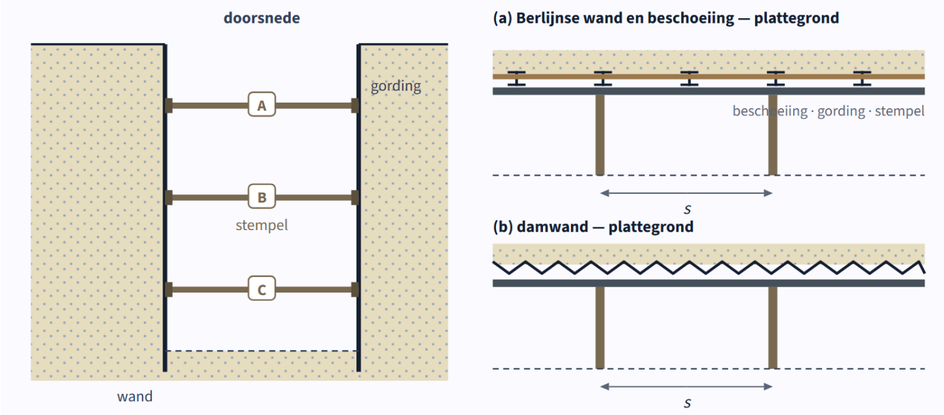
Ontgravingsondersteuning

Equivalente klei (zand + klei)

stempel · gording · damwand

EN 1993 · AISC 360

Bodemopbolling



Wat leren we in dit college?

Waarom de druk in een gestempelde bouwput **niet Rankine is** en hoe de omhullenden worden opgebouwd; kleiomhullenden (met γH/c)

Wanneer de ontgraving door zand en klei gaat, worden Peck's **equivalente cohesie** c_{av} en γ_a gebruikt; de omhullende wordt gekozen op basis van $\gamma_a H/c_{av}$

Hoe de ontgraving van National Plaza (Chicago) eerst **meerdere kleilagen** naar dikte middelt en ze vervolgens met het zand combineert

Het toevoegen van de bovenbelasting naast de omhullende; uit de omhullende de **stempelkrachten**, de dimensionering van de **damwand** en de **gording**

Het staal toetsen volgens **EN 1993-1-1 en AISC 360-22**; de controle op **bodemopbolling** in een gelaagd profiel

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: 3 m zand aan de top (γ = 17 kN/m³, φ′ = 30°) op klei (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa); H = 7.00 m, B = 6.00 m; stempels op diepten 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

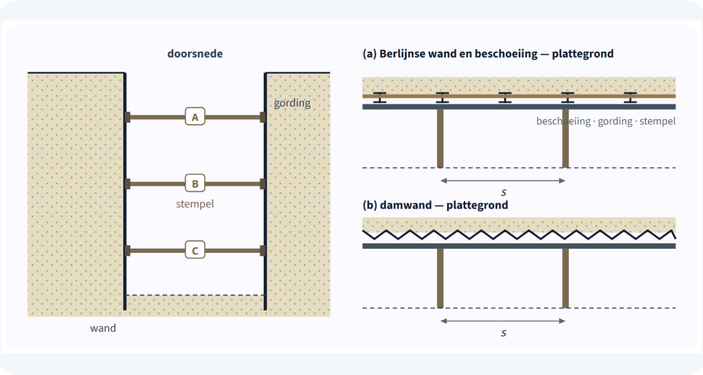
Diepe ontgravingen met een verticaal front (kelders in stedelijk gebied, cut-and-covertunnels) worden opengehouden met een tijdelijk **ondersteuningssysteem**. Twee opstellingen zijn gangbaar: vooraf ingeheide **verticale palen** (staal of hout) waartussen naarmate de ontgraving vordert horizontale houten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

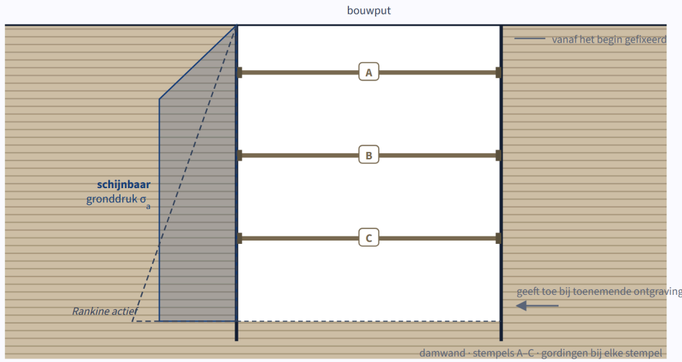
Een hoekkeermuur draait om zijn voet, en de actieve druk volgens Rankine (nul aan de bovenkant, het grootst aan de onderkant) beschrijft dat goed. **Een gestempelde wand beweegt in tegengestelde zin**: de eerste stempel wordt geplaatst terwijl de ontgraving ondiep is, zodat het bovenste deel nauwelijks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

