



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Rozwiązanie ogólne pojedynczo zakotwionej ścianki szczelnej w jednorodnym, idealnie sypkim gruncie zawodnionym

Dr inż. Michał Kowalski

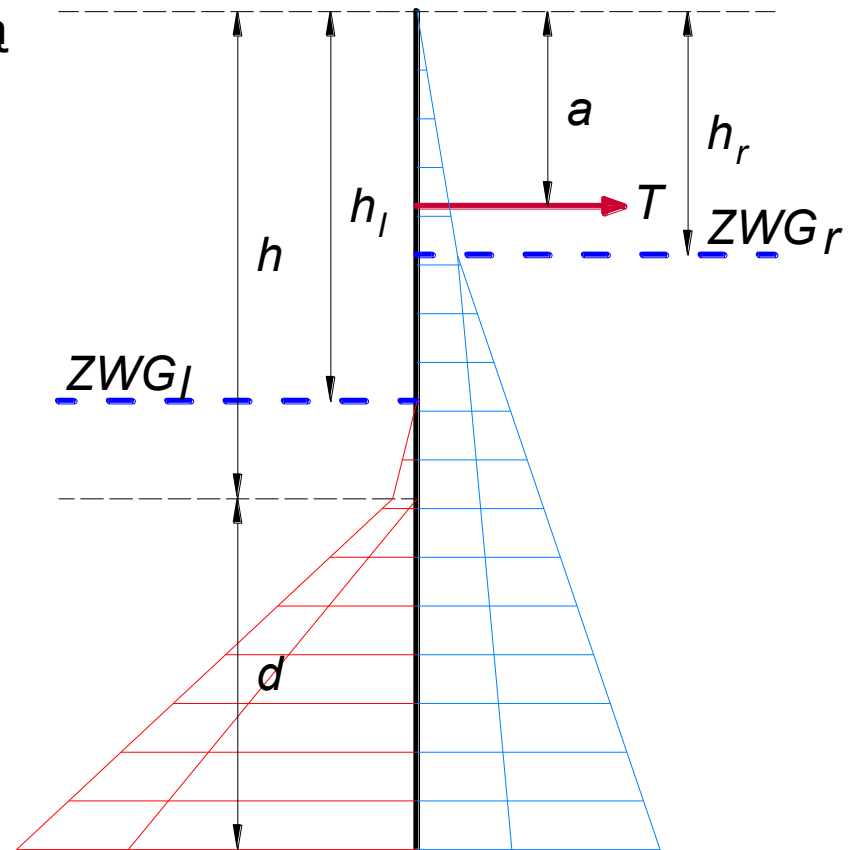
Nazwa wydziału: Górnictwa i Geoinżynierii

**Nazwa katedry: Geomechaniki, Budownictwa
i Geotechniki**

Wprowadzenie

Rozpatrzmy siły działające na ściankę szczelną umieszczoną w jednorodnym, idealnie sypkim, zawodnionym gruncie. Załóżmy, że dla utrzymania stateczności wykopu o głębokości h została ona zabita w grunt na głębokość d . Zwierciadło wód gruntowych po stronie wykopu znajduje się na głębokości h_I , po stronie naziomu na głębokości h_r .

W odległości a od naziomu ścianka została zakotwiona kotwią oddziałującą z siłą T .



Uwzględnienie ciśnienia sphywowego

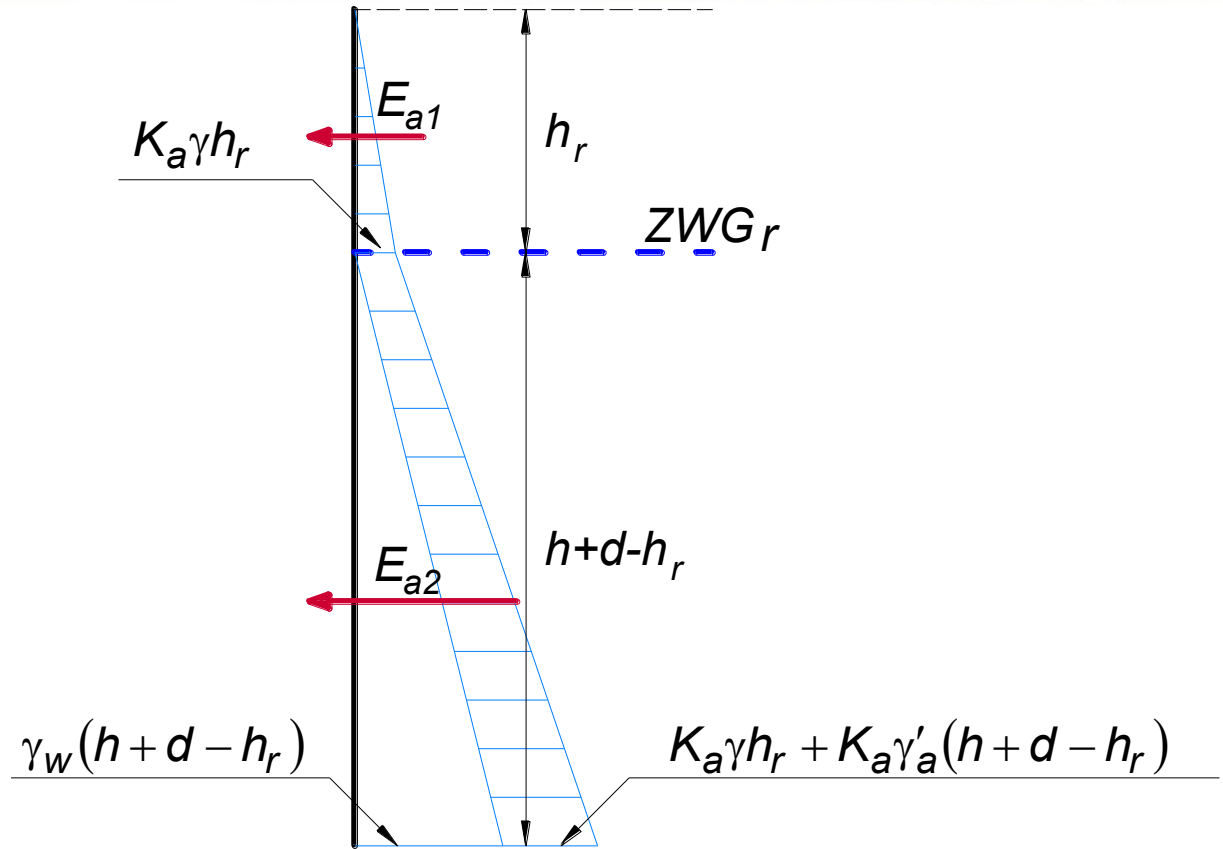
$$\gamma'_p = \gamma' - \frac{0.7(h_l - h_r)\gamma_w}{d + \sqrt{(h + d - h_r)d}}$$

$$\gamma'_a = \gamma' + \frac{0.7(h_l - h_r)\gamma_w}{(h + d - h_r) + \sqrt{d(h + d - h_r)}}$$



