



AGH

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Czyste energie

wykład 10

Energetyka wodna

dr inż. Janusz Teneta

**Wydział EAIiB
Katedra Automatyki i Robotyki**

AGH Kraków 2018

Cykl krążenia wody w przyrodzie



Co to jest hydroelektrownia?

Elektrownia wodna (hydroelektrownia) to zakład przetwarzający energię kinetyczną wody spływającej z wyżej położonych terenów takich jak np. góry, czy wyżyny do zbiorników wodnych (mórz lub jezior) położonych np. na nizinach na energię elektryczną. Płynąca woda napędza turbinę połączoną z generatorem. W przypadku hydroelektrowni wykorzystujących spiętrzenie wody – jej energia potencjalna jest zamieniana w turbinach na energię kinetyczną.

Typy elektrowni wodnych

- **Śródlądowe**

- przepływowe
- na zbiornikach o okresowym regulowaniu przepływu
- w kaskadzie zwartej
- pompowe i elektrownie z członem pompowym

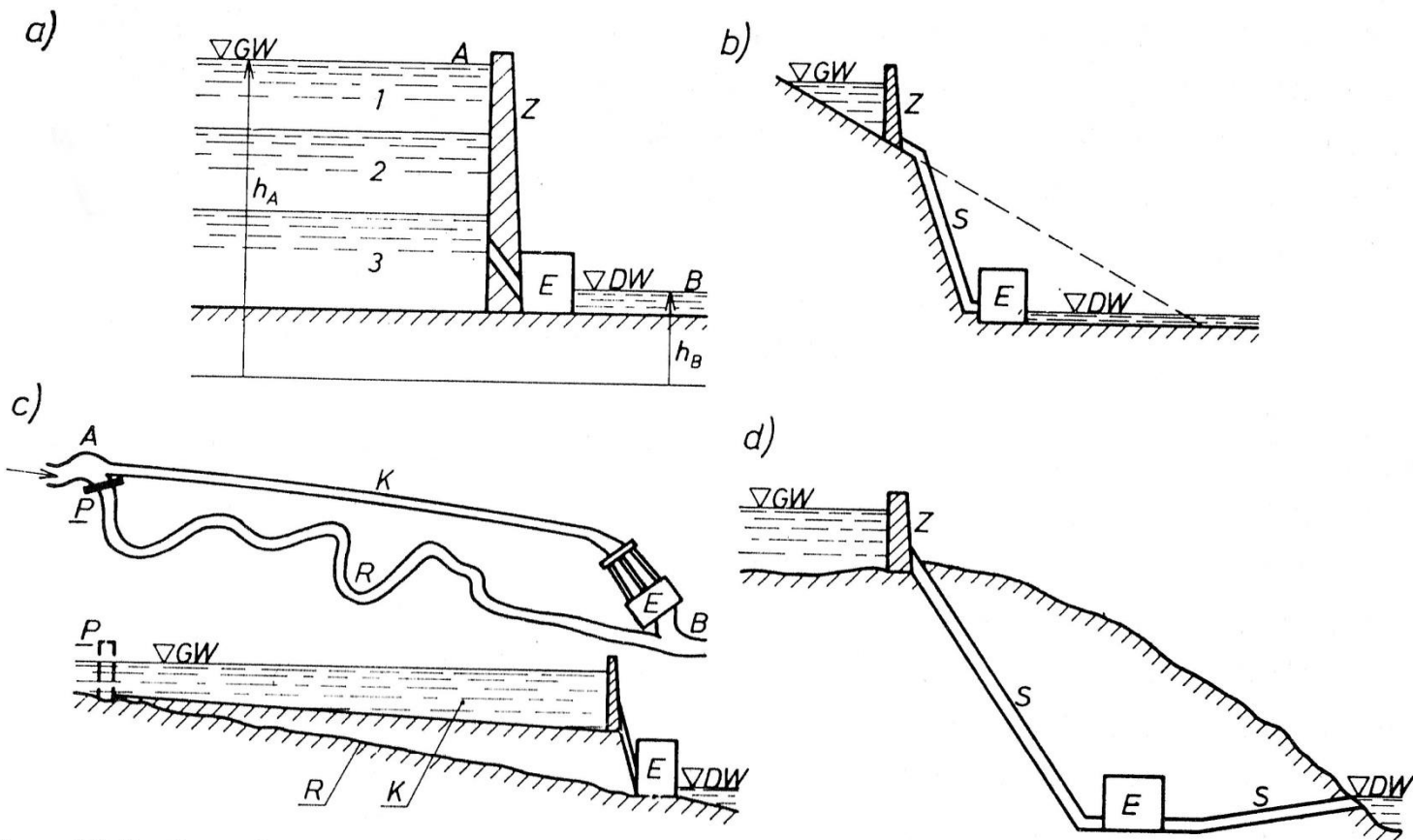
- **Morskie / Oceaniczne**

- Pływowe
- Falowe
- Maretermiczne

Typy elektrowni wodnych

- **Ze względu na sposób koncentracji piętrzenia:**
 - Elektrownie przyjazowe (małe piętrzenie w poprzek rzeki wybudowane w celu utrzymywania stałego poziomu wody)
 - Elektrownie przyzaporowe (duże budowle hydrotechniczne o znaczeniu retencyjnym i energetycznym)
 - Elektrownie z derywacją kanałową
 - Elektrownie z derywacją ciśnieniową
 - Elektrownie z derywacją mieszaną: kanałowo-rurociągową

Sposoby sztucznego spiętrzania wody



Rys. 12.2. Sposoby sztucznej koncentracji spadu

E – elektrownia wodna; *K* – kanał skracający; *P* – przegroda; *R* – koryto rzeki; *Z* – zaporę; *S* – sztolnia (derywacja ciśnieniowa); *1* – warstwa retencyjna; *2* – warstwa energetyczna; *3* – warstwa martwa; *DW* – dolna woda; *GW* – górna woda

Energia wody i moc elektrowni wodnej

W rzecznych elektrowniach wodnych energię elektryczną uzyskuje się z energii kinetycznej a zwłaszcza z energii potencjalnej wody.

Równanie Bernoulliego (energia jednostki masy płynu):

$$\frac{c^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

gdzie:

c - prędkość wody [m/s],

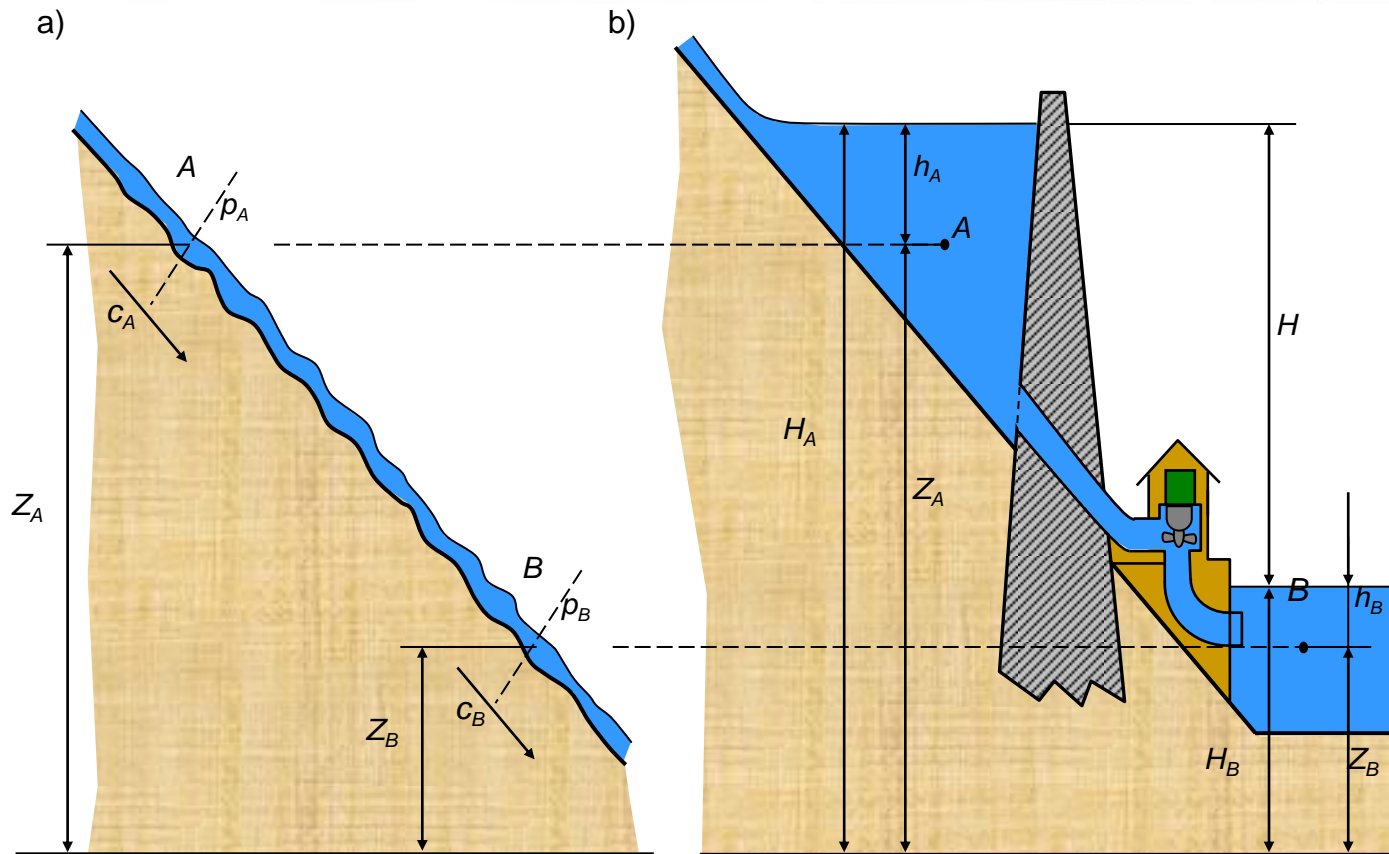
g - przyspieszenie ziemskie [m/s²],

h - wysokość [m],

p - ciśnienie [Pa],

ρ - gęstość wody [kg/m³]

Przekrój przez koryto rzeki



a) w stanie naturalnym

b) po wybudowaniu zapory.

Energia wody i moc elektrowni wodnej

Energia wody w każdym przekroju rzeki wynosi

$$E_A = \left[g \cdot Z_A + \frac{p_A}{\rho} + \frac{c_A^2}{2} \right] \cdot \rho \cdot V$$

$$E_B = \left[g \cdot Z_B + \frac{p_B}{\rho} + \frac{c_B^2}{2} \right] \cdot \rho \cdot V$$

$$g \cdot Z$$

Energia potencjalna

$$\frac{p}{\rho}$$

Energia ciśnienia

$$\frac{c^2}{2}$$

Energia kinetyczna

gdzie:

c - prędkość wody [m/s],

g - przyspieszenie ziemskie [m/s²],

h - wysokość [m],

p - ciśnienie [Pa],

ρ - gęstość wody [kg/m³],

Z_A, Z_B - wzniesienie przekrojów A i B nad dowolny poziom odniesienia [m],

p_A, p_B - ciśnienie na poziomie lustra wody [Pa],

c_A, c_B - średnia prędkość wody [m/s],

V - objętość przepływającej wody [m³].

Energia rozwijana przez rzekę między dwoma przekrojami

$$E_{AB} = E_A - E_B = \left[g \cdot (Z_A - Z_B) + \frac{p_A - p_B}{\rho} + \frac{c_A^2 - c_B^2}{2} \right] \cdot \rho \cdot V$$

gdzie:

- c - prędkość wody [m/s],
- g - przyspieszenie ziemskie [m/s²],
- h - wysokość [m],
- p - ciśnienie [Pa],
- ρ - gęstość wody [kg/m³],
- Z_A, Z_B - wzniesienie przekrojów A i B nad dowolny poziom odniesienia [m],
- p_A, p_B - ciśnienie na poziomie lustra wody [Pa],
- c_A, c_B - średnia prędkość wody [m/s],
- V - objętość przepływającej wody [m³].

Energia oddawana turbinie

Po wybudowaniu zapory uzyskuje się koncentrację spadu i możliwość wykorzystania energii strumienia wody w turbinach wodnych. Na poziomach Z_A i Z_B znajdują się środki ciężkości mas wody na górnym i dolnym poziomie. Pozostałe oznaczenia:

h_A, h_B - głębokość położenia środka ciężkości masy wody pod lustrem wody [m],

H_A, H_B - poziom niwelacyjny lustra wody w stosunku do poziomu odniesienia [m],

H - spad niwelacyjny [m].

Po uwzględnieniu zależności:

$$H = H_A - H_B$$

$$H_A = Z_A + h_A$$

$$H_B = Z_B + h_B$$

$$p_A = h_A \cdot \rho \cdot g$$

$$p_B = h_B \cdot \rho \cdot g$$

Po przekształceniach:

$$E_{AB} = \left[g \cdot H + \frac{c_A^2}{2} - \frac{c_B^2}{2} - g \sum h_{str} \right] \cdot \rho \cdot V$$

Energia użyteczna

$$E_u = g \cdot H + \frac{c_A^2}{2} - \frac{c_B^2}{2} - g \sum h_{str}$$

gdzie:

$g \cdot H$ energia potencjalna wody w zbiorniku górnym,

$\frac{c_A^2}{2}$ energia kinetyczna związana z ruchem wody w górnym zbiorniku z prędkością c_A ,

$\frac{c_B^2}{2}$ energia kinetyczna wody odpływającej na dolnym poziomie z prędkością c_B ,

$g \cdot \sum h_{str}$ strata energii związana z oporami przepływu wody w doprowadzeniach i odprowadzeniach z turbiny.

Energia elektryczna

$$E_{el} = E_u \cdot \rho \cdot V \cdot \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g$$

gdzie:

η_t sprawność turbiny wodnej [0,88 – 0,93]

η_p sprawność przekładni,

η_g sprawność generatora [0,95 – 0,98]

Moc elektrowni wodnej

Jeśli cała różnica poziomów wody jest skoncentrowana na niewielkim obszarze, można pominąć spadki ciśnienia w przewodach doprowadzających wodę do turbiny. Na ogół prędkości wody przed i za spiętrzeniem są zbliżone, czyli $c_A = c_B$. W takich przypadkach podstawową rolę w przemianie energii wody na elektryczną odgrywa energia potencjalna. Wcześniejsze wzory można uprościć do postaci:

$$E_u = g \cdot H$$

I idąc dalej:

$$P_{el} = \frac{E_{el}}{t}$$

$$P_{el} = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g$$

gdzie:

Q - przepływ turbiny, czyli objętość strumienia wody przepływającego przez turbinę w ciągu sekundy [m^3/s],

Moc elektrowni wodnej

Moc wytwarzana w elektrowni wodnej wykorzystującej energię rzeki między jej przekrojami *A* i *B* zależy od wysokości spadku wody (różnicy poziomów przed i za turbiną), wielkości przepływu *Q* oraz sprawności turbiny wodnej, przekładni i generatora.

