



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

# **Czyste energie**

**wykład 8**

## **Energetyka wodna**

**dr inż. Janusz Teneta**

**Wydział EAIiIB  
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej**

**AGH Kraków 2016**

# 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

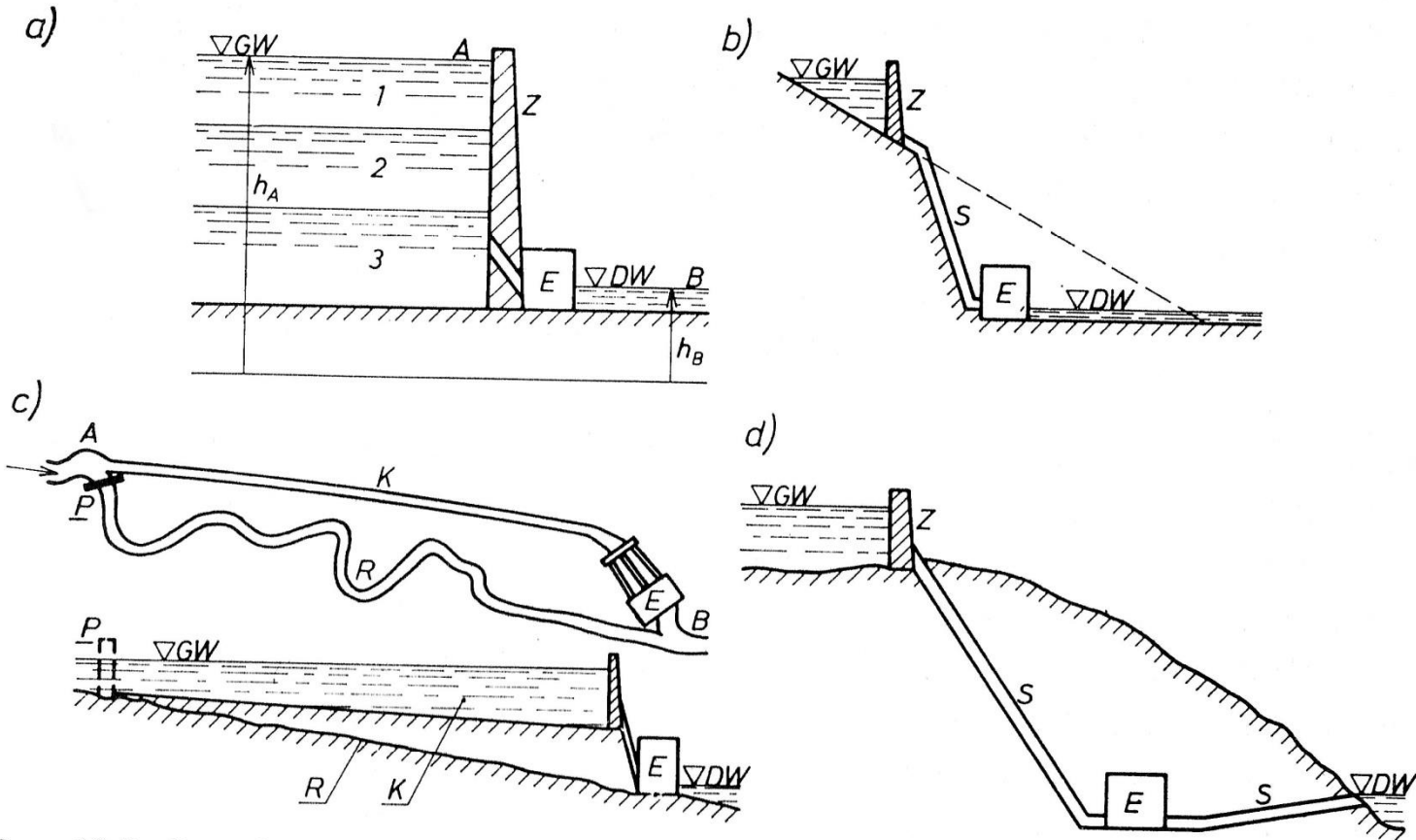
- **Morskie / Oceaniczne**

- 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],