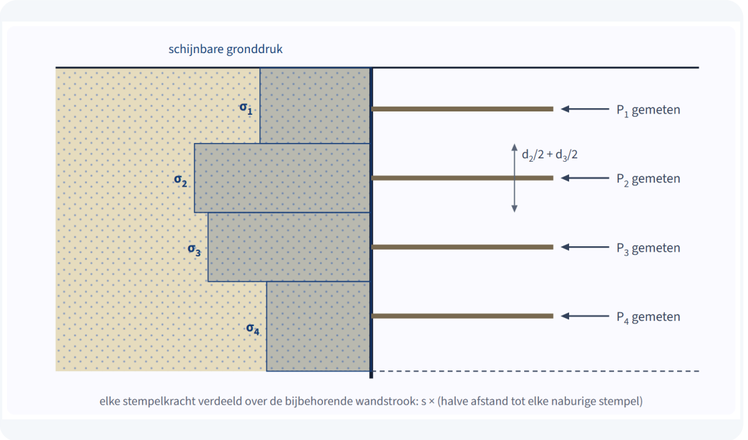
De druk varieert van punt tot punt en elke stempel moet worden gedimensioneerd op de **grootste belasting** die hij kan ondervinden. Daarvoor worden omhullenden opgesteld: in een geïnstrumenteerde ontgraving wordt de belasting op elke stempel gemeten, gedeeld door de damwandstrook die de stempel ondersteunt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



Zacht–matig of stijf: γH/c

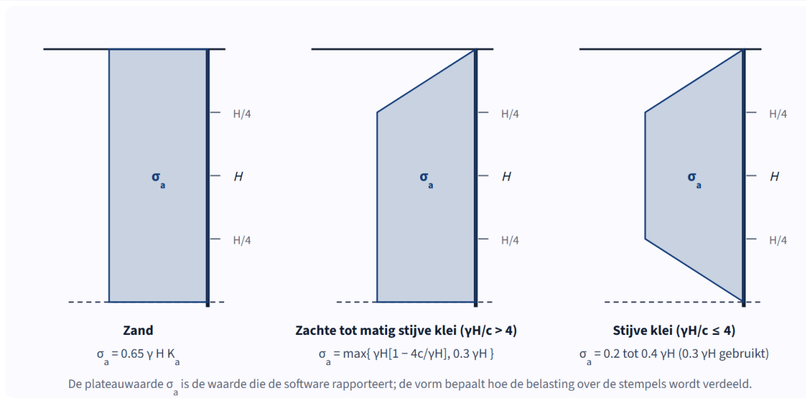
THEORIE

In klei wordt de vorm van de omhullende bepaald door het **stabiliteitsgetal γH/c** (c ongedraineerde cohesie, φ = 0). **Zachte tot matige klei** met γH/c > 4 wordt door de ontgraving ver buiten zijn sterkte belast; **stijve klei** blijft dichter bij zijn elastische bereik:

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

De omhullende voor zachte tot middelharde klei is nul aan het maaiveld, neemt toe in het bovenste kwart en vormt tot de basis een constant plateau; de omhullende voor harde klei neemt toe in het bovenste kwart, is constant in de middelste helft en keert in het onderste kwart terug naar nul. De grootste van de twee uitdrukkingen is maatgevend.

Voorwaarden: ontgravingsdiepte ≳ 6 m; water onder de bodem; klei ongedraineerd (poriënwaterspanning wordt niet in rekening gebracht).



Equivalente cohesie volgens Peck

THEORIE

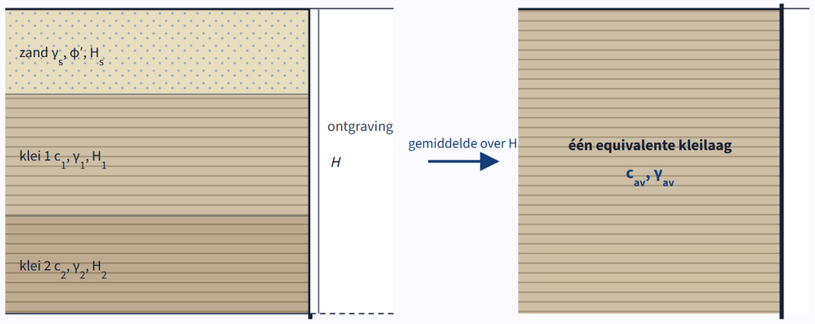
Als de ontgraving zowel zand als klei bevat, vervangt het profiel volgens Peck dit door **één enkele klei**: het middelt de sterkte die de grond over de hoogte kan mobiliseren. Zand draagt de wrijving van zijn eigen gewicht bij, klei zijn onbegrensde druksterkte (gereduceerd voor progressief bezwijken):

$$c_{av} = \frac{1}{2H}\left[\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + (H - H_s)\, n' q_u\right] \qquad \gamma_a = \frac{1}{H}\left[\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c\right]$$

H_s, γ_s, φ'_s: hoogte, volumiek gewicht en effectieve wrijvingshoek van het zand; K_s horizontale gronddrukcoëfficiënt van het zand (≈ 1); $q_u = 2c$ ongedraineerde druksterkte van de klei, γ_c verzadigd volumiek gewicht; n' coëfficiënt voor progressief bezwijken, 0.5–1.0 (gemiddeld 0.75).

Met c_{av} en γ_a worden de klei-omhullenden over de volledige hoogte toegepast; de omhullende wordt gekozen met $\gamma_a H / c_{av}$.

