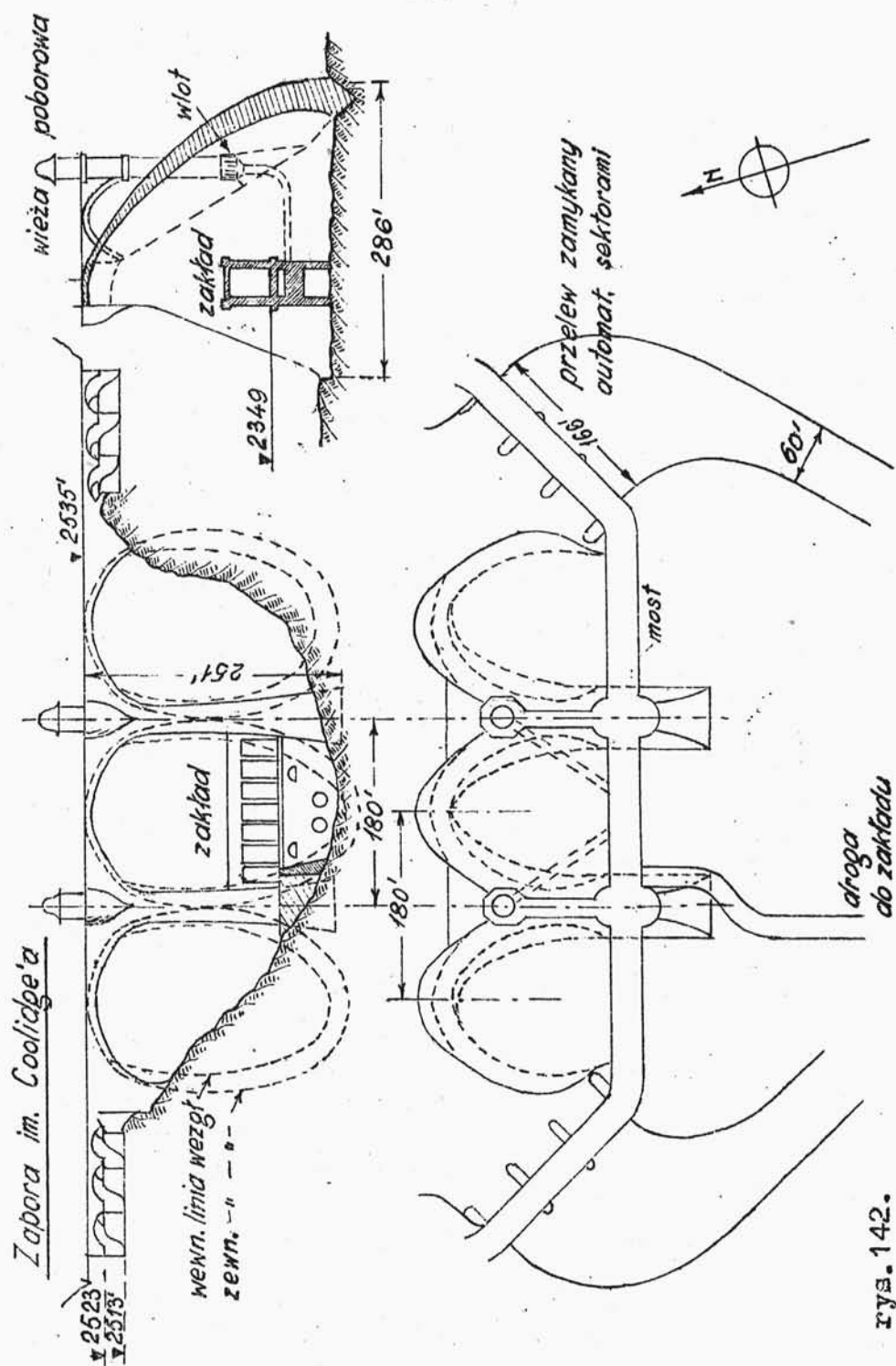


## ZAPORY KOPULASTE.

### O p i s z a p o r y .

Jedyną tego typu zaporą jest zapora im. Coolidge'a na rz. Gila /St.Zjedn.A.P./ zbudowana w latach 1927 i 1928 /rys.142/. Zapora składa się z trzech jajowych kopuł, wspierających się o stoki doliny i o dwa filary. Zakład turbinowy o mocy instalowanej 2 x 7500 KM umieszczony jest pod środkową kopułą. Wodę do turbin doprowadzają dwa przewody, przy czym ujęcie wody wykonano w dwóch żelbetowych wieżach poborowych, ustawionych na krawędzi od strony wody podstawy filarów. W wieżach tych znajdują się mechanizmy do zamykania przewodów.

Po obu stronach zapory, głęboko wcięte w stoki, znajdują się przelewy, każdy o trzech otworach po 15,25 m /50'/. Przelewy zamykane są samoczynnie działającymi sektorami żelbetowymi. Łączny wydatek przelewów wynosi  $3400 \text{ m}^3/\text{sek}$  przy wzniesieniu wody o 6,70 m /22'/ponad krawędzią przelewu.



rys. 142.

