

ZAPORY ŁUKOWE
/ O ŁUKU POJEDYNCZYM /

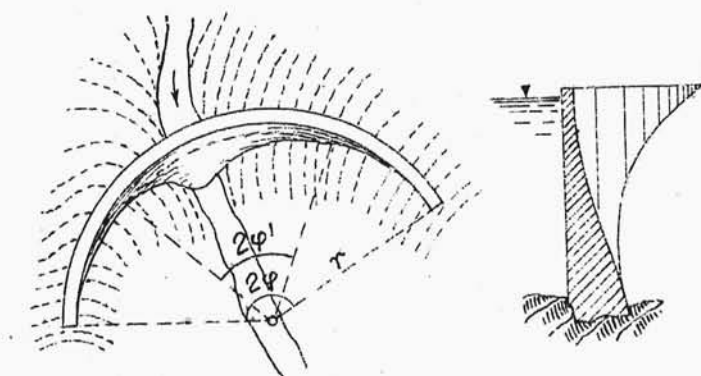
W s t ę p

W zaporach ciężkich, które przeciwstawiają się parciu wody swoim ciężarem, nie można w sposób zadowalniający wykorzystać wytrzymałości materiału. Właściwą drogą do uzyskania ekonomicznie i racjonalnie zbudowanej zapory jest oparcie jej konstrukcji na zasadzie pracy łuków.

Zapora łukowa, jak to z nazwy wynika, przedstawia w rzucie poziomym, w planie, łuk rozpięty między stokami doliny i opierający się o nie /rys. 100/. Zapora łukowa tworzy niejako wycinek naczynia /czasy/ o ściankach co raz grubszych ku dołowi. Parcie wody, działające na grzbiet łuku, przenoszone jest na stok doliny.

K s z t a ł t z a p o r y ł u k o w e j

Pierwsze zapory łukowe wykonane były w ten sposób, że promień krzywizny był stały na wszystkich wysokościach. Wskutek tego, że w co raz niż-



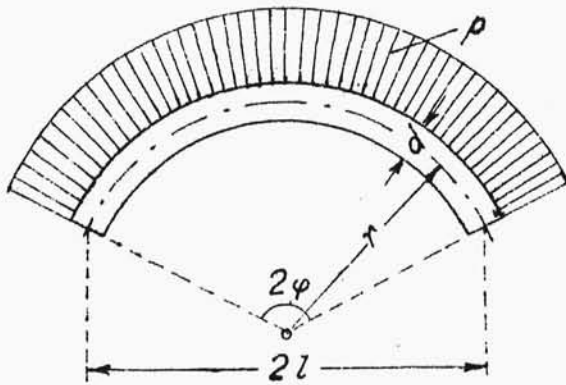
rys. 100.

szych przekrojach szerokość doliny zmniejsza się, zmniejsza się też kąt środkowy / $2\varphi' < 2\varphi$, rys. 100/, łuki dolne były krótkie, płaskie i grube, a więc sztywne. L.R Jorgensen zwrócił uwagę na fakt, że zapora będzie wtedy oszczędnie zbudowana, gdy kąt środkowy 2φ obejmujący łuk będzie miał wielkość określoną z warunku minimum ilości użytego materiału

Jeśli rozpatrywać będziemy łuk o szerokości = 1 /mierzonej pionowo, wzyż zapory/, to znalezienie minimum kubatury łuku sprowadzi się do określenia minimum powierzchni A jego przekroju poziomego /rys.101/

$$A = d.r. 2\varphi ;$$

Minimum A odpowiada takiemu kątowi φ ,



rys. 101.

który spełnia
równanie.

$$\frac{dA}{d\varphi} = 0;$$

Jako podstawę do
rozwiązania po -
wyższego równa -
nia Jorgensen
przyjął wzór Na

viere do obliczenia naprężeń w ściankach naczyń
cienkościennych

$$\sigma = \frac{p \cdot (r + \frac{d}{2})}{d};$$

lub

$$d = \frac{2pr}{2\sigma_{\text{dop}} - p};$$

gdzie p oznacza parcie wody na rozpatrywany łuk.