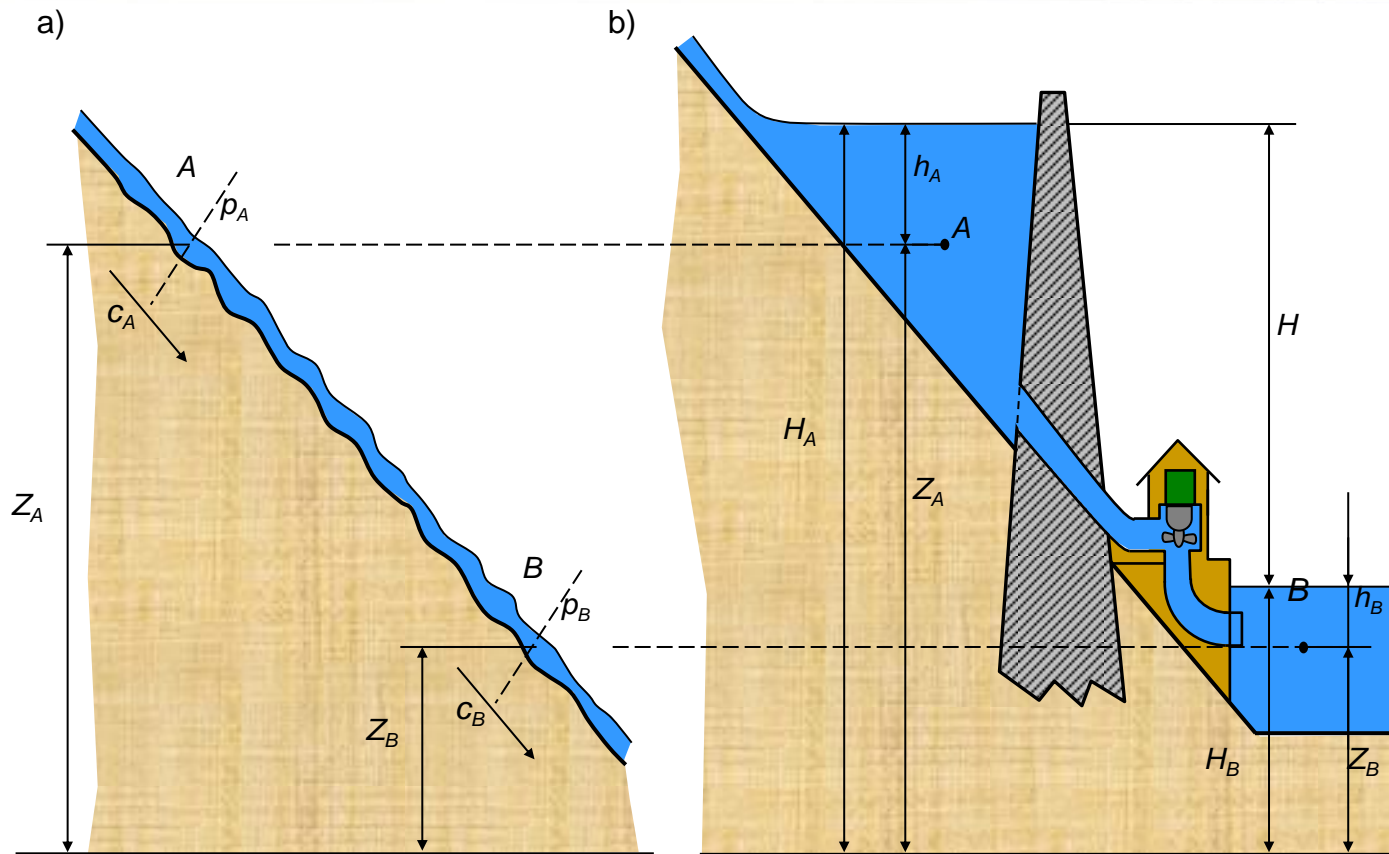
$g$  - przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>],

$h$  - wysokość [m],

$p$  - ciśnienie [Pa],

$\rho$  - gęstość wody [kg/m<sup>3</sup>]

# 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/s<sup>2</sup>],

$h$  - wysokość [m],

$p$  - ciśnienie [Pa],

$\rho$  - gęstość wody [kg/m<sup>3</sup>],

$Z_A, Z_B$  - 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 [m<sup>3</sup>].