Moc elektrowni wodnej to moc czynna oddawana do sieci energetycznej. W obliczeniach mocy należy zatem uwzględnić także sprawność układu wyprowadzenia mocy, tj. straty, jakie powstają na drodze przesyłu wytworzonej energii, od generatora aż do sieci, powodowane przez kable, szyny, przełączniki, transformatory itp. Ostatecznie moc oddawana do sieci przez elektrownię wodną przy założeniu

$\rho = 1000$ [kg/m³], a $g = 9,81$ [m/s²] wynosi:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_s$$

gdzie:

η_s

sprawność układu wyprowadzającego moc do systemu elektroenergetycznego.

Moc elektrowni wodnej

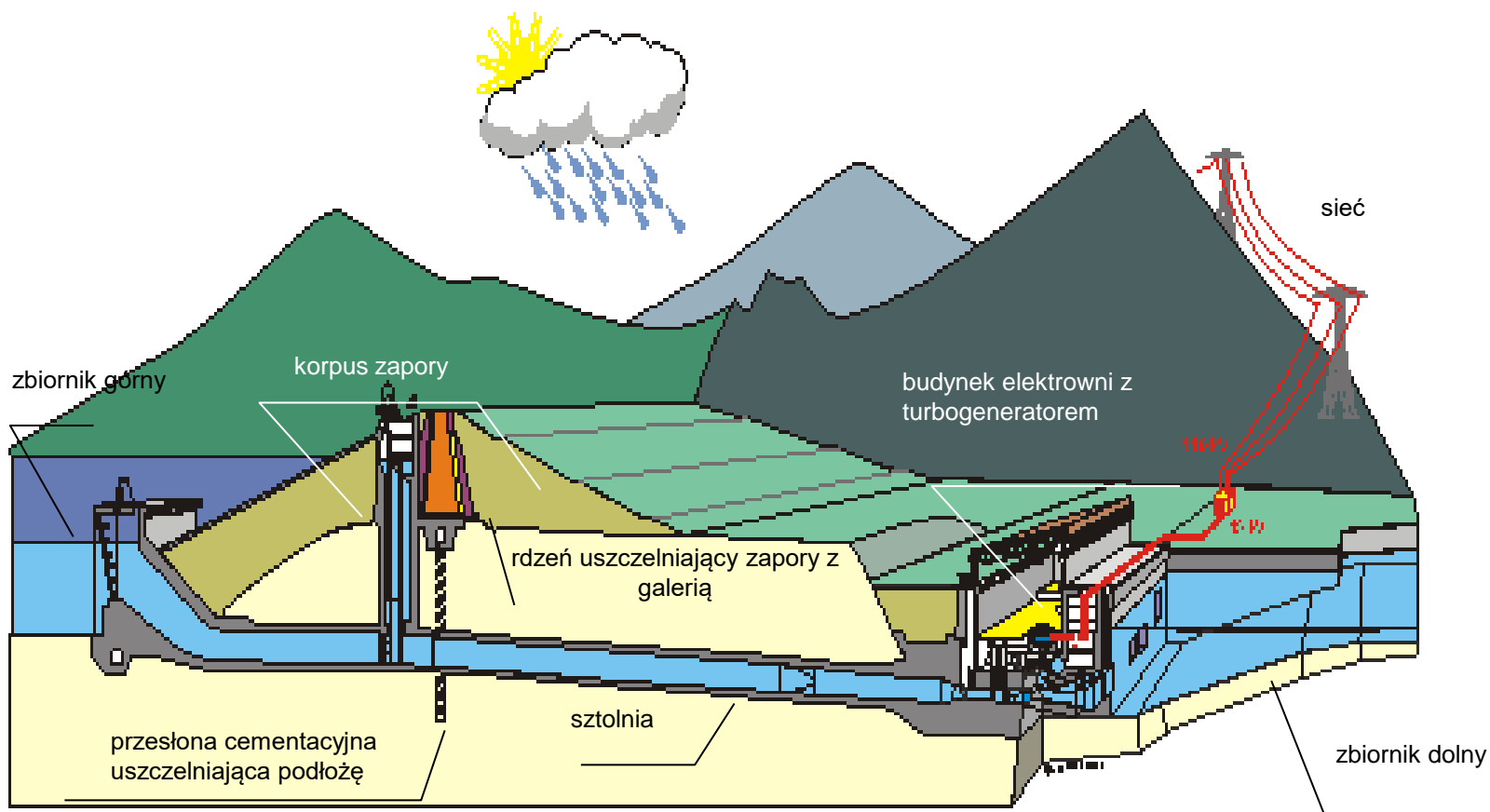
W obliczeniach mocy czynnej oddawanej przez elektrownię wodną często stosowana jest nieco przekształcona postać powyższego wzoru :

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad [\text{kW}]$$

gdzie:

η - współczynnik sprawności elektrowni wodnej [0,84 – 0,9]

Przekrój przykładowej hydroelektrowni



Przykład realizacji praktycznej

W budownictwie hydrotechnicznym wyróżnia się zapory betonowe, zapory ziemne i kanały. W Polsce najbardziej są rozpowszechnione zapory betonowe typu ciężkiego. Zapory ziemne są budowane na terenach nizinnych. W celu ujęcia wody filtrującej przez zaporę stosuje się system drenażowy. Zapory są wykorzystywane często jako drogi komunikacji publicznej. Nie każda hydroelektrownia wyposażona jest w zaporę.



Zapora Hoovera (USA) o wysokości 220 m

Typy turbin wodnych

Zależnie od przebiegu zjawisk energetycznych przy przepływie wody przez wirnik, turbiny wodne dzieli się na:

- ***akcyjne (natryskowe),***

- ***reakcyjne (naporowe).***

Typy turbin wodnych

W turbinie akcyjnej (natryskowej) przemiana energii potencjalnej związanej z ciśnieniem wody na poziomie wlotu do turbiny na energię kinetyczną odbywa się w dyszy, która przekazuje tę energię wirnikowi.

Woda z prędkością c_1 pod ciśnieniem atmosferycznym pa jest doprowadzona do wirnika, gdzie następuje przetwarzanie energii kinetycznej wody na energię ruchu obrotowego. Prędkość wylotowa wody zmniejsza się do c_2 .

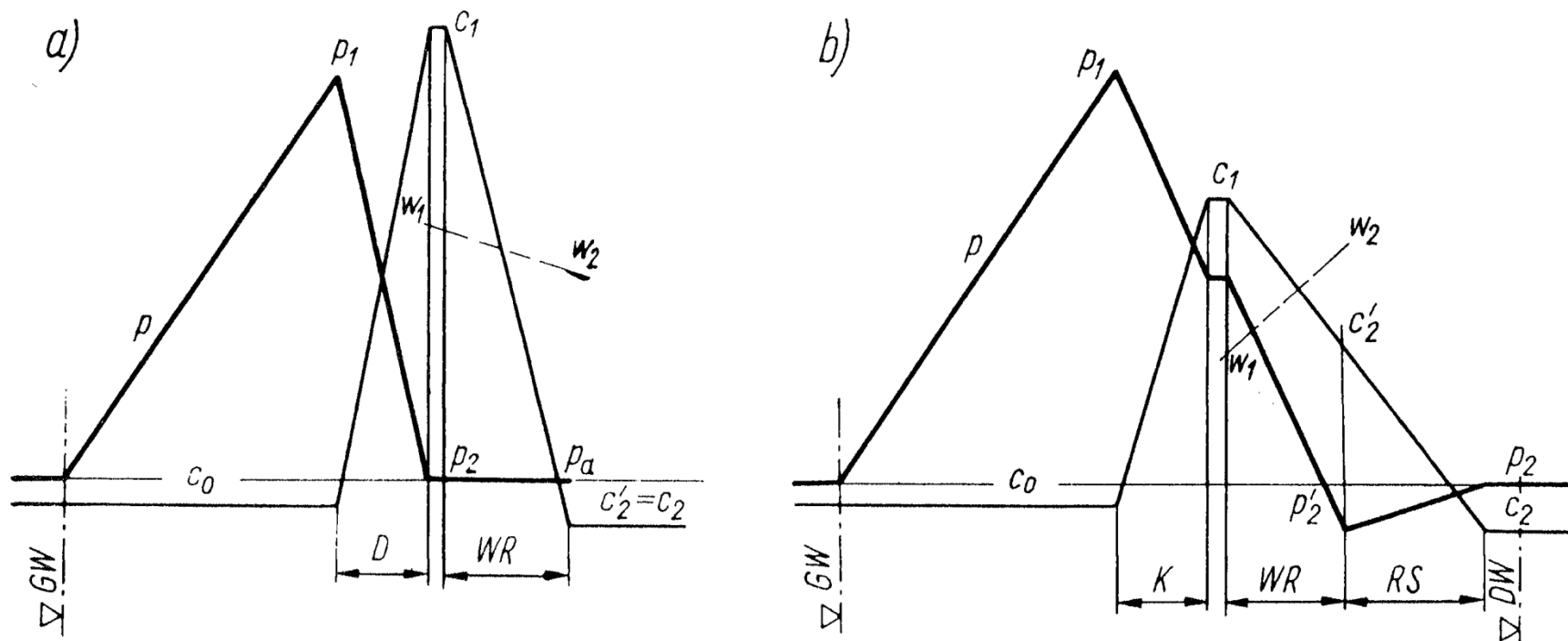
Wirnik turbiny akcyjnej jest zasilany na części obwodu i powierzchnie tylne łopatek nie stykają się z wodą. Konieczność umieszczenia wirnika nad zwierciadłem dolnej wody powoduje stratę pewnej części spadu. Ponieważ turbiny akcyjne są stosowane pod spadami najwyższymi, więc strata procentowa spadu jest nieznaczną.

Przykładem turbiny akcyjnej jest turbina wodna Peltona.

Typy turbin wodnych

W turbinie reakcyjnej (**naporowej**) przemiana energii potencjalnej wody w energię kinetyczną wirnika odbywa się częściowo w aparacie kierowniczym i częściowo w samym wirniku. Woda przepływając między łopatkami wirnika, doznaje odpowiedniego przyspieszenia i zwiększenia prędkości. Wirnik turbiny reakcyjnej jest na całym obwodzie zasilany wodą, która przepływa przez niego strugą ciągłą i za pomocą rury ssącej jest doprowadzana do poziomu dolnego.

Typy turbin wodnych



Rys. 12.3. Zmienność ciśnienia i prędkości w turbinie oraz odpowiednie trójkąty prędkości:
a) turbina akcyjna; b) turbina reakcyjna

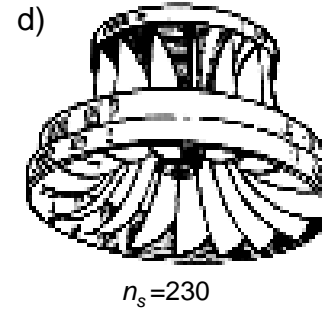
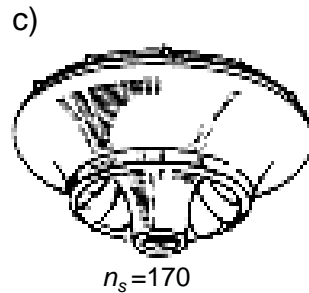
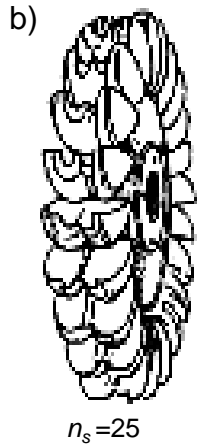
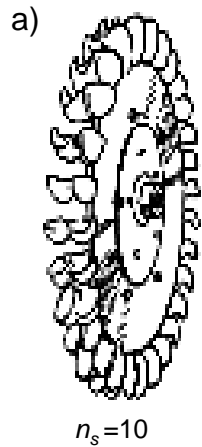
c_0 – prędkość wlotowa wody do turbiny; c_1 – prędkość wody na wylocie z dyszy D lub kierownic K ; c_2' – prędkość wody na wylocie z wirnika turbiny; c_2 – prędkość wody na wlocie do wody dolnej; w – względna prędkość wody w wirniku; u – prędkość (wypadkowa); p_a – ciśnienie atmosferyczne; p – ciśnienie wody w danym punkcie słupa wody; ℓ – łopata; WR – wirnik turbiny; RS – rura ssąca

Typy turbin wodnych

Ze względu na konstrukcję wirnika i sposób przetwarzania energii rozróżnia się następujące typy turbin wodnych i stosowane dla nich zakresy spadów:

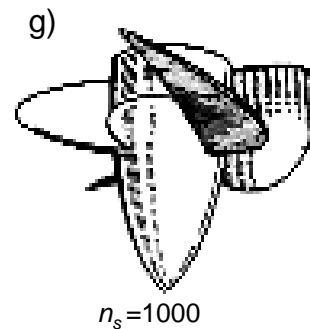
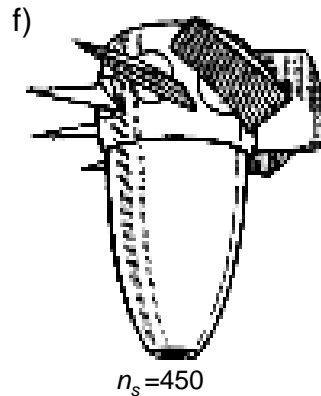
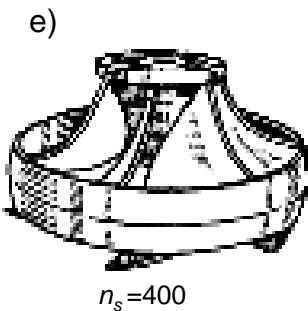
- Peltona spad 50 ÷ 2000 m $ns = 2 \div 35$
- Francisa spad 10 ÷ 600 m $ns = 50 \div 450$
- Deriaza spad 13 ÷ 300 m, $ns = 250 \div 500$
- Kaplana spad 1,5 ÷ 80 m $ns = 300 \div 1000$
- Banki-Michella spad 1 ÷ 60 m.

Przykładowe wirniki turbin



a),b) turbiny
Peltona;

c),d),e)
turbiny
Francisa;



f),g) turbiny
Kaplana.

Parametry turbin wodnych

Prędkość obrotowa n turbiny jest praktycznie stała i wynika z prędkości obrotowej generatora synchronicznego:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

gdzie:

f - częstotliwość prądu przemiennego wynosząca w Europie $f = 50$ [Hz];

p - liczba par biegunów generatora synchronicznego.

Parametry turbin wodnych

Wielkością charakteryzującą poszczególne rodzaje turbin wodnych jest *wyróżnik szybkobieżności*.

Jest to liczba charakteryzująca serię turbin podobnych. Liczbę wyróżnika szybkobieżności zwykle podaje się dla największego otwarcia kierownicy i wirnika, tzn. dla największej mocy, jaką turbina osiąga pod danym spadem, jak również dla mocy, przy której turbina osiąga największą sprawność.

Wyróżnikiem szybkobieżności turbiny nazywa się liczbę obrotów turbiny modelowanej, geometrycznie podobnej do rozpatrywanej turbiny rzeczywistej, lecz posiadającej tak małą średnicę wirnika D , że przy spadzie użytecznym $H_u = 1$ m, jej moc
 $P = 1 \text{ KM} = 0,736 \text{ kW}$.