Ponieważ

$$r = \frac{l}{\sin \varphi};$$

więc wzór dla A można ostatecznie przedstawić
następująco

$$A = \frac{2pl^2}{2\sigma_{\text{dop}} - p} \cdot \frac{\varphi}{\sin^2 \varphi} = C \cdot \frac{\varphi}{\sin^2 \varphi};$$

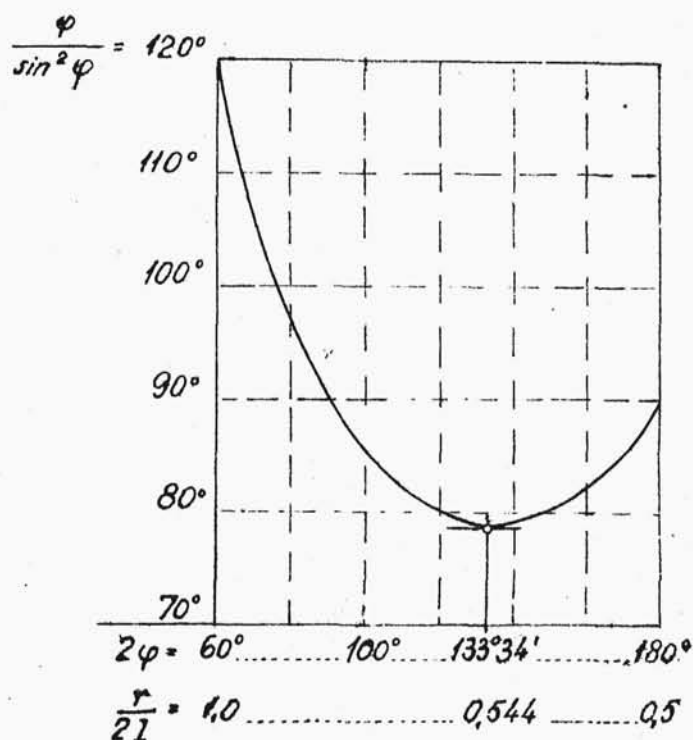
Wielkości wchodzące do czynnika C są niezależne
od φ

$$\begin{aligned}\frac{dA}{d\varphi} &= C \cdot \frac{\sin^2 \varphi - 2\varphi \cdot \sin \varphi \cos \varphi}{\sin^2 \varphi} = \\ &= C \cdot \frac{1 - 2\varphi \operatorname{ctg} \varphi}{\sin^2 \varphi} = 0;\end{aligned}$$

Licznik tego ułamka staje się zerem dla

$$2\varphi = 133^{\circ}34';$$

/rozwiązanie przybliżone, gdyż funkcja jest nie-
oznaczona/. Wykres na rys.102 przedstawia zmien-
ność funkcji $\frac{\varphi}{\sin^2 \varphi}$ w zależności od 2φ Widać



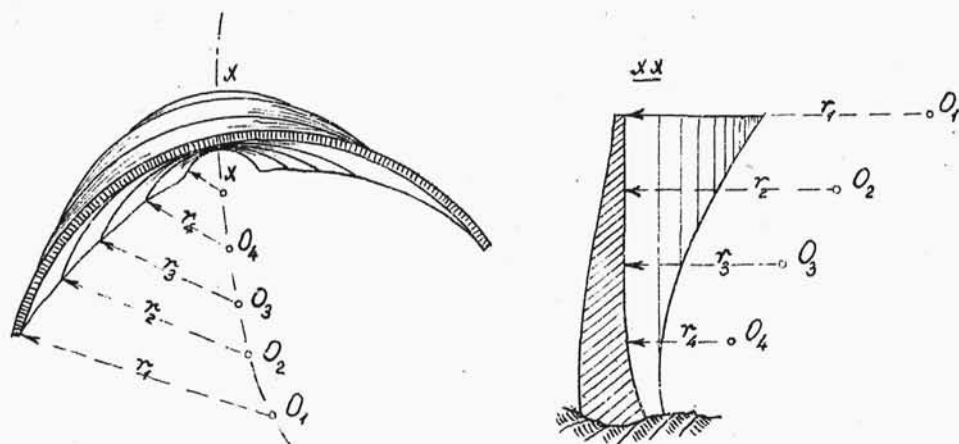
rys. 102.