# 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/s<sup>2</sup>],
- $h$  - wysokość [m],
- $p$  - ciśnienie [Pa],
- $\rho$  - gęstość wody [kg/m<sup>3</sup>],
- $Z_A, Z_B$  - 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 [m<sup>3</sup>].

# 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:

$\eta_t$       sprawność turbiny wodnej [ 0,88 – 0,93]

$\eta_p$       sprawność przekładni,

$\eta_g$       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/m<sup>3</sup>], a  $g = 9,81$  [m/s<sup>2</sup>] wynosi:

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

gdzie:

$\eta_s$

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 :

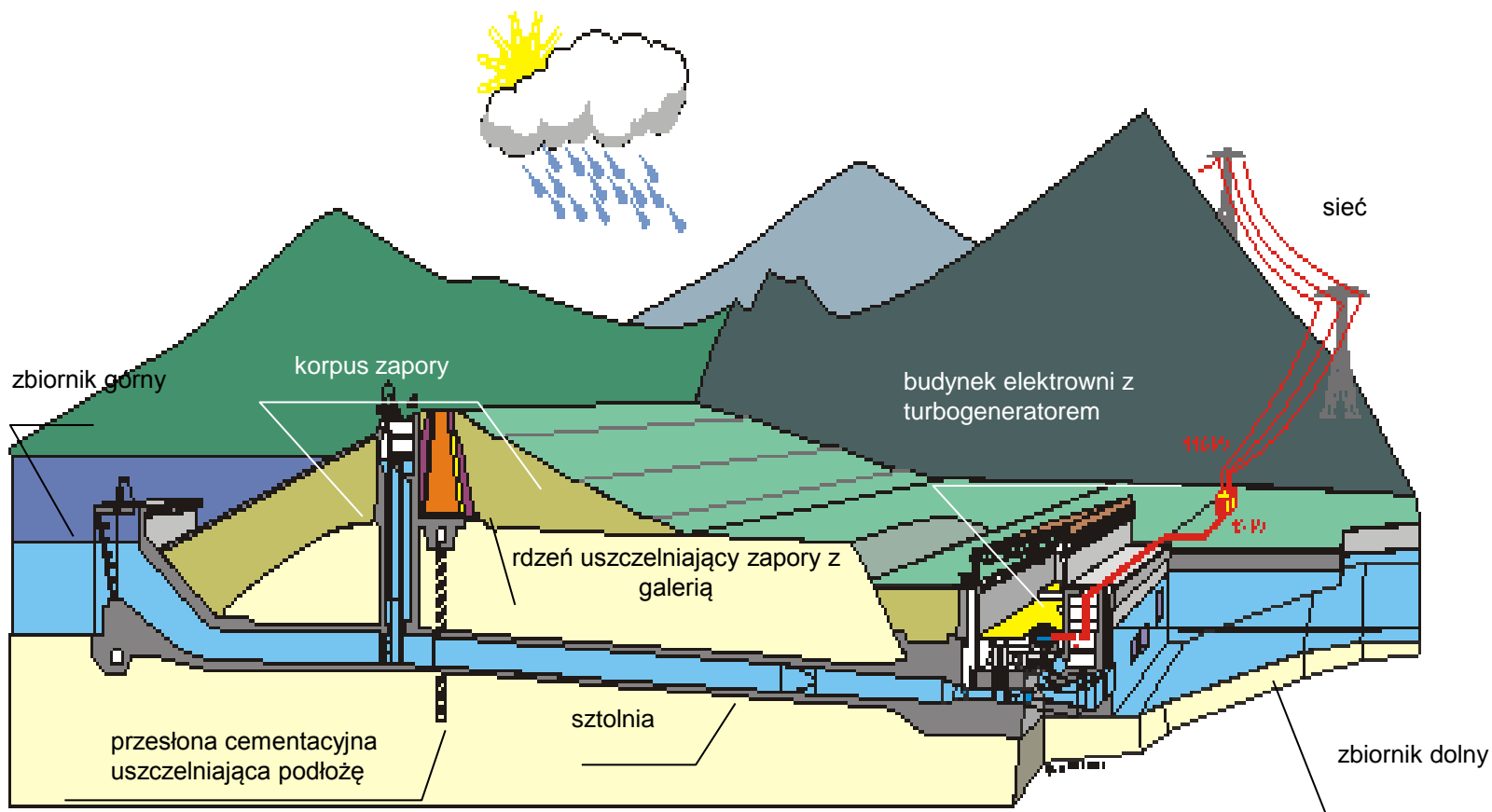
$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad [\text{kW}]$$