Als er onder het zand meerdere kleilagen aanwezig zijn, middelt de bron deze eerst naar dikte ($c_{av} = \Sigma c_i H_i / \Sigma H_i$, γ_{av}) en combineert vervolgens deze equivalente klei met het zand (zoals in het geval National Plaza).



zand: wrijving door eigen gewicht γ K_s H_s^2 tan φ' · klei: n' q_u H · beide gesommeerd over de hoogte, waarna de kleiregel geldt

Opgave

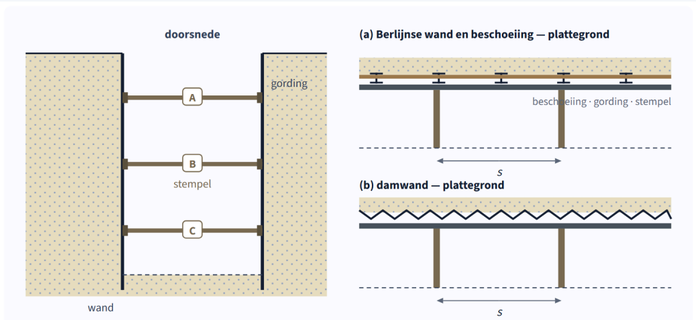
VOORBEELD

Gegeven

Profiel	**bovenaan $H_s = 3$ m zand ($\gamma_s = 17$ kN/m³, $\varphi'_s = 30°$, $K_s = 1$), daaronder klei ($\gamma_c = 18$ kN/m³, $c = 35$ kPa)**
Ontgraving en coëfficiënt	$H = 7.0$ **m;** $n' = 0.75$ **(gemiddeld); ook** $n' = 0.5$ **en** 1.0

GEVRAAGD

c_{av}, γ_a, $\gamma_a H/c_{av}$, het type omhullende en σ_a; resultaten bij variatie van n′.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Equivalente cohesie en volumiek gewicht (n′ = 0.75)

$$c_{av} = \frac{1}{2(7)}\left[17(1)(3)^2\tan 30^\circ + (7-3)(0.75)(2\cdot 35)\right] = \frac{88.33 + 210.0}{14} = \mathbf{21.31}\ \text{kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(3) + (7-3)18}{7} = \mathbf{17.57}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}} \qquad \frac{\gamma_a H}{c_{av}} = \frac{17.57(7)}{21.31} = \mathbf{5.77}\ > 4$$

Equivalente klei: c_{av} = **21.31 kPa**, γ_a = 17.57 kN/m³; $\gamma_a H/c_{av}$ = **5.77** > 4 → omhullende voor zachte tot middelharde klei.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Omhullende voor zachte tot middelharde klei en gevoeligheid voor n′

$$\sigma_a = \gamma_a H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_a H}\right] = 17.57(7) - 4(21.31) = \mathbf{37.75}\ \text{kPa}$$

n′	c_{av} (kPa)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	P_{max} (kN)
0.50	16.31	7.54	57.75	424.5
0.75	21.31	5.77	37.75	277.5
1.00	26.31	4.67	36.90	271.2

Equivalente klei: c_{av} = **21.31 kPa**, $\gamma_a H/c_{av}$ = 5.77 > 4: omhullende voor zachte tot matige klei, **σ_a = 37.75 kPa**. Wordt n′ = 0.5 aangehouden, dan daalt c_{av} tot 16.31 en stijgt σ_a tot 57.8 kPa: de coëfficiënt voor progressief bezwijken beïnvloedt het resultaat sterk.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

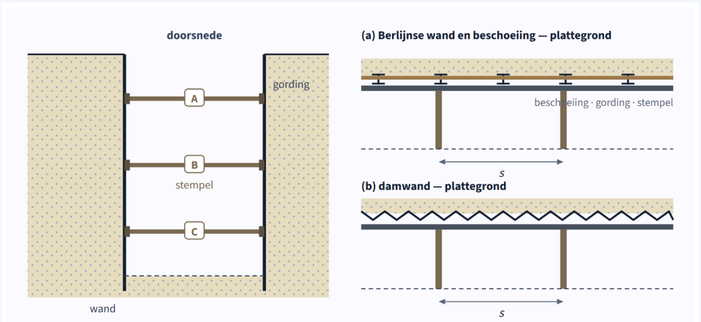
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	$H = 70$ **ft** $= 21.34$ **m diep, zes ondersteuningen eronder; 13 ft zand onder de ophoging, vier kleilagen (tabel hieronder, SI)**
Coëfficiënten	$K_s = 1$, $\varphi'_s = 30°$, $n' = 0.75$

GEVRAAGD

Over de dikte gemiddelde klei $c_{av,klei}$; c_{av}, γ_{av}, $\gamma H/c$ en σ_a.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Profiel (SI) en diktegemiddelde van de klei

Laag	Dikte (m)	γ (kN/m³)	c (kPa)	Bijdrageterm (kN/m)
Zandaanvulling	3.96	17.28	—	156.6
Klei 1	10.06	19.95	19.2	289.0
Klei 2	3.35	20.42	33.5	168.6
Klei 3	1.83	21.21	95.8	262.7
Klei 4	2.13	21.21	191.5	612.9

$$c_{av,clay} = \frac{\Sigma c_i H_i}{\Sigma H_i} = \mathbf{51.16}\ \mathrm{kPa}$$

Het diktegewogen gemiddelde van de vier kleilagen is **51.16 kPa**; de zandterm $\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s$ = 156.6, de kleiterm $n' q_u \Sigma H_i$ = 1,333.2 kN/m.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Equivalente cohesie, volumiek gewicht en omhullende

$$c_{av} = \frac{\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi_s' + n' q_u \Sigma H_i}{2H} = \frac{156.6 + 1{,}333.2}{2(21.34)} = \mathbf{34.91}\ \text{kPa}$$

$$\gamma_{av} = \frac{\Sigma \gamma_i H_i}{H} = \mathbf{19.76}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}} \qquad \frac{\gamma_{av} H}{c_{av}} = \frac{19.76(21.34)}{34.91} = \mathbf{12.08}\ > 4$$

$$\sigma_a = \gamma_{av} H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_{av} H}\right] = \mathbf{282.0}\ \text{kPa}$$

