

$+\sum_1 \frac{M_{p1} \cdot y \cdot s}{J} =$	+11610983
$+\sum_2 \frac{M_{p2} \cdot y \cdot s}{J}$	
$-\sum_1 \frac{P_1' \cdot s \cdot \cos \xi}{d} =$	-77894
$-\sum_2 \frac{P_2' \cdot s \cdot \cos \xi}{d}$	
$+E \omega t \frac{l_1 + l_2}{s} =$	-422250
$D_2 =$	+11110839
$+\sum_1 \frac{M_{p1} \cdot s}{J} =$	+663798
$+\sum_2 \frac{M_{p2} \cdot s}{J}$	
$D_3 =$	+663798

z których wynika, że

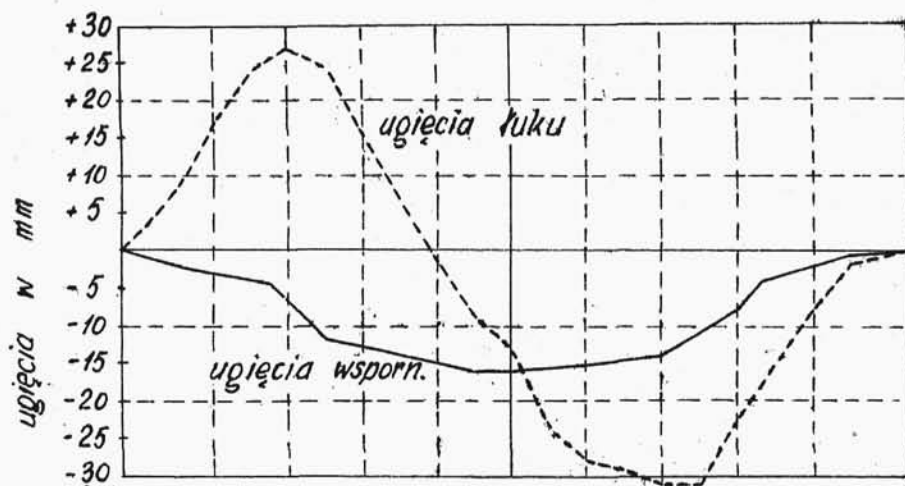
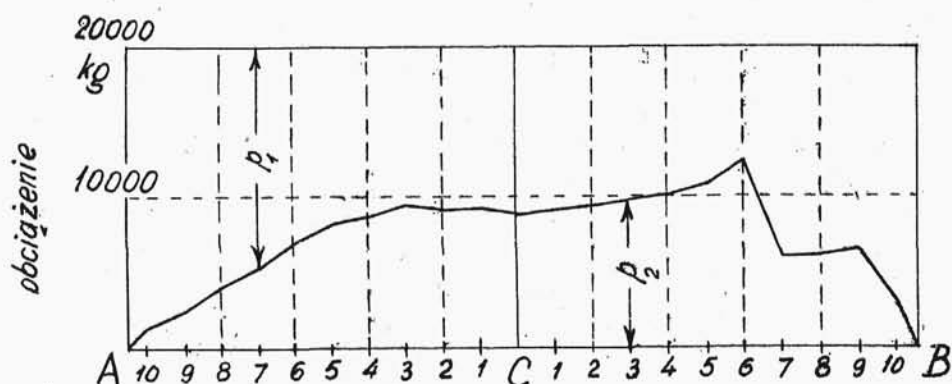
$$M_c = 2\,445\,856 \text{ kgm}$$