AGH

SIŁY PARCIA – strona prawa:



$0 < z < h_r :$

$$E_{a1} = \frac{1}{2} K_a \gamma h_r^2$$

$h_r \leq z < h+d :$

$$E_{a2} = \frac{1}{2} [K_a \gamma h_r + K_a \gamma h_r + K_a \gamma'_a (h+d-h_r) + \gamma_w (h+d-h_r)] (h+d-h_r)$$

$$E_{a2} = K_a \gamma h_r (h+d-h_r) + \frac{1}{2} (K_a \gamma'_a + \gamma_w) (h+d-h_r)^2$$



AGH

SIŁY PARCIA – strona lewa:

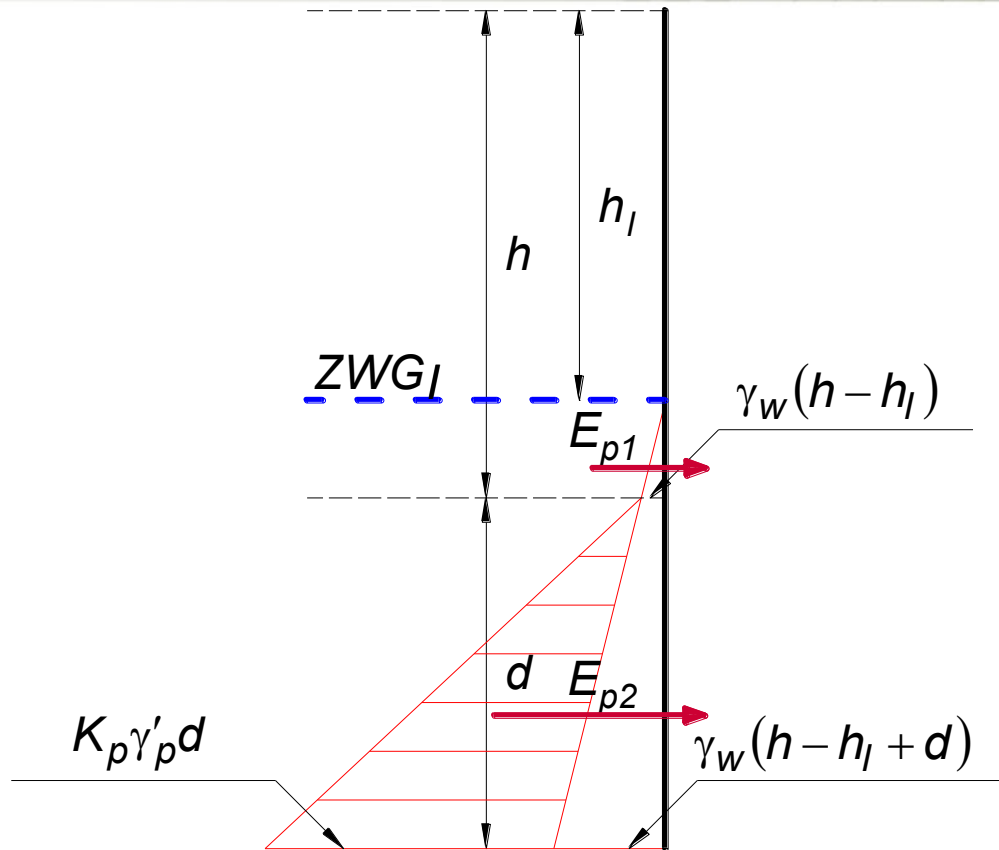
$$h_l < z < h:$$

$$E_{p1} = \frac{1}{2} \gamma_w (h - h_l)^2$$

$$h \leq z < h + d:$$

$$E_{p2} = \frac{1}{2} [\gamma_w (h - h_l) + \gamma_w (h - h_l) + K_p \gamma'_p d + \gamma_w d] \cdot d$$

$$E_{p2} = \gamma_w (h - h_l) d + \frac{1}{2} K_p \gamma'_p d^2 + \frac{1}{2} \gamma_w d^2$$

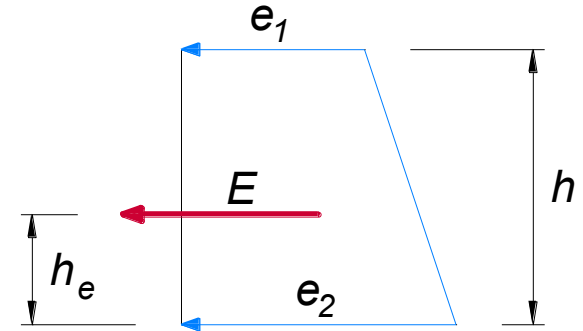




AGH

Ramiona działania sił

$$h_e = \frac{h}{3} \cdot \frac{2e_1 + e_2}{e_1 + e_2}$$



Określenie ramienia siły E_{a2}

$$R_r = \frac{h + d - h_r}{3} \cdot \frac{2K_a\gamma h_r + K_a\gamma' h_r + K_a\gamma'_a(h + d - h_r) + \gamma_w(h + d - h_r)}{K_a\gamma h_r + K_a\gamma' h_r + (K_a\gamma'_a + \gamma_w)(h + d - h_r)}$$

$$R_r = \frac{h + d - h_r}{3} \cdot \frac{3K_a\gamma h_r + (K_a\gamma'_a + \gamma_w)(h + d - h_r)}{2K_a\gamma h_r + (K_a\gamma'_a + \gamma_w)(h + d - h_r)}$$