De omhullende voor zachte tot middelharde klei wordt toegepast: **σ_a = 282.0 kPa** (c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, $\gamma_{av}H/c_{av}$ = 12.08). Een vergelijking van deze omhullende met waargenomen stempelkrachten staat in de paragraaf 'Omhullenden in echte ontgravingen' (omhullende volgens Peck ≈ 1.8 keer).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Wordt naast de omhullende toegevoegd

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: de klei-enveloppen zijn ongedraineerde, op totale spanning gebaseerde constructies; in klei zit het water al in het volumiek gewicht en in de ongedraineerde sterkte. Water boven de funderingszool wordt getekend en vermeld, niet als afzonderlijke belasting toegevoegd; het verandert alleen het grondgewicht: het verzadigde volumiek gewicht onder water, en in een laag die door water wordt doorsneden, het met de dikte gewogen gemiddelde van de twee waarden.

Omdat de dikte van de zandlaag de equivalente klei bepaalt, beïnvloedt de **laagopeenvolging** van het profiel het resultaat rechtstreeks: naarmate het zand dikker wordt, verandert c_{av} (voorbeeld hieronder).

$$\Delta p_q = K_a q = q \;\; (\varphi = 0 \Rightarrow K_a = 1)$$

$$\gamma = \frac{\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w)}{H}$$

Opgave

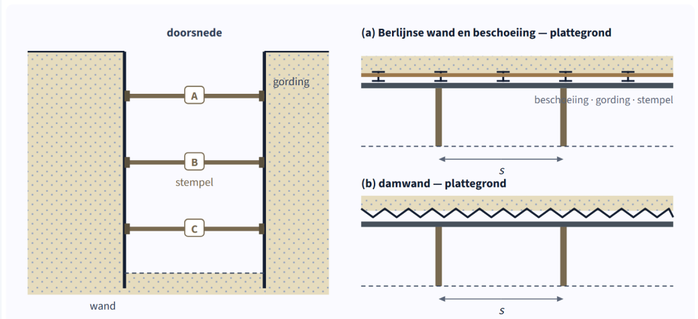
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	**De ontgraving uit voorbeeld 1 ($H = 7$ m, $n' = 0.75$): zand 3 m (ontgraving)**
Wijzigingen	**(a) zand 5 m dik (klei 2 m); (b) bovenbelasting $q = 10$ kPa**

GEVRAAGD

In elk geval $\mathbf{c_{av}}$, $\mathbf{\gamma_a H/c_{av}}$, $\mathbf{\sigma_a}$, de totale belasting R en de grootste stempelkracht.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 (a) Zand 5 m: equivalente klei opnieuw geconsolideerd

$$c_{av} = \frac{1}{14}\left[17(5)^2 \tan 30^\circ + (2)(0.75)(70)\right] = 25.03 \text{ kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(5) + 2(18)}{7} = 17.29 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_a = \max\left(\gamma_a H - 4c_{av},\, 0.3\gamma_a H\right) = \max(20.91, 36.31) = \mathbf{36.31} \text{ kPa}$$

Wanneer het zand 5 m bedraagt, wordt de equivalente cohesie 21.3 → **25.0 kPa** en wordt de omhullende bepaald door **0.3γ$_a$H = 36.3 kPa**.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 (b) Bovenbelasting: afzonderlijk $\Delta p_q = q = 10$ kPa; samenvatting van de drie gevallen

Toestand	c_{av} (kPa)	γ_a (kN/m³)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
Ontgraving (zand 3 m)	21.31	17.57	5.77	37.75	231.2	277.5
(a) zand 5 m	25.03	17.29	4.84	36.31	222.4	266.9
(b) q = 10 kPa	21.31	17.57	5.77	37.75	301.2	351.0

Naarmate de zandlaag dikker wordt, gaat c_{av} van 21.3 naar 25.0 kPa en daalt de omhullende van 37.8 naar **36.3 kPa** (wrijvingszand voegt meer sterkte toe dan klei; de resterende term $0.3\gamma_a H$ is maatgevend). Bovenbelasting beïnvloedt de omhullende niet: deze voegt alleen $\Delta p_q = 10$ kPa toe (R van 231.2 naar 301.2 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:

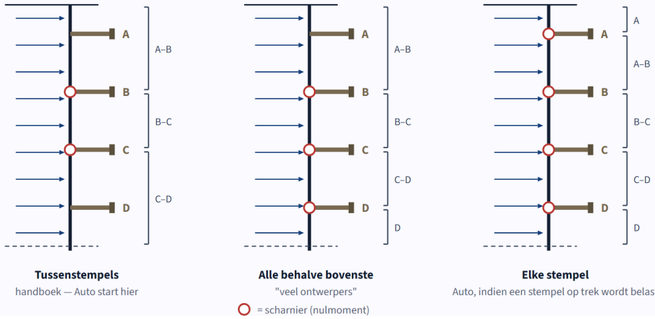
Teken de drukomhullende en de stempelniveaus. Beschouw de damwand **scharnierend in elk stempelniveau**, behalve het bovenste en het onderste (veel ontwerpers doen dit in alle niveaus behalve het bovenste).