$$N_c = 897\,594 \text{ kg}$$

$$T_c = 0 ;$$

### Przykład II.

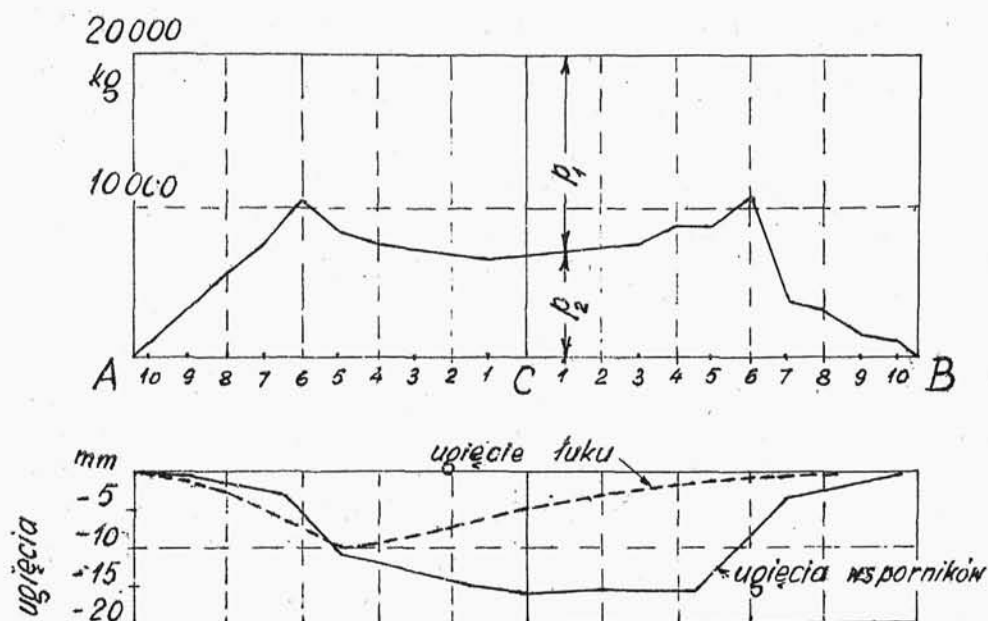
Dla ilustracji, jakim modyfikacjom ulegają założenia dotyczące rozdziału parcia wody, podane są wyniki obliczeń jednej z amerykańskich zapór łukowych. Na rys. 126 /część górna/ podany jest pierwszy hipotetyczny rozdział parcia wody w płaszczyźnie poziomej w głębokości 3,65 m pod powierzchnią wody. Łuk długości około 120 m podzielono na 22 kliny jednakowej długości. Linia *ACB* jest wyprostowaną osią łuku. Całkowite parcie wody na



rys. 126.

każdy klin = 20000 kg. Parcie wody na wsporniki oznaczono przez  $p_1$ , na łuk - przez  $p_2$ .

Przyjęto niesymetryczny rozdział parcia, przypuszczając że w ten sposób uda się uwzględnić wpływ raptownego uskoku stoku doliny w miejscu, odpowiadającym położeniu 6. i 7. klina prawej połowy łuku. Wyniki obliczeń nie potwierdziły



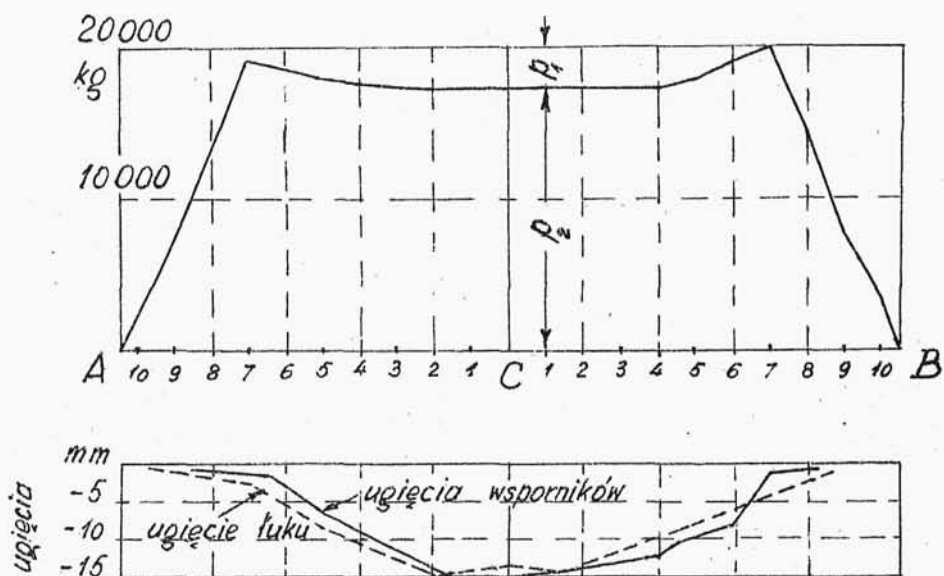
rys. 127.

jednak przypuszczeń: ugięcia wsporników i łuku nigdzie nie były nawet w przybliżeniu zgodne /rys. 126 część dolna/. Zmieniono więc rozdział parcia w ten sposób, że powiększono obciążenie lewej połowy łuku, a zmniejszono prawej /rys. 127/. Obliczone ugięcia nie były co prawda i tym razem zgodne, lecz wykazywały już pewną jednolitość. Oznaczało to, że zmianę rozdziału parcia przeprowadzono we właściwym kierunku. Wystarczało bowiem zmienić teraz obciążenie, tak jak wskazuje rys. 128, aby otrzymać zgodność ugięć dostateczną dla prak-

-----

Zbiorniki i zapory II 21.

tycznych celów i aby to trzecie obliczenie uznać za ostateczne.



