

od strony wody: $\sigma_1 + (-\Delta\sigma_1)$; poprostu: $\sigma_1 - \Delta\sigma_1$;

od strony powietrza: $\sigma_2 + (+\Delta\sigma_2)$; poprostu: $\sigma_2 + \Delta\sigma_2$;

Wpływ wyporu na wielkość naprężeń tnących określa przyrost

$$\Delta\tau = \Delta\sigma_2' \cdot \operatorname{tg} \beta = m \cdot \Delta\sigma_2' ;$$

odniesiony tylko do pola A' ; zatem

$$\Delta\sigma_2' = \left/ \frac{U_1 + U_2}{A'} - \frac{U_1 \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{d_1}{3}\right) + U_2 \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{d_3}{3}\right)}{W'} \right/ ;$$

Ostatecznie, uwzględniając wypór, naprężenia tnące wyniosą $\tau + \Delta\tau$.

P r z y k ł a d l i c z b o w y .

Jako przykład obliczenia zapory ciężkiej wewnątrz pustej podane są niektóre rezultaty rachunku statyczno-wytrzymałościowego zapory na Gelmersee /Szwajcaria/, projektowanej przez ś.p. Prezydenta Rzposp. Polskiej Gabryela Narutowicza /rys.116/.

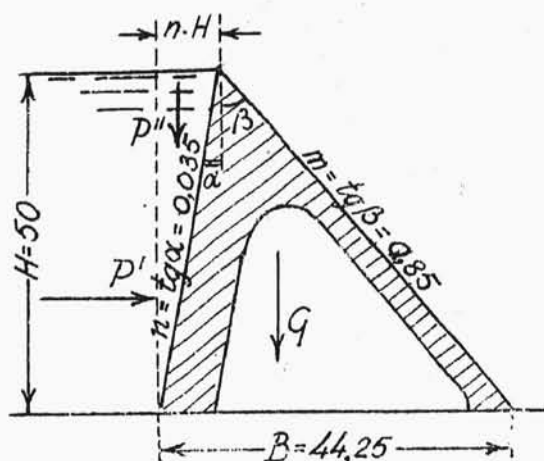
Ciężar zapory 50 m wysokiej określony został z równania równowagi /bez uwzględniania wyporu i ciężaru korony/, /rys.123/:

$$\frac{P'}{G + P''} = \operatorname{tg} \varphi$$

$\operatorname{tg} \varphi$ przyjęto = 0,7 ;

zatem ciężar zapory wynosi

$$G = \frac{P'}{\operatorname{tg} \varphi} - P'' = \frac{\gamma \cdot H^2}{2 \operatorname{tg} \varphi} - \gamma \cdot \frac{n \cdot H^2}{2} = \frac{1 \cdot 50^2}{2 \cdot 0,7} - 1 \cdot \frac{0,035 \cdot 50^2}{2};$$



rys. 123.

$G = 1746$ t/mb długości zapory, albo, odnosząc to na jednostkę obliczeniową t.zn. na długość odcinka = osiowemu odstępowi pustych przestrzeni, który wynosi 12,5 m /rys.116 i 125/, wypada

$$G_0 = 1746 \cdot 12,5 = 21\,800 \text{ t}$$

Ciężar właściwy muru ustalono na $\gamma_0 = 2,4$ t/m³, zatem kubatura muru wypada

$$Q = \frac{G_0}{\gamma_0} = \frac{21800}{2,4} = 9100 \text{ m}^3;$$

Gdyby zapora była pełna miałyby objętość

$$\frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot 12,5 = \frac{1}{2} \cdot 44,25 \cdot 50 \cdot 12,5 = 13\,830 \text{ m}^3$$

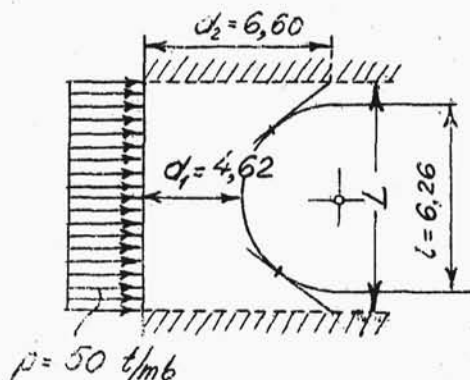
zatem przestrzenie puste zajmują 34 %.