z tego wykresu, że dla 2φ zawartego w granicach od 120° do 145° powierzchnia A niewiele odbiegać będzie od swej wartości najmniejszej. Najwłaściwszy promień krzywizny równa się

$$r = 0,544 \cdot 2l ;$$

Powyższy wywód Jorgensena doprowadził do projektowania zapór łukowych o stałym kącie środkowym /constant angle/, oszczędniejszych - jeśli chodzi o kubaturę muru. Poza tym jednak wynik powyższy nie ma istotnego znaczenia jako nieścisły, oparty na bardzo przybliżonym określeniu naprężeń σ /porów. "Obliczenie statyczne sklepień" zapór o łukach wielokrotnych/

Kształt zapory o stałym kącie środkowym na wszystkich wysokościach pokazany jest na rys 103



rys.103.

Ściany zapory są zakrzywione w przekroju pionowym, a nie proste, jak w zaporach ciężkich. W tym typie zapór promień krzywizny łuków położonych niżej stopniowo maleje, łuki stają się coraz bardziej wyniosłe, są względnie cienkie i sprężyste.

W rzeczywistości - wobec nieregularnego kształtu doliny - zmieniamy na różnych wysokościach zarówno kąt środkowy jak wielkość promienia, tak aby otrzymać najoszczędniejsze wymiary zapory. Promień /ewentualnie także kąt środkowy/ zmieniamy co 3...4...5...10...15 m zależnie od wysokości zapory. Wielkość promienia zwykle nieco większa od połowy rozpiętości łuku.

Zamiast łuków kołowych można zastosować inne krzywe /np krzywą odpowiadającą krzywej sznurowej, wykreślonej dla parcia wody działającego na łuk/. Jednak komplikuje się wtedy obliczenie zapory - już i tak bardzo zawiłe - oraz utrudnia wykonanie, które nawet w wypadku stosowania łuków kołowych nie jest łatwe.

S i ł y d z i a ł a j ą c e n a z a p o r ę .

Na zaporę łukową działają następujące siły:

Zbiorniki i zapory cz.II

1. parcie wody,
2. siły wywołane spadkiem lub wzrostem temperatury zewnętrznej,
3. siły wywołane różnicą temperatury innej z każdej strony zapory /silne nagrzanie lub oziębienie jednej strony zapory/,
4. siły powstające wskutek skurczu betonu.

Pewnych wyjaśnień wymaga wpływ wahania temperatur, który w zaporach łukowych jest bardzo znaczny. Przy obliczaniu bardzo dużych zapór łukowych uwzględnić trzeba jeszcze wiele innych czynników, jak np. odkształcenie skały pod fundamentem zapory, zmienność współczynnika sprężystości betonu i t.d., co obszernie omówione jest w rozdziale o zaporze w kanionie Boulder na rz. Colorado.

