

Zależność między σ_{max} a $\tau_{ef. max}$.

Z równania

$$\tau_{ef. max} = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min}) - (\sigma_{max} + \sigma_{min}) \cdot \sin \vartheta}{2 \cdot \cos \vartheta};$$

określamy σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot \tau_{ef. max} \cdot \cos \vartheta}{1 - \sin \vartheta} + \sigma_{min} \cdot \frac{1 + \sin \vartheta}{1 - \sin \vartheta};$$

Największe naprężenia normalne występują:

- 1/. na krawędzi od strony wody przy zbiorniku pustym
- 2/. i na krawędzi od strony powietrza przy zbiorniku pełnym.

W obu tych wypadkach $\sigma_{min} = 0$, zatem

$$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot \tau_{ef. max} \cdot \cos \vartheta}{1 - \sin \vartheta};$$

Dla zapór murowanych i betonowych, jak to już podano wyżej, $\cos \vartheta = 0,8$ a $\sin \vartheta = 0,6$, zatem

$$\tau_{ef. max} = \frac{1}{4} \cdot \sigma_{max}$$

Stąd widać, że, o ile dopuszczalne naprężenia tnące są niewielkie: $\tau_{ef. dop.} < \frac{1}{4} \cdot \sigma_{dop.}$; wówczas największe naprężenia sciskające musimy ustalić według powyższej zależności, t.j. $\sigma_{max} = 4 \cdot \tau_{ef. dop.}$ i wtedy oczywiście wytrzymałość betonu na sciskanie nie będzie wykorzystana. W danym razie mogłaby się zatem okazać potrzeba zbrojenia ze względu na napręże-

nia tnące.

Linje jednakowych naprężeń /izostatyczne/ .

Sporządzamy je w ten sposób, że na szeregu prostych Oi , wyprowadzonych z wierzchołka zapory, znajdujemy punkty o pewnej określonej wartości naprężenia.

Aby otrzymać linje jednakowych naprężeń normalnych $\sigma_{max} = \mathcal{R}$, musimy napisać równania zasadnicze, określające σ_x , σ_y i τ w postaci:

$$\sigma_x = y \cdot (a_1 k + b_1);$$

$$\sigma_y = y \cdot (a_2 k + b_2);$$

$$\tau = y \cdot (c \cdot k + d);$$

gdzie $k = \operatorname{tg} \varphi$ - jest pochyleniem dowolnej prostej Oi /rys.108 i 109/. Dla punktu, leżącego na tej prostej na głębokości $y=1$, naprężenia te wyniosą:

$$\sigma'_x = a_1 k + b_1 ;$$

$$\sigma'_y = a_2 k + b_2 ;$$

$$\tau' = c \cdot k + d ;$$

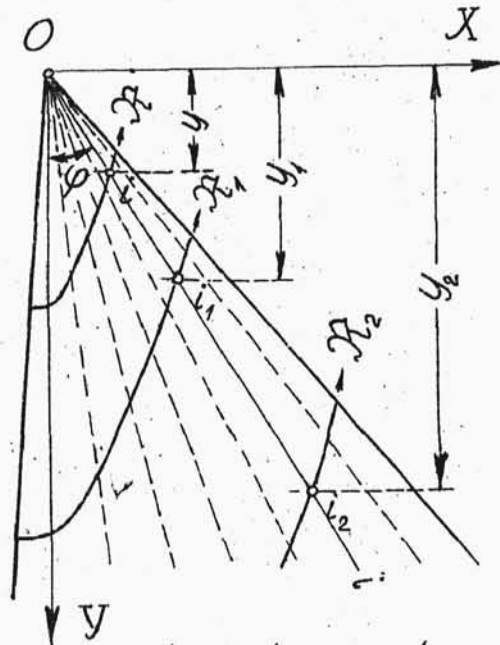
wtedy możemy napisać

$$\sigma_x = \sigma'_x \cdot y ; \quad \sigma_y = \sigma'_y \cdot y ; \quad \tau = \tau' \cdot y ;$$

a równanie

$$\sigma_{max} = \mathcal{R} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau^2} ;$$