Obliczenie ściany przedniej przedstawia się następująco.

Dla przekroju najniższego /w poziomie dna doliny/ (rys. 124) dane są następujące wielkości:

$$L = 1,05 \cdot \bar{l} = 1,05 \cdot 6,26 = 6,57 \text{ m.}$$

$$k = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3 = \left(\frac{4,62}{6,60} \right)^3 = 0,343 ;$$



rys. 124.

Obliczamy naprężenia:

$$\sigma = 0,165 \cdot \frac{3 \cdot k + 2}{k + 2} \cdot p \cdot \left(\frac{l}{d_1} \right)^2 = 19,5 \text{ t/m}^2 = 1,95 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_o = 0,165 \cdot \left(5 - \frac{3 \cdot k + 2}{k + 2} \right) \cdot p \cdot \left(\frac{l}{d_2} \right)^2 = 27,5 \text{ t/m}^2 = 2,75 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{recz.}} = 1,25 \cdot \sigma = 1,25 \cdot 1,95 = 2,34 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_o \text{ recz.} = 0,9 \cdot \sigma_o = 0,9 \cdot 2,75 = 2,48 \text{ kg/cm}^2$$

Oba te naprężenia nie przekraczają dopuszczalnej granicy, którą dla betonu, stosowanego w Gelmersee, określono na $\sigma_{g. \text{ dop.}} = 3 \text{ kg/cm}^2$.

W przesłach dylatacyjnych ściana, liczona jako wspornik, w najniższym przekroju otrzymała wymiary jak na rys. 120, a naprężenia wypadły następujące:

$$\sigma = \frac{M_F}{W_F} = \frac{\frac{p \cdot c^2}{2}}{\frac{d^3}{6}} = \frac{\frac{50 \cdot 3,13^2}{2}}{\frac{7^3}{6}} = 30 \text{ t/m}^2 = 3 \text{ kg/cm}^2$$

tutaj naprężenie osiągnęło najwyższą dopuszczalną wartość $\sigma_{g. dop.}$.

$$\tau = \frac{T}{A_F} = \frac{p \cdot c}{d} = \frac{50 \cdot 3,13}{7} = 22,4 \text{ t/m}^2 = 2,24 \text{ kg/cm}^2$$

Dopuszczalne naprężenie ścinające przy zginaniu ustalono na $\tau_{dop} = 2,2 \text{ kg/cm}^2$.

Wymiar w kluczu takisam, jak w pozostałych przęsłach.

Przebieg linii ciśnień wyznaczono na podstawie znalezionych mimośrodków ε w szeregu przekrojów poziomych:

$$\varepsilon = \frac{\sum M}{\sum N};$$

Dla przekroju na poziomie stopy fundamentu mamy

$\sum M = 89\,362 \text{ tm}$ oraz $\sum N = 22\,546 \text{ t}$, więc

$$\varepsilon = \frac{89\,362}{22\,546} = 3,92 \text{ m}$$

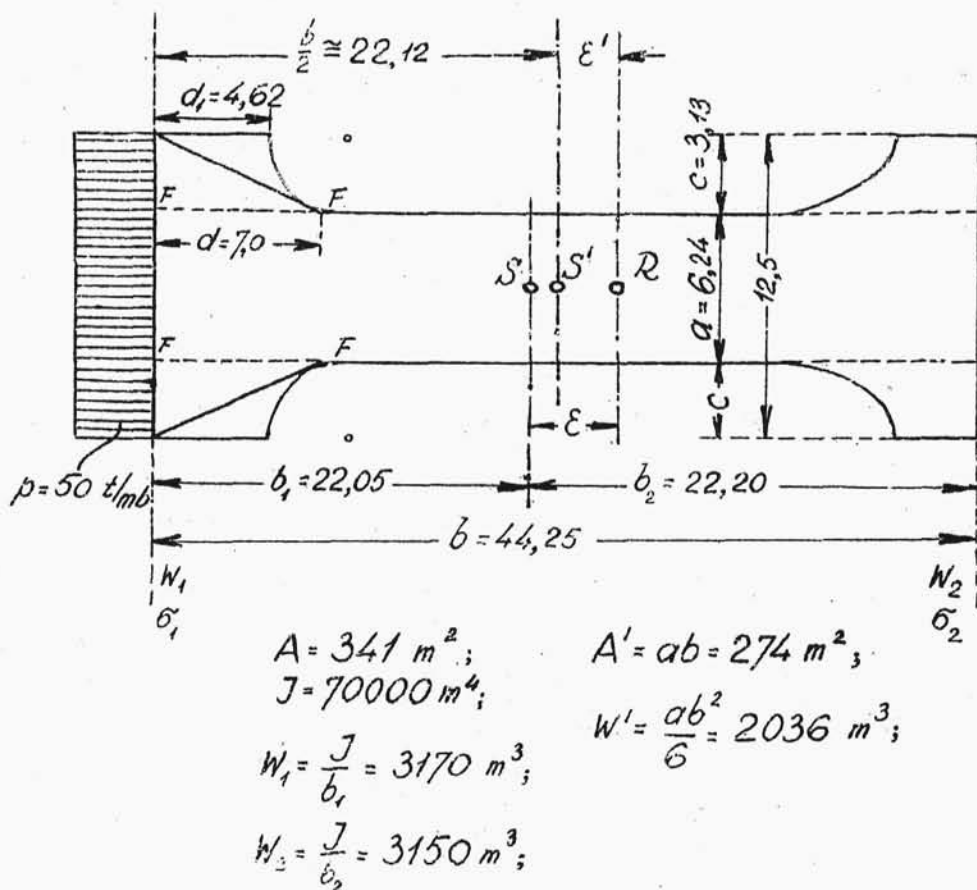
Naprężenia normalne dla zbiornika pełnego wynoszą /wymiary i pewne wielkości podano na rys. 125/:

od strony wody -

$$\sigma_1 = \frac{\sum N}{A} - \frac{\sum N \cdot \varepsilon}{W_1} = \frac{22\,546}{341} - \frac{22\,546 \cdot 3,92}{3170} = 42 \text{ t/m}^2 = 4,2 \text{ kg/cm}^2$$

od strony powietrza -

$$\sigma_2 = \frac{\sum N}{A} + \frac{\sum N \cdot \varepsilon}{W_2} = \frac{22\,546}{341} + \frac{22\,546 \cdot 3,92}{3150} = 91 \text{ t/m}^2 = 9,1 \text{ kg/cm}^2$$



rys. 125.

Największe naprężenia na krawędzi:
od strony powietrza:

$$\sigma_{\max} = (1 + m^2) \cdot \sigma_2 = (1 + 0,85^2) \cdot 9,1 = 15,7 \text{ kg/cm}^2$$

$\sigma_{\text{dop.}}$ w zaporze Gelmersee ustalono na 25 kg/cm^2 .

Obliczenie naprężeń tnących wymaga ustalenia
wpierw wielkości ϵ' , σ_2' i σ_{\max}' /znajdujemy tylko
 σ_2' - na krawędzi od strony powietrza, bo tam wystą-
pią największe naprężenia przy zbiorniku pełnym/

$$\varepsilon' = b_1 + \varepsilon - \frac{b}{2} = 22,05 + 3,52 - 22,12 = 3,45 \text{ m.}$$

$$\sigma_2' = \frac{\sum N}{A'} + \frac{\sum N \cdot \varepsilon'}{W'} = \frac{22546}{274} + \frac{22546 \cdot 3,45}{2036} = 120 \text{ t/m}^2 = 12 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{max}' = (1 + m^2) \cdot \sigma_2' = (1 + 0,85^2) \cdot 12 = 20,7 \text{ kg/cm}^2$$

Napężenia tnące:

$$\tau = m \cdot \sigma_2' = 0,85 \cdot 12 = 10,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{max}' = \frac{1}{2} \cdot 20,7 = 10,4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{jak widać} \quad \tau_{max} < \tau_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{2} = 12,5 \text{ kg/cm}^2$$

Okazuje się, że $\tau \cong \tau_{max}$, co wynika wskutek tego, że płaszczyzna główna, w której występuje τ_{max} , jest nachylona pod $\alpha 45^\circ$ do tylnej powierzchni zapory, jest więc niemal pozioma, bo $\beta \cong 41^\circ$ /a właśnie w płaszczyźnie poziomej działają napężenia τ /.