Korona zapory wykonana jest jako most z jezdnią 6,10 m /20' / szerokości. Most ten składa się z trzech dużych łuków, stanowiących górną część kopuła, oraz z sześciu mniejszych łuków przerzuconych nad przelewami. Wieże poborowe łączą się z mostem przy pomocy żelbetowych pomostów łukowych.

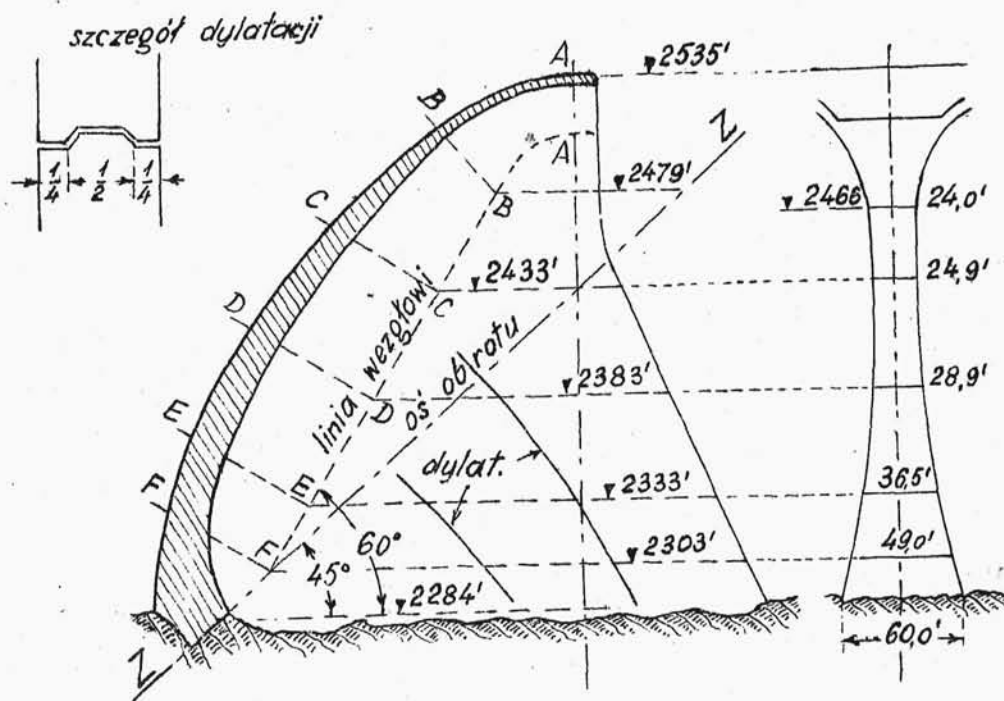
Zbiornik utworzony przez spiętrzenie wód rz. Gila dostarcza wody do nawadniania obszarów ogólnej powierzchni 40 000 ha oraz służy do wytwarzania energii elektrycznej. Pojemność zbiornika wynosi 1440 milionów  $m^3$  i jest 3 - krotnie większa od przeciętnego rocznego przepływu rz. Gila, który można przyjąć 500 milionów  $m^3$ . Naturalny niewyrównany odpływ rz Gila waha się od 0 w lecie do 2600  $m^3$ /sek na wiosnę. Konieczność ustalenia dużej pojemności zbiornika wynikała nie tylko z potrzeb melioracyjnych /nawadniania/, lecz także ze względu na to, że rz. Gila niesie bardzo duże ilości rumowiska i w zbiorniku trzeba przeznaczyć odpowiednio dużą część pojemności na zamulenie.