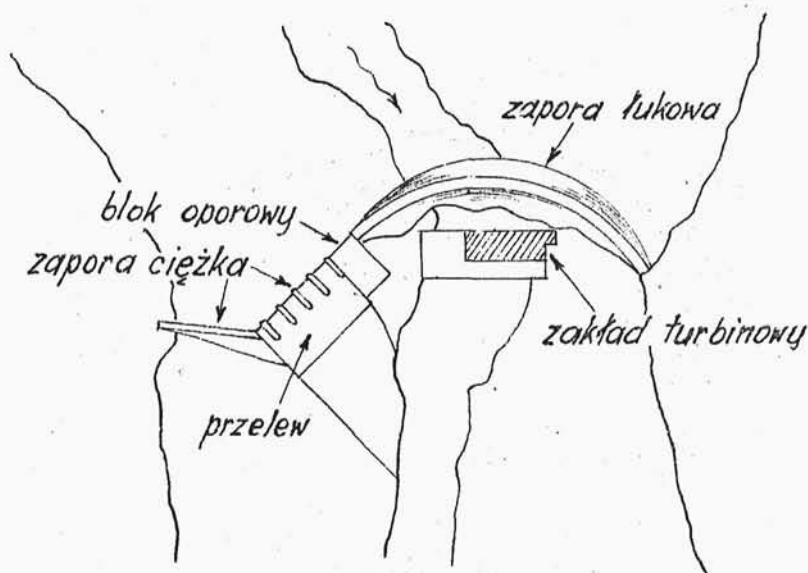
rys. 128.

### Zasady obliczenia zapory łukowej w Ariel /U.S.A./.

Inż. Ziemowit Słowiński, kierownik budowy zapory w Rożnowie, podaje ze swej praktyki w Stanach Zjednoczonych poniższe dane.

#### Ogólny opis zapory.

Zapora w Ariel /Stan Washington/ została zbudowana w roku 1931 na rz. Lewis, dopływie rz. Columbia. Zapora ta składa się z następujących



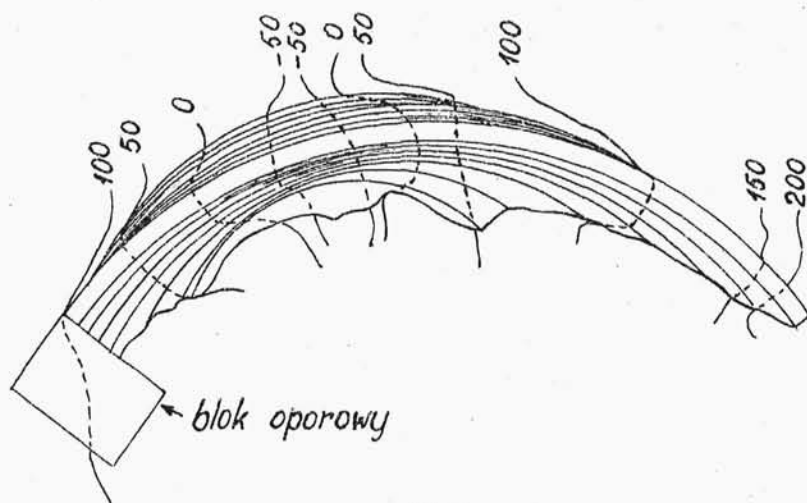
rys. 129.

części /rys. 129/:

- 1/ zapory ciężkiej 73,76 m długości o koronie bez przelewu oraz 62,79 m z przelewem dla wielkich wód,
- 2/ bloku oporowego 22,86 m długości i
- 3/ zapory łukowej 219 m dług. w koronie.

Zapory łukowa stanowi główną część przegrody doliny. Mieści się w centralnej części doliny, opierając się lewym przyczółkiem o skalny brzeg doliny, prawym o blok oporowy i przelewy wielkich wód.