gdzie:

$\eta$  - 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  $c_2$ .**

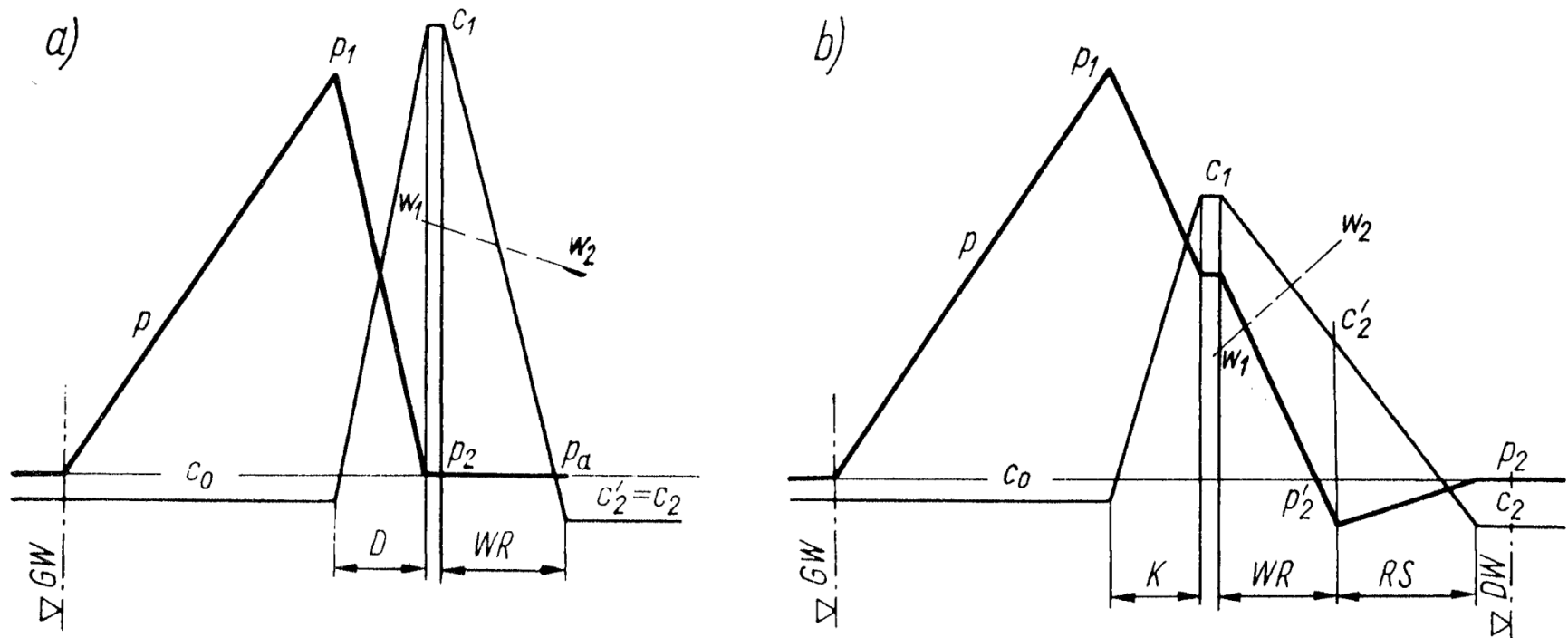
**Wirnik turbiny akcyjnej jest zasilany na części obwodu i powierzchnie tylne łopatek nie stykają się z wodą. Konieczność umieszczenia wirnika nad zwierciadłem dolnej wody powoduje stratę pewnej części spadu. Ponieważ turbiny akcyjne są stosowane pod spadami najwyższymi, więc strata procentowa spadu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