Całkowity koszt budowy zapory wraz z zakładem o sile wodnej wyniósł 4½ miliona dolarów. Przełożenie drogi żelaznej, która na długości 22 km prze-

chodziła przez teren zalewowy zbiornika, kosztowało dodatkowo 1 milion dolarów.

### K s z t a ł t   k o p u ł .

Kopuły mają kształt jajowy o dłuższej osi pochylonej pod kątem  $45^{\circ}$ , przy czym większa krzywizna zwrócona jest na dół /rys.143/. Pochylenie kopuły ma na celu zwiększenie stateczności. Aby zachować symetrię kopuł skrajnych, wykuto w skale odpowiednio głębokie doły fundamentowe w dnie



i stokach doliny /linia wykopu jest podobna do profilu styku kopuł z filarami/.

Zewnętrzna powierzchnia kopuł jest powierzchnią obrotową, utworzoną przez obrót krzywej koszarowej  $ABCDEF$  dookoła pochylonej osi  $ZZ$ /rys. 143/. Powierzchnia wewnętrzna kopuł nie może być powierzchnią obrotową, gdyż grubość sklepienia wzrasta ku węzłowiom /rys. 144/. Linia węzłowa pokazana na rys. 143 / i innych/ jest linią przenikania się podniebienia kopuły z powierzchnią boczną filarów.

Wskutek tego, że kopuła jajowa ustawiona jest mniejszą krzywizną ku górze, zewnętrzny promień łuków w przekrojach  $AA, BB \dots$  /rys. 144/ jest największy w górnych przekrojach i maleje stopniowo w co raz to niższych przekrojach. Natomiast kąt środkowy, obejmujący łuk w danym przekroju, wzrasta od  $82^\circ$  w koronie do  $\sim 180^\circ$  w najniższym przekroju. Taka konstrukcja kopuł jest uzasadniona teorią zapór łukowych.

Na kształt kopuł wpływają zasadniczo następujące dwa czynniki:

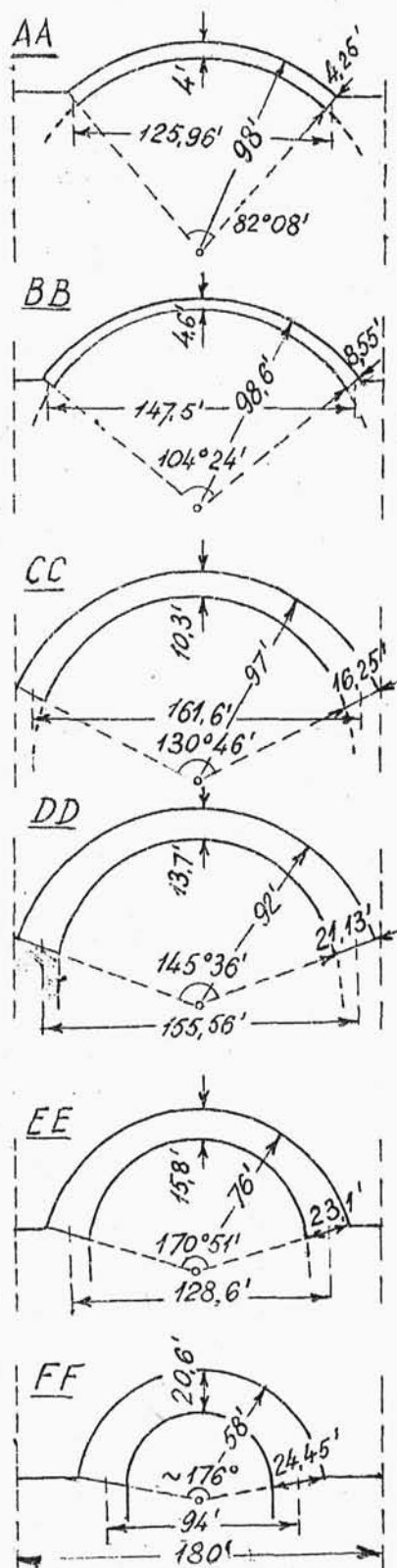
1/ część parcia wody rozłożona równomiernie na