Dynamiczny wyróżnik szybkobieżności

$$n_s = n \cdot \frac{\sqrt{1,36 \cdot P_u}}{H_u \cdot \sqrt[4]{H_u}}$$

gdzie:

n - prędkość obrotowa wirnika turbiny [obr/min];

P_u - moc na wale turbiny [kW];

H_u - spad użyteczny turbiny [m].

Kinematyczny wyróżnik szybkobieżności

$$n_{sQ} = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{(H_u)^{3/4}}$$

gdzie:

n - prędkość obrotowa wirnika turbiny [obr/min];

Q - Przepływ turbiny [m³/s]

H_u - spad użyteczny turbiny [m].



AGH

Wyróżnik szybkobieżności ns zależy również od prędkości obrotowej n hydrozespołu, która musi spełniać warunek pracy generatora synchronicznego określonego wcześniejszym wzorem.

Wyróżnik szybkobieżności charakteryzuje szybkość obrotową, którą turbina może rozwinąć przy danej mocy i pod danym spadem. Zależnie od wysokości spadu wykorzystywanego w elektrowni wodnej, turbiny wodne wyposażone są w wirniki o różnych wyróżnikach szybkobieżności ns .

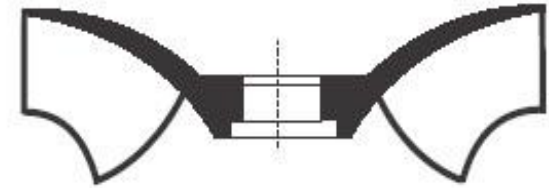
Wartość wyróżnika szybkobieżności decyduje o podziale wirników na:

**wolnobieżne ($ns < 150$),
średnobieżne ($ns = 150 \div 300$)
szybkobieżne ($ns > 500$).**

Wirniki szybkobieżne stosuje się przy najniższych spadach ($H < 60$ m), natomiast wirniki wolnobieżne wykorzystywane są przy spadach najwyższych ($H > 500$ m).

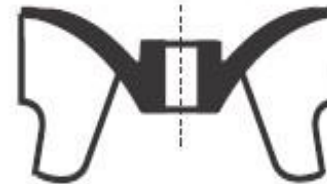
Elektrownia wodna
wysokospadowa

Turbina
wolna



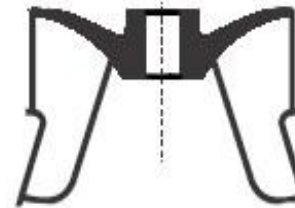
$n_s = 80$

typowa



$n_s = 200$

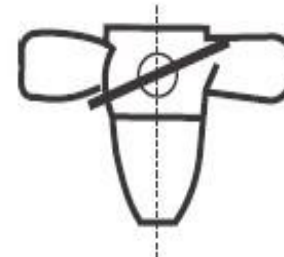
szybka



$n_s = 300$

Elektrownia wodna
niskospadowa

bardzo szybka



$n_s = 514$

Od wyróżnika szybkobieżności zależy również kształt wirnika turbiny i jego przetyk.

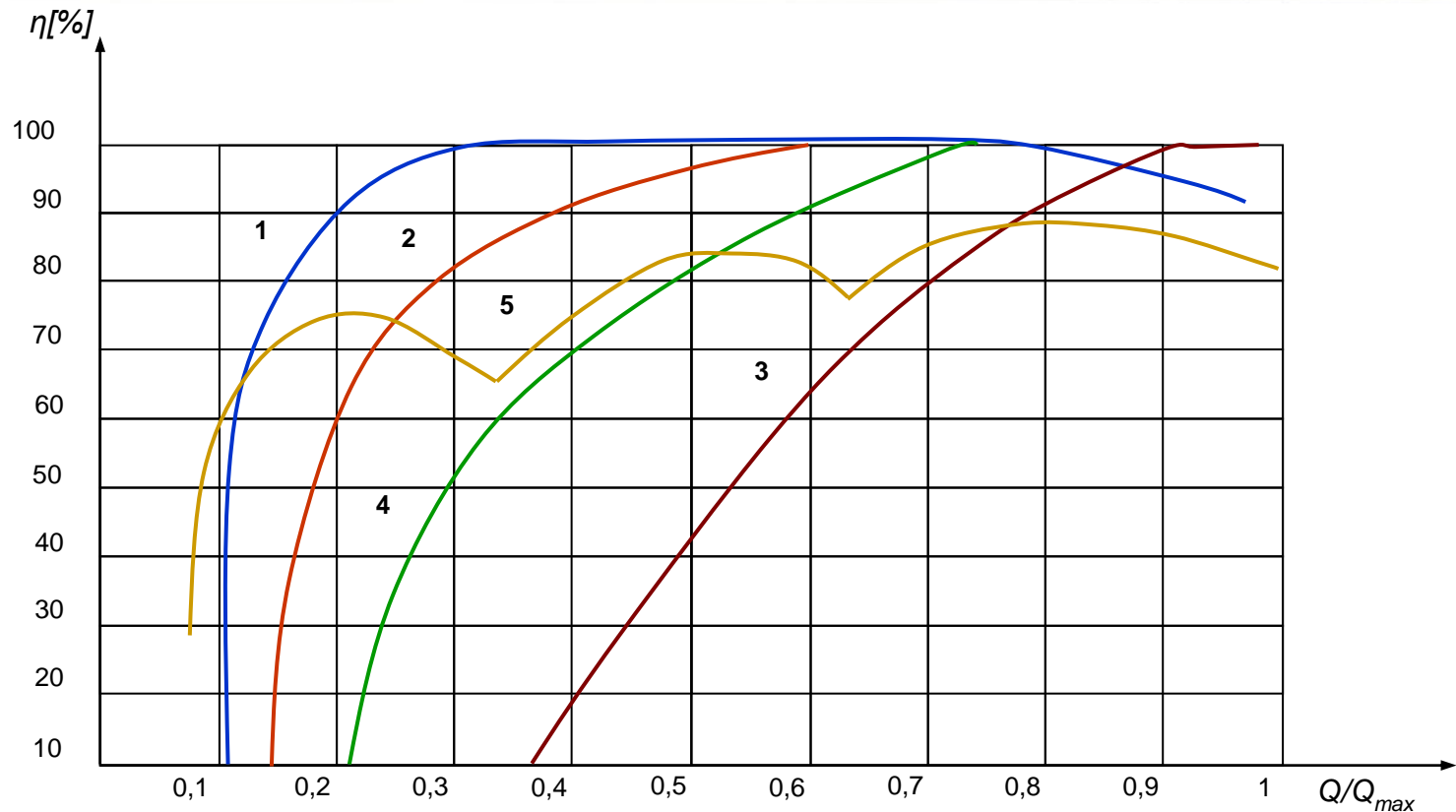
Zwiększenie szybkobieżności wpływa na zmniejszenie średnicy wirnika przy tej samej mocy i spadzie.

Charakterystyki podstawowe turbin wodnych wyznacza się z pomiarów wirnika modelowego.

Badania przeprowadzane są przy stałym spadzie H , zmiennej prędkości obrotowej n i przy całkowitym zamknięciu aparatu kierowniczego α_0 (w przypadku turbin Francis).

Mierzone są następujące wielkości: prędkość obrotowa n , przetyk Q i moment obrotowy M .

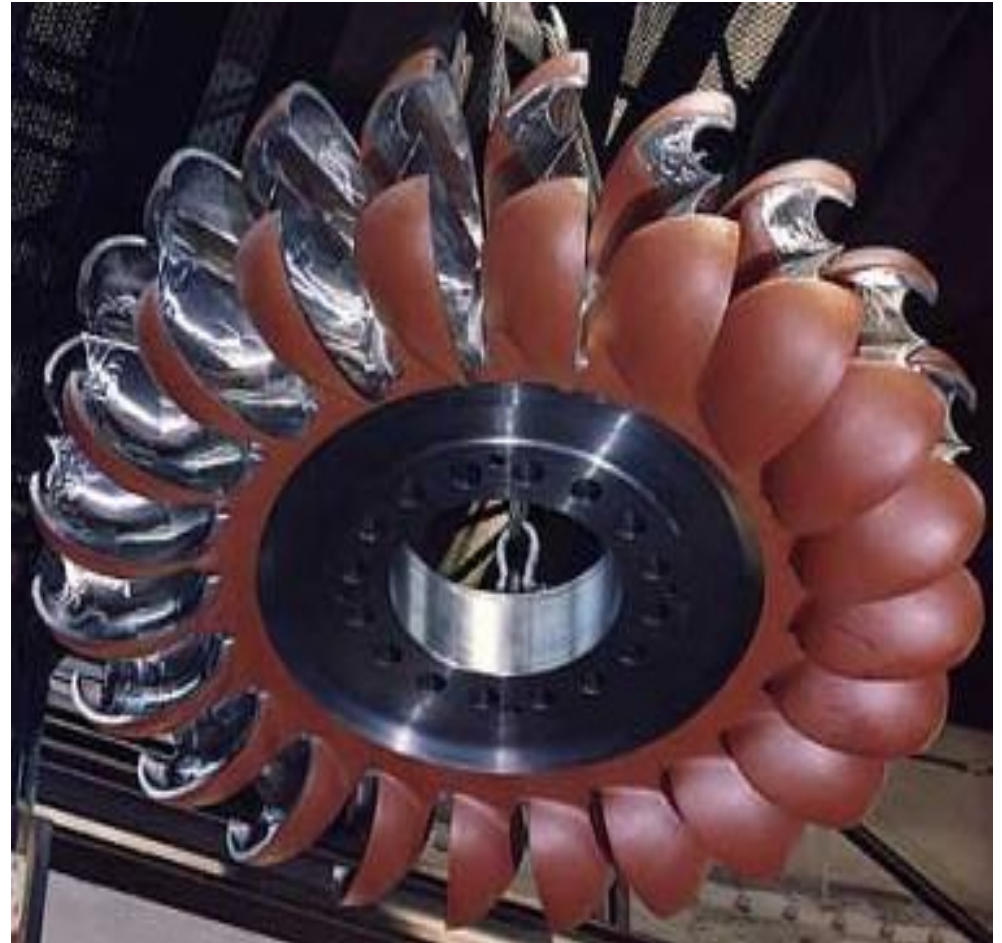
Sprawności różnych turbin



1 - turbina Kapłana pionowa i turbina rurowa kolanowa z podwójną regulacją, 2 - turbina rurowa kolanowa ze stałą kierownicą i regulowanym wirnikiem, 3 - turbina rurowa kolanowa ze stałymi łopatkami wirnika i regulowaną kierownicą, 4 - turbina Francisa, 5 - turbina Banki-Michella.

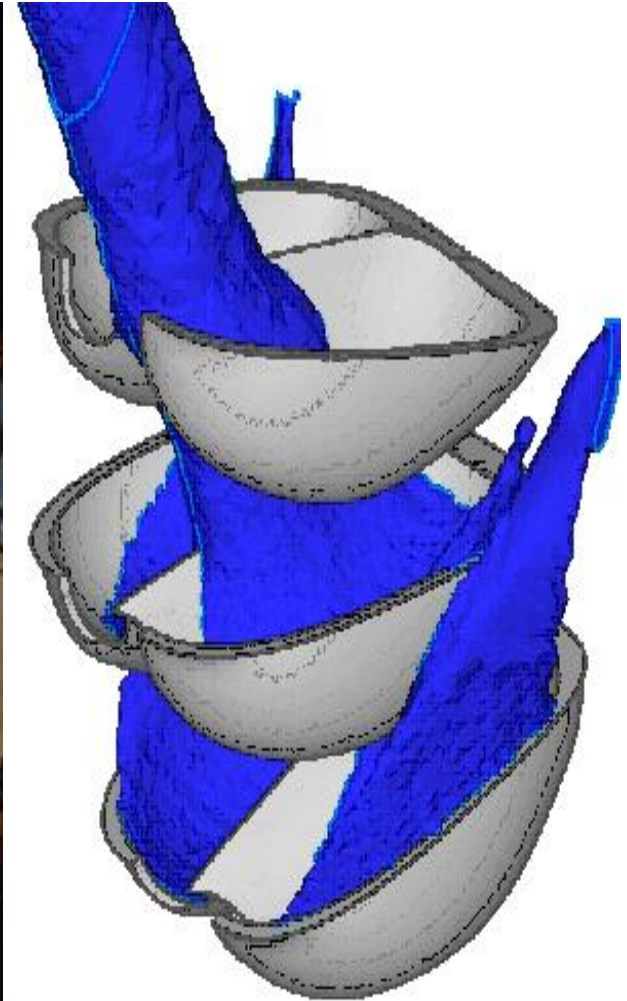
TURBINA PELTONA

Turbina Peltona przeznaczona jest do elektrowni wodnych, które dysponują dużymi spadami (nawet do 2000 m). Jest to turbina akcyjna, w której ciśnienie panujące na wlocie i wylocie wirnika jest jednakowe. Woda jest doprowadzana do wirnika dyszami odgrywającymi rolę wieńca kierowniczego turbiny. W kierownicy następuje przekształcenie całego spadu na energię kinetyczną, przekazywaną na łopatki wirnika.



TURBINA PELTONA

Wirnik turbiny składa się z tarczy zaopatrzonej na swym obwodzie w szereg równomiernie rozmieszczonych łopatek o kształcie podwójnych czarek, rozdzielających strumień zasilający na dwie symetryczne gałęzie i odchylających je niemal o 180° . Turbiny Peltona umieszcza się w takiej wysokości nad dolnym poziomem wody, by czarki nie zanurzały się w wodzie, nawet przy najwyższym poziomie wody w kanale odpływowym.