**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

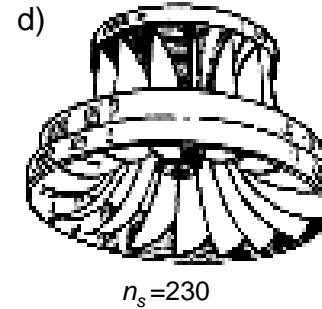
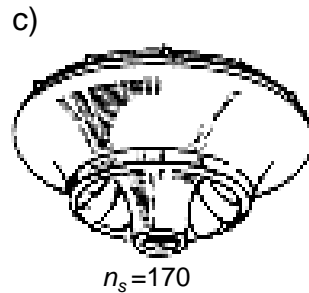
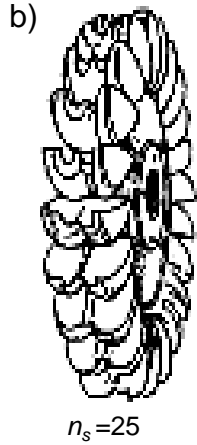
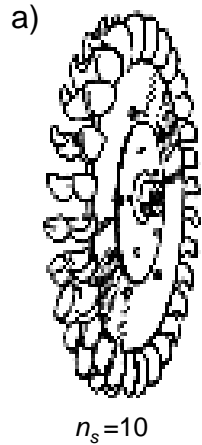
$c_0$  – prędkość wlotowa wody do turbiny;  $c_1$  – prędkość wody na wylocie z dyszy  $D$  lub kierownic  $K$ ;  $c_2'$  – prędkość wody na wylocie z wirnika turbiny;  $c_2$  – prędkość wody na wlocie do wody dolnej;  $w$  – względna prędkość wody w wirniku;  $u$  – prędkość (wypadkowa);  $p_a$  – ciśnienie atmosferyczne;  $p$  – ciśnienie wody w danym punkcie słupa wody;  $\xi$  – 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:

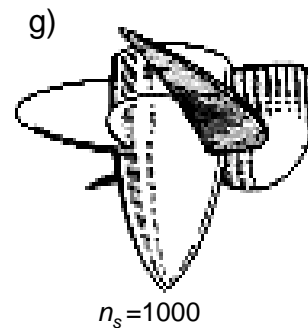
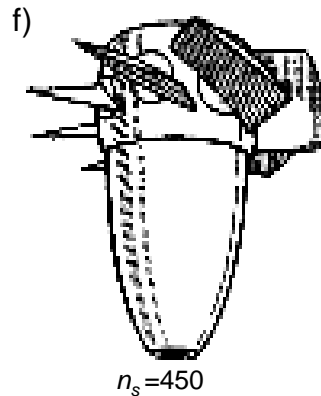
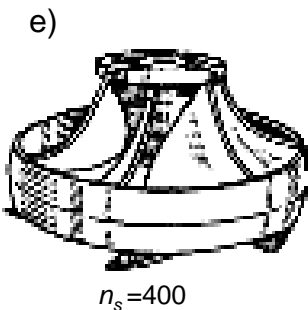
- Peltona                      spad    50 ÷ 2000 m             $ns = 2 \div 35$
- Francisa                    spad    10 ÷ 600 m              $ns = 50 \div 450$
- Deriaza                     spad    13 ÷ 300 m,             $ns = 250 \div 500$
- Kaplana                     spad    1,5 ÷ 80 m         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

# Przykładowe wirniki turbin



a),b) turbiny  
Peltona;

c),d),e)  
turbiny  
Francisa;



f),g) turbiny  
Kaplana.