całej długości łuku,  
2/ część parcia wody nie-  
jednostajnie rozłożo-  
nego, co jest wyni-  
kiem tego, że rozpat-  
rywane elementy łuko-  
we są ukośne, zatem  
węzłowiec znajdują  
się głębiej od zwor-  
nika /porów.str.41, i  
rys.11 i 30/.

Równomiernie rozłoż-  
zone parcie wody wywołuje  
naprężenia, których  
wielkość uzależniona  
jest od kąta środkowego  
 $2\varphi$  i względnej gruboś-  
ci łuku

$$\delta = \frac{d}{l};$$

rys.144.



Przy projektowaniu chodzi głównie o jak największe zmniejszenie wymiarów zwłaszcza grubości łuków. Jedną drogą prowadzącą do tego jest odpowiednie dobranie kąta środkowego /metoda stosowana w zaporach o łukach wielokrotnych/. Mając jednak ustalony kąt  $2\varphi$ , dalsze zmniejszenie grubości łuku uzyskać można już tylko przez zmniejszenie rozpiętości łuku, co tak wyraźnie widać na przekrojach  $DD$ ,  $EE$ ,  $FF$  na rys. 144.

Weźmy teraz jednak pod uwagę część parcia hydrostatycznego niejednostajnie rozłożonego. Naprężenia wywołane tym parciem będą tym mniejsze, im większe będzie pochylenie łuku /bardziej poziome/, im mniejszy kąt środkowy, im większa względna grubość łuku i im mniejsza jego rozpiętość /porów. str. 65 i n./.

W porównaniu z tym, co powiedziano wyżej o wpływie równomiernie rozłożonego parcia wody, widać od razu zbieg sprzecznych ze sobą kwestii dotyczących wymiarowania łuków /kolizje te szczegółowo omówione są w rozdziale "Zapory o łukach wielokrotnych. Wpływ nierównomiernie rozłożonego parcia wody"/

Projekt zapory Coolidge'a w ten sposób uzgodnił sprzeczności, że w górnych przekrojach zapory

$AA, BB, CC$ , gdzie wpływ niejednostajnie rozłożonego parcia wody jest dominujący, kąt środkowy starano się uczynić jak najmniejszy natomiast w przekrojach głębszych  $DD, EE, FF$ , gdzie przeważa wpływ równomiernego parcia wody, kąt środkowy jest duży i zbliża się do  $180^{\circ}$  w przekrojach najniższych /rys.144/. W tych dolnych przekrojach zewnętrzna powierzchnia ścian kopuły jest bardzo stroma, na dnie niemal pionowa, co w wyniku powoduje zanik nierównomiernie rozłożonego parcia wody, a w konsekwencji pozwala jeszcze bardziej zmniejszyć grubość łuku w dolnych przekrojach.

Jak powiedziano wyżej, wpływ niejednostajnego parcia wody jest wyraźny i znaczny tylko w górnych przekrojach, aby więc wynikające stąd naprężenia zredukować, najwyższe przekroje  $AA, BB$  mają mniejsze rozpiętości.

Wreszcie nadmienić należy, że promień krzywizny kopuły maleje wraz ze zwiększającą się głębokością, co korzystnie wpływa na rozmiar grubości sklepienia.