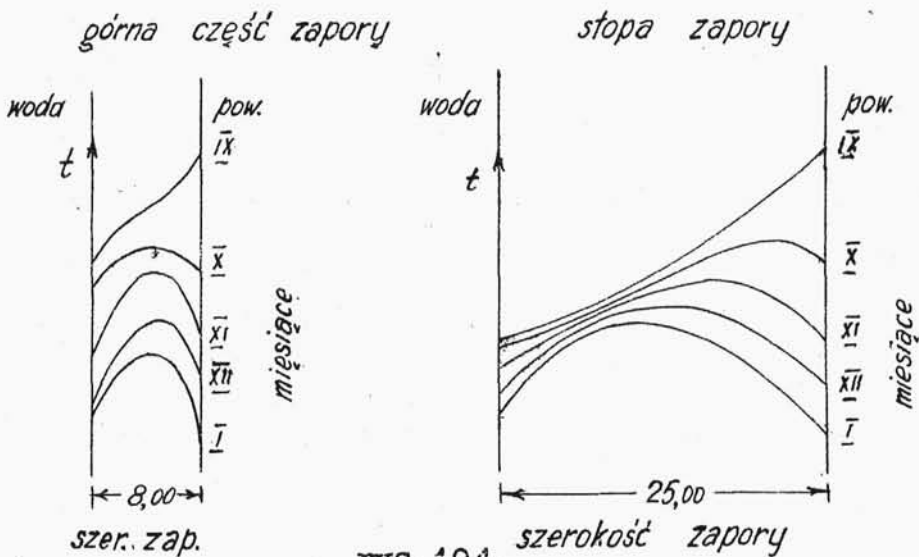
W p ł y w z m i a n t e m p e r a t u r y .

Obniżenie się temperatury zewnętrznej wywołuje kurczenie się łuku, ujawnia się więc jak parcie wody, potęgując jego wpływ. Natomiast podniesienie się temperatury powoduje rozszerzanie się łuków, a więc powoduje częściowe anulowanie wpływu parcia wody. Zatem w obliczeniach powinien być uwzględniony wpływ spadku temperatury zewnętrznej.

Różnica między działaniem parcia wody a wpływem spadku temperatury polega na tym, że wpływ obniżenia się temperatury znika z chwilą powstania odkształceń, gdy tymczasem parcie hydrostatyczne występuje stale, niezależnie od odkształceń.

Niemniej ważny jest wpływ różnicy temperatury innej po każdej stronie zapory. Od strony wody wahania temperatury są nieznaczne /przy zbiorniku pełnym/, ponieważ woda jako zły przewodnik ciepła przystosowuje swoją temperaturę bardzo wolno do ciepłoty otoczenia. W dodatku wahania te, wyraźnie bliżej powierzchni wody, stają się co raz mniejsze w głębszych warstwach /rys. 104/. Tymczasem na

Zmiany temperatury w różnych miesiącach



rys. 104.

powierzchni zapory od strony powietrza nie ma żadnego czynnika wyrównującego wahania temperatury i tam są one bardzo silne. Na rys. 104 pokazano obserwacje zmian temperatury wewnątrz zapory Cignano we Włoszech /L'Energia Elettrica Nr 2 z roku 1933/.

W rezultacie - gdy zaporą zwrócona jest stroną wypukłą na północ - wystąpi silne nagrzewanie strony odpowietrznej, gdy po drugiej stronie temperatura będzie nieco wyższa ponad $+ 4^{\circ} \text{C}$. Jeszcze gorzej będzie w zimie, gdy zbiornik będzie pusty, bo wtedy strona odwodna zapory będzie przemarzała, a strona odpowietrzna silnie nagrzewana /mowa wciąż o zaporze zwróconej wypukłością na północ/. W konsekwencji mogą powstać niepożądane pęknięcia od strony wody. Wypadek taki zajść może jedynie pod koniec budowy zbiornika, gdy zaporą jest już gotowa, a zbiornik jeszcze nie wypełniony. Normalnie bowiem zbiornik w zimie jest pełny, a w takim znów wypadku niekorzystnie odbija się silne oziębianie strony odpowietrznej, zwłaszcza gdy ta strona jest skierowana na północ, od strony wody tymczasem zaporą może mieć tempera-

ture wyższą, około $+ 4^{\circ} \text{C}$. W lecie niebezpieczny może być wypadek insolacji strony odwodnej, gdy zbiornik jest pusty /co często w lecie ma miejsce/. Sytuację ratuje jednak to, że zaporą nie jest obciążona wtedy parciem wody.