Określenie ramienia siły E_{p2}

$$R_l = \frac{d}{3} \cdot \frac{2\gamma_w(h - h_l) + \gamma_w(h - h_l) + K_p\gamma'_p d + \gamma_w d}{\gamma_w(h - h_l) + \gamma(h - h_l) + K_p\gamma'_p d + \gamma_w d}$$

$$R_l = \frac{d}{3} \cdot \frac{\gamma_w(3h - 3h_l + d) + K_p\gamma'_p d}{\gamma_w(2h - 2h_l + d) + K_p\gamma'_p d}$$

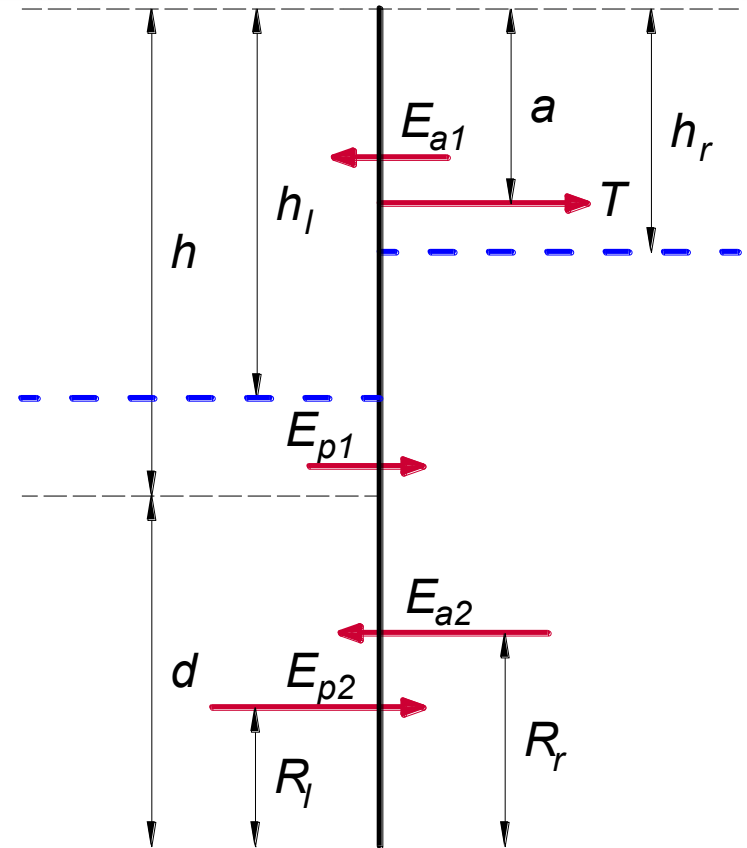


AGH

Suma momentów względem punktu zakotwienia

$$E_{a_1} \left(h_r - a - \frac{h_r}{3} \right) + E_{a_2} (h + d - a - R_r) + \\ - E_{p_1} \left(h - a - \frac{h - h_l}{3} \right) - E_{p_2} (h + d - a - R_l) = 0$$

$$E_{a_1} \left(\frac{2}{3} h_r - a \right) + E_{a_2} (h + d - a - R_r) + \\ - E_{p_1} \left(\frac{2}{3} h - a + \frac{h_l}{3} \right) - E_{p_2} (h + d - a - R_l) = 0$$



Z powyższego równania należy iteracyjnie określić głębokość zakotwienia d. Po określeniu wartości d należy sprawdzić, czy nie jest ona mniejsza niż wynika z warunku na przebicie hydrauliczne.

Warunek na przebicie hydrauliczne

- spadek hydrauliczny

$$i = \frac{h_l - h_r}{(h - h_r) + 2d}$$

- ciśnienie sphywowe

$$j = i\gamma_w = \frac{h_l - h_r}{(h - h_r) + 2d}\gamma_w$$

- wskaźnik bezpieczeństwa

$$F = \frac{\gamma'}{j} \geq 2.5$$

$$\frac{h_l - h_r}{h - h_r + 2d} = \frac{1}{F} \Rightarrow F(h_l - h_r) = h - h_r + 2d$$

$$d = \frac{F(h_l - h_r) - (h - h_r)}{2}$$

$$d = \frac{h_r(1 - F) + Fh_l - h}{2}$$

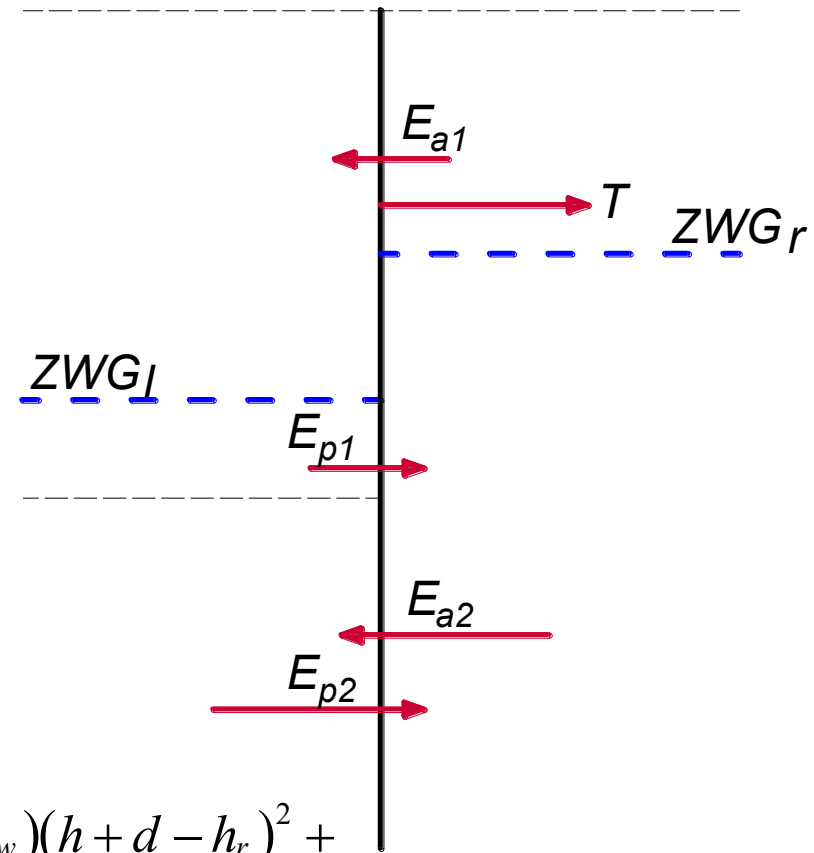


AGH

Określenie siły T w kotwi

$$\sum_{i=1}^n P_{ix} = T - E_{a1} - E_{a2} + E_{p1} + E_{p2} = 0$$

$$\Rightarrow T = E_{a1} + E_{a2} - E_{p1} - E_{p2}$$



$$T = \frac{1}{2} K_a \gamma h_r^2 + K_a \gamma h_r (h + d - h_r) + \frac{1}{2} (K_a \gamma'_a + \gamma_w) (h + d - h_r)^2 +$$
$$- \frac{1}{2} \gamma_w (h - h_l)^2 - \left[\gamma_w (h - h_l) d + \frac{1}{2} K_p \gamma'_p d^2 + \frac{1}{2} \gamma_w d^2 \right]$$