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

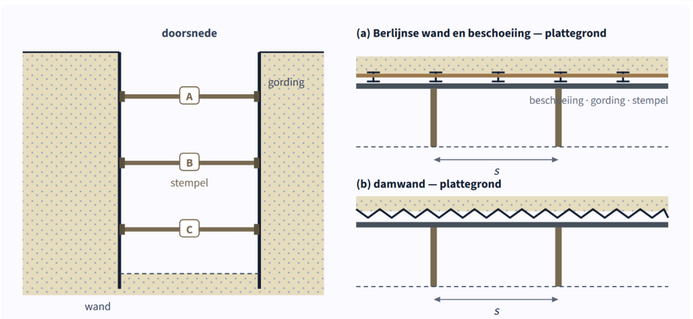
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	$H = 7.00$ 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: equivalente klei, omhullende voor zacht–halfvast $\sigma_a = 37.75$ kPa (neemt toe in het bovenste kwart, constant tot aan de basis); damwand scharnierend bij stempel B (behalve boven en onder)

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	99.09	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	3.50 – 7.00	132.12	5.250	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

2 Eerste deel: momentenevenwicht om de eerste stempel

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.09(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.14} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{53.95}\ \mathrm{kN/m}$$

De eerste overspanning draagt de twee stempels met 53.95 en 45.14 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

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{132.12(5.250 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{92.49} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{39.64}\ \mathrm{kN/m}$$

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	53.95	53.95	**161.85**
B	3.50	45.14 + 39.64	84.78	**254.34**
C	6.00	92.49	92.49	**277.47**

Grootste stempelkracht **P_C = 277.47 kN** (niveau C): 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

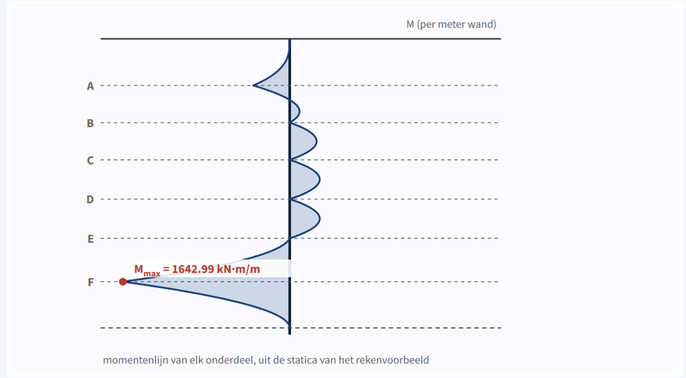
De **damwand** wordt uit dezelfde delen ontworpen: in elk deel wordt het maximale buigende moment bepaald (waar de dwarskracht van teken wisselt: binnen de overspanning of bij de stempel waar de uitkraging op de stempel aansluit); het grootste is het ontwerpmoment per strekkende meter wand. Het vereiste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

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

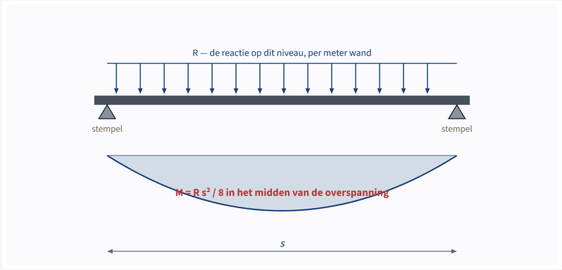
Stempels mogen als continu worden beschouwd indien op de juiste wijze verbonden; conservatief worden zij bij de steunpunten als **scharnierend** aangenomen: eenvoudig opgelegde balk met overspanning s, met de reactie R van het niveau (per eenheid van wandlengte) als verdeelde belasting:

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

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

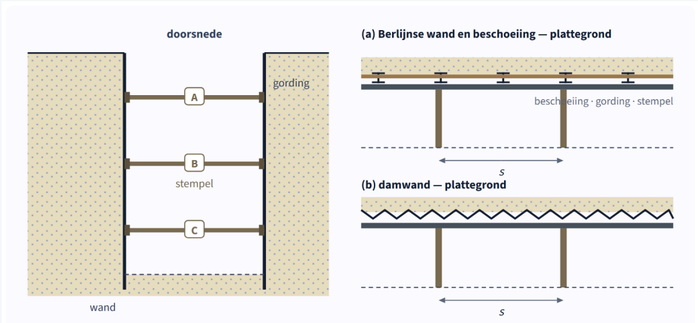
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving	**De ontgraving uit Voorbeeld 1 ($H = 7$ m, equivalente klei, $\sigma_a = 37.75$ kPa); stempels op 1.0 · 3.5 · 6.0 m; $s = 3.0$ 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	26.99	2.30
2	3.50 – 7.00	20.81	4.55

2 Vereist weerstandsmoment

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{26.99}{170{,}000} = 0.0001588\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{158.8\ cm^3/m}$$

In de damwand **M_{max} = 26.99 kN·m/m** (segment 1, z = 2.30 m): **S ≥ 158.8 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	53.95	60.69	357
B	84.78	95.38	561
C	92.49	104.05	612