Ostateczny kształt zapory łukowej /rys. 130/ został ustalony po szczegółowej analizie, która po-



rys.130.

legała na opracowaniu kilku wariantów i wybraniu najekonomiczniejszego. Jest to typ zapory o zmiennym promieniu krzywizny. Promień krzywizny zewnętrznej zmienia się w granicach od 120 m w koronie do 74,5 m w fundamencie. Kąt środkowy zmienia się od  $107^{\circ}$  do  $18^{\circ}$ . Wysokość maksymalna od fundamentu wynosi około 90 m, szerokość w koronie 5,4 m, szerokość fundamentu 27,5 m. W tabeli na następnej stronie zestawione są wymiary zapory w różnych głębokościach. Grubość łuków w planie od góry do wysokości mniej więcej 36 m nad dnem jest na całej długości stała, poniżej tej głębokości łuki są rozszerzane ku przyczółkom, przy

Rzędna w sto- pach n.p m.	Grubość łuku m	Promień zewnę- trzny m	Promień linii środkowej m	Promień wewnę- trzny m	$\frac{1}{2}$ kąta środk.
220	6,09	119,0	116,2	113,0	53°0'
180	7,62	116,2	113,2	109,5	52°3'
120	12,50	111,1	105,0	99,3	54°0'
60	19,81	79,5	60,7	44,5	64°0'
-20	25,60	76,0	57,4	44,0	20°0'

czym strona odpowietrzna posiada dwa lub trzy środki krzywizny. Strona odwodna posiada tylko stałe promienie krzywizny. Od strony wody w pobliżu przyozólków jest niewielkie nadwieszenie lica zapory, które nie przekracza 1,5 m.

Zapora została wykonana w oddzielnych blokach, przedzielonych pionowymi szwami dylatacyjnymi o szerokości 60 cm, które zostały wypełnione dopiero po ochłodzeniu betonu. Odległość szwów wynosi 9,14 m.

#### Normy obliczeń.

W obliczeniach przyjęto następujące normy:

1/ ciężar właściwy betonu 2320 kg/m<sup>3</sup>,

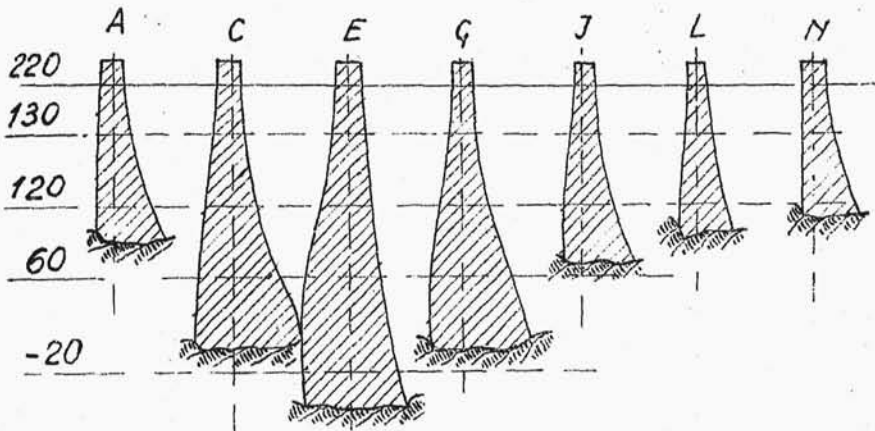
- 2/ współczynnik spężystości skały  $280\ 000\text{ kg/cm}^2$ ,
- 3/       "                     "               betonu przy ściskaniu  
                                                 $140\ 000\text{ kg/cm}^2$ ,
- 4/       "                     "               "               przy ścinaniu  
                                                 $47\ 000\text{ kg/cm}^2$ ,
- 5/ maksymalne dopuszczalne naprężenie ściskające  
w betonie  $42\text{ kg/cm}^2$ ,
- 6/ beton nie przenosi rozciągań,
- 7/ wypór w fundamencie zapory przyjęto jako zmie-  
niający się liniowo od wielkości równej 50 %  
parcia górnej wody na krawędzi odwodnej do  
wielkości 50 % parcia dolnej wody na krawędzi  
odpowietrznej,
- 8/ spadek temperatury w betonie po zamknięciu  
szwów przyjęto w zależności od wysokości:  
    w koronie  $6,1^\circ\text{ C}$   
    w fundamencie  $1,4^\circ\text{ C}$ .