Linie jednak. naprężeń σ_{max}
przy zbiorn. pełnym



$$\operatorname{tg} \varphi = k; \quad x = k \cdot y;$$

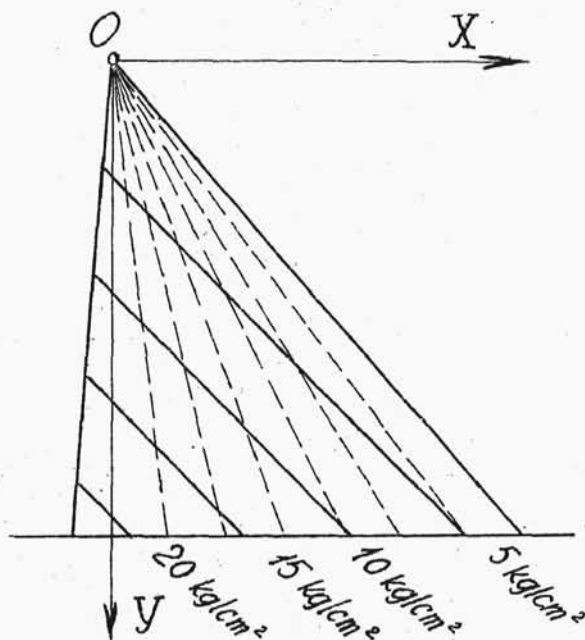
rys. 108.

przybierze postać

$$y = \frac{\mathcal{R}}{\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma'_x - \sigma'_y)^2 + 4 \cdot \tau'^2}};$$

Otrzymujemy więc na danej prostej Ol punkt na głębokości y , określonej powyższem równaniem, w którym to punkcie $\sigma_{max} = \mathcal{R}$. Przeprowadzając podobny rachunek dla szeregu prostych o różnych k , otrzymujemy odpowiadające im σ'_x σ'_y τ' oraz rzędne y .

Linje jednak. naprężeń σ_{max}
przy zbiorn. pustym



rys. 109.

Łącząc otrzymane punkty, dostajemy linję jednakowych naprężeń $\sigma_{max} = \mathcal{R}$.

Inne linje dla innych naprężeń $\sigma_{max} = \mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_3, \dots$ wyznaczamy na podstawie linjowego wzrastania wszelkich wielkości związanych z siłami zewnętrznymi / o czem była mowa na samym początku rozdziału o obliczaniu zapór metodą Pigeaud'a /. Wyrazi się to

w następujących formułach (rys.108):

$$O i : O i_1 : O i_2 : \dots = \mathcal{R} : \mathcal{R}_1 : \mathcal{R}_2 : \dots = y : y_1 : y_2 : \dots$$

Obliczywszy więc rzędne dla linii $\mathcal{R} = 5 \text{ kg/cm}^2$ i mnożąc te rzędne kolejno przez 2, 3, 4, 5... otrzymamy linie jednakowych naprężeń ściskających odpowiednio: 10, 15, 20, 25 ... kg/cm^2 .

Zupełnie taksamo postępujemy, chcąc znaleźć linie jednakowych naprężeń tnących efektywnych

$\tau_{ef. max} = \mathcal{R}_t$, przyczem korzystamy ze wzoru

$$y = \frac{2 \cdot \mathcal{R}_t \cdot \cos \vartheta}{\sqrt{(\sigma'_x - \sigma'_y)^2 + 4 \cdot \tau'^2} - (\sigma'_x + \sigma'_y) \cdot \sin \vartheta};$$

Zdarza się, że w pewnej części przekroju zapory otrzymujemy $\tau_{ef. max} < 0$ / rys.112/. Jest to możliwe, gdy ujemnie działający opór tarcia przewyższa naprężenie tnące teoretycznie obliczone. W partji takiej nie podlegają sprawdzeniu naprężenia ścinające. Przestrzeń, w której $\tau_{ef. max} < 0$, ograniczają proste, na których $\tau_{ef. max} = 0$; z warunku tego wyznaczamy k odpowiadające granicznym prostym.