***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 [m<sup>3</sup>/s]**

**$H_u$  - spad użyteczny turbiny [m].**

**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  $ns$ .**

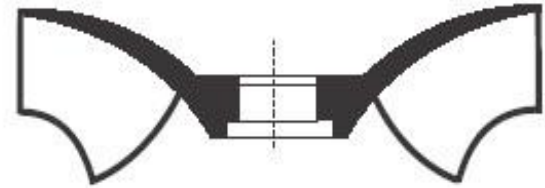
**Wartość wyróżnika szybkobieżności decyduje o podziale wirników na:**

**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).**

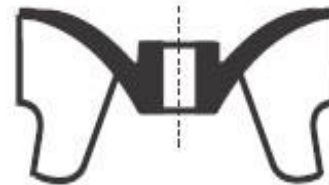
Elektrownia wodna  
wysokospadowa

Turbina  
wolna



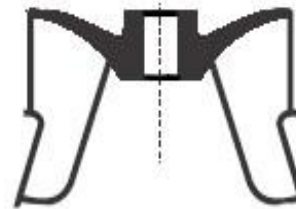
$n_s = 80$

typowa



$n_s = 200$

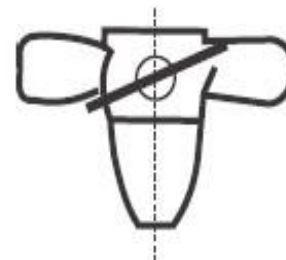
szybka



$n_s = 300$

Elektrownia wodna  
niskospadowa

bardzo szybka



$n_s = 514$

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

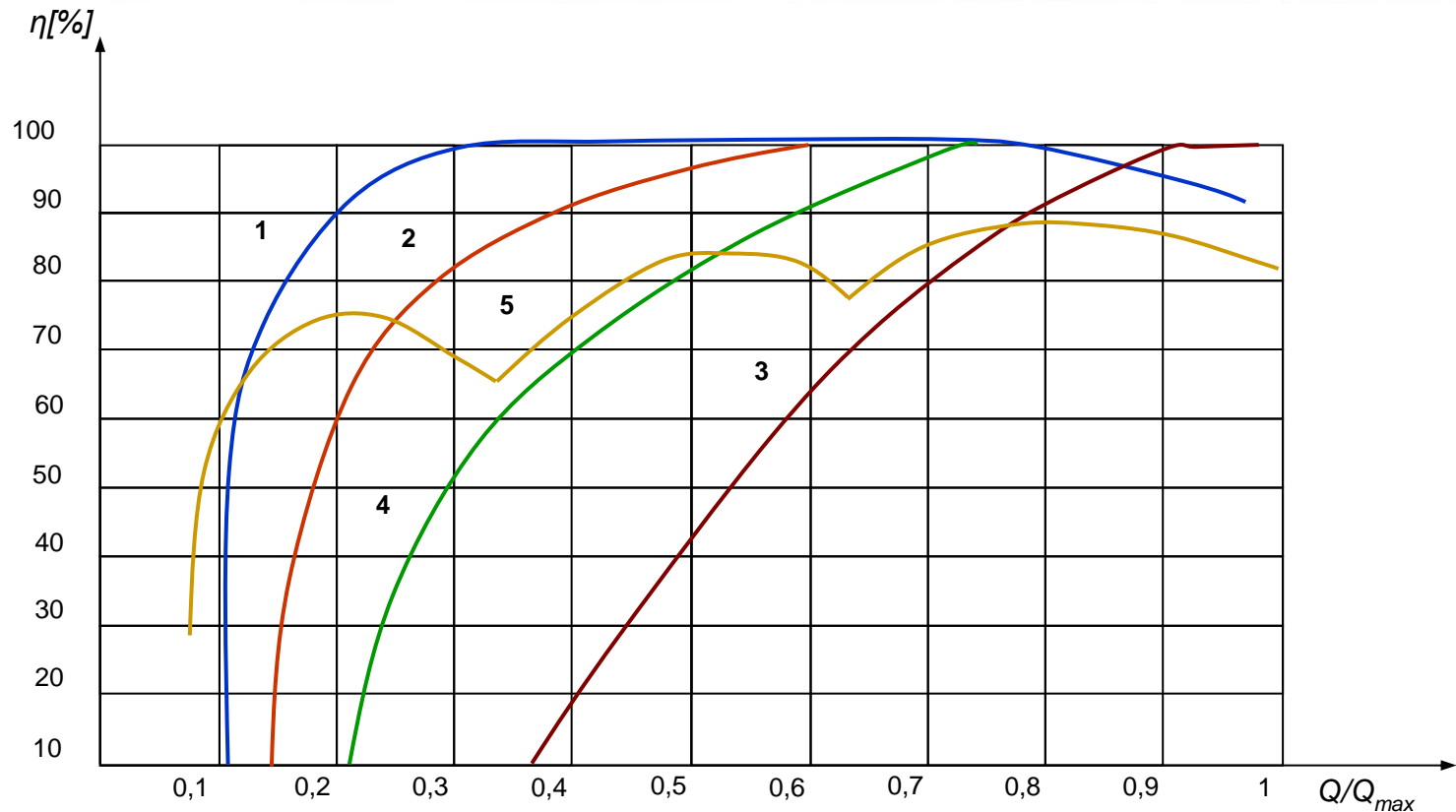
***Zwiększenie szybkobieżności wpływa na zmniejszenie średnicy wirnika przy tej samej mocy i spadzie.***