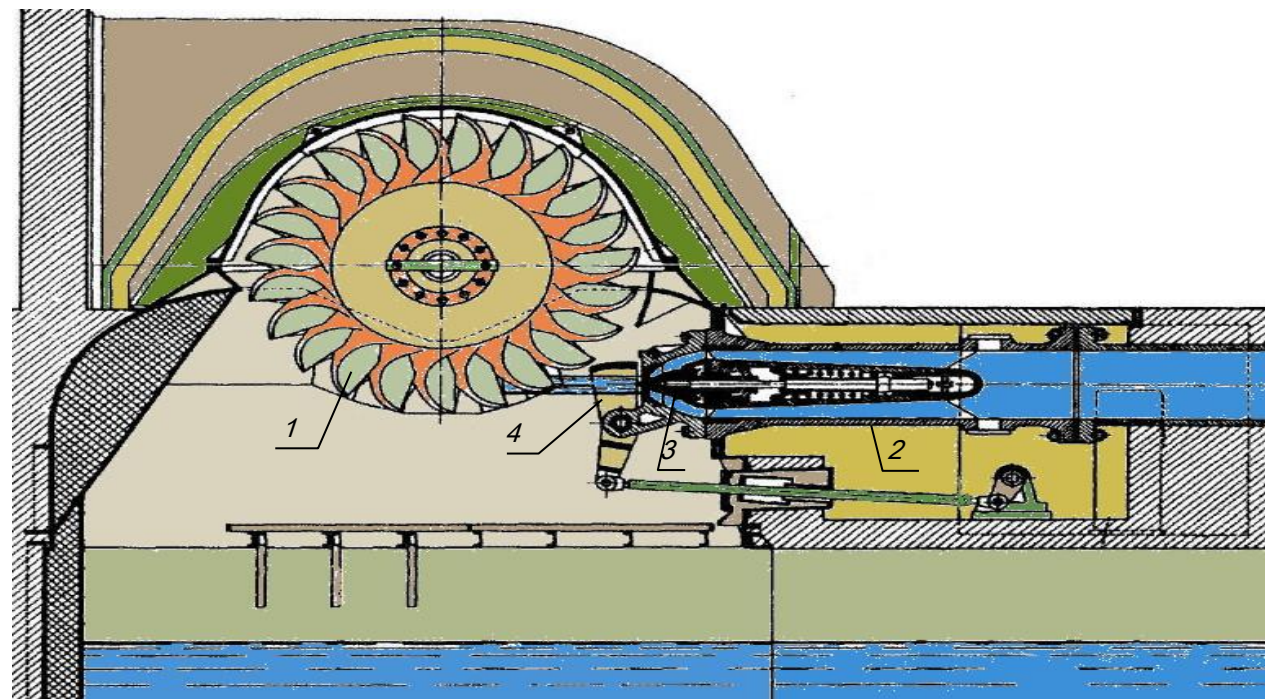


TURBINA PELTONA

zasada działania

Z dyszy 2 wypływa woda z prędkością c_1 , wpada na łopatki „czarki” 1, oddaje część energii kinetycznej i z prędkością $c_2 \approx 0$ w postaci strug opada grawitacyjnie w komorze wirnika i jest odprowadzana do wody. Strumień objętości wody, a więc i moc turbiny, można regulować w sposób ciągły, przesuwając osiowo iglicę 3, co zmienia przekrój wylotowy dyszy z możliwością całkowitego jej zamknięcia. Odchylacz strumienia 4 umożliwia szybkie przerwanie działania strumienia wody

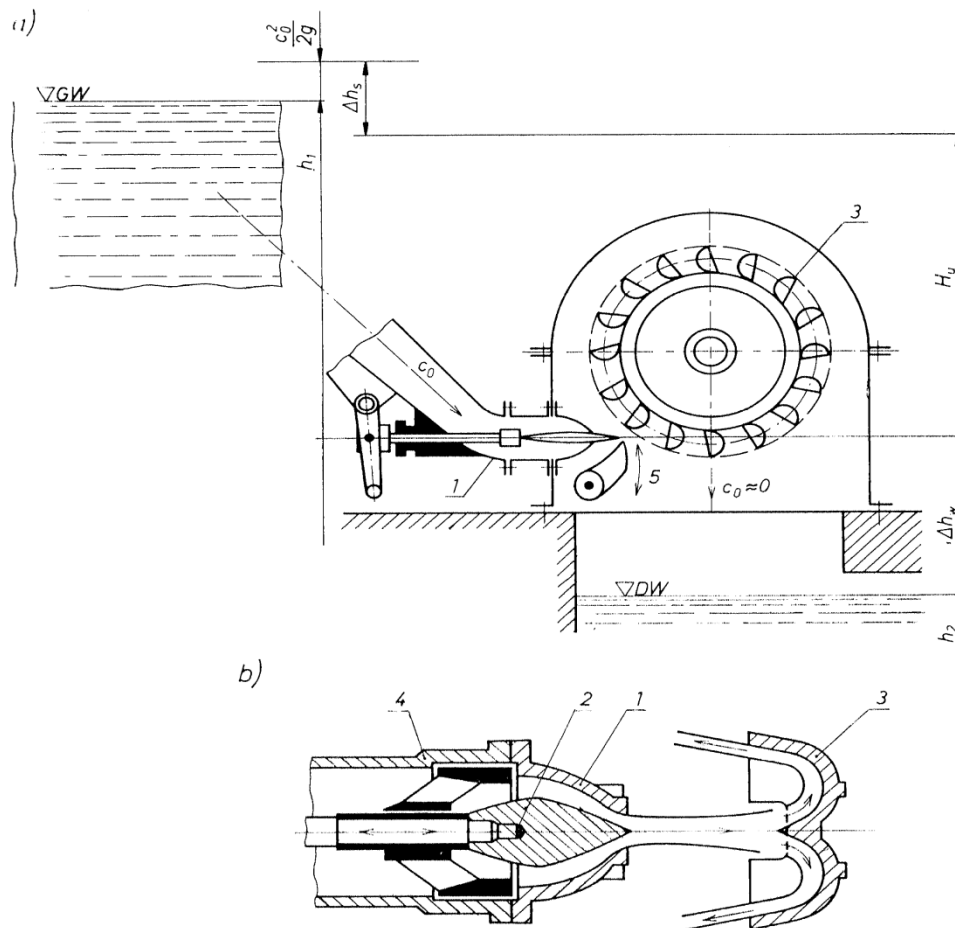
na wirnik przez odchylenie go od wirnika. W tym czasie iglica powoli zamyka dyszę, nie wywołując w rurociągu wzrostu ciśnienia, które mogło by spowodować efekt uderzenia hydraulicznego.



1- łopatka wirnika; 2- dysza; 3- iglica; 4- odchylacz strumienia.

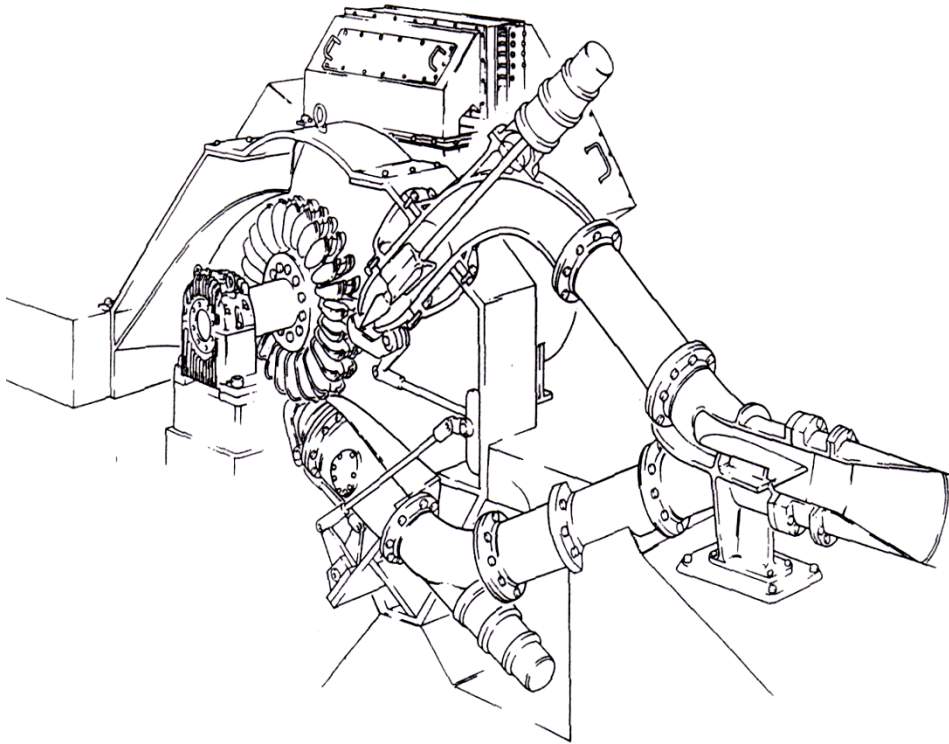
TURBINA PELTONA

zasada działania

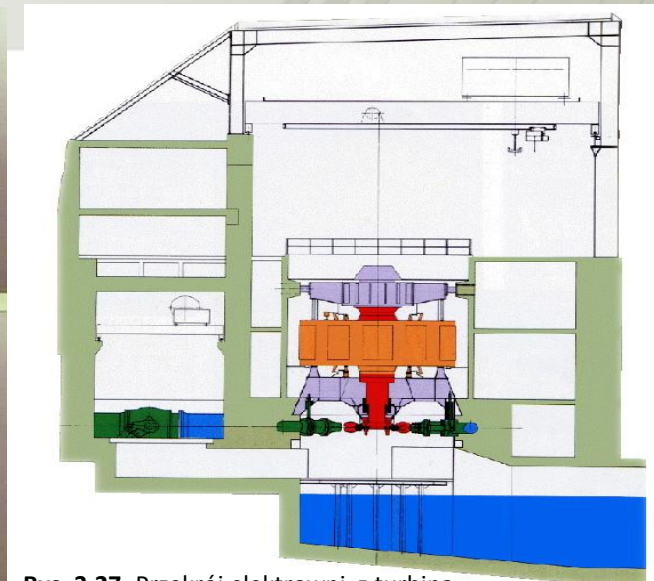
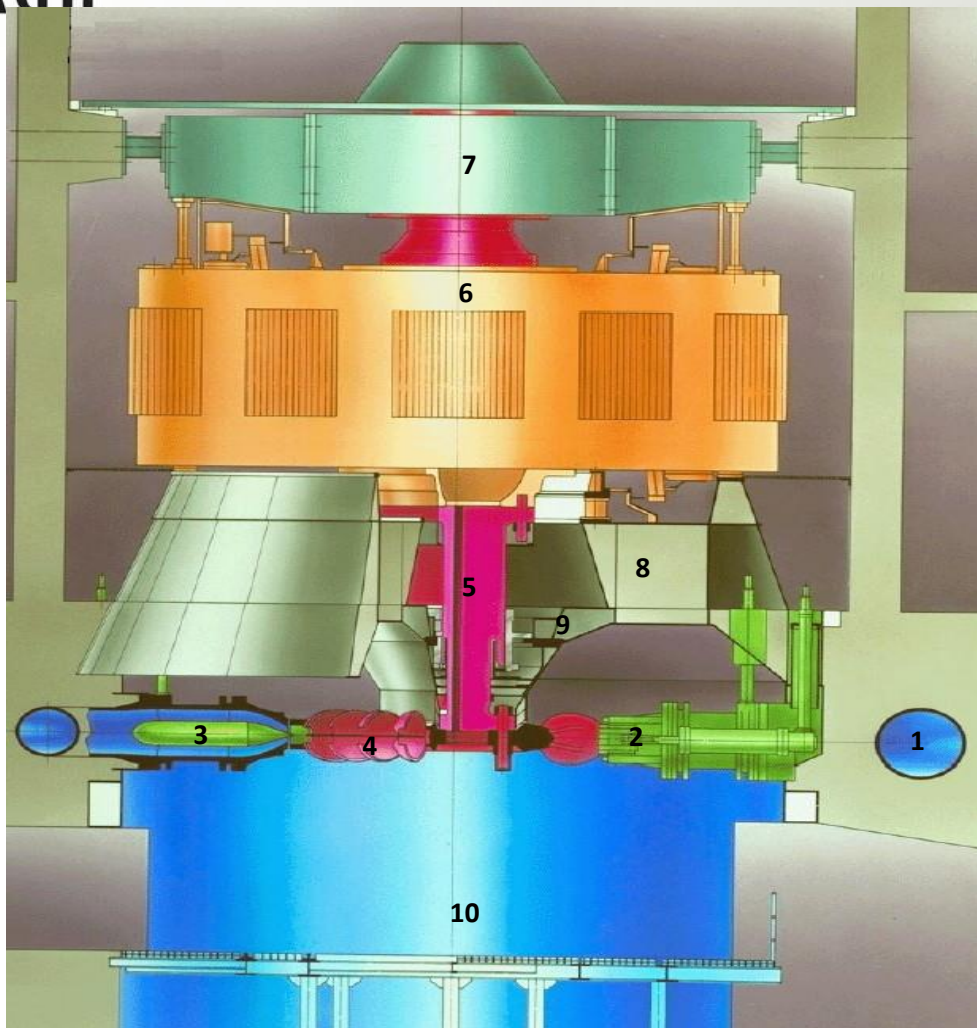


Rys. 12.4. Turbina Peltona: a) doprowadzenie wody i wirnik turbiny; b) dysza i łopatkę wirnika
 1 – dysza; 2 – iglica; 3 – łopatkę; 4 – rura ciśnieniowa doprowadzająca wodę; 5 –
 odchylacz strugi (strumienia); Δh_s – straty spadujące przy przepływie wody przez
 utorociąg, budowle i urządzenia

TURBINA PELTONA o osi poziomej



TURBINA PELTONA o osi pionowej



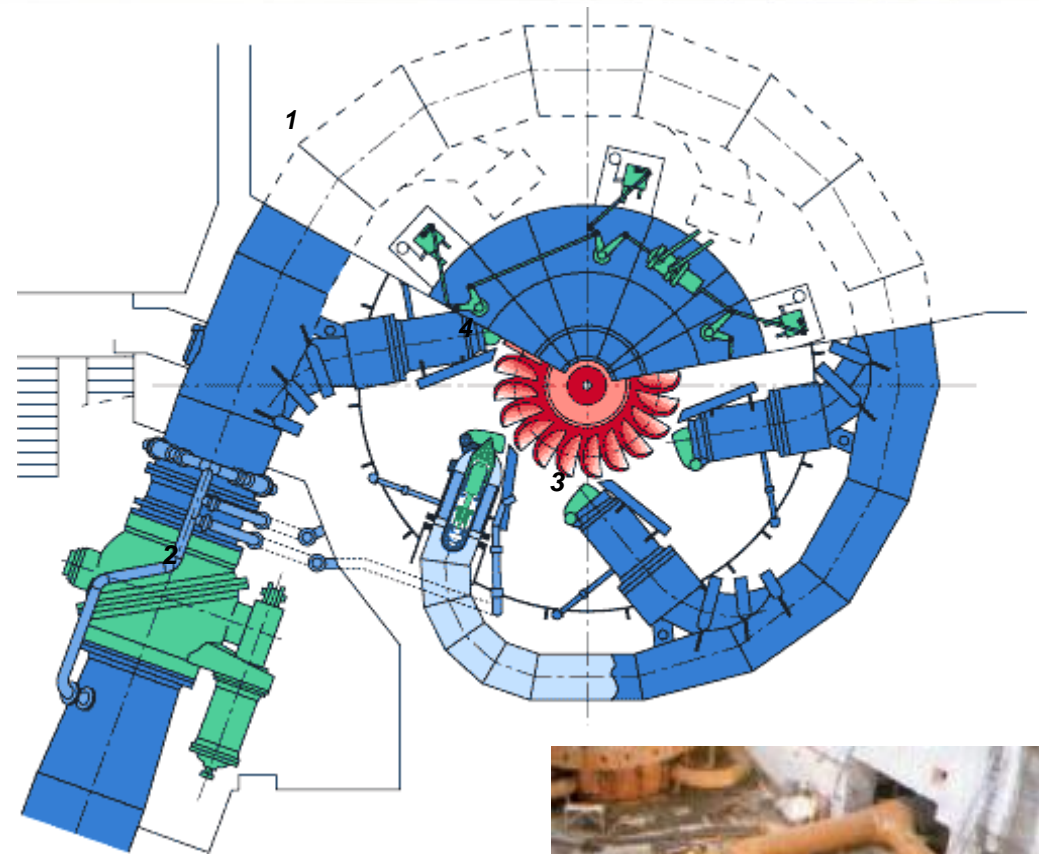
Rys. 3.27. Przekrój elektrowni z turbiną Peltona.