De grootste reactie treedt op **ter hoogte van niveau C** (R = 92.49 kN/m): de gording wordt gedimensioneerd met **M_{max} = 104.05 kN·m**, **S ≥ 612 cm³**; de gordingen op de andere niveaus kunnen kleiner zijn.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Rekentechnische effecten, klasse, buiging en knik

THEORIE

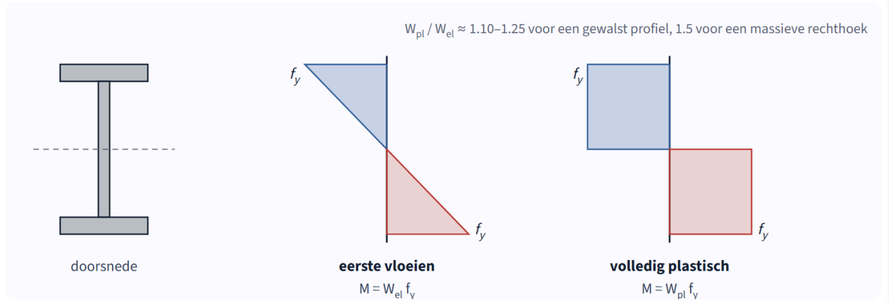
De belastingen uit de omhullende zijn **representatieve waarden** (de omhullende volgens Peck is een bovengrens voor de gemeten belastingen); zij worden één keer omgerekend naar de rekenwaarde: $E_d = \gamma_F E_k$. Elk element wordt getoetst met de vloeigrens van zijn eigen staalsoort (f_y); de doorsnede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

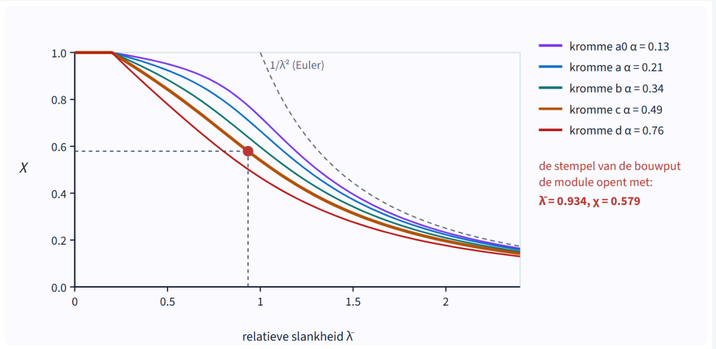
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{klasse 1–2}),\ W_{el}\ (\text{klasse 3})$$

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

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

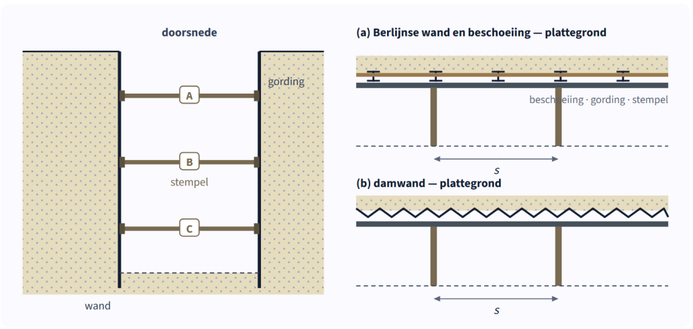
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving en belastingen	**De ontgraving uit Voorbeeld 1 en de belastingen uit Voorbeeld 4: $P_{max} = 277.47$ kN**
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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(26.99)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.44}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(104.05)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{140.47}{275.0} = \mathbf{0.511}$$

Damwand η = **0.221**, gording η = **0.511**: beide zijn voldoende ($\eta \leq 1$).

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Stempel (knik): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(277.47) = 374.58$ kN

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

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

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

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

$\eta_{stempel}$ = 374.6 / 1,046.4 = **0.358**. Alle drie de elementen voldoen (η ≤ 1); **knik** is maatgevend voor de stempel ($N_{c,Rd}$ = 1,806.8 kN, $N_{b,Rd}$ = 1,046.4 kN).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

LRFD of ASD; klassen, buiging, afschuiving, kolomkromme

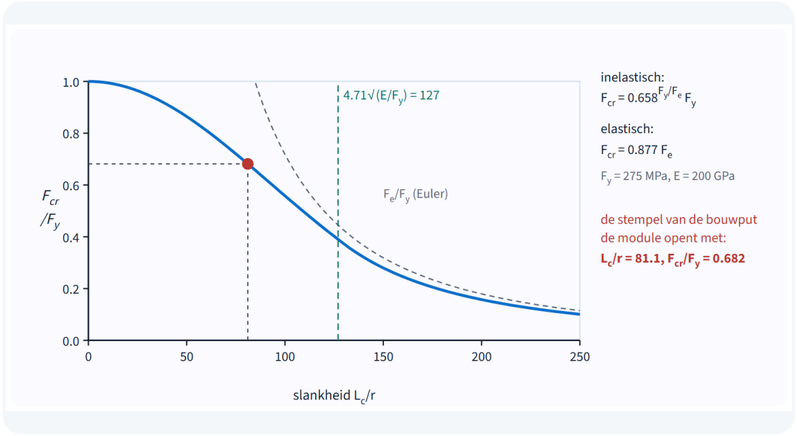
THEORIE

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

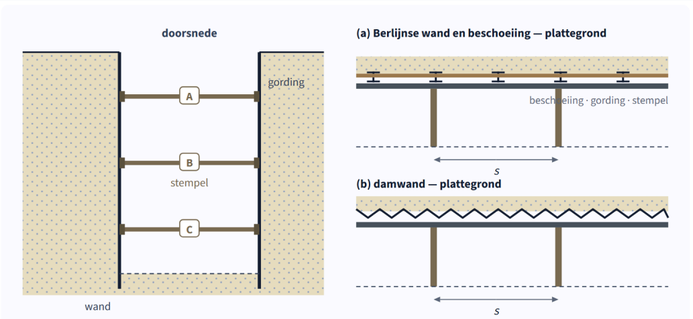
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving en belastingen	**De ontgraving uit Voorbeeld 1 en de belastingen uit Voorbeeld 4: $P_{max} = 277.47$ kN**
Elementen	**Elementen uit Voorbeeld 6 (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)