AGH Siły tnące w przedziałach

I przedział $0 \leq z < a$

$$Q_I = -\frac{1}{2}K_a\gamma z^2$$

II przedział $a \leq z < h_r$

$$Q_{II} = -\frac{1}{2}K_a\gamma z^2 + T$$

III przedział $h_r \leq z < h_l$

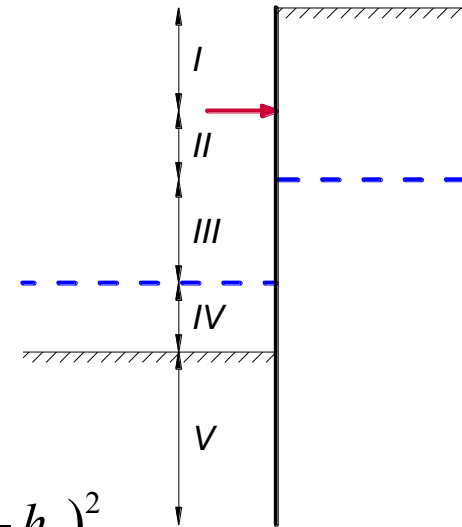
$$Q_{III} = -\frac{1}{2}K_a\gamma h_r^2 + T - K_a\gamma h_r(z - h_r) - \frac{1}{2}(K_a\gamma'_a + \gamma_w)(z - h_r)^2$$

IV przedział $h_l \leq z < h$

$$Q_{IV} = -\frac{1}{2}K_a\gamma h_r^2 + T - K_a\gamma h_r(z - h_r) - \frac{1}{2}(K_a\gamma'_a + \gamma_w)(z - h_r)^2 + \frac{1}{2}\gamma_w(z - h_l)^2$$

V przedział $h \leq z \leq h + d$

$$Q_V = -\frac{1}{2}K_a\gamma h_r^2 + T - K_a\gamma h_r(z - h_r) - \frac{1}{2}(K_a\gamma'_a + \gamma_w)(z - h_r)^2 + \frac{1}{2}\gamma_w(z - h_l)^2 + \frac{1}{2}K_p\gamma'_p(z - h)^2$$





AGH Momenty zginające w przedziałach

I przedział $0 \leq z < a$

$$M_I = -\frac{1}{6}K_a\gamma z^3$$

II przedział $a \leq z < h_r$

$$M_{II} = -\frac{1}{6}K_a\gamma z^3 + T(z-a)$$

III przedział $h_r \leq z < h_l$

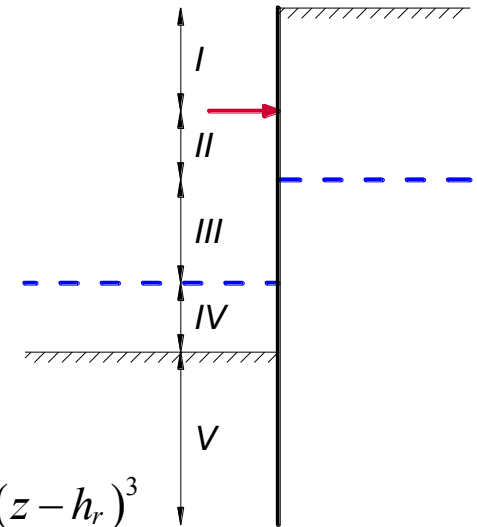
$$M_{III} = -\frac{1}{2}K_a\gamma h_r^2\left(z - \frac{2}{3}h_r\right) + T(z-a) - \frac{1}{2}K_a\gamma h_r(z-h_r)^2 - \frac{1}{6}(K_a\gamma'_a + \gamma_w)(z-h_r)^3$$

IV przedział $h_l \leq z < h$

$$M_{IV} = -\frac{1}{2}K_a\gamma h_r^2\left(z - \frac{2}{3}h_r\right) + T(z-a) - \frac{1}{2}K_a\gamma h_r(z-h_r)^2 - \frac{1}{6}(K_a\gamma'_a + \gamma_w)(z-h_r)^3 + \frac{1}{6}\gamma_w(z-h_l)^3$$

V przedział $h \leq z \leq h+d$

$$M_V = -\frac{1}{2}K_a\gamma h_r^2\left(z - \frac{2}{3}h_r\right) + T(z-a) - \frac{1}{2}K_a\gamma h_r(z-h_r)^2 - \frac{1}{6}(K_a\gamma'_a + \gamma_w)(z-h_r)^3 + \frac{1}{6}\gamma_w(z-h_l)^3 + \frac{1}{6}K_p\gamma'_p(z-h)^3$$



Przykład

Rozpatrzmy konstrukcję ścianki szczelnej dla wykopu o wysokości $h = 5$ m, wykonanego w gruncie o ciężarze objętościowym $\gamma = 20$ kN/m³ i kącie tarcia wewnętrznego równym $\varphi = 30^\circ$. Ciężar objętościowy gruntu z uwzględnieniem wyporu wody wynosi $\gamma' = 11$ kN/m³. Załóżmy zakotwienie w odległości $a = 2$ m od naziomu. Zwierciadło wód gruntowych znajduje się na głębokości $h_r = 2.5$ m po stronie naziomu i na głębokości $h_l = 4$ m po stronie wykopu.

Określić zagłębienie ścianki szczelnej (d) i siłę naciągu kotwi (T). Narysować wykres sił tnących oraz momentów zginających wzdłuż ścianki. Znaleźć maksymalny moment zginający.