### Metoda obliczeń.

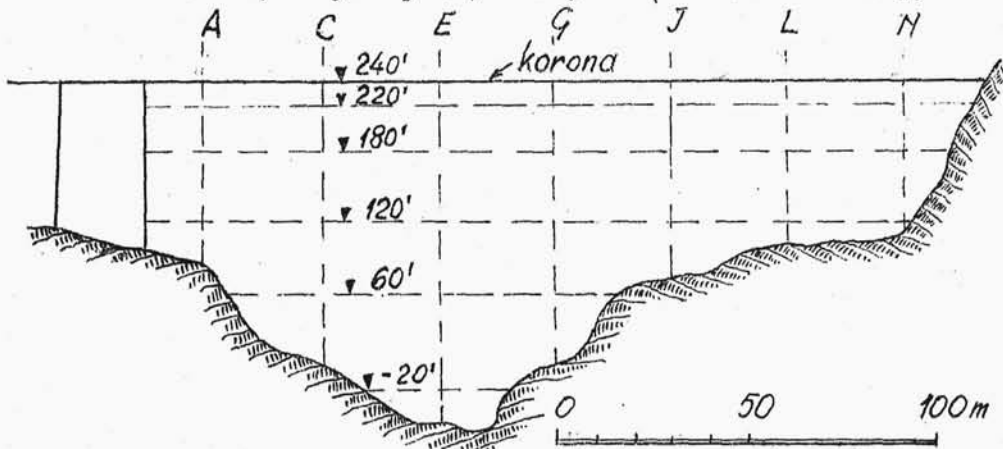
Obliczenie wykonane było przez Inland Power and Light Co metodą "prób obciążenia" opracowaną przez U.S.Bureau of Reclamation w Denver. Przyjęto, że zapora składa się z poziomych łuków i pionowych wsporników, że każdy z tych elementów dział



Przekroje



Dołożenie rozpatrywanych przekrojów (widok od dol. wody)



rys. 131.

ła niezależnie i przenosi taką część obciążenia, która powoduje identyczne odkształcenie dowolnego łuku i wspornika. Rozpatrywano 7 wsporników i 5 łuków /rys. 131/.

Obliczenie, które polegało na podziale obciążeń na wsporniki i łuki - i porównaniu odkształceń

przeprowadzono metodą kolejnych przybliżeń /prób/. Najpierw przeprowadzono obliczenie odkształceń łuków i wsporników w kierunku radialnym, otrzymując pewien podział obciążenia na te oba elementy. Obliczenie to, zwane "wyrównaniem odkształceń radialnych" przeprowadzono dla założonego kształtu zapory i obliczono następnie naprężenia. Po sprawdzeniu naprężeń okazało się, że trzeba nieco zmienić założony kształt, aby naprężenia odpowiadały dopuszczalnym normom. Obliczenie powtarzano do chwili otrzymania zadowalniającego kształtu zapory. Na rys.134 linią przerywaną pokazany jest początkowy rozdział parcia wody przy pierwszym "wyrównaniu odkształceń radialnych"; całkowite parcie wody oznaczono przez  $\rho$ , parcie wody na wsporniki  $\rho_1$ , na łuk  $\rho_2$ . Na rys.135 też linią przerywaną pokazano odkształcenia, odpowiadające temu pierwotnemu rozdziałowi parcia wody. Naprężenia w łukach przy pierwszym wyrównaniu odkształceń radialnych podane są w zestawieniu na nast. str..