Linie kierunków działania największych naprężeń.

Kierunki działania σ_{max} wyznacza równanie

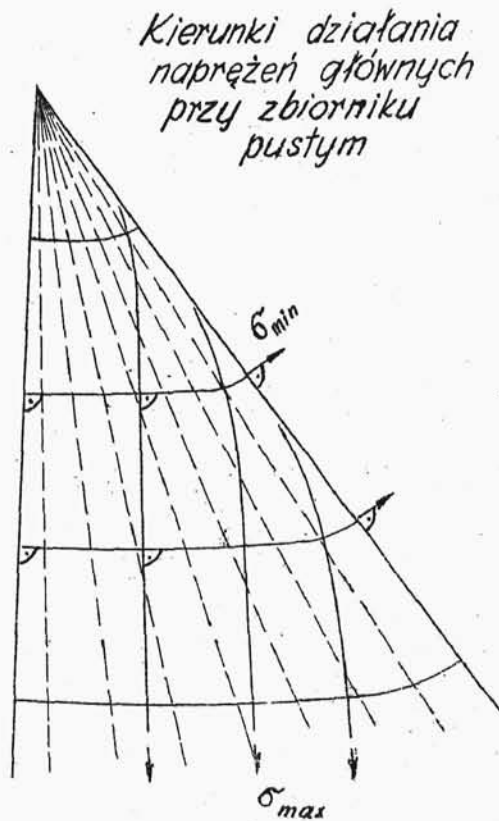
$$\text{tg } \Phi = \frac{(\sigma_y - \sigma_x) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \tau^2}}{2 \tau};$$

