

wpływ ciężaru sklepienia.

$$M_{q_1}'' = q_1'' \left(\frac{b}{2} - e_1 \right); \quad \text{/rys. 53/}$$

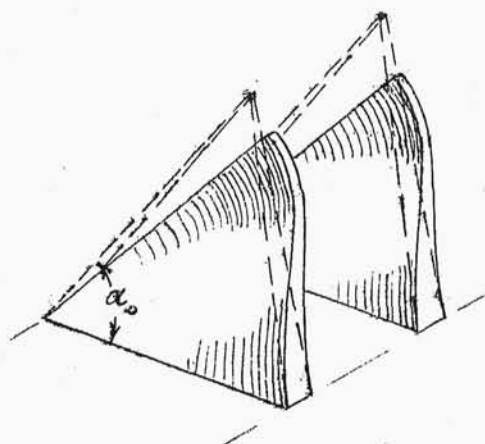
wpływ ciężaru korony i belek stężających

$$M_{q_2} = q_2 \left(\frac{b}{2} - e_2 \right); \quad \text{/rys. 54/}$$

Wyboczenie filarów.

Niebezpieczeństwo wyboczenia filarów bez wątplenia istnieje i to tym większe, im filar jest cieńszy i wyższy oraz im większe jest jego obciążenie. Matematyczne ujęcie tego zagadnienia napotyka jednak na nieprzezwyciężone trudności i nie zostało dotychczas podane w formie nadającej się do powszechnego stosowania, a przede wszystkim w formie opartej na przekonujących założeniach. Wyboczenie filara jest istotnie zjawiskiem bardzo złożonym, całkowicie swoistym, nie posiadającym sobie podobnego w całej dziedzinie statyki budowli.

Wyboczenie może nastąpić tylko w kierunku prostym do płaszczyzny symetrii filara. Ponieważ podstawa filara jest zamocowana w skale /często nawet zakotwiona/, więc jej odkształcenie jest



rys. 59.

niemożliwe. Również sztywny jest cały brzeg od strony wody, który jest złączony ze sklepieniami. Wynika z tego, że wskutek działania parcia wody odwodna ściana czołowa ma dążność

do pochylenia się, do zbliżenia się do podstawy filara /kąt α_0 maleje - rys. 59/, zwichrzając płaszczyznę filara w sposób najsilniejszy wzdłuż brzegu od strony powietrza.

Dopóki nie ma racjonalnego sposobu, przy pomocy którego możnaby sprawdzić zabezpieczenie przed wyboczeniem filara, należy kierować się praktyczną zasadą: filarów nie wykonywać zbyt cienkich, filary powiązać ze sobą w sposób należyty przy pomocy belek żelbetowych /a także przy pomocy mostu, przeźrzonego w koronie zapory/. Sklepienia są również konstrukcją usztywniającą filary, o ile są z nimi sztywno złączone. Niezależnie od tych środków, filary zapór wysokich otrzymują żebra pionowe lub ukośne /rys. 7, 12 i 21/, albo też stosuje się filary wewnątrz puste /rys. 18/.

Przebieg obliczenia filarów.