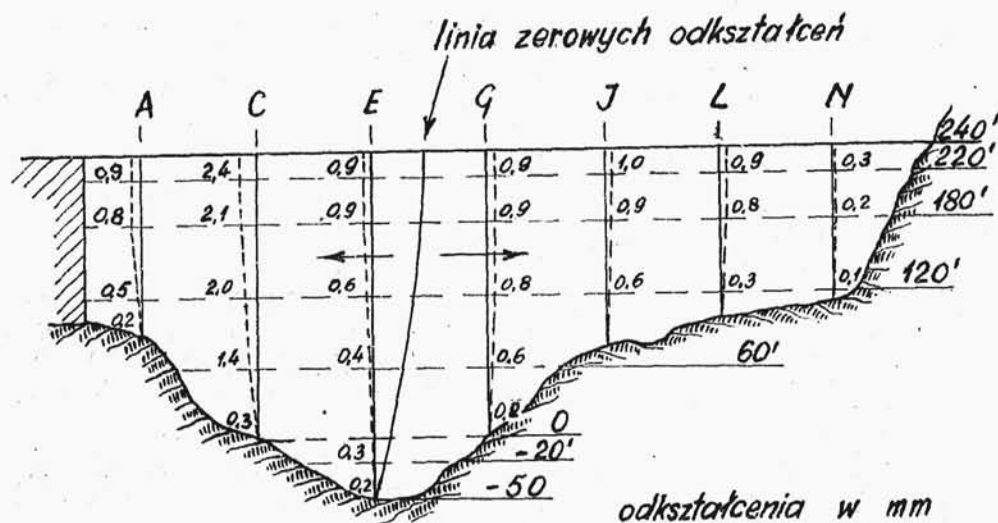
Wyrównanie odkształceń radialnych i obliczone stąd naprężenia stanowiły pierwsze przybliżenie.

Z kolei rozpatrywano odkształcenia styczne

Napężenia w łukach / kg/cm<sup>2</sup>/.

Północna połowa łuków.									
średnia	1		3/4		1/2		1/4		0
	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.
	220	+9,1	+15,7	+18,8	+6,0	+6,5	+17,9	+7,7	+25,1
180	+27,2	+1,3	+21,1	+7,1	+7,6	+20,3	+7,7	+26,4	+7,7
120	+24,3	+12,7	+15,2	+5,6	+5,2	+15,3	+7,7	+21,0	+2,1
60	+17,9	+1,4	+31,1	+0,1	+22,4	+11,0	+18,9	+26,0	+1,9
-20	+28,3	+3,0	+20,5	+5,0	+13,0	+14,3	+5,7	+22,7	+4,3
Południowa połowa łuków									
0	1/4		1/2		3/4		1		średnia
	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	
	+18,7	+15,2	+9,3	+19,8	+4,9	+15,7	+8,9	+17,5	+6,9
+20,9	+15,0	+13,1	+19,6	+8,7	+18,9	+9,4	+11,5	+16,6	180
+18,3	+9,5	+11,2	+15,7	+5,2	+16,8	+4,4	+7,5	+13,2	120
+33,6	+18,9	+26,0	+22,4	+11,0	+31,0	-0,1	+32,0	-1,4	60
+26,0	+6,7	+22,7	+13,0	+14,3	+20,6	+5,4	+28,3	-3,0	-20

*Odkształc. styczne po osi łuku (wyrówn. dla łuków i wsporn.)*



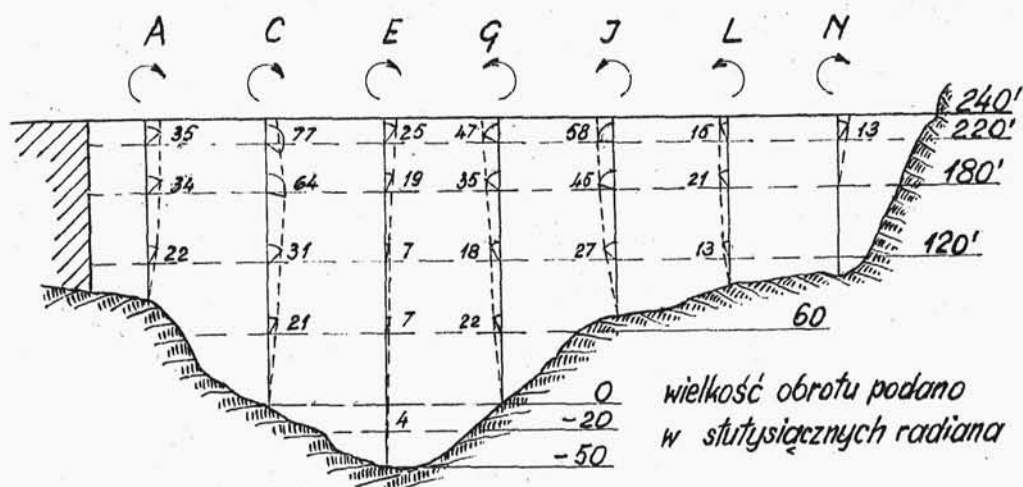
rys.132.

przeprowadzając "wyrównanie odkształceń stycznych łuków i wsporników" /rys.132/. Obliczenie przeprowadzono, wychodząc z otrzymanego podziału obciążeń przy "wyrównaniu odkształceń radialnych". Potrzebne do obliczeń wzory otrzymano przez porównanie pracy sił wewnętrznych i zewnętrznych. Dla ułatwienia wprowadzono typowe obciążenia podobne do linii wpływowej.