Zagłębienie ścianki określamy stosując procedurę iteracyjną podstawiając kolejno wartości d aż do uzyskania wymaganej zbieżności obu stron równania. Otrzymujemy:

$$d = 3.558 \text{ m}$$

Przykład

Z warunku na przebicie hydrauliczne przyjmując $F = 3$ otrzymujemy:

$$d_{\min} = \frac{(4 - 2.5) \cdot 3 - 5 + 2.5}{2} = 1.0 \text{ m}$$

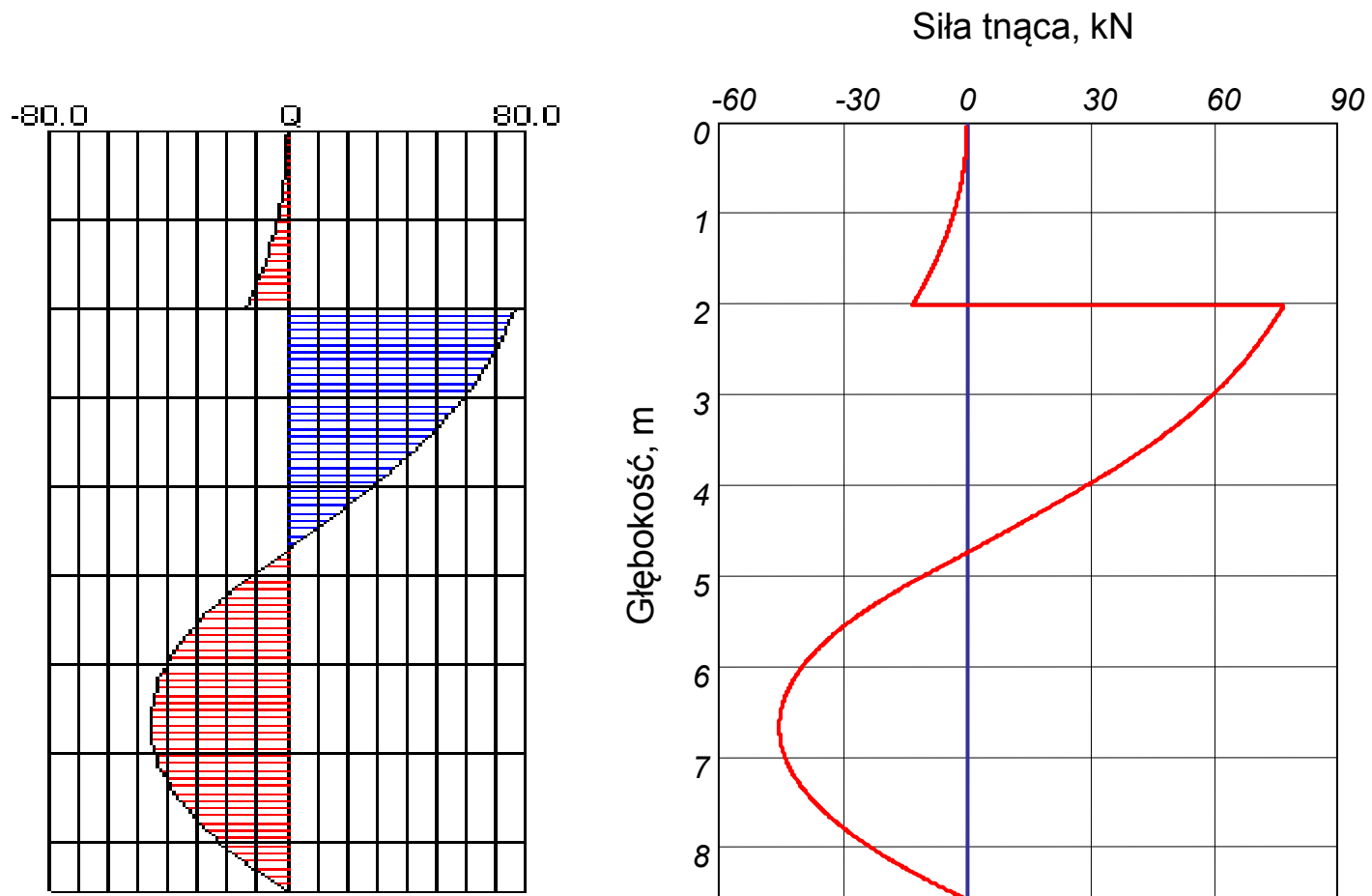
Do dalszych obliczeń przyjęto głębokość zabicia ścianki obliczoną z sumy momentów względem punktu zakotwienia:

$$d = 3.558 \text{ m}$$

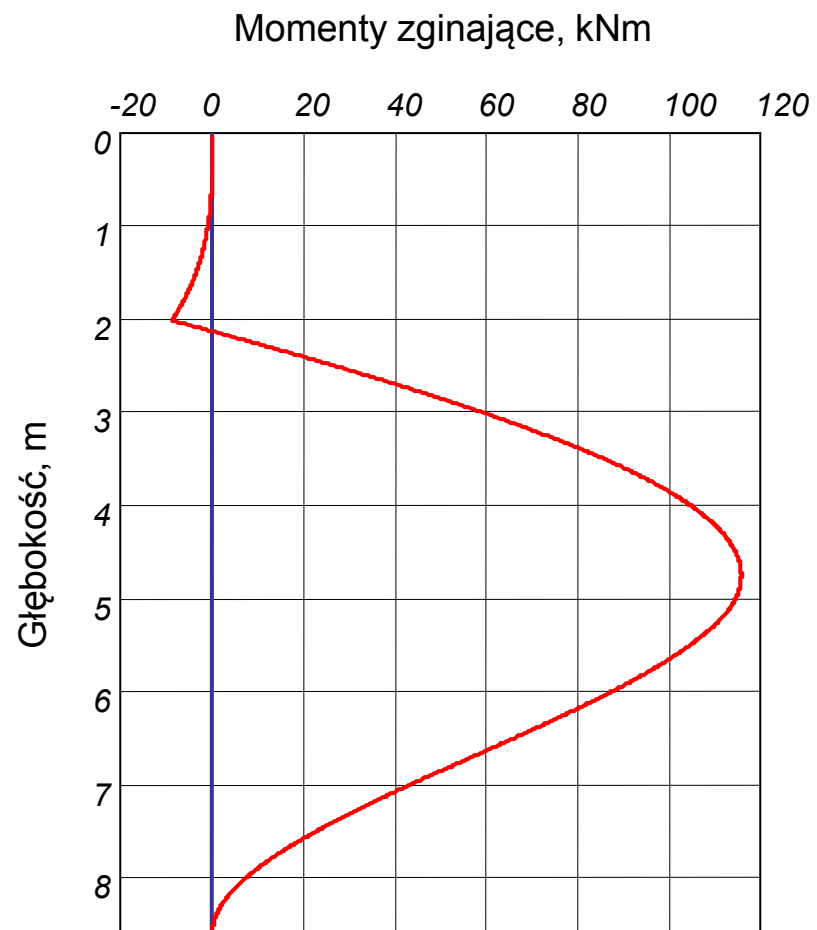
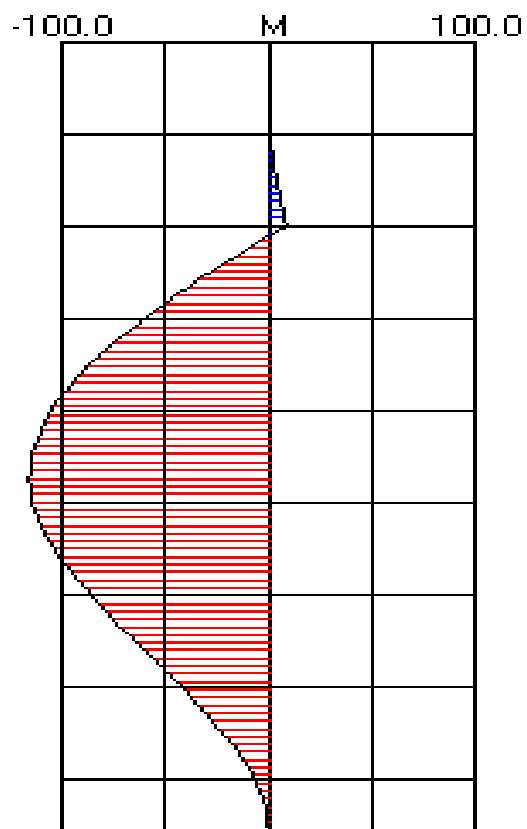
Dla takiej wartości zabicia siła T w kotwi jest równa:

$$T = \frac{1}{2} K_a \gamma h_r^2 + K_a \gamma h_r (h + d - h_r) + \frac{1}{2} (K_a \gamma'_a + \gamma_w) (h + d - h_r)^2 + \\ - \frac{1}{2} \gamma_w (h - h_l)^2 - \left[\gamma_w (h - h_l) d + \frac{1}{2} K_p \gamma'_p d^2 + \frac{1}{2} \gamma_w d^2 \right] = 90.15 \text{ kN}$$

Wykres sił tnących



Wykres momentów zginających



Dobór profilu ścianki

Maksymalny moment zginający jest równy:

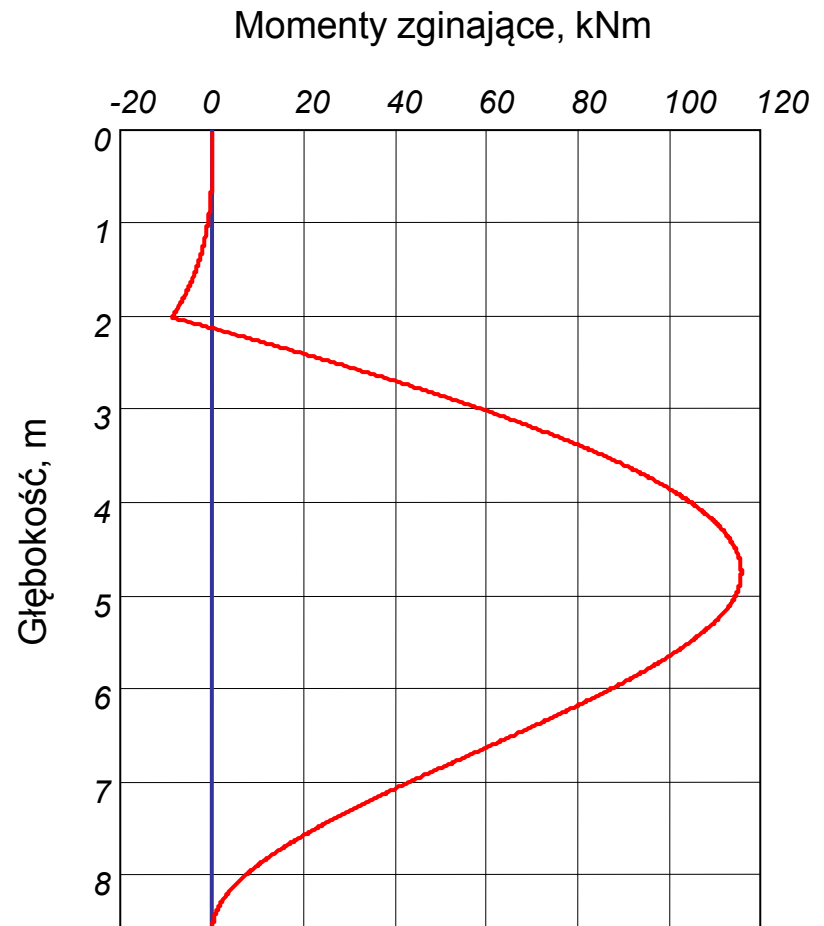
$$M_{g,\max} = 115.64 \text{ kNm}$$

Wskaźnik wytrzymałości przekroju:

$$W_{gx} = \frac{M_{g,\max}}{k_d}$$

$$W_{gx} = \frac{115.64 \text{ kNm}}{150 \text{ MPa}} = 771 \text{ cm}^3$$

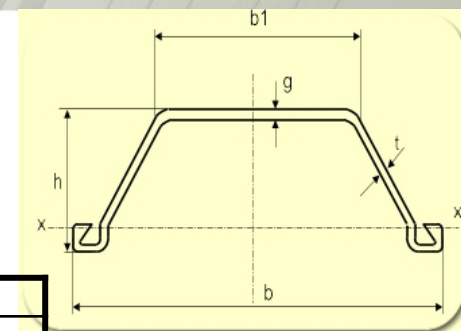
k_d – naprężenie dopuszczalne dla stali





AGH

Wybrane profile ścianek szczelnych



Wyróżnik oznaczenia	Wymiary					Powierzchnia przekroju cm ²	Masa 1 m kg	Wielkości statyczne			
	b	b1	h	t	G			Dla przekroju grodzicy		Dla przekroju ściany dł. 1 m	
								I _y cm ⁴	W _y cm ³	I _y cm ⁴	W _y cm ³
mm											
G 46	632	275	175.5	6.4	7.5	58.6	47.0	2462.0	233.0	11352.0	735.0
*G 46/P1	632	275	176.5	7.1	8.5	66.0	51.8	2066.0	246.0	12690.0	821.0
*G 46/P2	632	275	177.5	7.9	9.5	72.3	56.7	2863.9	260.0	14336.9	920.2
*G 46/P3	632	275	178.5	8.3	10.0	75.2	59.0	2974.3	268.1	14977.1	961.3
G 61	538	285	192.0	9.0	10.0	77.5	61.0	3870.0	335.0	21900.0	1275.0
*G 61/C1	538	285	191.0	8.5	9.0	71.9	56.4	3570.3	313.8	19726.0	1156.8
*G 61/P1.0	538	285	192.0	10.0	10.0	82.3	64.6	4067.0	258.0	21753.0	1283.0
*G 61/P1	538	285	193.0	9.5	11.0	82.6	64.8	4116.3	350.6	23200.4	1360.6
*G 61/P1.1	538	285	192.0	10.0	11.0	85.0	66.8	4188.0	362.0	23131.0	1366.0
*G 61/P1.2	538	285	193.0	10.5	11.0	86.6	68.0	4245.1	364.8	23525.7	1387.8
*G 61/P2.1	538	285	194.0	10.0	12.0	87.9	69.0	4386.5	368.7	24903.7	1460.5
*G 61/P2.2	538	285	193.0	11.0	12.0	91.0	71.4	4380.7	370.4	25210.0	1487.1
G 62	436	320	168.0	9.5	13.0	78.9	62.0	3106.0	282.0	23200.0	1600.0
*G 62/C1	436	320	167.0	9.4	12.0	76.2	59.8	2830.2	258.6	21641.9	1492.5
*G 62/P1	436	320	169.0	9.6	14.0	84.8	66.6	3182.5	284.3	24362.7	1680.2
*G 62/P2	436	320	170.0	9.7	15.0	87.8	68.9	3282.3	288.1	25953.0	1777.6