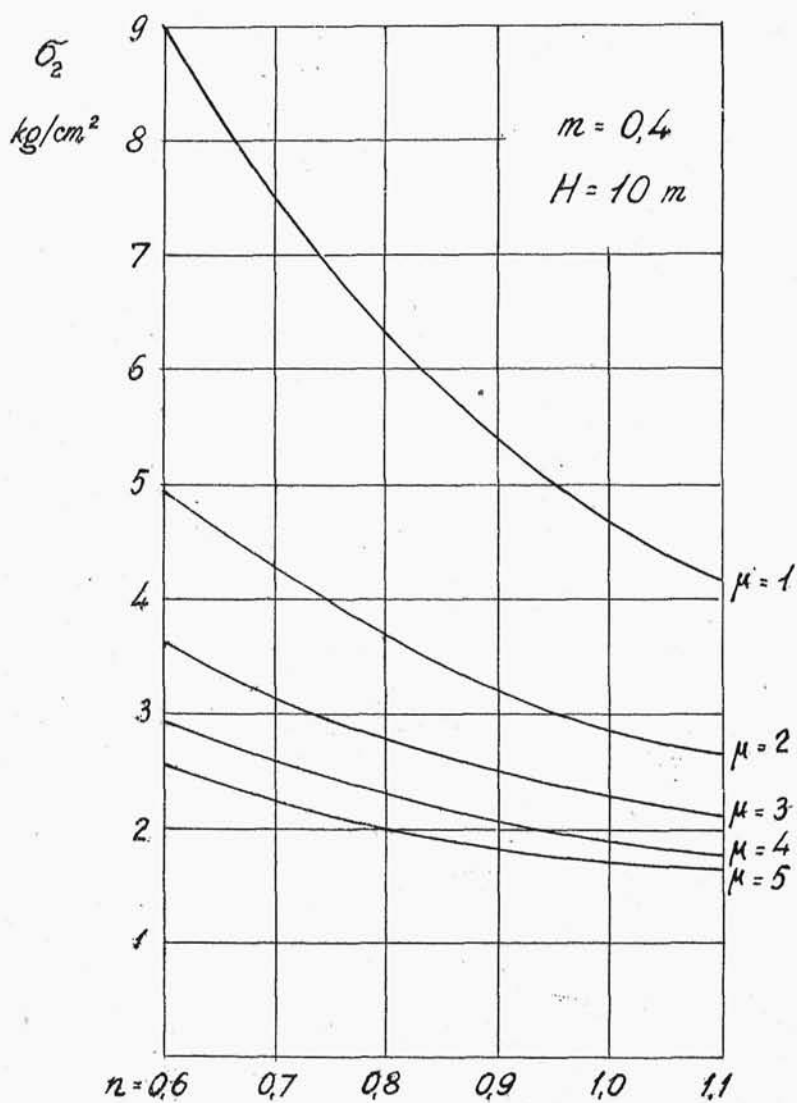
Obliczenia filara, jak powiedziano na wstępie, polega na znalezieniu takich wielkości pochyłości m , n i μ , aby naprężenia nie przekraczały granic dopuszczalnych. Jeśli więc we wzorach dla σ wyrazić wszystkie wielkości w zależności od m , n i μ , to otrzyma się związek