Jednocześnie przeprowadzono "wyrównanie obrotu" elementów łuku i wsporników. Otrzymane rezultaty wskazane są na rys.133.

W rezultacie "wyrównania odkształceń styczn-

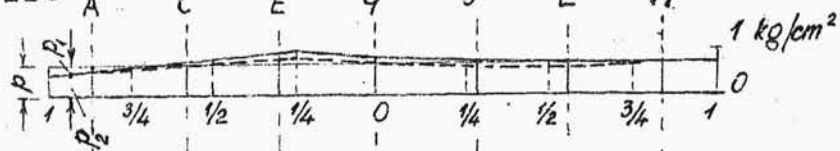
*Obroty elementów łuku po wyrównaniu*



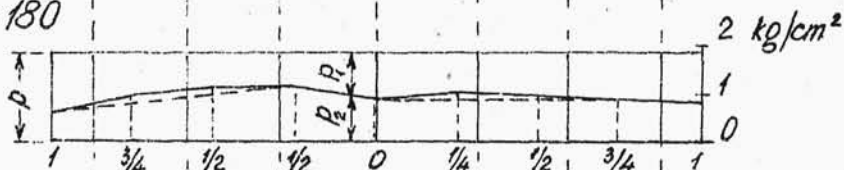
rys. 133.

ných" i "wyrównanie obrotów" została znaleziona pewna wielkość obciążenia łuków i wsporników i obliczone odpowiednie wielkości odkształceń radialnych. Z kolei odkształcenia radialne wymagały ponownego wyrównania. To ostateczne wyrównanie odkształceń radialnych i odpowiedni podział obciążeń stanowiło podstawę do obliczenia ostatecznych wielkości naprężeń. Na rys. 134 linią ciągłą pokazano ostateczny rozdział parcia wody, a na rys. 135 - odkształcenia radialne przy ostatecznym wyrównaniu /linia ciągła/.