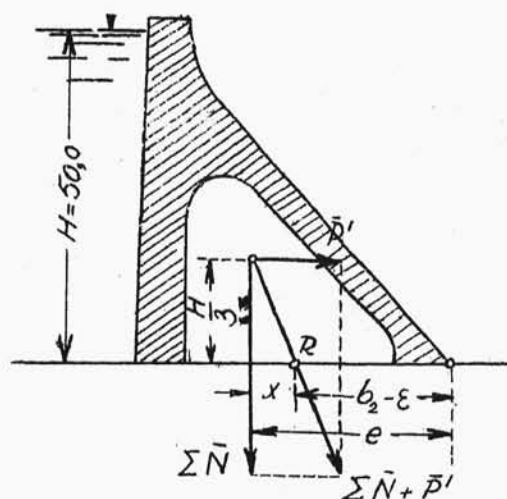
Pewność przeciw wywróceniu się zapory koło krawędzi od strony powietrza /rys.126/ bez uwzględniania wyporu wynosi

$$n = \frac{\sum N \cdot e}{p' \cdot \frac{H}{3}};$$

$$\sum N = 22546 \text{ t}$$

$$p' = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} \cdot (a + l) = 15625 \text{ t} \text{ liczone na długość}$$

odcinka, odpowiadającego osiowemu odstępowi przestrzeni pustych: $a + l = 12,5 \text{ m.}$



rys. 126.

dalej: $e = b_2 - \varepsilon + x$;

$$x = \frac{H}{3} \cdot \frac{P'}{\Sigma \bar{N}} = 11,53 \text{ m}$$

/widoczne z rys.126/, więc

$$e = 22,2 - 3,52 + 11,53 = 30,21 \text{ m}$$

Ostatecznie

$$\kappa = \frac{22546 \cdot 30,21}{15625 \cdot \frac{50}{3}} = 2,62 > \min \kappa = 2 ;$$

Zabezpieczenie od poślizgu jest również dostateczne: $\frac{P'}{\Sigma \bar{N}} = \frac{15625}{22546} = 0,692 < \tan \varphi = 0,7$;

Wpływ wyporu /rys.127, porów. także rys.122/.
"Zasięg" wyporu pod filarem przyjęto $d_3 = 7,75 \text{ m}$.

od strony powietrza

$$\sigma_2 + \Delta\sigma_2 = 9,1 + 0,65 = 9,75 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{max} = (1+m^2) \cdot (\sigma_2 + \Delta\sigma_2) = 16,8 \text{ kg/cm}^2$$

Jak widać, naprężenia od strony wody są jeszcze dodatnie, a największe naprężenie od strony powietrza nie przekracza granic dopuszczalnych.

Wskutek uwzględnienia wyporu zmieniają się też naprężenia tnące:

$$\Delta\sigma'_2 = \left| \frac{U_1 + U_2}{A'} - \frac{U_1 \cdot u_1 + U_2 \cdot u_2}{W'} \right| = +11,9 \text{ t/m}^2 = 1,19 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta\sigma'_{max} = (1+m^2) \cdot \Delta\sigma'_2 = (1+0,85^2) \cdot 1,19 = 2,05 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta\tau = m \cdot \Delta\sigma'_2 = 0,85 \cdot 1,19 = 1,0 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta\tau_{max} = \frac{1}{2} \cdot \Delta\sigma'_{max} = \frac{2,05}{2} \approx 1,02 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau + \Delta\tau = 10,2 + 1,0 = 11,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{max} + \Delta\tau_{max} = 10,4 + 1,02 = 10,42 \text{ kg/cm}^2 < \tau_{dop}$$

Gdy wypór będzie uwzględniony, zmniejszy się stateczność zapory /pewność przeciw wywróceniu się i poślizgowi/:

$$\kappa = \frac{\sum N \cdot e}{P' \cdot \frac{H}{3} + U_1 \cdot (b - \frac{d_1}{3}) + U_2 \cdot (\ell - \frac{d_3}{3})} = 2 = \min \kappa ;$$