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

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

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

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

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 = 277.47 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(277.47) = 444.0\ \text{kN} \ \leq\ \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.401}$$

$$\text{ASD: } P_a = 277.47\ \text{kN} \ \leq\ \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.376}$$

Stempel: LRFD η = **0.401**, ASD η = **0.376**. Damwand (LRFD) 0.291, gording 0.673; in EN 1993-1-1 waren dat 0.221, 0.511 en 0.358.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De klei eronder draagt, de lagen ernaast veroorzaken afschuiving en belasting

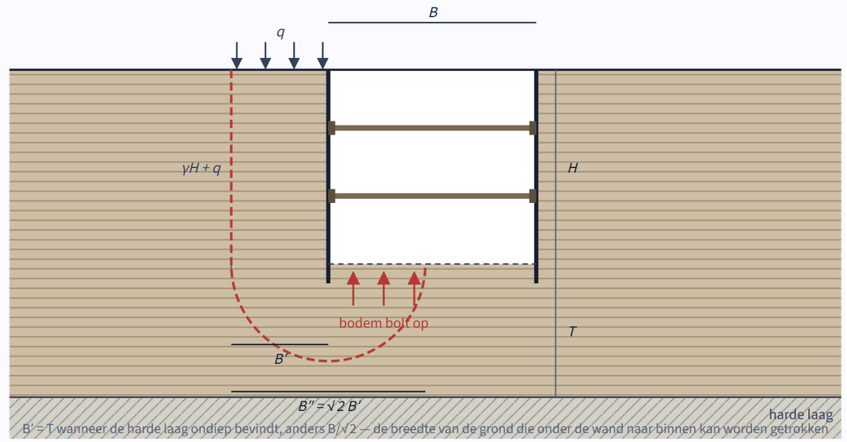
THEORIE

De ontgravingsbodem in klei kan onder het gewicht van de aangrenzende grond omhoog komen (kolom van Terzaghi, correctie van Chang). De formule is afgeleid voor homogene klei; de module gebruikt haar **in gelaagde profielen via de GeoTerva-uitbreiding**:

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

c: de klei onder de zool (draagvermogenterm); **c_{side}**: gemiddelde cohesie over de gekeerde hoogte (zand wordt als nul beschouwd; term voor zijschuif); **$\sigma_V(H)$**: totale deklaagspanning op het niveau van de zool aan de rand van de ontgraving ($\Sigma\gamma_i H_i$).

B de ontgravingsbreedte, L de lengte in bovenaanzicht, T de stijve laag onder de basis; de insteekdiepte van de wand wordt niet meegerekend (conservatief). Gevraagd FS ≈ **1.5**.



Opgave

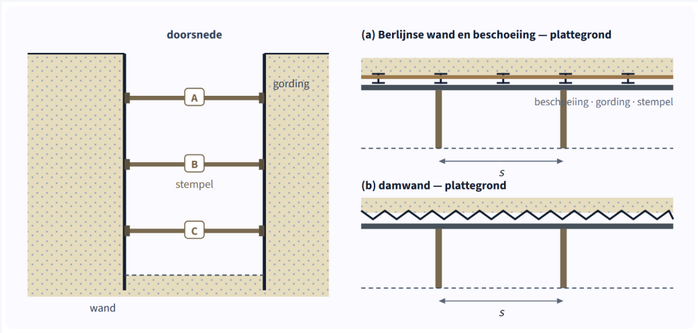
VOORBEELD

Gegeven

Ontgraving in open put	$H = 7$ **m,** $B = 6$ **m,** $L = 20$ **m, klei** $T = 4$ **m onder de bodem; bovenaan 3 m zand (**$\gamma = 17$**), daaronder klei (**$\gamma = 18$**,** $c = 35$ **kPa)**
Vergelijking	**als het zand 5 m dik was (klei 2 m)**

GEVRAAGD

c_{side}, $\sigma_v(H)$, **B′** en **FS** (≥ 1.5?); FS bij toenemende zanddikte?