$$\sigma = f(m, n, \mu);$$

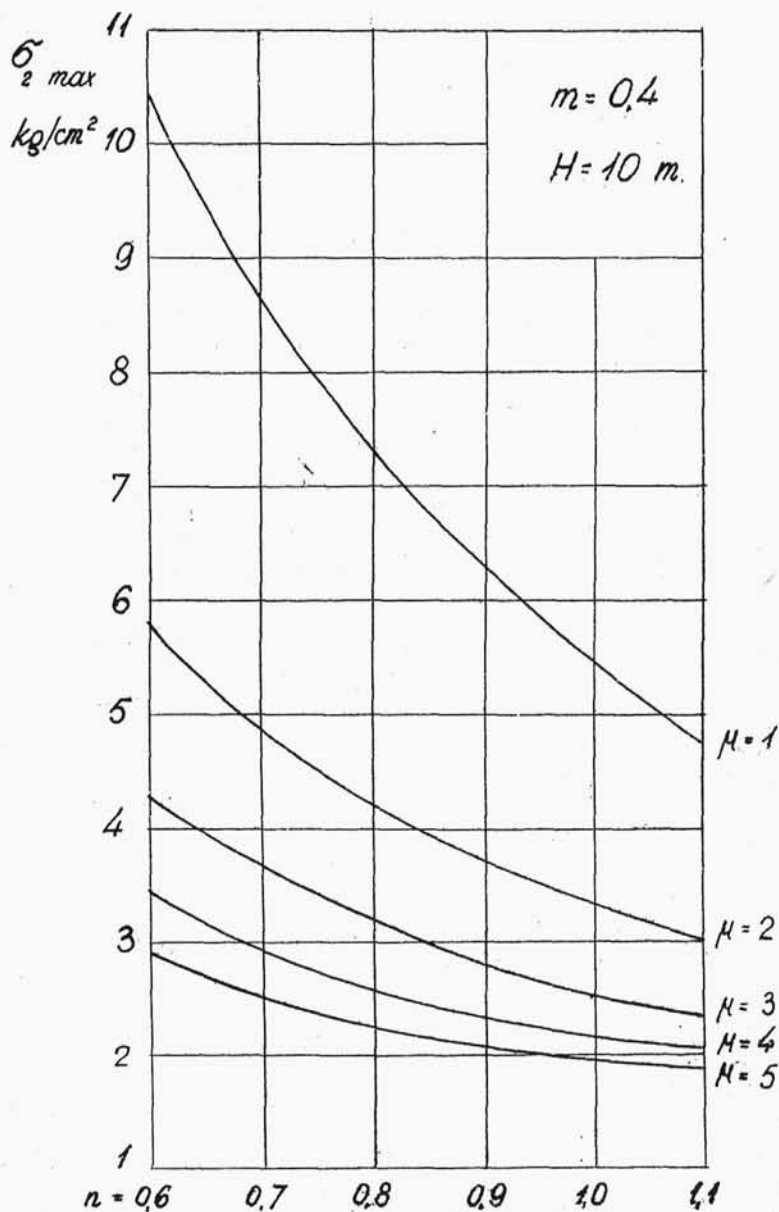
o bardzo skomplikowanej budowie. Rozwiązanie jednoznaczne jest niemożliwe, gdyż trzy zmienne niewiadome m , n i μ nie są ze sobą związane.

Określenie m , n i μ możliwe jest jednak na innej drodze.

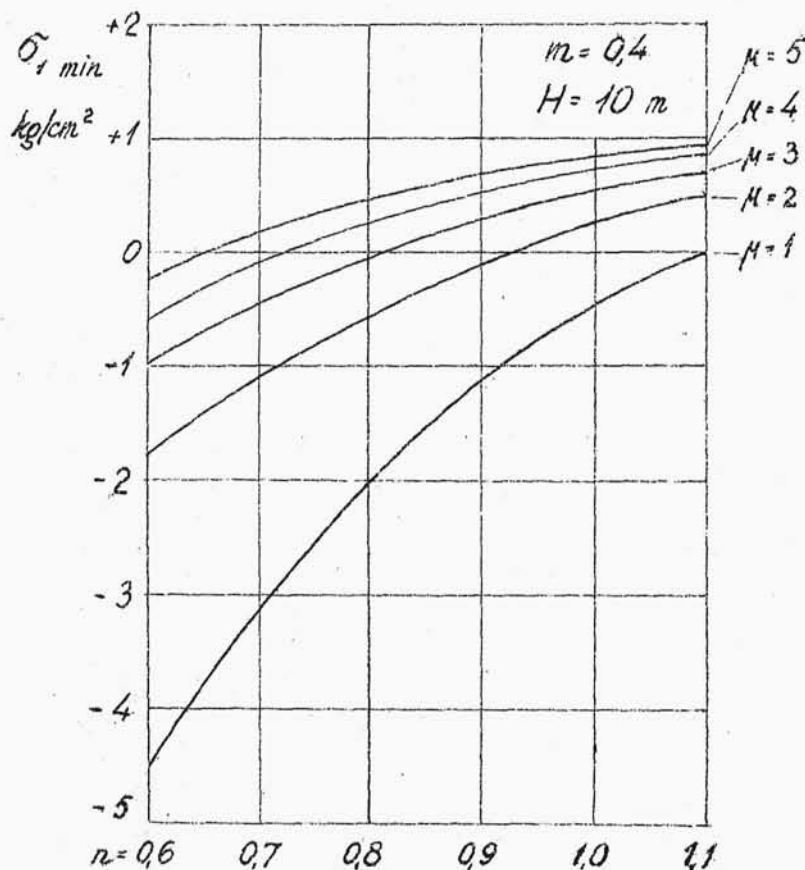
Dla rozmaitych określonych wielkości m i dla różnych μ wykreśla się przebieg zmian naprężenia w zależności od n , t.zn. przebieg funkcji $\sigma = f(n)$; Wykresy takie wykonywa się dla σ_2 , $\sigma_{2\max}$ i $\sigma_{1\min}$ oraz dla $m = 0, -0,1 - 0,2 - 0,3 \dots$ i t.d. aż do $m = 1,0$, wreszcie dla $\mu = 1, 2, 3, 4$ i 5 /razem 30 wykresów/. Ramy niniejszego skryptu nie pozwalają na podanie wszystkich wykresów /czytelnik znajdzie je w książce "Die Stauauern" N.Kelena/. Na rys.60,61 i 62