## Statyczne obliczenie kopuł

Kopuły zapory Coolidge'a obliczono w sposób przybliżony, wychodząc jednak ze słusznego i ścisłego założenia, które obecnie stanowi podstawę obliczania zapór łukowych. Jeśli mianowicie:

- 1/ płaszczyznami prostopadłymi do powierzchni zewnętrznej kopuł i przechodzącymi przez oś obrotu  $ZZ$ , wykroimy z bryły kopuły pionowe elementy, wsporniki, zamocowane jednym końcem w dnie doliny,
- 2/ zaś płaszczyznami prostopadłymi do linii wezgiłow /a więc płaszczyznami  $AA, BB, CC \dots$ / wykroimy pochyłe elementy łukowe, zamocowane na obu końcach,

to wówczas założenie wyżej wzmiankowane sformułować można w ten sposób: rozpatrując niezależnie od siebie dwa układy: pierwszy - układ szeregu zakrzywionych wsporników, drugi - układ łuków, przy czym każdy z układów obciążony jest pewną tylko częścią parcia hydrostatycznego, to ugięcie pewnego punktu musi być to samo w każdym z tych układów rozpatrywanych osobno /porów. rozdz. o obliczaniu zapór łukowych, str.249 i n./.

Ponieważ jednak pionowe elementy /wsporniki/ są bardzo wiotkie / z wyjątkiem części niższych/ i przejmują tylko nieznaczną część obciążenia, więc uproszczono rachunek w ten sposób, że w partiach wyższych obliczono tylko przekroje łukowe /początkie/ obciążone pełnym parciem wody, ciężarem własnym i całkowitym wpływem skurczu betonu i zmiany temperatury. W partiach zaś niższych kopułę obliczono z uwzględnieniem działania wsporników.

Łukowym elementom obliczeniowym nadano kształt odpowiednio do przebiegu linii ciśnień, albo - inaczej mówiąc - linia ciśnień przy pełnym zbiorniku zbiega się z osią łuku. Łuki traktowane są jako sztywnie zamocowane na końcach, co jest zupełnie usprawiedliwione wobec tego, że zbrojenie kopuł przechodzi w filary lub w stoki doliny.

Wielkość statycznie niewyznaczalnego rozporu określa wzór

$$H = \frac{\int \frac{N}{A} \cos \varphi \cdot ds}{\int y^2 \frac{ds}{J} + \int \cos^2 \varphi \frac{ds}{A} + 3 \int \sin^2 \varphi \frac{ds}{A}};$$

Trzeci składnik w mianowniku oznacza wpływ

siły poprzecznej /tnącej/, który w danym wypadku był szczególnie duży, zwłaszcza w dolnych grubych łukach, co wynikało wskutek tego, że przekrój łuku zmienia się od zwornika do wezglowia.

Ponieważ grubość łuku jest zmienna, całkowanie we wzorze powyższym zastąpiono sumowaniem, przy czym każdą połowę łuku dzielono na 10 części, a grubość łuku w każdej płaszczyźnie podziału /a stąd powierzchnię przekroju  $A$  i jej moment bezwładności  $J$  / wyznaczano z wykresu.

Obliczenia naprężeń, wynikających wskutek zmian temperatury, dokonano w założeniu jednakowego / z obu stron zapory / spadku temperatury o  $19,5^{\circ}\text{C}$  /  $35^{\circ}\text{F}$  / na wysokości korony /rzędna 2535'/ i  $5,6^{\circ}\text{C}$  /  $10^{\circ}\text{F}$  / u podstawy /rzędna 2303'/, na wysokościach pośrednich interpolując liniowo /zbiornik pełny/.

Wpływ skurczu betonu pominięto, uważając, że w czasie długotrwałego napełniania wielkiego zbiornika beton nasiąknie wodą i powstające w konsekwencji pęcznienie przeciwstawi się i zniweczy wpływ pierwotnego skurczu betonu.

Na str.367 zamieszczono zestawienia naprężeń;

Tablica I.