linie działania σ_{min} są do powyższych prostopadłe.

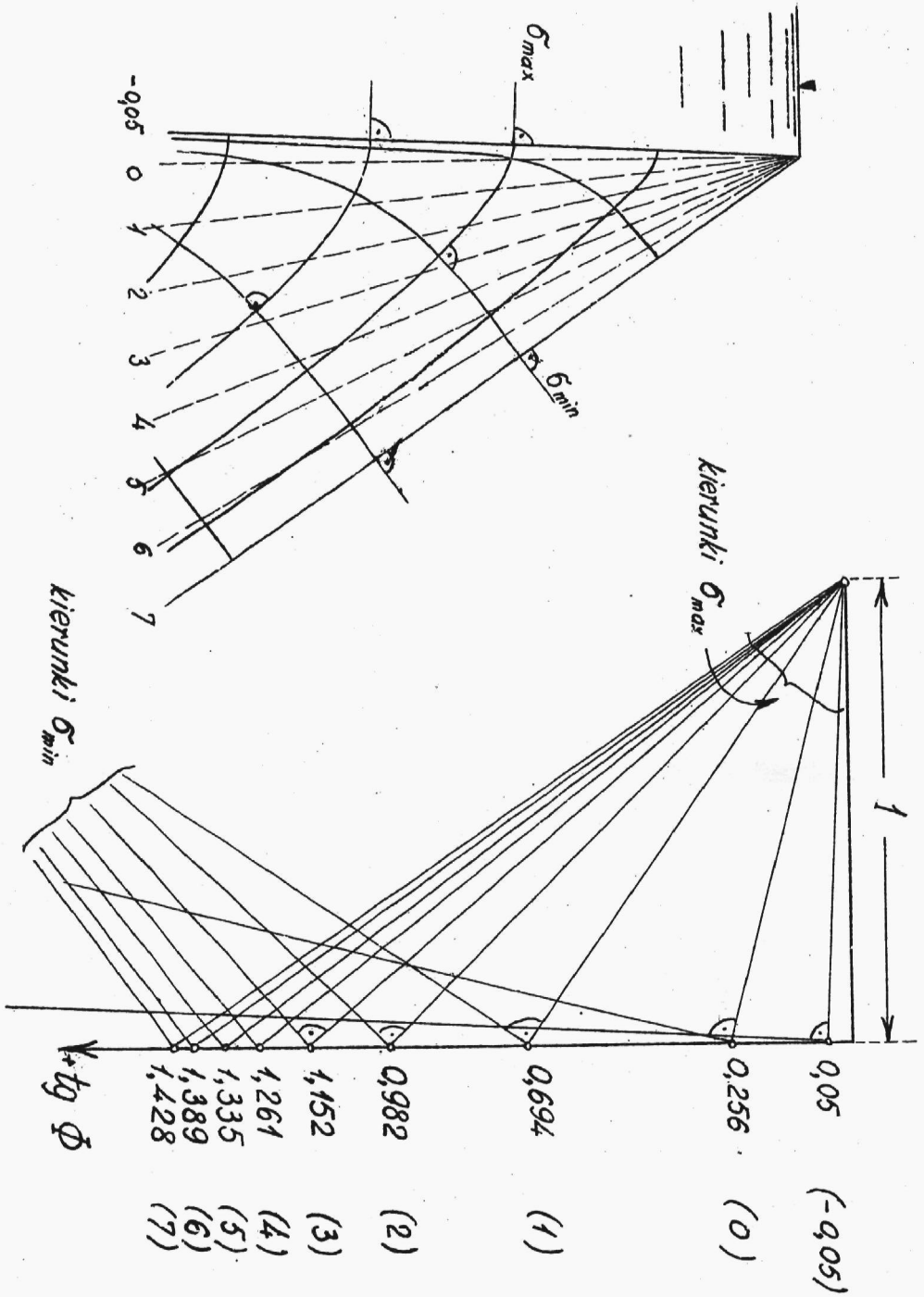
Dla każdej prostej Oi określamy kierunek działania σ_{max} przy pomocy wzoru analogicznego do powyższego