Zabezpieczenie od poślizgu:

$$\frac{P'}{\sum N - (U_1 + U_2)} = \frac{15625}{22546 - (724 + 1210)} = 0,754 > \text{tg } \varphi !$$

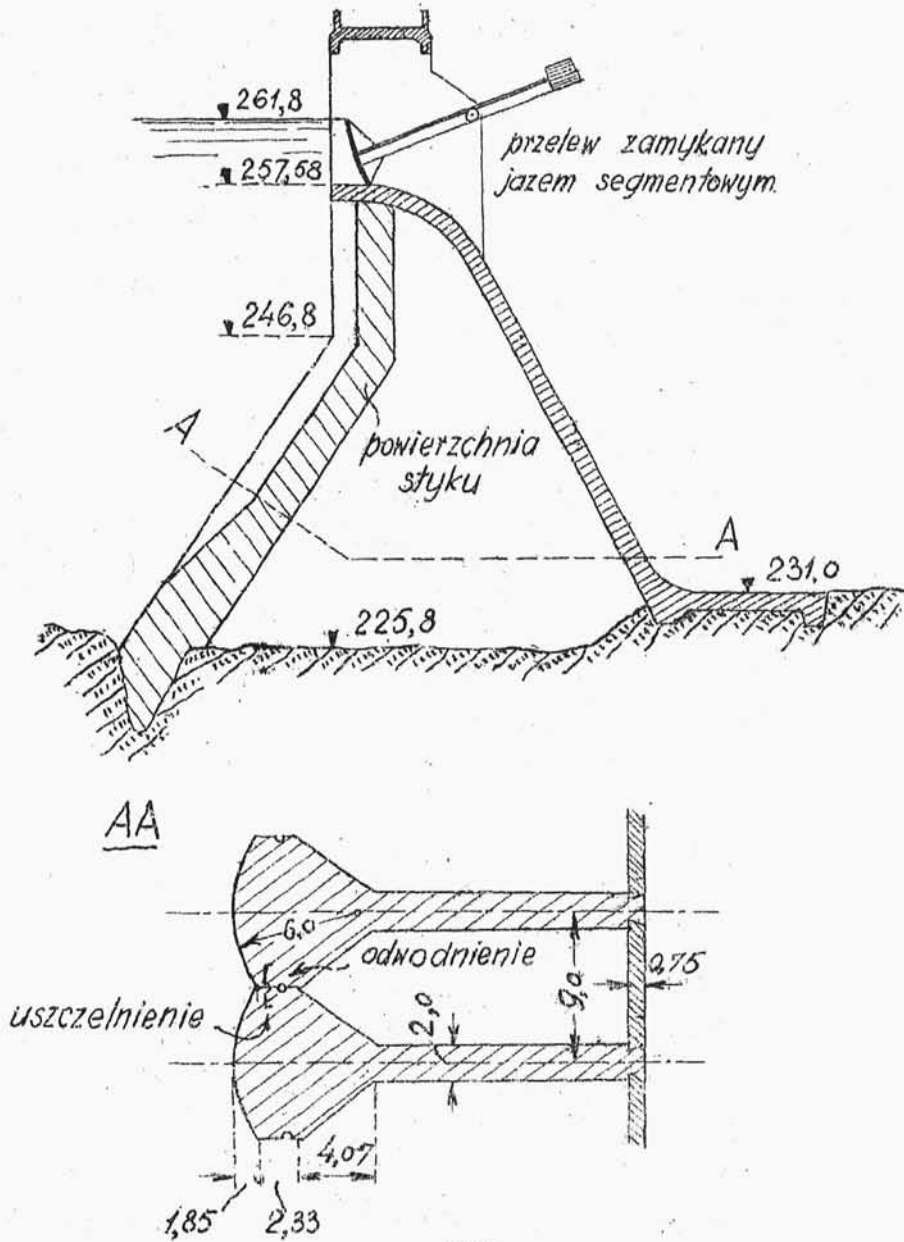
Tak duża wartość została dopuszczona w zaprze Gelmersee z uwagi na małe prawdopodobieństwo powstania wyporu /skała zbita i szczelna/ oraz należyte posadowienie zapory /stopa fundamentu zazębiona/.