Największe naprężenia ściskające na krawędzi od strony wody występują w zworniku pod wpływem parcia wody i wzrostu temperatury zewnętrznej, zaś na krawędzi od strony powietrza - w węzłach pod wpływem parcia wody, spadku temperatury zewnętrznej i skurczu betonu, ewentualnie także pod wpływem insolacji podniebienia łuku w ziemi przy pustym lub pełnym zbiorniku /porów. tabelę na str.61/.

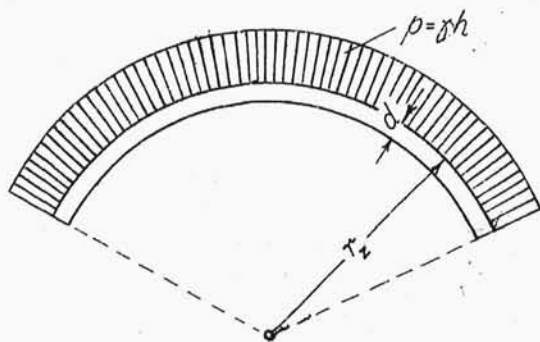
Aby otrzymać jak najmniejsze naprężenia wskutek wahań temperatury i skurczu betonu, należy starać się zaprojektować jak najcieńszą zaporę. Z drugiej strony jednak zaporą nie może być zbyt cienka, aby nie przemarzała. Przed wpływem samego skurczu betonu możemy się ochronić użyciem odpowiedniego cementu oraz przez wykonanie dużej liczby szczelin dylatacyjnych i jak najpóźniejsze ich zamknięcie.

Przybliżone obliczenie zapory łukowej

Zasadniczym elementem obliczeniowym jest łuk bezprzegubowy na końcach zamocowany i obciążony parciem wody. Te elementy łukowe obliczano dawniej w sposób bardzo przybliżony uważając, że poszczególne łuki są niezależne /nie powiązane ze sobą/, niesprężyste i że grubość ich jest niewielka w stosunku do rozpiętości. Posługiwano się wzorem Naviera dla cylindrycznych naczyń cienkościennej jednostajnie obciążonych z zewnątrz:

$$d = \frac{p \cdot r_z}{\bar{q}_{dop}} ;$$

p - jednostkowe parcie wody w głębokości h ;
/rys.105/. Zapora łukowa zachowuje się jednak zu-



rys.105.

pełnie inaczej, niż ściany naczynia cylindrycznego, a wzór powyższy może dać tylko ogólne pojęcie o wymiarach zapory łukowej.

O b l i c z e n i e s t a t y c z n e ł u k u .

Dokładniejsze obliczenie zapór łukowych polega na uwzględnieniu teorii sprężystości elastycznych łuków, za jakie można uważać poziome wycinki zapory stosunkowo bardzo cienkiej. Rachunek jest żmudny i długotrwały, głównie dlatego, że poziome elementy łukowe mają w różnych głębokościach różne rozpiętości, promienie krzywizny, grubości i poddane są różnym parciom wody, nie mówiąc już o skomplikowanej budowie wzorów. Wprowadza się więc do rachunku różne upraszczające założenia, buduje pomocnicze wykresy, tabele i t.p..

Tego rodzaju obliczenie dokonane przez Rittera ma dzisiaj zastosowanie przy obliczaniu zapór o łukach wielokrotnych. W zastosowaniu do zapór łukowych obliczenie Rittera przedstawia dużo niedociągnięć i uproszczeń, nie odpowiadających rzeczywistości, tak że obliczenie łuku musiano oprzeć na innych założeniach.

Ścisłe obliczenie
zapory łukowej.

Wstęp.