Przekrój jednostki z turbiną Peltona: 1- rura doprowadzająca wodę; 2 - odchylacz strumienia;
 3 - iglica; 4 - wirnik Peltona; 5 - wał turbiny; 6 - generator; 7 - łożysko; 8 - turbinownia;
 9 - element nośny; 10 - platforma kontrolna.

TURBINA PELTONA o osi pionowej

Rozplanowanie
doprowadzeń wody do
turbiny:
1- rura spiralna główna;
2 - zawór główny
odcinający;
3 - pojedyncza dysza ;
4 - wirnik Peltona.



TURBINA PELTONA

Turbina Peltona jest najbardziej efektywna, kiedy spad wody jest wysoki, co daje dużą szybkość strumienia.

Nowoczesne wersje wykorzystujące dwa, cztery, a czasem nawet sześć strumieni przepływających przez pojedyncze koło są często obecnie używane w elektrowniach wodnych o wysokim spadzie, na przykład w Reisseck w Austrii.

Na całym świecie pracują małe turbiny Peltona wykorzystujące spad wody równy 200m a nawet i mniejszy.

W Polsce nie znajdują one zastosowania z powodu braku w naszych rzekach i strumieniach dużych spadów.

Woda – mała elektrownia wodna (MEW)

Turbina PowerSpout

Moc elektryczna pojedynczej turbiny do 1000W



źródło: www.powerspout.com

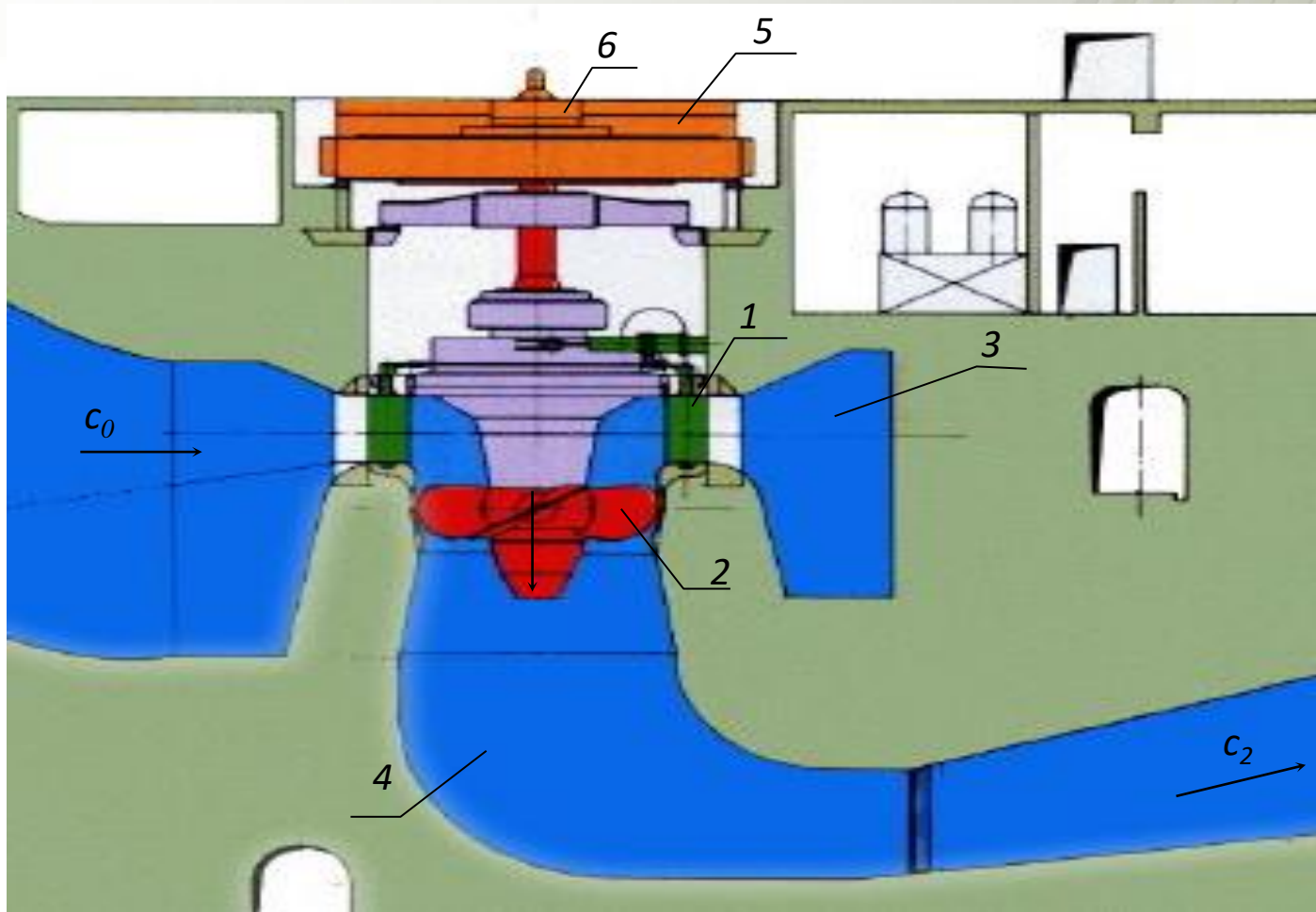
TURBINA Kaplana

Turbiny Kaplana kształtem wirnika przypominają śrubę okrętową, której łopatki w liczbie 3÷10 (zwykle 4) są nastawialne. Kierunek przepływu wody przez wirnik jest osiowy. Stosuje się je przy najniższych spadach wynoszących $H = 1,5\div 80$ m.

W turbinie Kaplana czopy łopatek są osadzone w piaście wirnika, w której jest umieszczony napęd łopatek. Woda doprowadzona do spiralnej komory z prędkością c_0 . Promieniowo na całym obwodzie, przepływa przez nastawialne łopatki kierownicze. Zwiększa swą prędkość do c_1 , i wpływa na łopatki, skąd wypływa z prędkością c_2

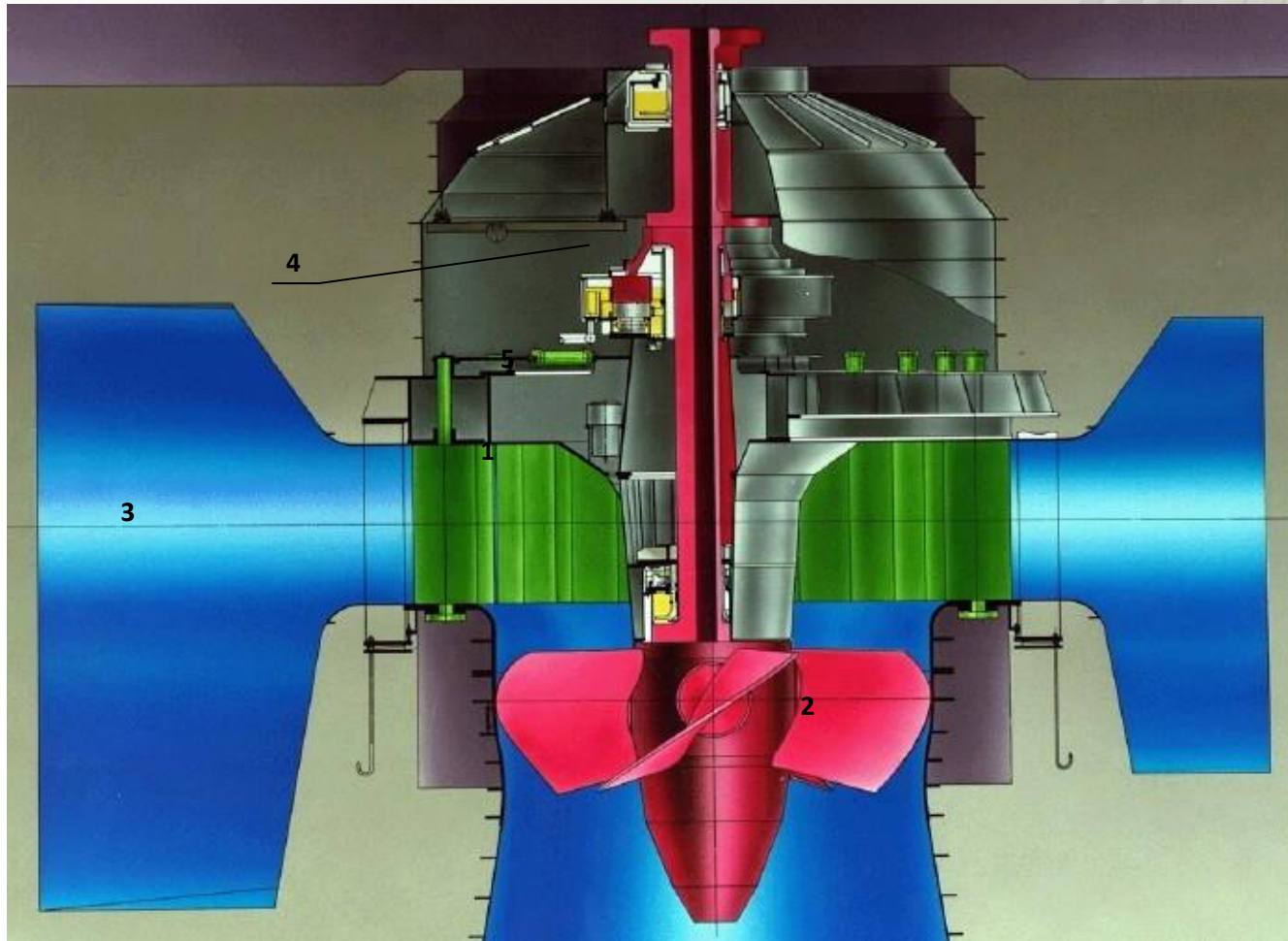


TURBINA Kaplana



Przekrój elektrowni wykorzystującej turbinę Kaplana: 1 - łopatki kierownicze; 2 - łopatki wirnika; 3 - spirala doprowadzająca wodę (betonowa); 4 - rura ssąca; 5 - generator; 6 - wzбудnica

TURBINA Kaplana

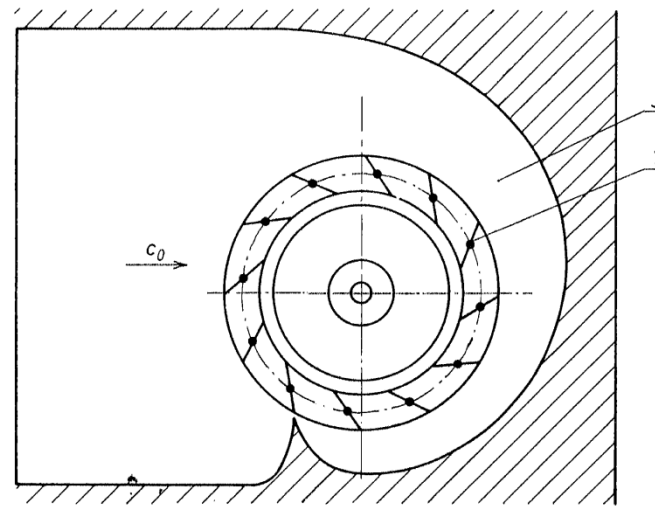
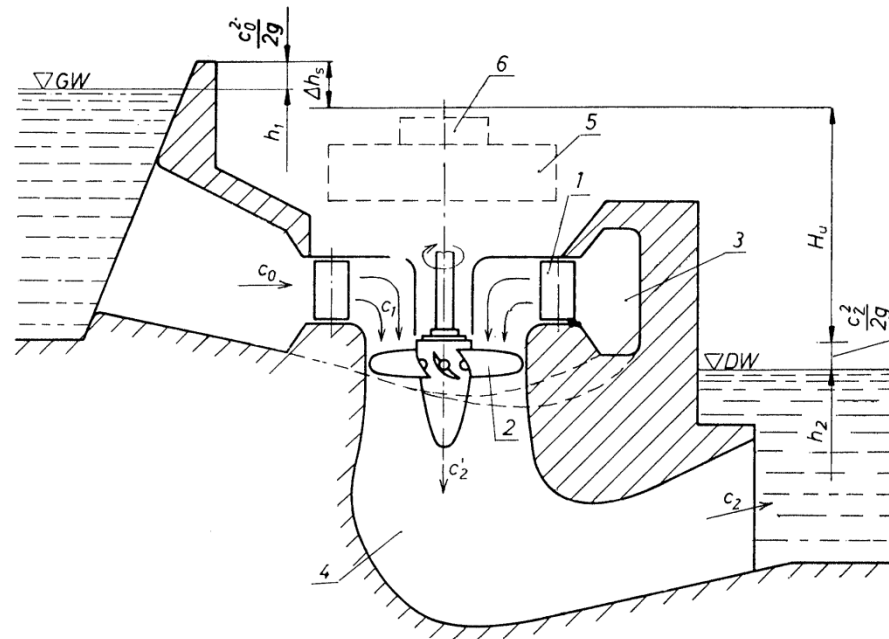


1 - łopatki kierownicze; 2 - łopatki wirnika; 3 - spirala doprowadzająca wodę (betonowa);
4 - łożysko turbiny; 5 - konstrukcja nośna.