Oplossing

OPLOSSING

1 Van de aangrenzende lagen: gemiddelde cohesie en deklaagdruk

$$c_{side} = \frac{0\,(3) + 35\,(4)}{7} = \mathbf{20.0}\ \text{kPa}\ \ (\text{zand nul}) \qquad \sigma_v(H) = 17(3) + 18(4) = \mathbf{123}\ \text{kPa}$$

$$B/\sqrt{2} = 4.24\ \text{m} > T = 4\ \text{m} \ \Rightarrow\ B' = 4.00\ \text{m}, \quad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

2 Veiligheidsfactor (draagterm: klei onder de voet c = 35 kPa)

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{20(7)}{4.00}}{123} = \frac{190.1 + 35.0}{123} = \mathbf{1.83}\ \geq 1.5\ \checkmark$$

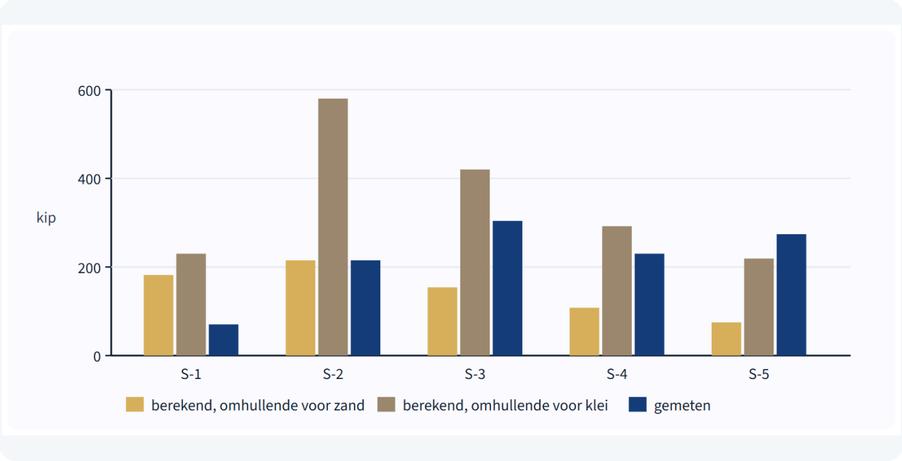
Veiligheid tegen bodemopbolling **1.83** (≥ 1.5). Wanneer het zand 5 m dik wordt, daalt de zijdelingse cohesie tot 10 kPa, neemt de deklaagspanning af tot 121 kPa en daalt FS tot **1.72**: naarmate de zandlaag dikker wordt, neemt de bijdrage van de zijdelingse afschuiving af.

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, 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, σ_a = 282.0 kPa). De omhullende volgens Peck gaf ongeveer **1.8 maal** de waargenomen druk: 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 samengesteld uit ontgravingen dieper dan ongeveer 6 m; **de omhullende is niet de werkelijke druk op de wand op enig moment**: zij geeft een veilige stempelkracht, geen wanddoorbuiging. Klei is ongedraineerd, zand is gedraineerd.

Het profiel zand + klei wordt omgezet in **één equivalente klei** (c_{av}, γ_a); de omhullende wordt gekozen met $\gamma_a H/c_{av}$. Meerdere kleilagen worden eerst naar dikte gemiddeld. $K_s \approx 1$ en $n' = 0.75$ zijn gemiddelde waarden; een variatie van $n' = 0.5–1.0$ heeft grote invloed op het resultaat.

De bovenbelasting wordt apart toegevoegd ($\Delta p = q$); water wijzigt alleen het volumiek gewicht. De **damwand** is een keten van scharnierende bepaalbare liggers; de **gordingen** zijn enkelvoudige overspanningen tussen de stempels. Het staal wordt getoetst volgens EN 1993-1-1 (klasse 4 wordt niet ontworpen) of AISC 360-22.

Bodemopbolling wordt getoetst met de gelaagde GeoTerva-uitbreiding van de formule die voor homogene klei is afgeleid; de insteekdiepte van de damwand wordt niet meegerekend.

Tijdens de ontgraving worden laterale beweging en grondverlies rond de bouwput verwacht; bij een harde laag worden de damwanden daarin ingeklemd.

Samenvatting

Belangrijkste punten

Equivalente klei: $c_{av} = [\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s + (H - H_s) n' q_u]/(2H)$, $\gamma_a = [\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c]/H$; in het voorbeeld 21.31 kPa en 17.57 kN/m³

Omhullende: $\gamma_a H/c_{av} = 5.77 > 4 \rightarrow$ omhullende voor zachte tot matige klei $\sigma_a = \gamma_a H[1 - 4c_{av}/\gamma_a H] = 37.75$ kPa; $n' = 0.5 \rightarrow 57.75$ kPa

National Plaza: $c_{av,klei} = 51.16$, $c_{av} = 34.91$ kPa, $\gamma_{av} = 19.76$ kN/m³, $\gamma H/c = 12.08 \rightarrow \sigma_a = 282.0$ kPa (≈ 1.8 keer de waargenomen waarde)

Stempelkracht en dimensionering: $P_{max} = 277.47$ kN; damwand $M_{max} = 26.99$ kN·m/m; gording M = 104.05 kN·m

Staal: EN 1993-1-1 η = 0.221 / 0.511 / 0.358; AISC LRFD stempel 0.401, ASD 0.376

Bodemopbolling (gelaagd): $c_{side} = 20$ kPa, $\sigma_v(H) = 123$ kPa, FS = 1.83 ≥ 1.5

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 geproduceerd met de eigen berekeningskern van de module; de module geeft dezelfde waarden. De rekenvoorbeelden op de modulepagina zijn het geval National Plaza (Chicago) en de openingsontgraving van de module (H = 7 m, zand 3 m + klei).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Voer de zand- en kleilagen van uw eigen ontgraving, de stempelniveaus, de bovenbelasting en uw elementen in GeoTerva in; de module geeft de equivalente klei, de omhullende, de stempelkrachten, de momenten in damwand en gording, de staalverificatie en de bodemopbolling in samenhang.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

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