Rys. 60.



Rys. 61.



Rys. 62.

przedstawiono jedynie 3 wykresy ilustrujące zmiany trzech miarodajnych naprężeń w zależności od pochylenia od strony wody, gdy $m = 0.4$. Wykresy zbudowane zostały w założeniu, że $\lambda = 0.1$; $\gamma_0 = 2.3 \text{ t/m}^3$ oraz $H = 10 \text{ m}$. Przyjęcie $H = 10 \text{ m}$ pozwala na łatwe korzystanie z wykresów dla filarów o każdej innej wysokości /naprężenia

są wprost proporcjonalne do wysokości filara/.

W podobny sposób należy także skonstruować wykresy, przedstawiające funkcjonalną zależność współczynnika poślizgu f i stateczności κ od pochylenia n :

$$f = f(n); \quad \kappa = \kappa(n);$$

Rys. 55 przedstawia właśnie $f = f(n)$ dla $m = 0,4$.

Mając już wszystkie wykresy, można na każdym z nich ustalić trzy wielkości m , n i μ dla których spełnione będą warunki

$$1/. \quad \tilde{\sigma}_2 < \text{dop. } \tilde{\sigma}_{\text{grunt}}; \quad 2/. \quad \tilde{\sigma}_{\text{min.}} > \tilde{\sigma}_{r. \text{ dop}}; \quad 3/. \quad \tilde{\sigma}_{\text{max}} < \tilde{\sigma}_{\text{dop}};$$

oraz $4/. \quad f < \text{tg } \varphi; \quad 5/. \quad \kappa > 2;$

Na ogół otrzymuje się po kilka odpowiedzi za-
dość czyniących wymienionym warunkom.

Z podanych na rys. 60, 61, 62 i 55 wykresów wi-
dać, że dla zapory $H = 40$ m wysokości, warunkom

$$\text{dop. } \tilde{\sigma}_{\text{grunt}} = 12 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tilde{\sigma}_{r. \text{ dop}} = - 2 \quad "$$

$$\tilde{\sigma}_{\text{dop}} = 20 \quad "$$

$$\text{tg } \varphi = 0,75$$

odpowiadają następujące zestawienia

1/. z rys 60:

$$n \geq 0,94$$

$$m = 0,4$$

$$\mu = 2$$

$$n \geq 0,73 \quad m = 0,4 \quad \mu = 3$$

oraz dla $\mu = 4$ i 5 każde n w granicach od $0,6$ do $1,1$;

2/. z rys. 61:

$$n \geq 0,8 \quad m = 0,4 \quad \mu = 1$$

oraz dla $\mu = 2, 3, 4$ i 5 wszystkie wielkości n od $0,6$ do $1,1$;

3/. z rys. 62:

$$n \geq 0,62 \quad m = 0,4 \quad \mu = 1$$

dla wszystkich innych μ - wszelkie wielkości n zawarte między $0,6$ a $1,1$ zadośćczynią warunkowi $\sigma_{i \min} > \sigma_{r \text{ dop}}$;

4/. z rys. 55:

$$n \geq 0,97 \quad \mu = 1$$

$$n \geq 0,85 \quad \mu = 2$$

$$n \geq 0,73 \quad \mu = 3$$

$$n \geq 0,63 \quad \mu = 4$$

$$n = 0,6 \dots 1,1 \quad \mu = 5$$

wszystko przy $m = 0,4$.