AGH

TURBINA Kaplana



Rys. 12.5. Turbina Kaplana

1 – łopatki kierownicze; 2 – łopatki wirnika; 3 – spirala doprowadzająca wodę (betonowa);
4 – rura ssąca; 5 – generator; 6 – wzbudnica

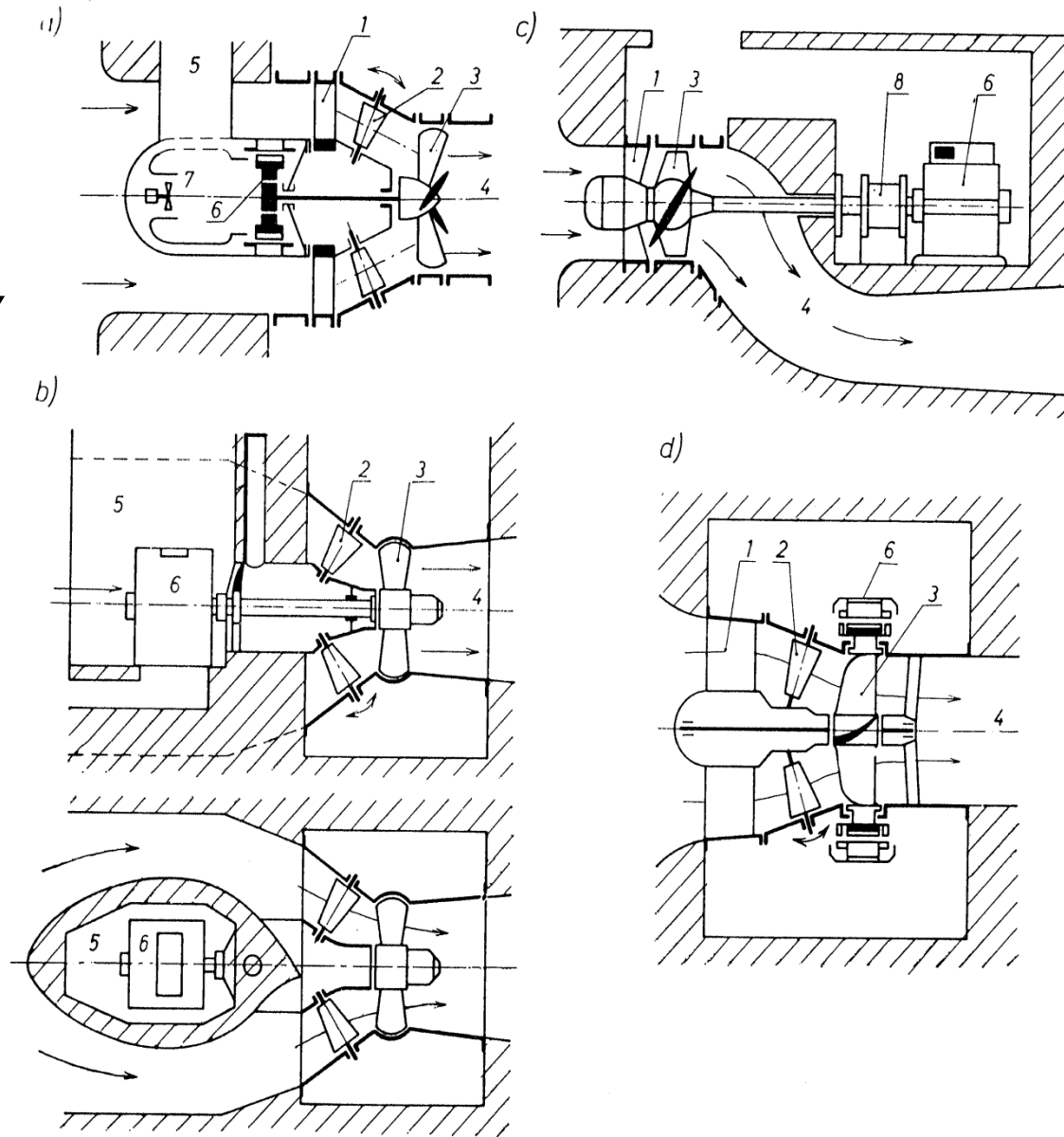
TURBINA Kaplana

Turbiny te mają bardzo dobre właściwości regulacyjne, dzięki możliwości jednoczesnego właściwego ustawienia zarówno łopatek kierowniczych, jak i wirujących, przez odpowiedni ich obrót.

Dzięki temu, turbina może być dopasowana tak, aby dawać maksymalną wydajność w całym zakresie spadów, jak również przy nagłych zmianach obciążenia.

Turbiny Kaplana osiągają wysokie sprawności sięgające 93 %. Przepływ strumienia wody w nowoczesnych modelach tych turbin dochodzi do 500 m³/s.

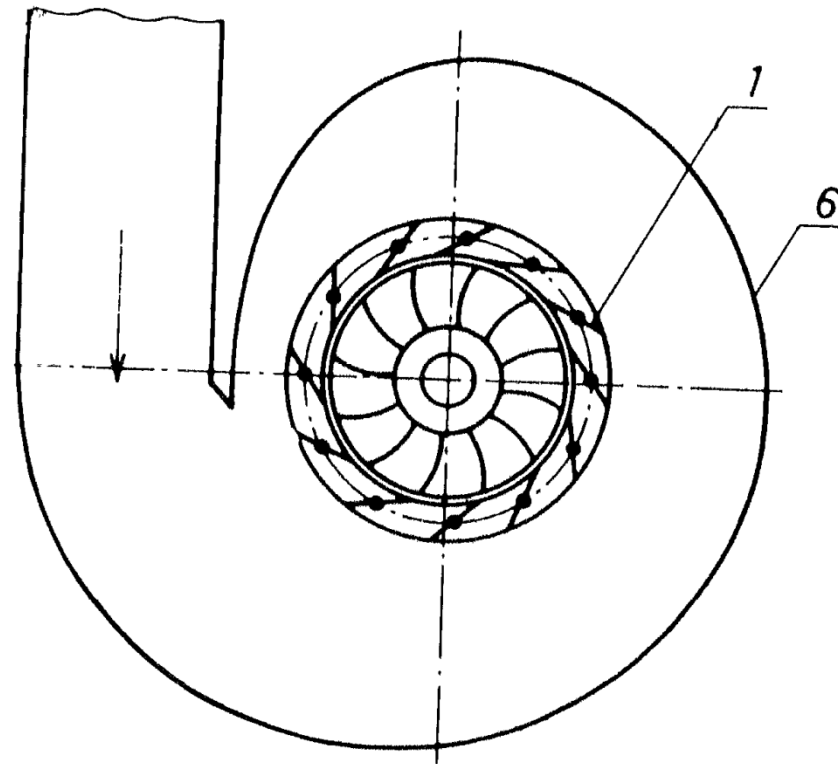
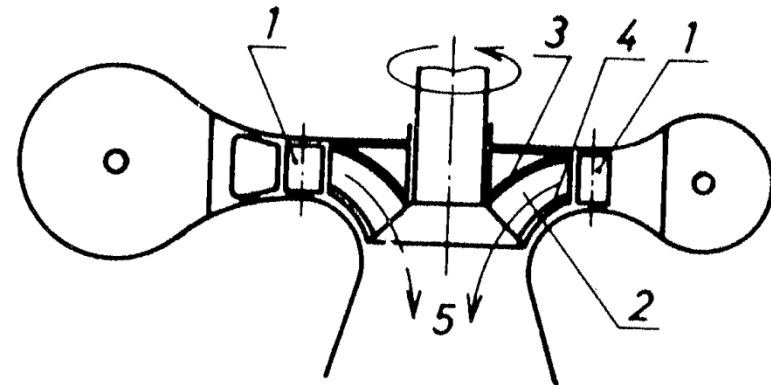
TURBINY rurowe



Rys. 12.6. Przykłady turbozespołów rurowych: a) gruszkowy; b) studniowy; c) z generatorem zewnętrznym; d) tzw. Straflo

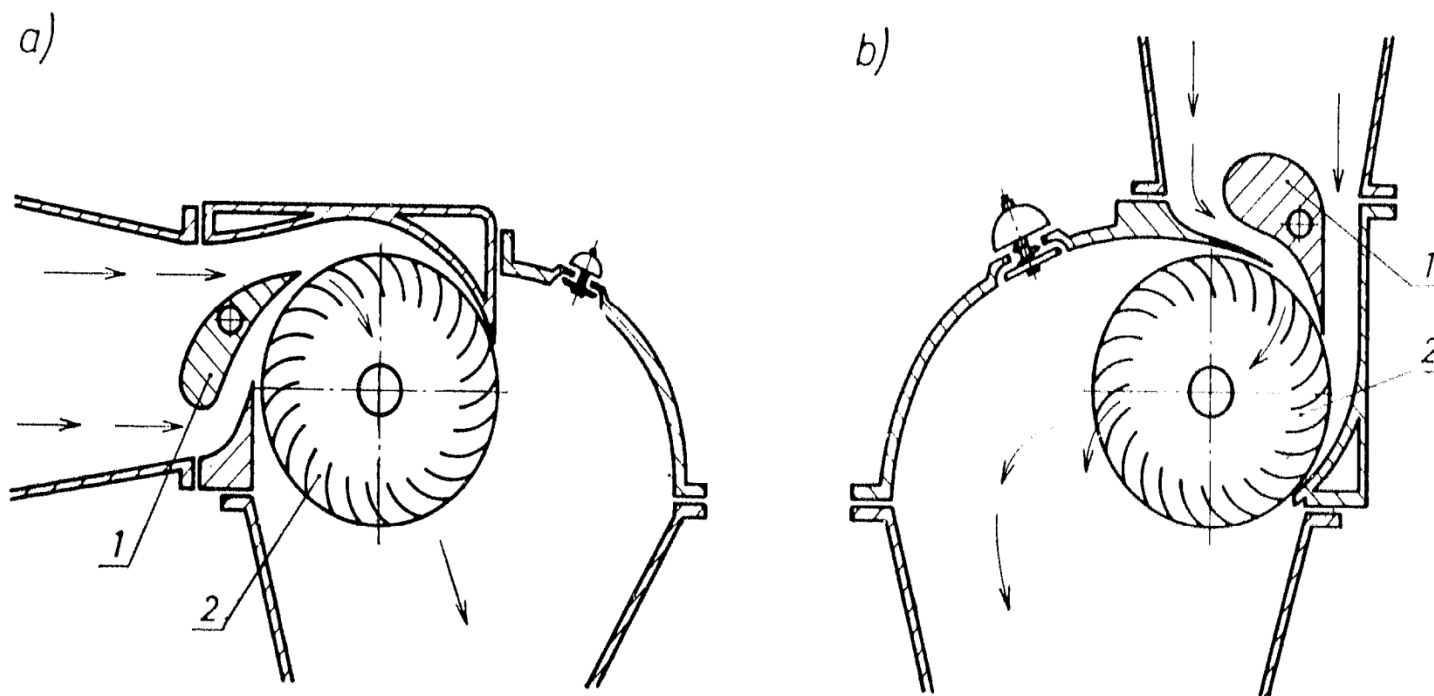
TURBINA Francisa

- 1 – nastawialne łopatki kierownicze
- 2 – nieprzystawialne łopatki łączące wieńce 3 i 4
- 5 – rura ssąca
- 6 – metalowa spirala dolotowa



TURBINA Banki-Michella

Turbina akcyjno-reakcyjna z poziomą osią obrotu



Rys. 12.10. Turbina Banki-Michella z napływem: a) poziomym; b) pionowym wg materiałów informacyjnych firmy Ossberger-Turbinenfabrik Weissenburg RFN

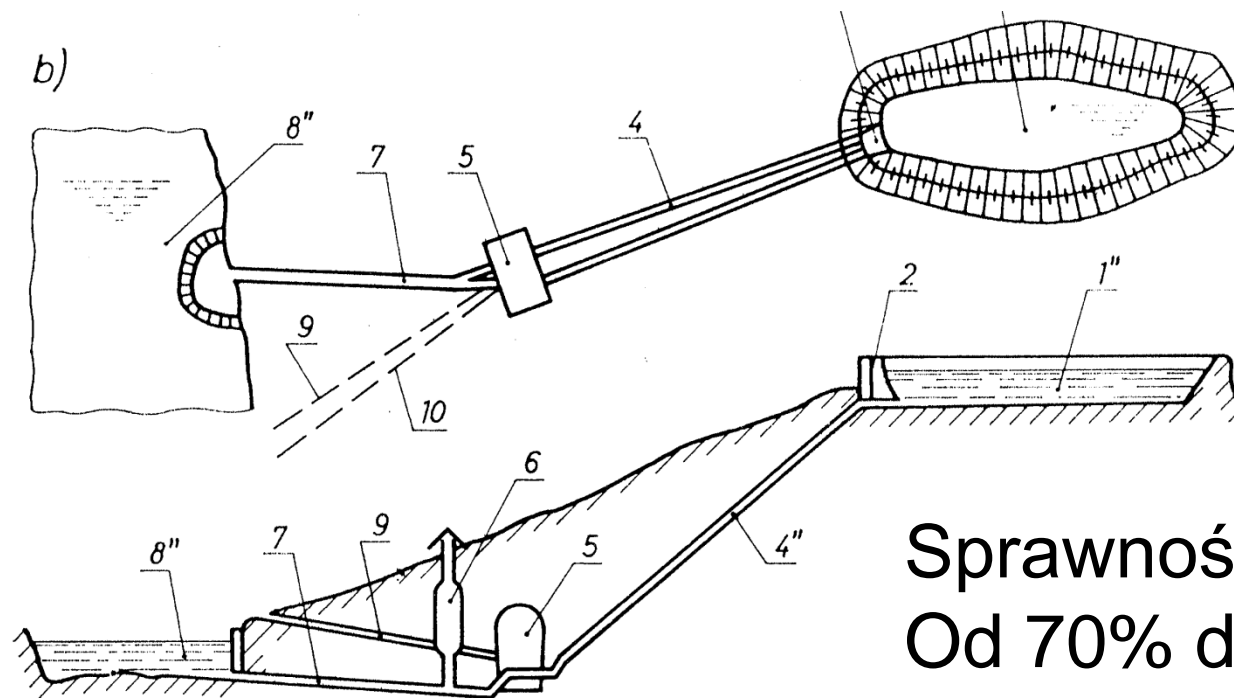
Elektrownie kaskadowe

- elektrownie przepływowe
- brak zbiornika (lub małe zbiorniki np. dobowe)
- wyrównanie przepływów
- ruch przewałowy – synchronizacja wszystkich stopni kaskady
- źródło mocy szczytowej

Tryby pracy elektrowni wodnych

- Praca programowa – wyrównanie obciążeń dobowych
- Praca regulacyjna – pokrywanie szybkich zmian obciążenia w czasie
- Praca interwencyjna
- Dostarczanie mocy biernej

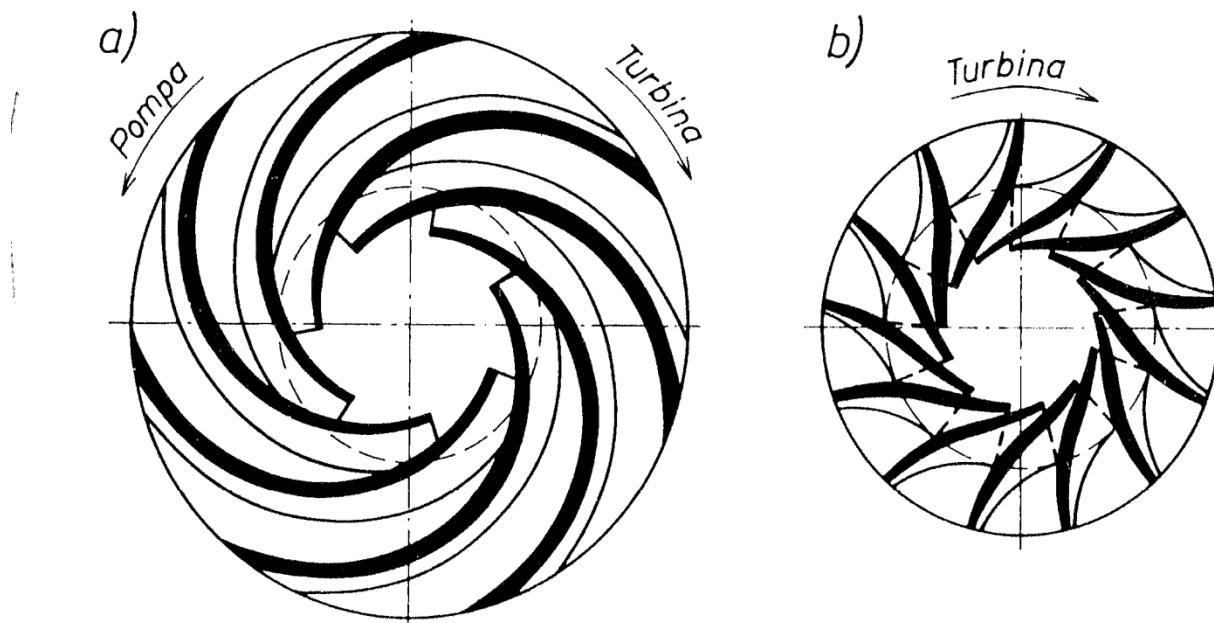
Elektrownia szczytowo pompowa



Sprawność cyklu
Od 70% do 75%

Rys. 12.16. Plan sytuacyjny i przekrój elektrowni pompowej: a) naziemnej; b) podziemnej
 1 – zbiornik górny (1' – jezioro; 1'' – zbiornik sztuczny); 2 – ujęcie wody; 3 – kanał otwarty; 4 – ciśnieniowe sztolnie opadowe (4' – derywacja rurociągami napowietrznymi; 4'' – derywacja rurociągami podziemnymi); 5 – elektrownia; 6 – komora wyrównawcza wraz z napowietrzaniem; 7 – sztolnia odpływowa; 8 – zbiornik dolny (8' – jezioro; 8'' – rzeka); 9 – sztolnia komunikacyjna; 10 – sztolnia kablowa (wyprowadzenie mocy); 11 – most; 12 – rzeka