T y p a m e r y k a ń s k i
z a p o r y w e w n ą t r z p u s t e j .

Zapory wewnątrz puste, których budowa została zaprojektowana w Ameryce, odbiegają swoją konstrukcją od poprzedniego wzoru. Opierają się one na zasadzie, wspomnianej już przy omawianiu sposobu obliczania ściany przedniej zapory wewnątrz pustej. Mianowicie stanowią one cały szereg filarów z poszerzeniami wzdłuż pionowych /lub pochyłych/ krawędzi od strony wody /rys.128/.

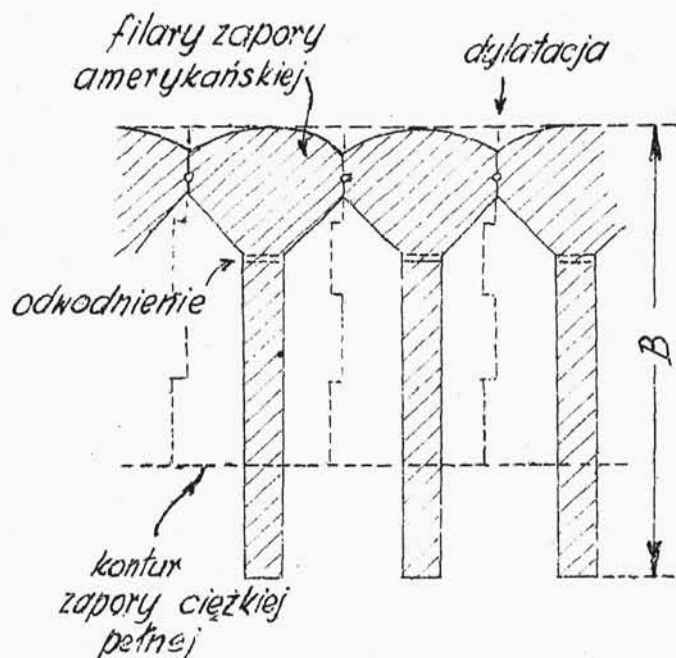
Filary są ustawione w takim odstępie, by ich zgrubione obrzeża stykały się ze sobą i - odpowiednio w miejscu styku uszczelnione - tworzyły nieprzerwaną /lecz nie monolityczną/ ścianę zapory, na którą bezpośrednio działa parcie wody. W ten sposób filary stanowią jakby pionowe wsporniki wprost obciążone parciem wody.

Don Martin (Meksyk)



rys. 128.

Dla dostatecznego zabezpieczenia się przeciwko poślizgowi filara, a pozatem, by zapora miała odpowiedni ciężar, potrzebna jest duża szerokość stopy filara, w przybliżeniu równa lub nawet większa od wysokości zapory. Rysunek 129 w sposób poglądowy przedstawia różnicę w wymiarach stopy fundamentu zapory ciężkiej i typu amerykańskiego tej samej wysokości.



rys.129.

Szerokość zapory ciężkiej pełnej /zależnie od przyjętego współczynnika wyporu/ wynosi naogół $0,7 \cdot H$
..... $0,8 \cdot H$, gdy tymczasem szerokość filarów /wymiar

poprzeczny zapory/ wypadła: $B = (0,9....1,0....1,5....) \cdot H$;
zależnie od kształtu i wymiaru samego poszerzenia
oraz od grubości filarów.

W przekroju poziomym głowice filarów są od czoła zaokrąglone, a przejście z poszerzonego przekroju do normalnej grubości filara wykonane jest przy pomocy skosów. W ten sposób parcie wody przenosi się radialnie na sam filar /niema więc zginania części głowicy, wystających z płaszczyzny dźwigara tak, jak to miało miejsce w ścianie projektowanej zapory Gelmersee w przedziale dylatacyjnym/.

Wypór, jak w zaporze Narutowicza, powstawać może tylko pod głowicami filarów. Rozkład wyporu pod filarami jest dotychczas niezbadany, dlatego też, chcąc wyeliminować z rachunku wszelkie założenia hypotetyczne, dające w ostatecznym wyniku bardzo wątpliwe rozwiązania, lepiej jest wykonać odwodnienie u spodu filarów, tuż za głowicami, w miejscu zakończenia skosów /rys.129/.