Z innych podobnych wykresów znajdzie się również po kilka odpowiedzi. Ze wszystkich odpowiedzi zebranych w ten sposób należy wybrać tę grupę m , n i μ , która najlepiej czyni

zadość wszystkim wymienionym wyżej warunkom. W ten sposób dochodzi się do oznaczenia wszystkich wymiarów filara.

Racjonalne wymiarowanie filarów.

Racjonalne wymiarowanie filarów polega na nadaniu im kształtów najekonomiczniejszych t.j. takich, przy których kubatura filara będzie najmniejsza /przy jednoczesnym zachowaniu wszystkich norm statyczno - wytrzymałościowych/.

Całe zagadnienie można w ten sposób sformułować: mając daną wysokość filarów H oraz ich rozstaw L i górną grubość α_2 , należy w ten sposób ustalić szerokość b i dolną grubość α_1 filarów, aby uzyskać najmniejszą ich kubaturę, przy czym wszystkie naprężenia muszą znajdować się w granicach dopuszczalnych, a stateczność zapory winna być zapewniona w odpowiednim stopniu.

Zagadnienie ustalenia najekonomiczniejszych wymiarów filara jest bardzo skomplikowane i nie daje się rozwiązać na drodze matematycznej, gdyż wchodzi tu w grę także momenty natury techniczno-budowlanej. Przyczyną nie pozwalającą na proste

rozwiązanie zagadnienia jest duża ilość zmiennych niezależnych.

Ustalenie wymiarów a , b filarów jest równoznaczne z określeniem wielkości m , n i μ , a trzy te wielkości wiążą się z wszelkimi wzorami dla naprężeń i ponadto mają wpływ na stateczność filara. Widać z tego, jak się komplikuje całe zagadnienie; mamy bowiem następujące miarodajne wielkości:

- 1 - największy dopuszczalny nacisk na grunt /któremu winno odpowiadać σ_2 /,
- 2 - największe dopuszczalne naprężenie ściskające w betonie /odpowiednik σ_{1max} lub σ_{2max} /,
- 3 - najmniejsze dopuszczalne naprężenie w betonie /które mogą być także ujemne: σ_{1min} /,
- 4 - największy dopuszczalny współczynnik poślizgu $f < \operatorname{tg} \varphi$ /.

Wszystko przy pełnym zbiorniku.

Teraz kolejno dla każdej z wymienionych wyżej czterech wielkości wyrazić należy objętość filara V w funkcji n dla kilku wielkości m oraz dla różnych wielkości miarodajnych /t.zn.dla różnych dop. σ_{grunt} : σ_{dop} , $\sigma_{r.dop}$ i $\operatorname{tg} \varphi$ /.

Z wykresów $V = f(n)$ można oznaczyć minimum kubatury odpowiadające przyjętej wielkości miarodajnej. Ograniczymy się tutaj do podania krótkich uwag, opierając się na szczegółowych wywodach N. Keleny zawartych w jego dziele "Die Staumauern".

Mniejszą kubaturę filara otrzymamy dla większych wielkości dopuszczalnych naprężeń /co jest zresztą zrozumiałe/ i na ogół dla większych pochyień n ; w ogóle V_{min} wypada w dość szerokich granicach. W szczególności filar 30 do 40 m wysokości osiąga minimum kubatury:

- 1 - dla dopuszczalnego nacisku na grunt 10 do 20 kg/cm^2

przy $n = 0,5 \text{ -- } 0,5 \text{ -- } 0,6$

i jednocześnie $m = 0,5 \text{ -- } 0,8 \text{ -- } 0,9$

- 2 - dla dopuszczalnego naprężenia ściskającego w betonie 15.....30 kg/cm^2

przy $n = 0,6 \text{ -- } 0,7 \text{ -- } 0,8 \text{ -- } 0,8 \text{ -- } 0,9$

$m = 0,4 \text{ -- } 0,4 \text{ -- } 0,4 \text{ -- } 0,5 \text{ -- } 0,6$

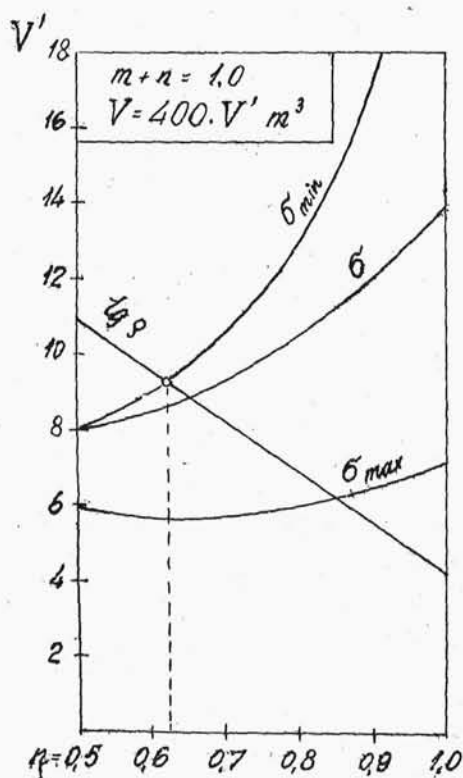
- 3 - dla dopuszczalnego naprężenia rozciągającego w betonie = - 2 kg/cm^2

przy $n = 0,5 \text{ -- } 0,5 \text{ -- } 0,8 \text{ -- } 1,0 \text{ -- } 1,2$

$m = 0,7 \text{ -- } 0,5 \text{ -- } 0,5 \text{ -- } 0,4 \text{ -- } 0,3$

Jeśli chodzi o zapewnienie zaporze stateczności, to najmniejszą objętość filara otrzymuje się dla jak największych pochyłań n . Dla $\tan \varphi = 0,75$ należałoby przyjmować $n = 1,35$ celem otrzymania V_{min} .

Kiedy już ustalono funkcjonalną zależność $V = f(n)$ przy różnych założeniach i dla różnych m , zestawia się odpowiednie krzywe na jed -

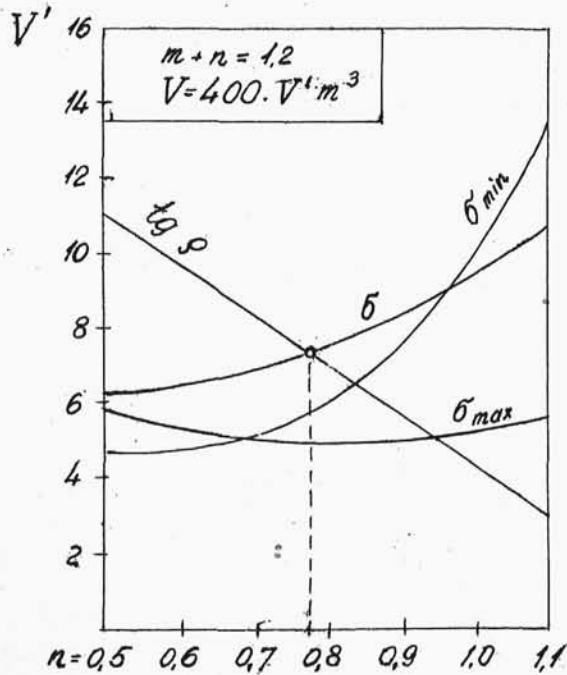


rys.63.

nym wykresie i wów -
czas możemy ustalić
dopiero V_{min} , odpo-
wiadające wszystkim
warunkom jednocześnie.