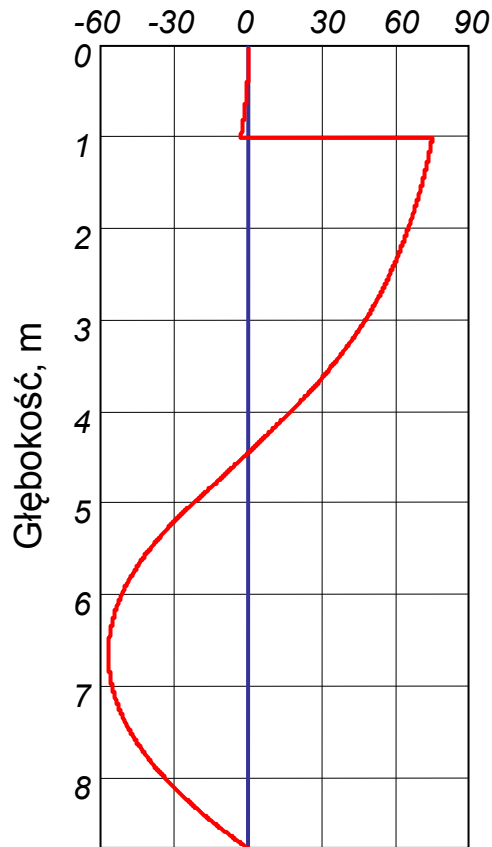


AGH

Wpływ głębokości zakotwienia na siły tnące

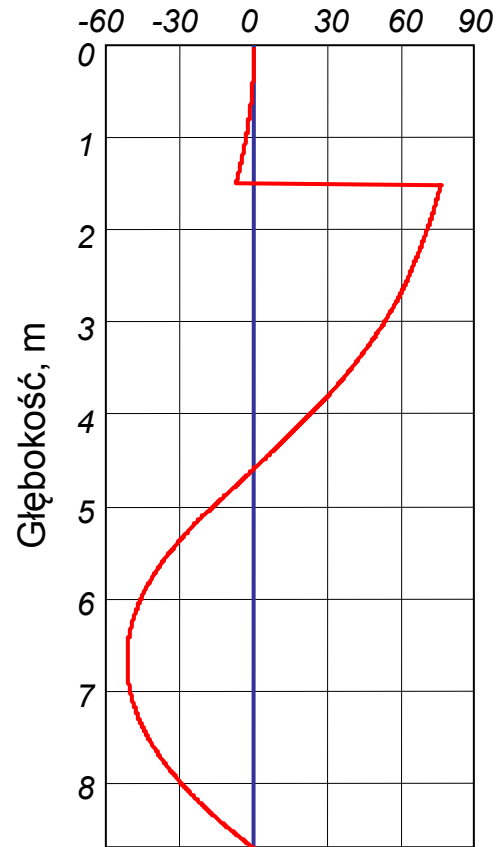
$a = 1.0m$

Siła tnąca, kN



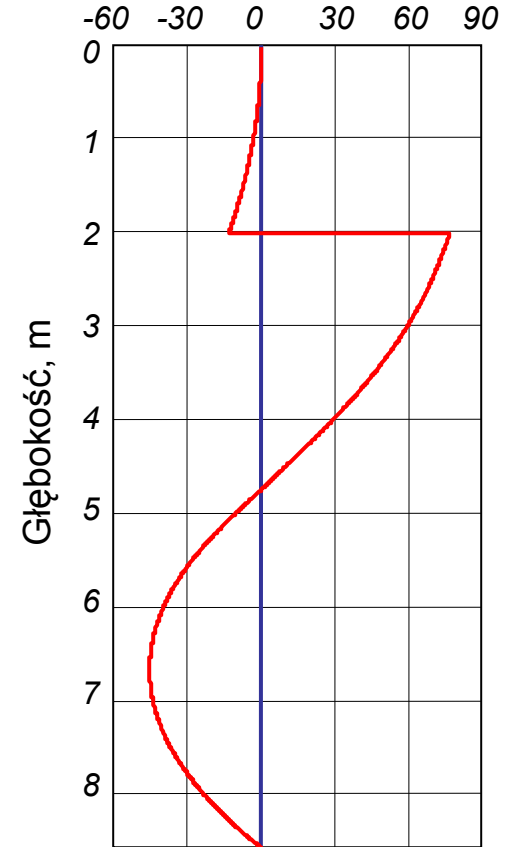
$a = 1.5m$

Siła tnąca, kN



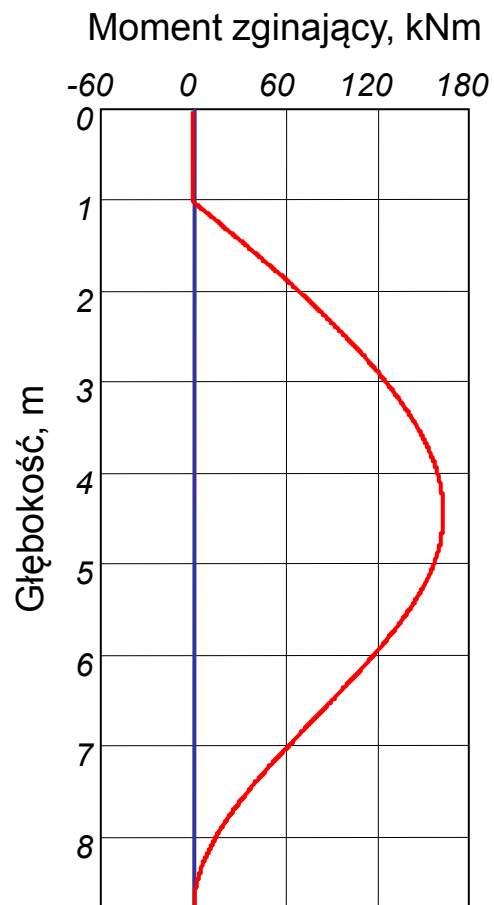
$a = 2.0m$

Siła tnąca, kN

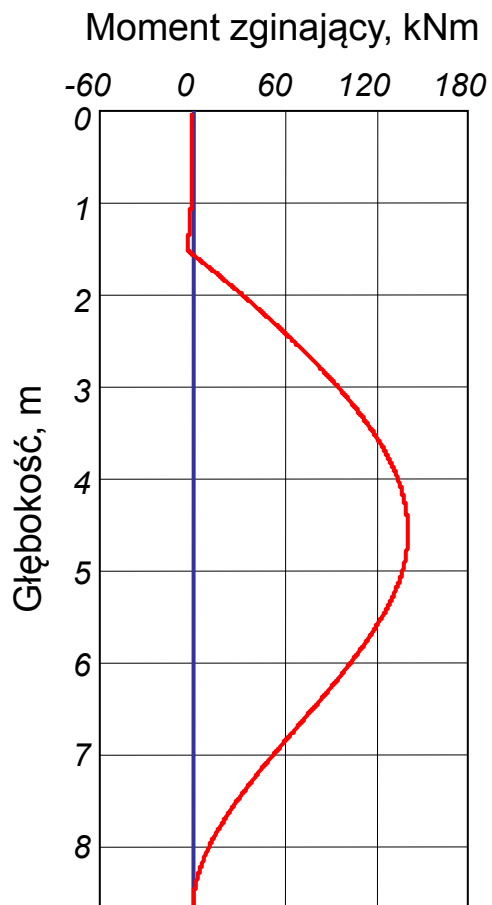


Wpływ głębokości zakotwienia na momenty zginające

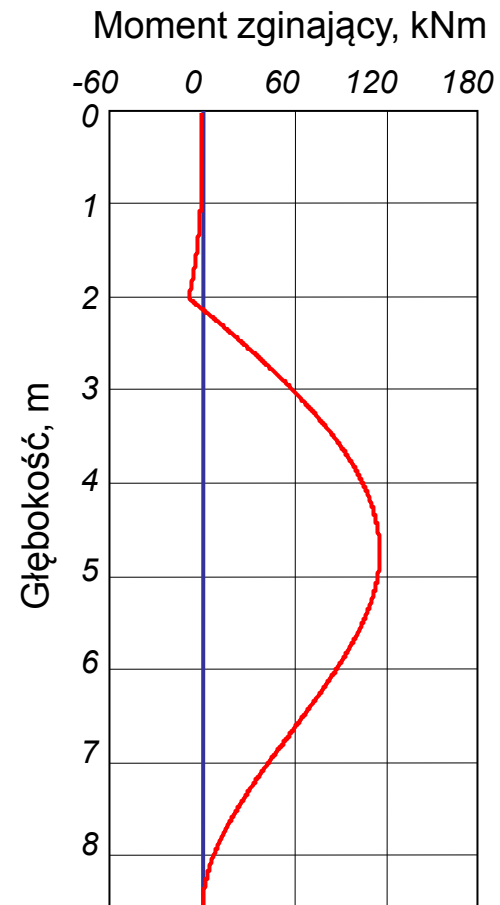
$a = 1.0m$



$a = 1.5m$



$a = 2.0m$



Wpływ głębokości zakotwienia na uzyskane wyniki

<i>$a = 1.0 \text{ m}$</i>	<i>$a = 1.5 \text{ m}$</i>	<i>$a = 2.0 \text{ m}$</i>
<i>$T_{kotwi} = 78.12 \text{ kN}$</i>	<i>$T_{kotwi} = 83.66 \text{ kN}$</i>	<i>$T_{kotwi} = 90.15 \text{ kN}$</i>
<i>$d = 3.76 \text{ m}$</i>	<i>$d = 3.67 \text{ m}$</i>	<i>$d = 3.56 \text{ m}$</i>
<i>$T_{max} = 74.79 \text{ kN}$</i>	<i>$T_{max} = 76.16 \text{ kN}$</i>	<i>$T_{max} = 76.82 \text{ kN}$</i>
<i>$M_{max} = 162.76 \text{ kNm}$</i>	<i>$M_{max} = 140.30 \text{ kNm}$</i>	<i>$M_{max} = 115.64 \text{ kNm}$</i>
<i>$W_{gx} = 1085 \text{ cm}^3$</i>	<i>$W_{gx} = 935 \text{ cm}^3$</i>	<i>$W_{gx} = 771 \text{ cm}^3$</i>

Przy zmianie głębokości zakotwienia ścianki z $a = 1.0 \text{ m}$ na $a = 2.0 \text{ m}$ następuje zmniejszenie maksymalnego momentu zginającego działającego na ściankę o 29%.