Zapory złożone z filarów mają jeszcze jedną zaletę: ponieważ filary są ze sobą zupełnie niepowiązane, więc zniszczenie jednego filara nie pociąga za sobą zawalenia się całej zapory, co jest cechą

charakterystyczną zapór na łukach wielokrotnych, o których będzie mowa w II części niniejszego skryptu.

Przebieg obliczenia jest identyczny do obliczenia zapory Gelmersee.

Przedewszystkiem należy zgóry założyć wymiary filara, w szczególności wielkość poszerzenia jego krawędzi od strony wody i grubości filara w pozostałej części.

Szerokość zapory B koryguje się na podstawie nierówności

$$\frac{P}{\sum N} \leq \operatorname{tg} \varphi ;$$

Ustaliwszy w formie ostatecznej wymiary filara, oblicza się naprężenia normalne i ścinające:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sum N}{A} \pm \frac{\sum N \cdot e}{W_{1,2}} ;$$

$$\tau_1 = -n \cdot \sigma_1 ;$$

$$\tau_2 = m \cdot \sigma_2 ;$$

dla zbiornika pełnego i pustego oraz największe naprężenia normalne

$$\sigma_{\max} = (1 + m^2) \cdot \sigma_2 ;$$

/krawędź od strony powietrza przy pełnym zbiorniku/
oraz

$$\sigma_{\max} = (1 + n^2) \cdot \sigma_1 ;$$

/krawędź od strony wody przy pustym zbiorniku/, zaś
największe naprężenia ścinające :

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max}}{2};$$

W Ameryce zapory tego typu nie posiadają płyty, przykrywającej filary od strony powietrza /rys.129/. Podana na rys.128 zaporą meksykańską w Don Martin posiada przykrycie z tego powodu, że na całej długości zapory /234 metry/ znajduje się przelew i przykrycie to potrzebne jest do łagodnego sprowadzenia wody z wysokości przeszło 26 m na dno doliny.

Zapora w Don Martin jest tylko częścią wielkiej, przeszło 1000 m długości grobli ziemnej przyczem stanowi, jak wspomniano, przelew w tej grobli. Krawędź filarów od strony wody jest w górnej części pionowa, niżej pochylona, by przez rozszerzenie podstawy współczynnik poślizgu $\tan \varphi$ /spółczynnik tarcia muru po skale/ doprowadzić do wartości dopuszczalnej. Szczegóły: Górnictwo i Budownictwo z 22. lutego 1930.

U w a g i k r y t y c z n e.

Należy podkreślić, że w zaporach wewnątrz pustych jest dobrze wykorzystany materiał /szczególnie w zaporze zaprojektowanej przez Narutowicza/, bardzo dobre chłodzenie betonowych bloków i wreszcie płaszczy-

zna działania wyporu jest zredukowana do nieznacznej powierzchni poziomego przekroju przedniej ściany /t.j. od strony wody/ zapory.

Z drugiej strony oszczędność na materiale jest stosunkowo nieznaczna, a koszt budowy zapory wewnątrz pustej - ze względu na skomplikowane rusztowanie i przewlekłe tempo roboty - jest daleko większy niż zapory ciężkiej, pełnej, o tejsamej kubaturze.

Dlatego zapory wewnątrz pustej nie opłaca się naogół budować, jakkolwiek system ten jest teoretycznie wskazany.

Z a p o r a z a ł a m a n a w p l a n i e .

Wykonanie zapory wewnątrz pustej w linii prostej /jak zaporą Gelmersee lub Don Martin /, jak wynika z powyższych uwag, nie stanowi wybitnego ulepszenia. Dlatego inżynier amerykański C.H.Howel zaprojektował zaporę wewnątrz pustą /złożoną z filarów o zgrubionem obrzeżu/ załamana w planie, jakby cofniętą w środku, składającą się niejako z dwóch zapór ustawionych do siebie pod kątem 90° /rys.130 i 131/.

Dzięki takiemu usytuowaniu korpus każdej z obu