Dla przykładu podane
są na rys.63 i 64
dwa takie sumaryczne
wykresy z krzywymi,
przedstawiającymi za-
leżność kubatury V
filara od różnych
przyjętych wielkości
miarodajnych: $V = f(\tan \varphi)$;
 $V = f(\sigma_{min})$; $V = f(\sigma_{max})$;
 $V = f(\sigma_2)$;

Na wykresach odpowiednio krzywe oznaczono po prostu $\operatorname{tg} \varphi$, σ_{\min} , σ_{\max} i σ . Na pierwszym wykresie /rys. 63/ dla $m + n = 1$ minimum kubatury wyznacza punkt przecięcia się krzywych $V = f(\operatorname{tg} \varphi)$ i $V = f(\sigma_{\min})$;



rys. 64.

i jemu też odpowiada największe pochylenie n od strony wody. Krzywe przebiegające niżej oraz ich punkty przecięcia się z prostą $V = f(\operatorname{tg} \varphi)$ nie mogą być brane pod uwagę, gdyż dają za małą kubaturę, podczas gdy inne warunki wymagają większej objętości filara.

Omawiany punkt przecięcia dlatego daje minimum V , bo jest to punkt, w którym przecinają się dwie krzywe /ściśle mówiąc prosta z krzywą/: jedna opadająca, druga wznosząca się.

Na rys. 64 /wykres dla $m + n = 1,2$ / V_{\min} i

największe n określa również punkt przecięcia się prostej $V = f(\operatorname{tg} \varphi)$ z najwyżej połączoną krzywą, w danym wypadku z $V = f(\sigma_2)$.

Wielkość μ , odpowiadająca znanemu wartościom optimum n , określa się ze wzoru na objętość filara, który to wzór wiąże ze sobą wielkości m , n i μ . Wielkość V_{\min} odczytuje się z wykresu.

Jedynie dla małych pochyłości /t.zn. dla $m + n \leq 1$ / miarodajne są $\operatorname{tg} \varphi$ i $\sigma_{1 \min}$, poza tym jednak o racjonalnych wymiarach filara przeważnie decydują $V = f(\operatorname{tg} \varphi)$ i $V = f(\sigma_2)$.

Wykresy podane na rys. 63 i 64 wykonane zostały dla filarów 40 m wysokości, rozstawionych co 15 m, przyjmując następujące normy:

$$\begin{aligned} \text{dop. } \sigma_{\text{grunt}} &= 12 \text{ kg/cm}^2 & (\sigma_2) \\ \sigma_{\text{dop}} &= 20 \text{ kg/cm}^2 & (\sigma_{1 \max} \text{ lub } \sigma_{2 \max}) \\ \sigma_{1 \text{ dop}} &= - 2 \text{ kg/cm}^2 & (\sigma_{1 \min}) \end{aligned}$$

Współczynnik poślizgu przyjęto $\operatorname{tg} \varphi = 0,75$, poza tym $\lambda = 0,1$.

Na ogół można powiedzieć, że kubatura filarów jest tym mniejsza, im większe jest δ /t.zn. im większe jest $m + n$ /. Wynika to z tego,

że naprężenia szybko maleją przy powiększaniu szerokości podstawy /porów.str.111/, więc filar może być cieńszy, a jego objętość mniejsza.

Chcąc być dokładnym, należałoby poza kwestiami statycznie - wytrzymałościowymi t.zn.pozą uwzględnieniem naprężeń w filarze i jego stateczności, zanalizować także zależność kosztów deskowania /form do betonu/ i kosztów fundamentu filara od jego wymiarów. Wpływ tych czynników na wymiarowanie filara bywa niekiedy wręcz odmienny od wpływu warunków statycznie - wytrzymałościowych. Tak np. względy stat.-wytrzym. wskazywały na to, że koszt materiału użytego do budowy filara będzie mniejszy, gdy większa będzie jego podstawa, tymczasem koszt szalowania wzrasta przy powiększaniu wielkości b . Wynika to wskutek tego, że przy powiększaniu szerokości b podstawy-boczne powierzchnie filara zwiększają się szybciej, aniżeli maleją ściany czołowe: od strony wody i od strony powietrza /nie należy zapominać, że powiększając b można zmniejszyć a , aby bez potrzeby nie powiększać pola podstawy - stąd wynika zmniejszanie się powierzchni czołowych/.