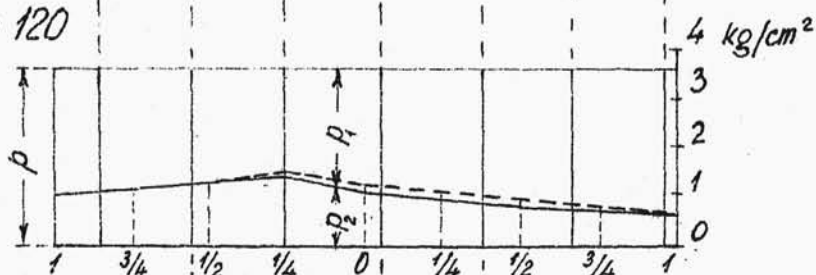
Rzędna 220



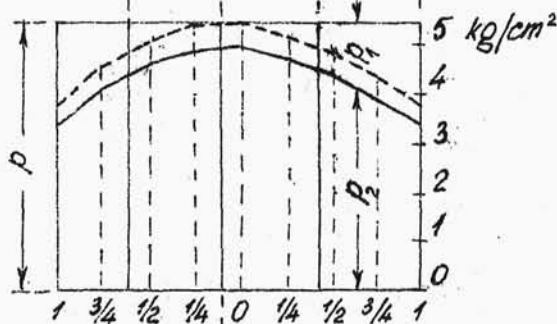
Rzędna 180



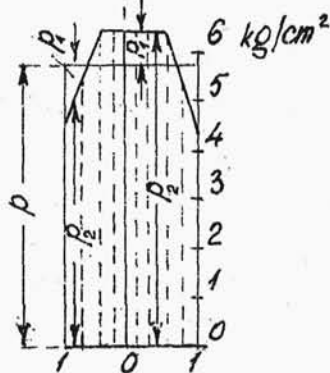
Rzędna 120



Rzędna 60

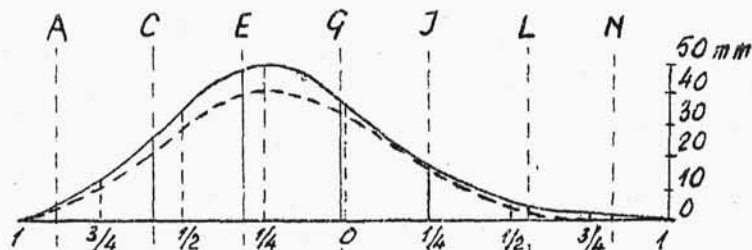


Rzędna -20

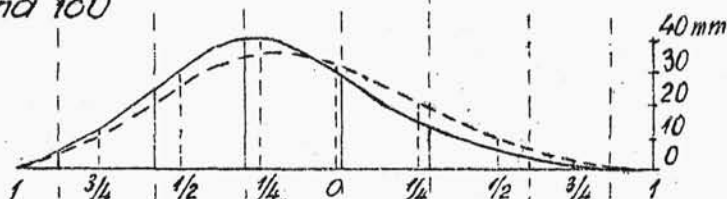


rys. 134.

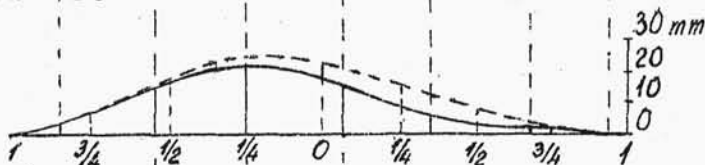
Rzędna 220



Rzędna 180



Rzędna 120



Rzędna 60



rys. 135.

Ostateczne wielkości naprężeń podane są w tabeli na str. 334. Dla porównania podane są różnice wielkości naprężeń pierwszego i ostatecznego wyrównania odkształceń, które przedstawiają pominięty w pierwszym przybliżeniu wpływ

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

Północna połowa łuków.										
Przędna	1		3/4		1/2		1/4		0	
	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.
	220	+11,7	+16,4	+22,3	+6,1	+6,1	+20,7	-2,0	+29,4	+5,7
180	+39,5	+7,5	+22,9	+8,6	+3,5	+27,6	-1,4	+3,2	+10,2	
120	+26,2	+7,4	+12,8	+5,4	+2,3	+14,9	+2,3	+20,0	+2,1	
60	+28,4	-1,1	+28,8	-1,0	+21,1	+9,2	+8,2	+23,6	+1,5	
-20	+28,3	-3,0	+20,6	+5,4	+13,0	+14,3	+6,7	+22,7	+4,3	
Południowa połowa łuków.										
0	1/4		1/2		3/4		1		Przędna	
	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.	wewn.	zewn.
	+22,0	+18,0	+9,8	+24,5	+3,4	+18,8	+9,1	+12,0	+15,5	220
+21,0	+20,0	+11,3	+24,5	+7,0	+20,7	+10,8	+5,1	+26,0	180	
+15,7	+10,0	+8,1	+15,2	+3,1	+14,1	+4,2	+4,5	+13,5	120	
+31,1	+8,2	+23,6	+21,1	+9,2	+28,8	-9,8	+28,3	-1,1	60	
+26,0	+6,7	+22,7	+13,0	+14,3	+20,6	+5,4	+28,3	+3,3	-20	





wyrównania kątowych i stycznych odkształceń /zestawienie na str. 335/.

Po wybudowaniu zapory mierzono ściśle odkształcenia. Odkształcenia radialne w okolicy środka łuku odpowiadały połowie wielkości wyliczonych w ostatecznym wyrównaniu, a na prawym przyczółku były równe lub nieco większe od wyliczonych. Wskazywałoby to na to, że odkształcenie skały jest nieco większe niż przyjęte w założeniach /współczynnik sprężystości skały przyjęto za duży/, podczas gdy współczynnik sprężystości betonu jest raczej większy niż przyjęto w założeniu. Co się tyczy odkształceń stycznych, to wielkość ich - zbyt mała w granicach błędu obserwacji - nie pozwoliła na pomiar, jednakże zauważono, że w kierunku lewego przyczółka są one nieco większe niż to wypadało z obliczeń.

#### U w a g i   k o ń c o w e .

#### Z a s t o s o w a n i e   z a p ó r   ł u k o w y c h .

Zapory łukowe wymagają daleko mniej /o 20 % do 50 %/ materiału na swoją budowę niż zapory ciężkie tej samej wysokości. Zapory łukowe są bardzo stateczne, bo z racji swego kształtu nie mogą się