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{(\sigma_y' - \sigma_x') + \sqrt{(\sigma_x' - \sigma_y')^2 + 4 \cdot \tau'^2}}{2 \cdot \tau'} ;$$

Sposób wykreślenia przedstawia rys.111. Na rys.110 podany jest wykres kierunków działania naprężeń głównych przy zbiorniku pustym.



rys.110.



rys.III.

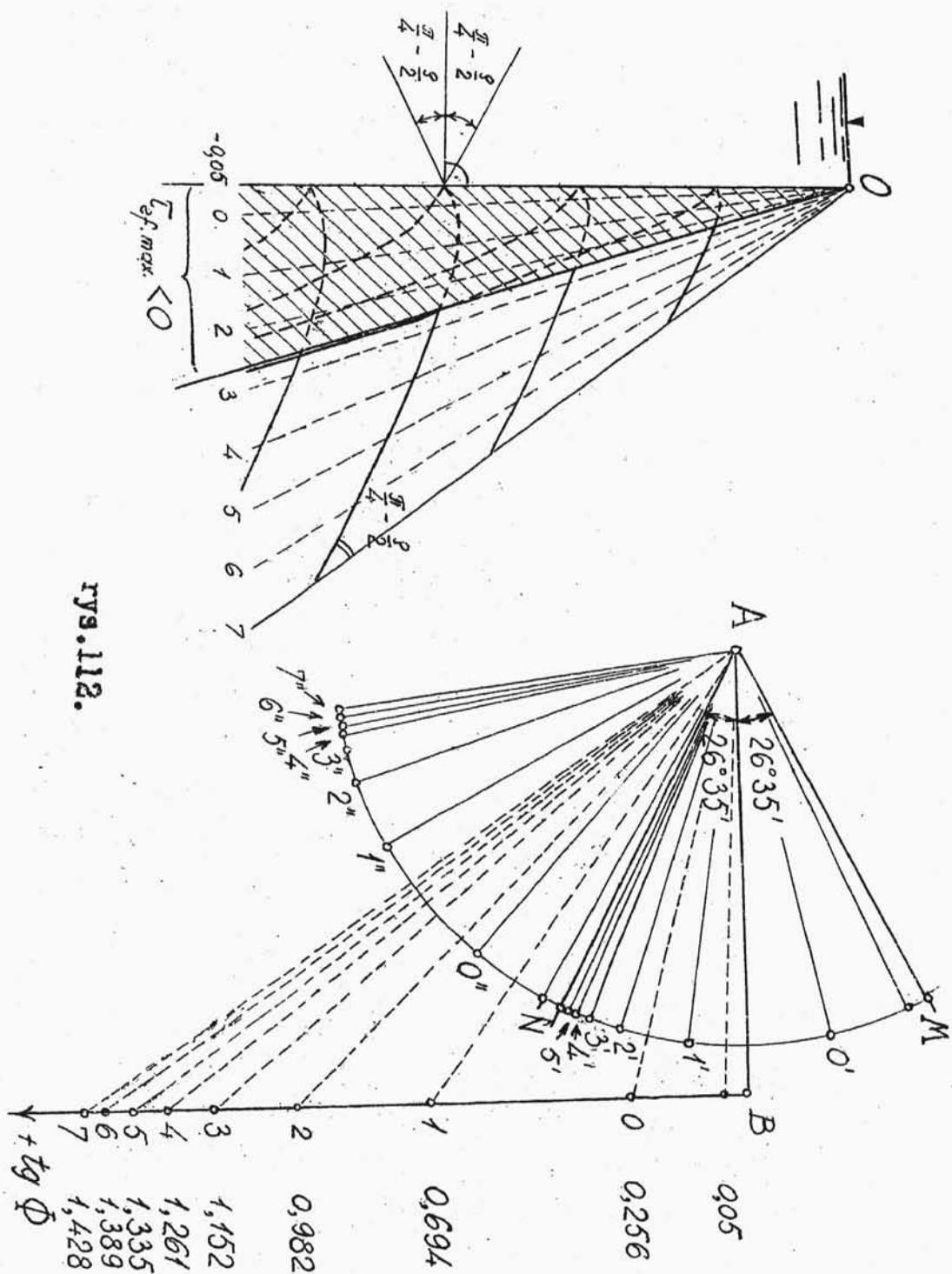
Kierunki działania największych sił tnących efektywnych wyznacza się jednocześnie z linjami działania σ_{max} i σ_{min} . Sposób wykreślenia podany jest jednak na osobnym rys.112, aby nie gmatwać rysunku.

Wyznaczenie tych kierunków jest łatwe, pamiętając, że są one odchylone o $\pm(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$ od kierunku działania σ_{max} t.zn., że na prostych $O1, O2, O3...$ wyznacza się kierunki równoległe do $A1', A2', A3'...$ oraz $A1'', A2'', A3''...$ przyczem $\angle MA1' = \angle BA1$; $\angle MA2' = \angle BA2$; $\angle MA3' = \angle BA3$... zaś AM i AN tworzą z poziomą AB kąt $(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}) = 26^{\circ}25'$.