Naprężenia /w kg/cm<sup>2</sup>/ w łuku

na wysok. 2333 stóp n p.m. /przekrój EE na rys. 142/

	Napręż. wywoł. siłą osiową	Napręż. wywoł. rozpor. <i>H</i>	Napręż. wywoł. spadek temper. o 15,5°	Napręż. całkowite.
od str. wody	+26,5	+8,8	+5,7	+41,0
zwornik				
od str. pow.	+26,5	-12,8	-8,2	+5,5
od str. wody	+20,2	-12,7	-8,1	-0,6
wegzłowie				
od str. pow.	+20,2	+12,3	+7,9	+40,4

Tablica II.

Naprężenia /kg/cm<sup>2</sup>/ w poszczególnych łukach.

Przekrój	Rzęd. wysok. w sto pach n.p.m.	spadek temp. o C	Naprężenia				grubość łuku w m.	
			w zworniku od str. wody	w zworniku od str. pow.	w wezgłowie od str. wody	w wezgłowie od str. pow.	zwor- nik	wegz- łowie
BB	2479	-18,3	+30,0	+12,2	-1,6	+27,7	1,40	2,62
CC	2433	-13,3	+38,0	+4,3	-2,8	+34,4	3,15	4,95
DD	2383	-10,3	+40,7	+5,9	-2,4	+38,7	4,18	6,45
EE	2333	-7,3	+41,0	+5,6	-0,6	+40,4	4,82	7,05
FF	2303	-5,6	+23,7	+3,1	-1,0	+31,6	6,28	7,42

w tablicy I podane są naprężenia w łuku na wysokości 2333 stóp n.p.m., a tablicy II zebrano największe naprężenia we wszystkich łukowych elementach obliczeniowych przy pełnym obciążeniu, uwzględniając także obniżenie się temperatury. W zestawieniach tych znak plus oznacza ściskanie, znak minus rozciąganie. Rzędne wysokości dotyczą wezglowi.

Przy zbiorniku pustym wpływ ciężaru własnego i podniesienia się temperatury jest taki, że wywołuje naprężenia rozciągające dochodzące do  $10 \text{ kg/cm}^2$ , co zmusza do zbrojenia kopuł. Sklepienia w płaszczyznach rachunkowych /t.zn. w przekrojach AA, BB ...../ są podwójnie zbrojone na całej długości łuku, przy czym wkładki stalowe są głęboko zakotwione w filarach lub w stokach skalnych.

W górnych przekrojach występują duże naprężenia ścinające w płaszczyźnie połączenia kopuły z filarem, gdzie też ułożono specjalne wkładki stalowe przejmujące naprężenia ścinające.

Podstawy wszystkich trzech kopuł oraz boczne krawędzie kopuł skrajnych są związane ze skałą specjalnymi kotwami /żelazne pręty  $44 \text{ mm } \varnothing$  w odstępach

38 cm/. Kotwy są zabetonowane w otworach wywierconych w skale do 2,5 m głębokości i przechodzą częściowo w pionowe zbrojenie dolnych części kopuł.

Koronę kopuły stanowią łuki pionowe podpierające drogę. Łuki te obliczone zostały odpowiednio do obciążenia ruchomego na drodze, a traktowane były przy tym jako nie związane z całym korpusem kopuły.

### F i l a r y .

Filary zapory Coolidge'a mają kształt podobny, jak w zaporach o łukach wielokrotnych. Grubość filarów maleje od spodu ku górze wg paraboli /rys. 142 i 143/. Pochylenie krawędzi od strony wody /a tym samym pochylenie linii wezglowi/ wynosi  $60^{\circ}$ . Wielkość tę otrzymano z warunku, aby stopień zabezpieczenia przed poślizgiem był 0,75. Filary, podobnie jak kopuły, są związane ze skałą przy pomocy kotew /rozstawionych jednak w większych odstępach niż pod kopułami/. W ten sposób zabezpieczono się przed działaniem wyporu, którego wpływu nie wprowadzono do obliczeń.