***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  $\alpha_0$  (w przypadku turbin Francis).***

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

# Sprawności różnych turbin

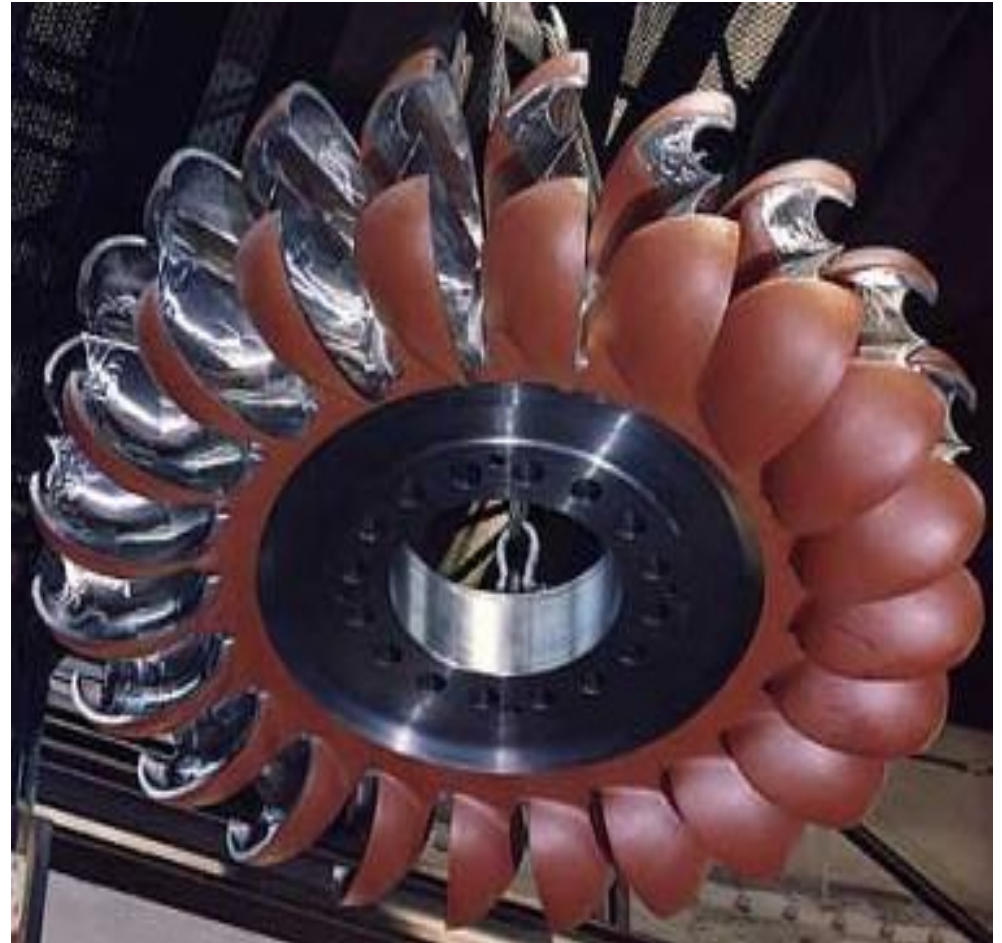


1 - turbina Kapłana pionowa i turbina rurowa kolanowa z podwójną regulacją, 2 - turbina rurowa kolanowa ze stałą kierownicą