Wirnik turbiny - pompy



Rys. 12.9. Porównanie konstrukcji wirnika (widok na wirnik od strony generatora): a) pompoturbiny; b) turbiny Francisa



Największe elektrownie wodne na świecie

- Zapora Trzech Przełomów na rzece Jangcy 18,6 GW
- Itaipu (Brazylia/Paragwaj) 12,6GW (18x700MW)
- Gran Coulee (USA) 9,7GW
- Guri (Wenezuela) 9 GW
- Krasnojarska – Jenisej (Rosja) 6,1GW
- Churchill Falls (Kanada) 5,2 GW

Polskie elektrownie wodne

- **Solina-Myczkowce (1960-68)**
 - 2x tr. Francisa , $P=46,8\text{MW}$, $n=136$ obr/min, średnica wirnika 4,1m, spad 57m,
 - 2x pompoturbiny $P_t/P_p=22,5\text{MW}/20\text{MW}$
- **Żydowo (1971)**
 - 2x pompoturbiny $P_t/P_p=50\text{MW}/60,4\text{MW}$
 $n=187,5$ obr/min, $D=4,5\text{m}$, $H=77,4\text{m}$
 - tr. Francisa 52MW $n=250$ obr/min $D=2,85\text{m}$
- **Porąbka-Żar (1979) – Soła**
 - 4x pompoturbiny 125/135MW $n=600$ obr/min, $D=3,1\text{m}$
 $H=440\text{m}$
- **Żarnowiec (1983)**
 - 3x pompoturbiny 170/182MW $n=166,7$ obr/min
 $D=6\text{m}$, $H=117\text{m}$

Elektrownia szczytowo-pompowa Porąbka-Żar



Elektrownia szczytowo-pompowa Porąbka-Żar



Elektrownia szczytowo-pompowa Porąbka-Żar

PGE Energia Odnawialna S.A.

PORĄBKA-ŻAR

ZBIORNIK GÓRNY

MAKSYMALNA DŁUGOŚĆ W OSI ZBIORNIKA	650m
SZEROKOŚĆ MAKSYMALNA	250m
DŁUGOŚĆ OBWAŁOWAŃ	1650m
SZEROKOŚĆ KORONY OBWAŁOWAŃ	5m
ŚREDNIA WYSOKOŚĆ OBWAŁOWAŃ	około 30m
NACHYLENIE SKARPY OD-WODNEJ	1:2
NACHYLENIE SKARPY OD-POWIETRZNEJ	1:1,7
USZCZELNIENIE CZASZY ZBIORNIKA : ASFALTOBETON	
GŁĘBOKOŚĆ MAKSYMALNA	27.87m
GŁĘBOKOŚĆ MINIMALNA	24.00m
POJEMNOŚĆ CAŁKOWITA	2.310.000m ³
POJEMNOŚĆ ENERGETYCZNA	2.000.000m ³
WAHANIE ZWIERCIADŁA WODY	20m
DOPIŁYW ŚREDNI PRZY POMPOWANIU 4 TURBOPOMPAMI	140m ³ /sek
CZAS POMPOWANIA 4 TURBOPOMPAMI	5,5 godz.
ODPIŁYW ŚREDNI PRZY PRACY 4 TURBOPOMP	145m ³ /sek
CZAS PRACY GENERATOROWEJ PRZY PRACY 4 TURBIN	4 godz.
MOC ELEKTROWNI PRZY PRACY GENERATOROWEJ	4X125 MW
POBRANA MOC PRZY PRACY POMPOWEJ	4X135 MW



Polskie elektrownie wodne

- **Zespół elektrowni wodnych na Dunajcu Czorsztyn-Niedzica-Sromowce Wyżne (1934, 1975-1997)**

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)

- Górna woda – Zbiornik Czorsztyński (232 mln m³, 1226 ha, głębokość przed zaporą 46m)
- Zapora: wysokość 56m, długość 404m (najwyższa zapora ziemna w Polsce)
- Dolna woda – Zbiornik Sromowiecki
- 2x pompo-turbiny Deriaza (2x44,5/46,4MW)
- spad 40-50m, dwie sztolnie o średnicy 7m.
- budynek elektrowni 40m wgłąb ziemi (7 kondygnacji, 171 tyś. m³)

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)



Źródło: www.niedzica.pl

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)



Źródło: www.wikipedia.pl

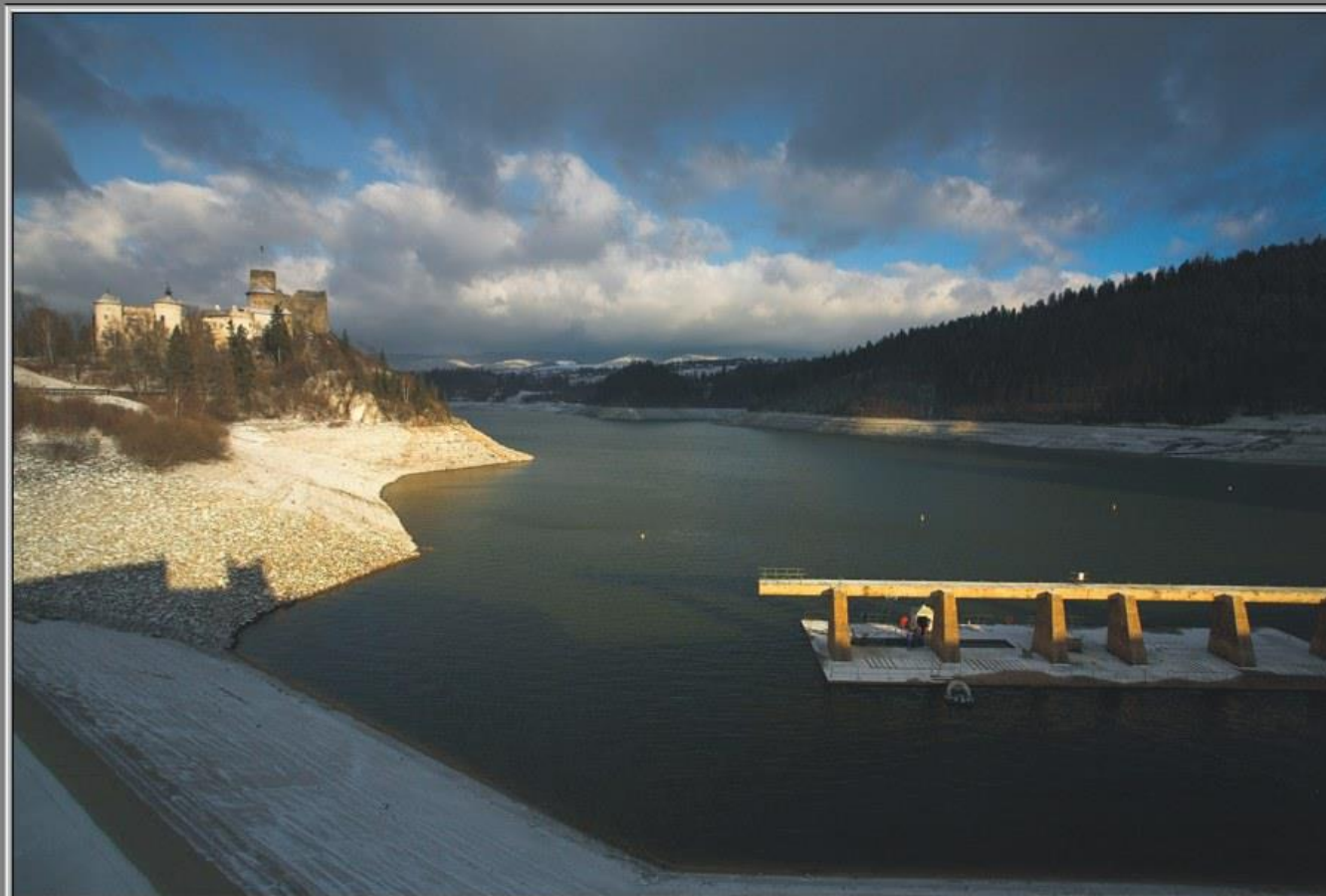


AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)

wloty elektrowni wodnej - Niedzica - 13.12.2007 r.



Fot. Zabrzewski



AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)

rozgałęzienie sztolni (na sztolnię energetyczną i spustową) - 19.12.2007r.

www.zew-niedzica.com.pl





AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)

wloty wody - widok od strony sztolni - 19.12.2007r.

www.zew-niedzica.com.pl



Fot. Zabrzewski



AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)



wieża zamknięć - widok od strony sztolni - 19.12.2007

www.zew-niedzica.com.pl



AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)



gniazda zamknięć (wieża zamknięć) - 19.12.2007r.

www.zew-niedzica.com.pl

Fot. Zabrzewski



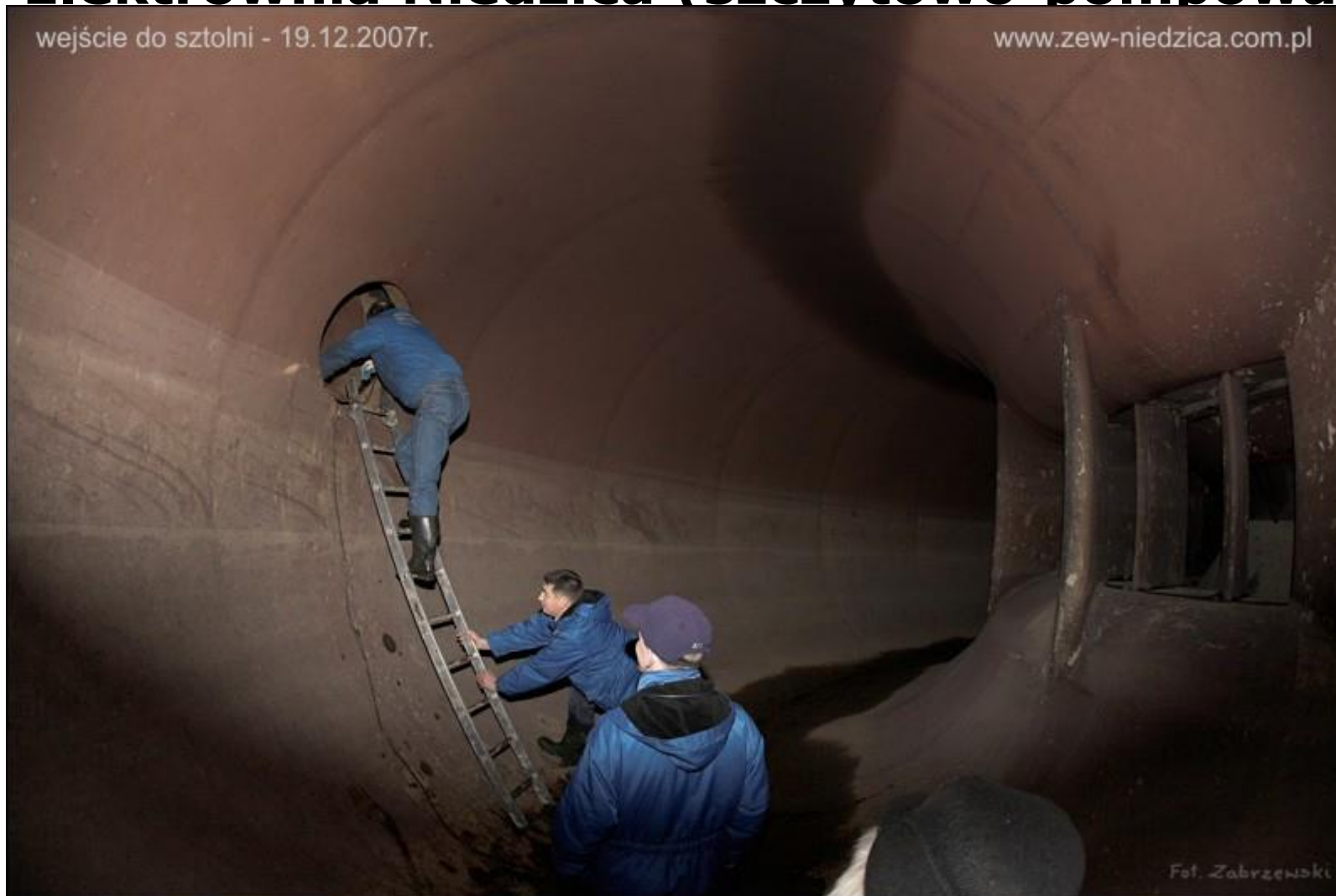
AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)

wejście do sztolni - 19.12.2007r.

www.zew-niedzica.com.pl



Fot. Zabrzewski



Polskie elektrownie wodne

- **Zespół elektrowni wodnych na Dunajcu Czorsztyn-Niedzica-Sromowce Wyżne (1934, 1975-1997)**

Elektrownia Sromowce (przeptywowa)

- Górna woda – Zbiornik Sromowiecki (7,5 mln m³, 88 ha)
- Zapora ziemna, wzmocniona stalową ścianą i kurtyną cementową: wysokość 11m, długość 460m
- Dolna woda – koryto Dunajca
- 4x pionowe turbiny śmigłowe (dwie o nastawianych łopatkach (303 obr./min.) – stały przelęg
- spad 3,4-10,3m, 4 kanały żelbetowe
- generatory 4x 502kW (303 obr./min)



AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Sromowce (przeptywowa)





AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica-Czorsztyn-Sromowce



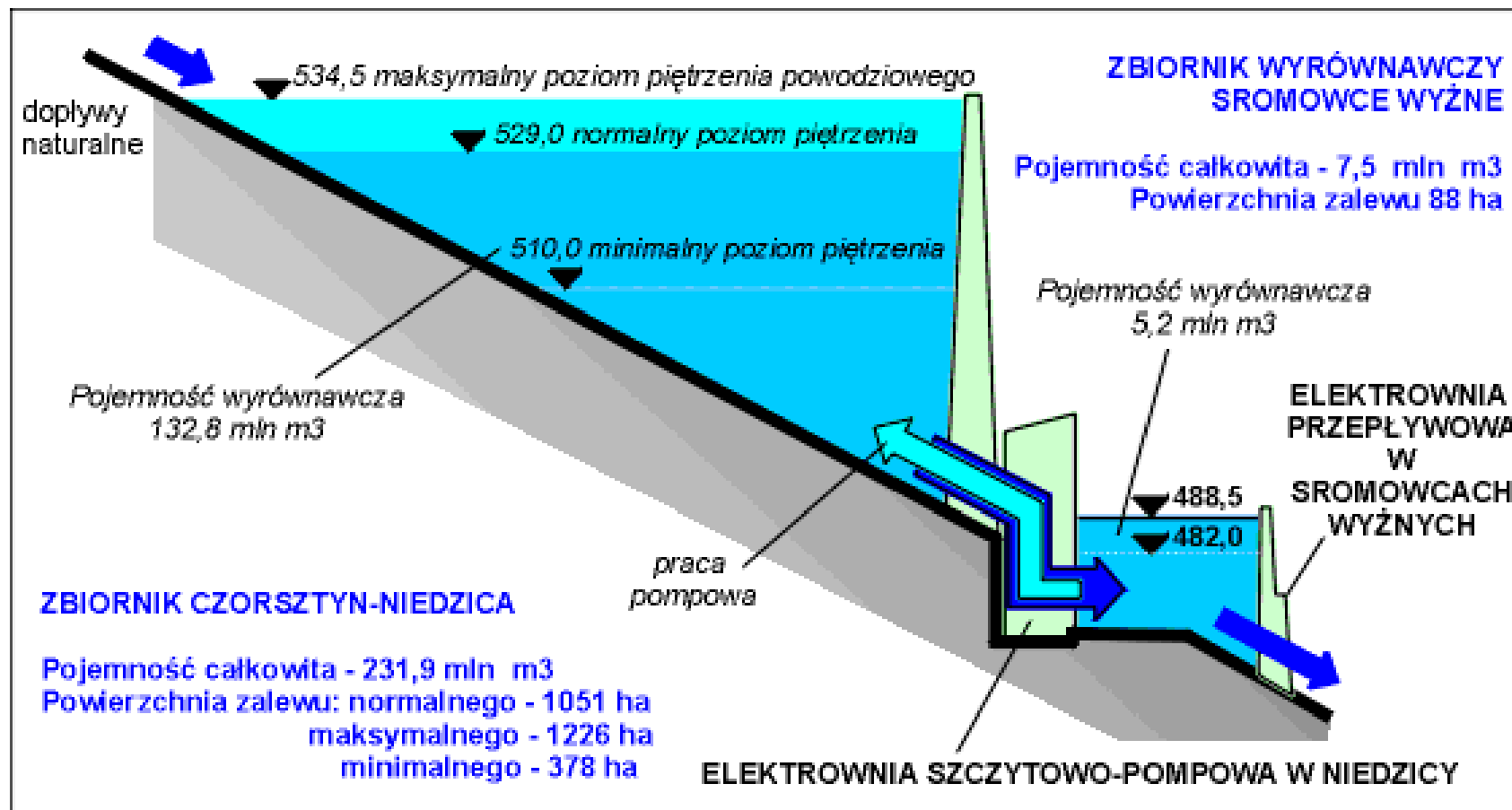
Źródło: www.zew-niedzica.com.pl



AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica-Czorsztyń-Sromowce



Źródło: www.zew-niedzica.com.pl



Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica - fala powodziowa 2001



Źródło: www.zew-niedzica.com.pl



AGH

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica - fala powodziowa 2001



Źródło: www.zew-niedzica.com.pl

J. TENETA Wykłady "Czyste energie i ochrona środowiska" AGH 2018

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia Niedzica – przelew stokowy





Źródło: www.zew-niedzica.com.pl

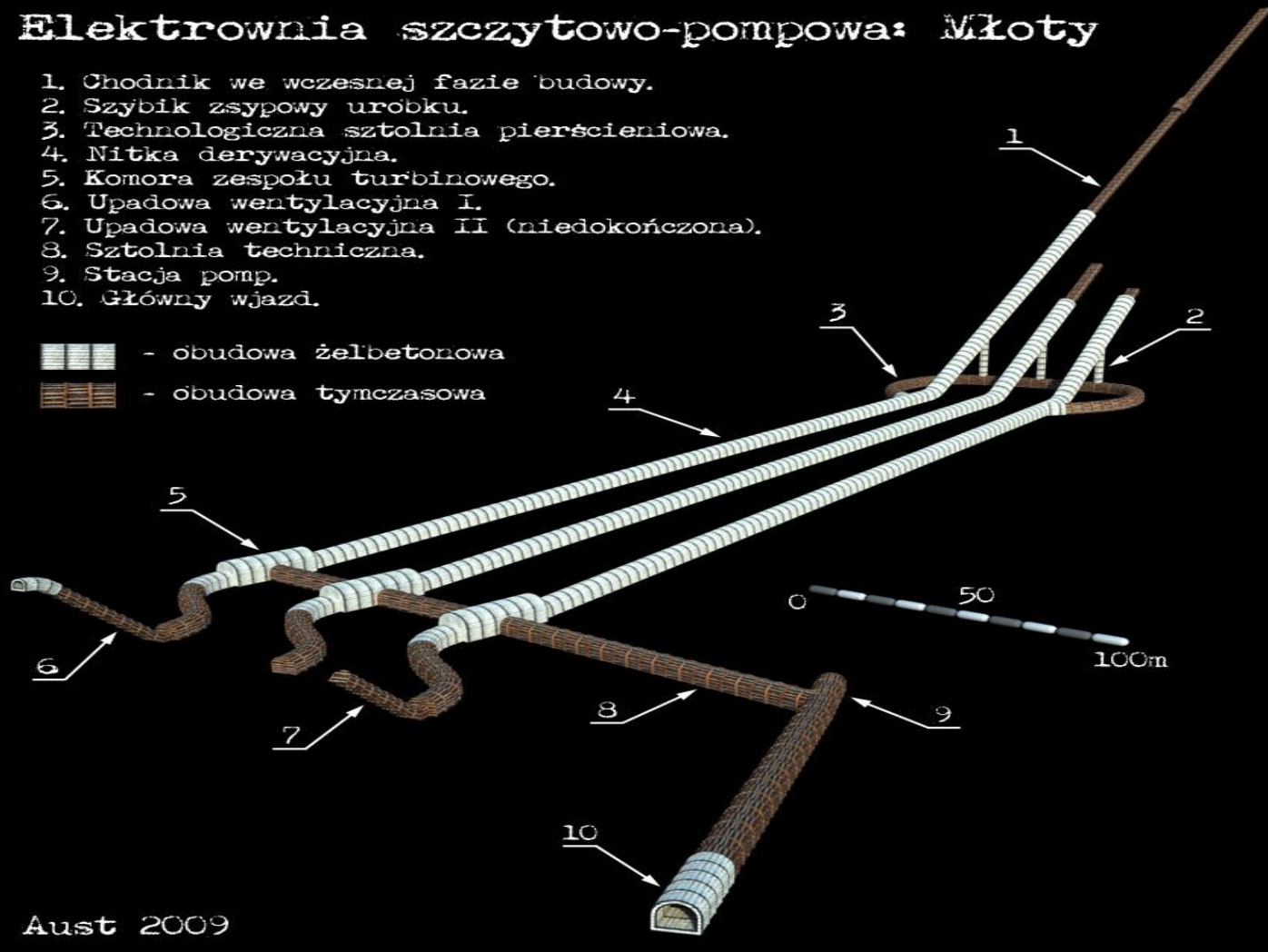
- **Elektrownia szczytowo-pompowa Młoty (1968...)**
pozwolenie na budowę ważne do 2015
 - dolna woda – sztuczny zbiornik na Bystrzycy (11,3 mln m³, 2km długości)
 - Zapora: wysokość 80m, szerokość w koronie 240m.
 - górna woda – zbiornik na szczycie Zamkowej Kopy 6,5 mln m³
 - 3 tunele derywacyjne: długość 800m, różnica poziomów 260m.
 - planowana moc 750MW
 - Stopień zaawansowania prac ok. 70%

Polskie elektrownie wodne

Elektrownia szczytowo-pompowa: Młoty

1. Chodnik we wczesnej fazie budowy.
2. Szybik zsypowy urobku.
3. Technologiczna sztolnia pierścieniowa.
4. Nitka derywacyjna.
5. Komora zespołu turbinowego.
6. Upadowa wentylacyjna I.
7. Upadowa wentylacyjna II (niedokończona).
8. Sztolnia techniczna.
9. Stacja pomp.
10. Główny wjazd.

-  - obudowa żelbetonowa
 - obudowa tymczasowa



Aust 2009

Polskie elektrownie wodne - Młoty



Zródło: www.podziemia.eu

Polskie elektrownie wodne - Młoty



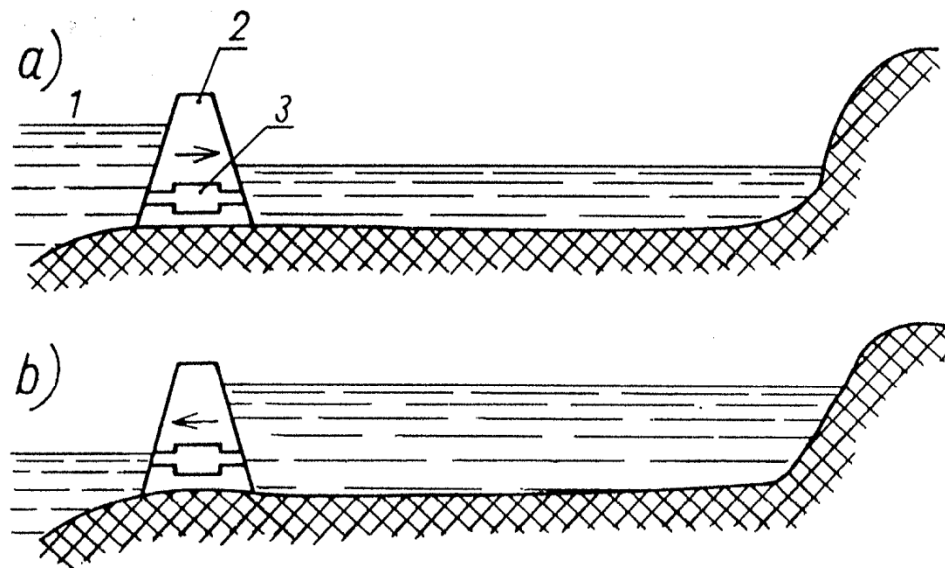
Źródło: www.podziemia.eu

Polskie elektrownie wodne - Młoty



Źródło: www.podziemia.eu

Morska elektrownia pływowa



Rys. 20.5. Schemat ideowy elektrowni pływowej: a) przypływ morza; b) odpływ morza
1 – morze; 2 – zapora; 3 – turbozespół

Morska elektrownia pływowa - problemy

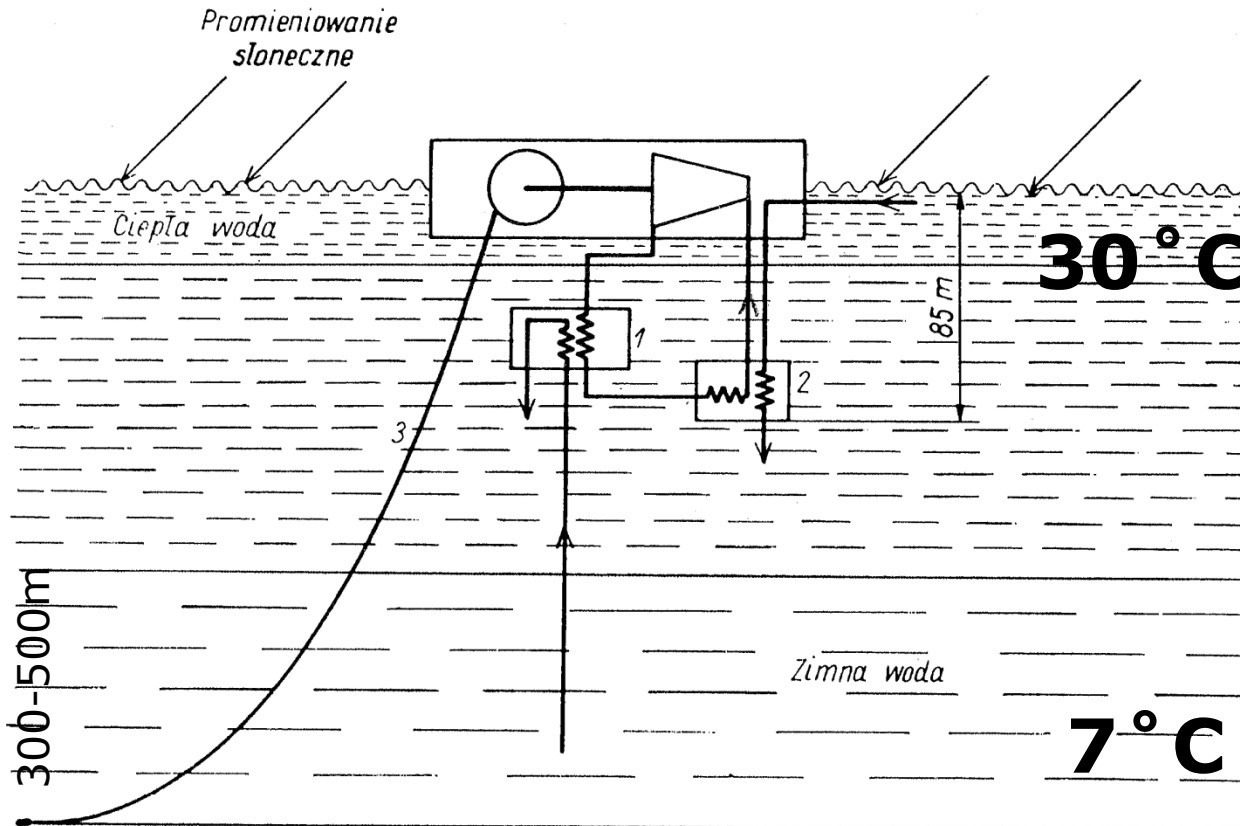
- Zasalanie ujść rzek
- Erozja brzegów rzek wskutek wahań poziomu wody

Największa elektrownia pływowa

Francja – rzeka La Rence – kanał La Manche. 24 x 10MW. Amplituda pływów 5-13,5m. Start przy różnicy 1,75m (10% mocy); 3,9m (50%); 6m (100%)

W dolinie obciążenia agregaty pracują w trybie pompowym.

Elektrownia maretermiczna



Bali (Indonezja) 5MW
 Japonia 10 MW
 Tahiti 5MW
 Hawaje 40 MW

Rys. 20.6. Schemat ideowy elektrowni maretermicznej wg [20.22]
 1 – skraplacz; 2 – kocioł propanowy; 3 – kabel podmorski



Dziękuję za uwagę !!!