Naczelną zasadą do niedawna stosowanego analitycznego obliczenia zapory łukowej było sprawdzanie elementów łukowych niezależnie jednego od drugiego i z pominięciem ich ciężaru własnego. Tymczasem poszczególne łuki nie spoczywają luźno na sobie, lecz tworzą jeden nieprzerwany maszyn zapory. Błąd, wynikający z odrzucenia tej okoliczności, jaskrawo uwydatnia się przy analizie odkształceń najniższych łuków. Łuki te mogą być nawet względnie cienkie w porównaniu do swej rozpiętości, a jednak myśl o możliwości sprężystego ugięcia się tych łuków jest wprost nie do przyjęcia, gdyż najniższe łuki, choćby bardzo cienkie, nie ugną się z powodu oddziaływania /ciężaru/ całego muru leżącego powyżej oraz wskutek wpływu zamocowania fundamentu zapory w dnie doliny, przy czym bez wątpienia wpływ ten będzie sięgał na pewną wysokość ponad dno doliny i na pewną odległość od stoków.

Możemy sobie zatem wyobrazić, że parcie wody

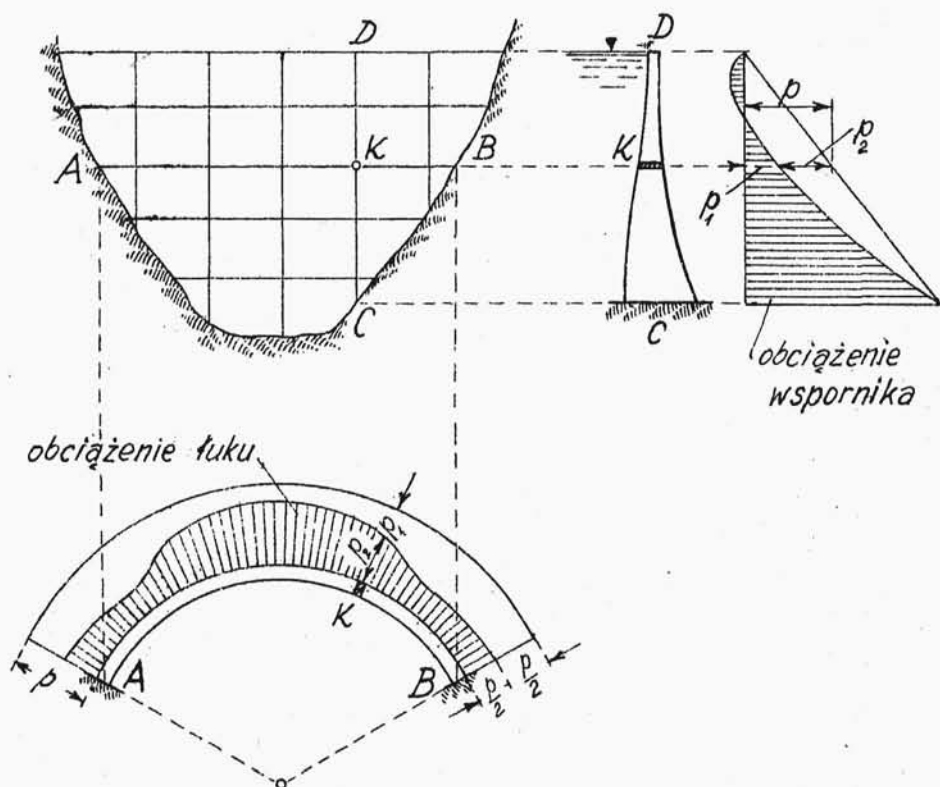
przenosi się nie tylko na stoki doliny przez łukowe poziome elementy zapory, ale także na dno doliny przez elementy pionowe - wsporniki - zamocowane jednym końcem w skale. Tak samo jak elementów łukowych nie można sobie wyobrażać luźno na sobie leżących, nie należy przedstawiać sobie owych wsporników jak by luźno obok siebie ustawionych; one także stanowią całość.

Zaporę łukową można więc przedstawić sobie jako sprężystą, wygiętą łukowo płytę, zamocowaną w stokach i w dnie.

Objaśnienie metody.

Konieczność uwzględnienia zginania zapory w dwu płaszczyznach: poziomej i pionowej, prowadzi do obliczania poziomych elementów łukowych oraz pionowych elementów, które nazywać będziemy wspornikami.