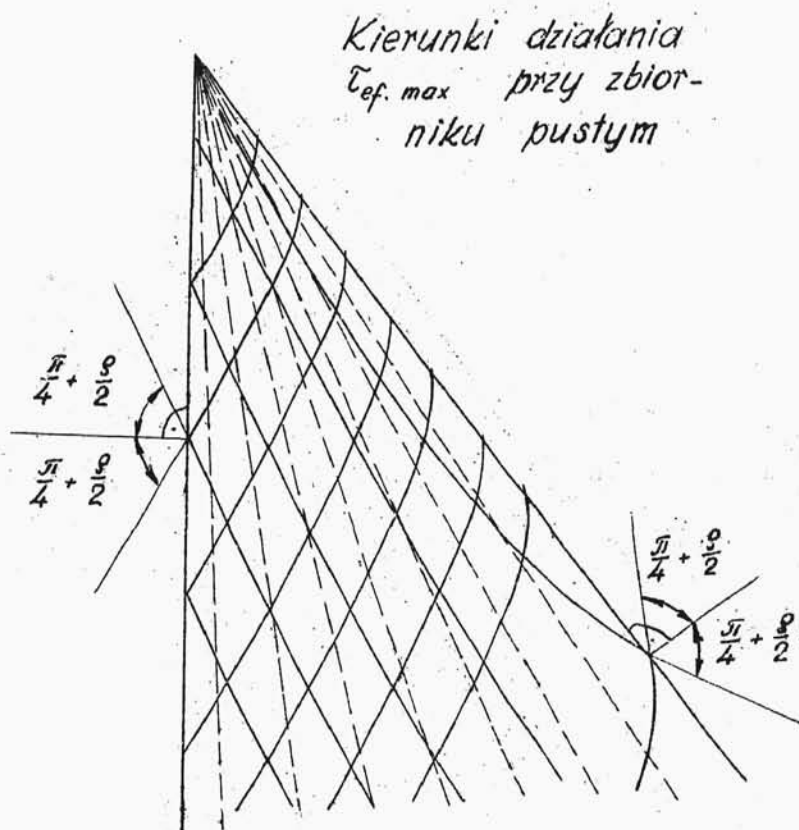
Na rys.113 pokazane są kierunki działania $\tau_{ef, max}$ przy zbiorniku pustym. Ponieważ kierunki działania σ_{min} przy zbiorniku pustym są na obu krawędziach prostopadłe do ścian zapory /rys.110/, więc kierunki $\tau_{ef, max}$ odchylone są na tych krawędziach o kąt $(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}) = 63^{\circ}25'$ od normalnej do ściany zapory, tak bowiem kąt tworzą kierunki działania σ_{min} i $\tau_{ef, max}$ / porów.rys.107/.

Pochylenie ścian zapory.

Warunek Lévy'ego wyraża się równaniem $\frac{\sigma_{max}}{\gamma \cdot y} = \Theta$; przyczem $\Theta \geq 1$, a σ_{max} odnosi się do krawędzi od strony wody przy zbiorniku pełnym. Podstawiając odpowiednie wyrażenie na σ_{max} / patrz ustęp " Formuły prak-



rys. 112.



rys.113.

tyczne" / dochodzimy do równania wiążącego nachylenia ścian zapory ze współczynnikiem wyporu:

$$\gamma_0 \cdot (1+n^2) \cdot (m+n) - \gamma \cdot (1-m \cdot n)^2 - \Theta \cdot \gamma \cdot (m+n)^2 = 0;$$

Zwykle n obieramy = 0, 0,05, 0,1 ; wielkość Θ wynika z warunków hydrogeologicznych w podłożu.

Dla większych zapór przeważnie $n = 0,05$ i wtedy przy $\gamma_0 = 2,3 \text{ t/m}^3$; $\gamma = 1 \text{ t/m}^3$ wypadają następujące nachylenia ściany od strony powietrza:

dla $\Theta = 0,0$	wypada $m = 0,614$
$\Theta = 0,333$	" $m = 0,668$
$\Theta = 0,5$	" $m = 0,700$
$\Theta = 0,666$	" $m = 0,739$
$\Theta = 1,0$	" $m = 0,834$
$\Theta = 1,3$	" $m = 0,950$

Powyższe zestawienie pozwala wyznaczyć największą możliwą wysokość zapory dla różnych dopuszczalnych naprężeń ściskających / $\gamma_0 = 2,3 \text{ t/m}^3$ /:

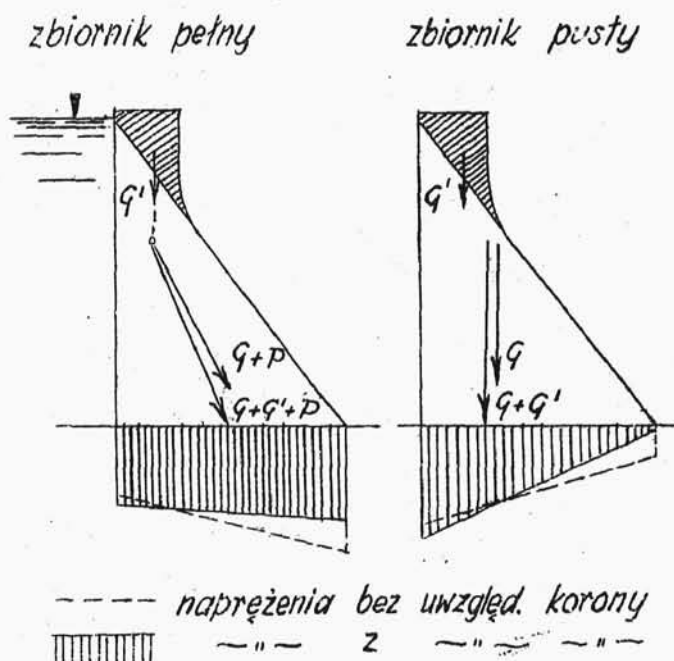
Θ	m	Dopuszczalny nacisk [kg/cm ²]					Uwagi.
		10	15	20	25	30	
		Największe wysok. zapory [m]					
0,0	0,614	30	46	61	76	92	dla $\Theta \leq 1$ σ_{max} występuje na krawędzi od str. powietrza przy zbiorn. pełnym
0,333	0,668	33	50	67	84	101	
0,5	0,700	36	54	72	90	107	
0,666	0,739	38	57	76	95	114	
1,0	0,834	43	65	87	108	130	
1,3	0,950	45	68	91	114	137	dla $\Theta > 1$ σ_{max} występuje przy zbiorn. pust. i od str. wody

Wpływ ciężaru korony zapory.

Wpływ ciężaru korony uwzględnia się tylko w górnych przekrojach /szczególnie przy wysokich zaporach/ tam on bowiem jest pokaźny.

Dla zbiornika pełnego wpływ ciężaru korony jest

korzystny, linia ciśnień przesuwana się ku środkowi /rys.114/, natomiast dla zbiornika pustego - niekorzystny, linia ciśnień przesuwana się ku krawędzi, naprężenia z tej strony wzrastają.



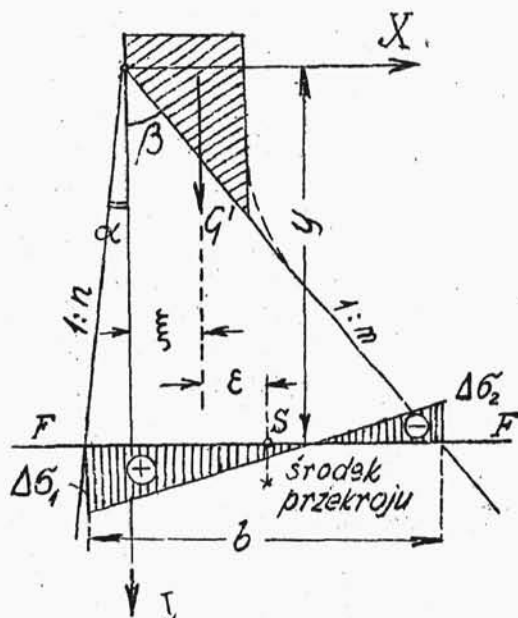
rys.114.

Przy wykreślnem obliczaniu zapory dodatkowy ciężar Q' zostaje odrazu uwzględniony przy określaniu wielkości Q_1, Q_2, Q_3, \dots /porów. odpow. ustęp/.

Obliczając zaporę analitycznie, wpływ ciężaru korony /zwykle tylko przy zbiorniku pustym/ określa się osobno po dokonaniu właściwych obliczeń.

Według oznaczeń na rys.115 mimośród ε siły Q' w dowolnej płaszczyźnie poziomej FF wyniesie

$$\varepsilon = \frac{m-n}{2} \cdot y - \xi ;$$



rys.115.