Jeśli podzielimy zaporę płaszczyznami poziomymi i pionowymi /radialnymi/ na łuki i wsporniki /rys. 106/, to omawiane zagadnienie możemy w ten sposób sprecyzować. Dowolny pt K należy jednocześnie do pewnego wspornika CD i do pewnego



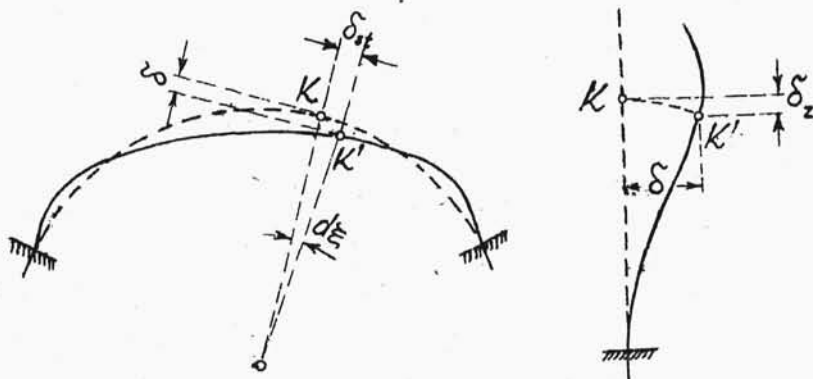
rys.106.

łuku AB , z którymi razem się odkształca. Wspornik odkształca się pod działaniem pewnego obciążenia p_1 , będącego tylko częścią parcia hydrostatycznego, łuk zaś obciążony jest pozostałą częścią p_2 parcia wody. Całe zagadnienie będzie rozwiązane z chwilą ustalenia rozdziału parcia wody na dwie części, z których jedna obciąża tylko wspornik, a pozostała tylko łuk. Wtedy bowiem, znając obciążenia, obliczymy naprężenia w poszczególnych

punktach zapory.

Aby dokonać odpowiedniego rozdziału parcia wody, trzeba skorzystać z warunku, że ugięcie wspornika CD w pcie K pod działaniem części parcia p_1 musi być identyczne z ugięciem łuku AB w tym samym pcie K pod wpływem reszty parcia wody $/p_2/$. Można to inaczej wypowiedzieć: parcie wody rozdziela się na dwie części /działające osobno na wspornik, osobno na łuk/, które są proporcjonalne do sztywności wsporników i łuków.

Pt K /rys. 107/ doznaje przesunięcia δ w kierunku promienia, przesunięcia pionowego δ_z , przesunięcia δ_{st} w bok po stycznej do łuku oraz skręcenia o $\angle d\xi$. Rachunek, który by uwzględnił wszystkie te odkształcenia, doprowadziłby do wzorów tak



rys. 107.

zawiliych, że przekreślone byłoby znaczenie tej metody jako metody praktycznej. Należy więc poczynić pewne uproszczenia, które jednak nie zmniejszają wartości omówionej metody, metody ujmującej pracę zapory w sposób najbardziej zbliżony do rzeczywistości. Byłoby bezcelowe ustalać zupełnie ściśle wzory, w których występujące wartości są przybliżone, lub wręcz hipotetyczne np. wpływ temperatury, zmienność współczynnika sprężystości betonu, nieregularny kształt doliny, niezupełnie sztywne zamocowanie łuków i wsporników w skale i t.d.. Uproszczenia polegają na pominięciu wszystkich przesunięć z wyjątkiem przesunięcia δ . Należy zatem rozwiązać równania

$$\delta_{nsp} = \delta_{luk} ;$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 ;$$

Przebieg obliczenia

Kolejność obliczeń jest następująca:

- 1 - przybliżone określenie wymiarów zapory,
- 2 - pierwsze prawdopodobne rozdzielenie parcia wody,
- 3 - ustalenie odkształcenia wsporników,