Ostatecznie:

$$\Delta\tilde{\sigma}_{1,2} = \frac{G'}{(m+n) \cdot y} \pm \frac{6 \cdot G' \cdot \left(\frac{m-n}{2} \cdot y - \xi \right)}{(m+n)^2 \cdot y^2};$$

Naprężenia główne dodatkowe:

od strony wody $\Delta\tilde{\sigma}_{1, \max} = \Delta\tilde{\sigma}_1 \cdot (1+n^2);$

od strony powietrza $\Delta\tilde{\sigma}_{2, \max} = \Delta\tilde{\sigma}_2 \cdot (1+m^2);$

Przebieg obliczeń zapory ciężkiej.

1. Przedewszystkiem ustala się nachylenie od strony wody. Jeśli wysokość zapory nie przekracza 40...

Naprężenia dodatkowe
na krawędziach

$$\Delta\tilde{\sigma}_{1,2} = \frac{G'}{A} \pm \frac{G' \cdot \varepsilon}{W};$$

przyczem powierzchnia
przekroju

$$A = b \cdot t = y \cdot (m+n);$$

a jej wskaźnik wytrzyma-
łości

$$W = \frac{1 \cdot b^2}{6} = \frac{y^2 \cdot (m+n)^2}{6};$$

znak (+) odnosi się do $\Delta\tilde{\sigma}_1$

" (-) " " " $\Delta\tilde{\sigma}_2$

... 60 m , ściana od strony wody może być pionowa, co odpowiada minimum kubatury muru. Większe zapory mają łagodne nachylenie od strony wody: zwykle 1 : 20 / $n=0,05$ / czasem więcej 1 : 10 / $n=0,1$ /.

2. Z warunków fundowania zakłada się wartość współczynnika wyporu $\Theta = \frac{\sigma_{max}}{\gamma \cdot H}$; współczynnik ten można zmniejszyć przez odpowiednie uszczelnienie gruntu pod zaporą. Wielkości Θ według przepisów włoskich podaje poniższa tabelka.

Współczynnik Θ .

Wysokość zapory	Warunki fundowania :		
	<u>b. dobre</u>	<u>dobre</u>	<u>przeciętne</u>
	skała b. zwarta nieprzepuszcz.	skała mniej zwarta lecz nieprzepuszcz.	skała spękana
do 25 m.	0	$\frac{1}{3}$	1
od 25 do 50 m.	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1
ponad 50 m	$\frac{1}{2}$	1	1

3. Mając już n i Θ określamy nachylenie m krawędzi od strony powietrza przy pomocy równania, wiążącego powyższe trzy wielkości.

4. Oblicza się naprężenia główne / σ_{max} σ_{min} $\tau_{ef. max}$ przede wszystkim w stopie fundamentu przy zbiorniku pełnym i pustym.
5. Oblicza się i wykreśla linie izostatyczne /też przy zbiorniku pełnym i pustym/.
6. Wykreśla się linie kierunków działania jednakowych naprężeń maksymalnych.
7. Wreszcie w kilku górnych przekrojach /zapór wysokich/ lub we wszystkich /zapór niskich/ sprawdza się wpływ ciężaru korony / tylko dla zbiornika pustego/.

W toku obliczeń należy mieć na uwadze warunki podane na początku niniejszego rozdziału, a dotyczące nieprzekraczania dopuszczalnych naprężeń i niedoprowadzania do naprężeń wyciągających.

P r z y k ł a d l i c z b o w y.

Obliczenie zapory betonowej / $\gamma_c = 2300 \text{ kg/m}^3$ / o wysokości $H = 90 \text{ m}$. Dopuszczalne naprężenia $\sigma_{dop} = 25 \text{ kg/cm}^2$ oraz $\tau_{ef. dop.} = \frac{1}{4} \cdot \sigma_{dop.} = 6,25 \text{ kg/cm}^2$ przyczem zawsze $\sigma > 0$ /rozciąganie niedopuszczalne/.

Współczynnik wyporu $\phi = 0,5$ oznaczono po dokonaniu badań hydrogeologicznych podłoża. Pozatem przy-