i regulowanym wirnikiem, 3 - turbina rurowa kolanowa ze stałymi łopatkami wirnika i regulowaną kierownicą, 4 - turbina Francisa, 5 - turbina Banki-Michella.



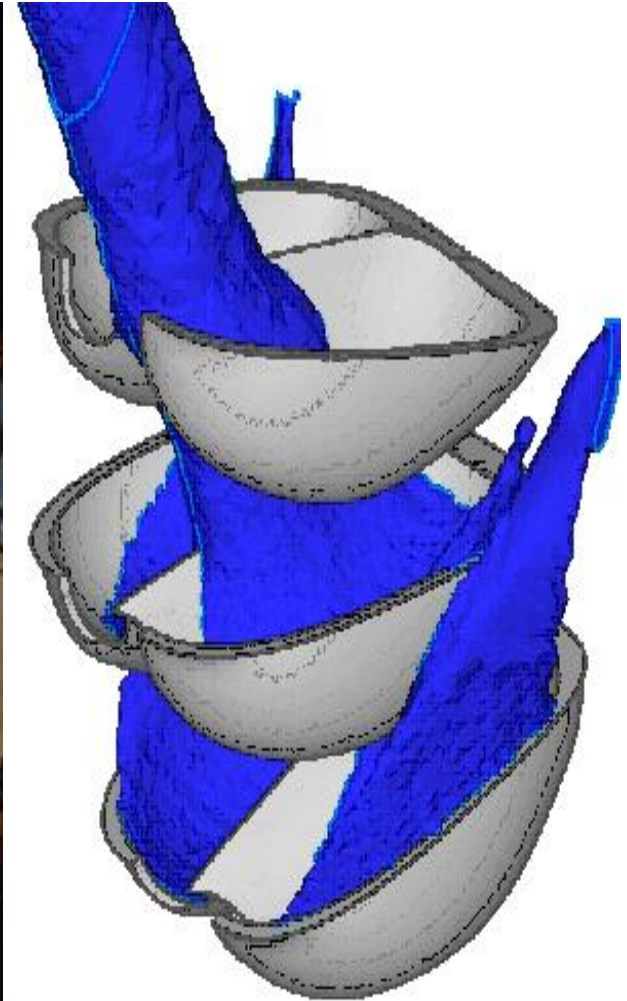
# TURBINA PELTONA

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  $180^\circ$ . 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.



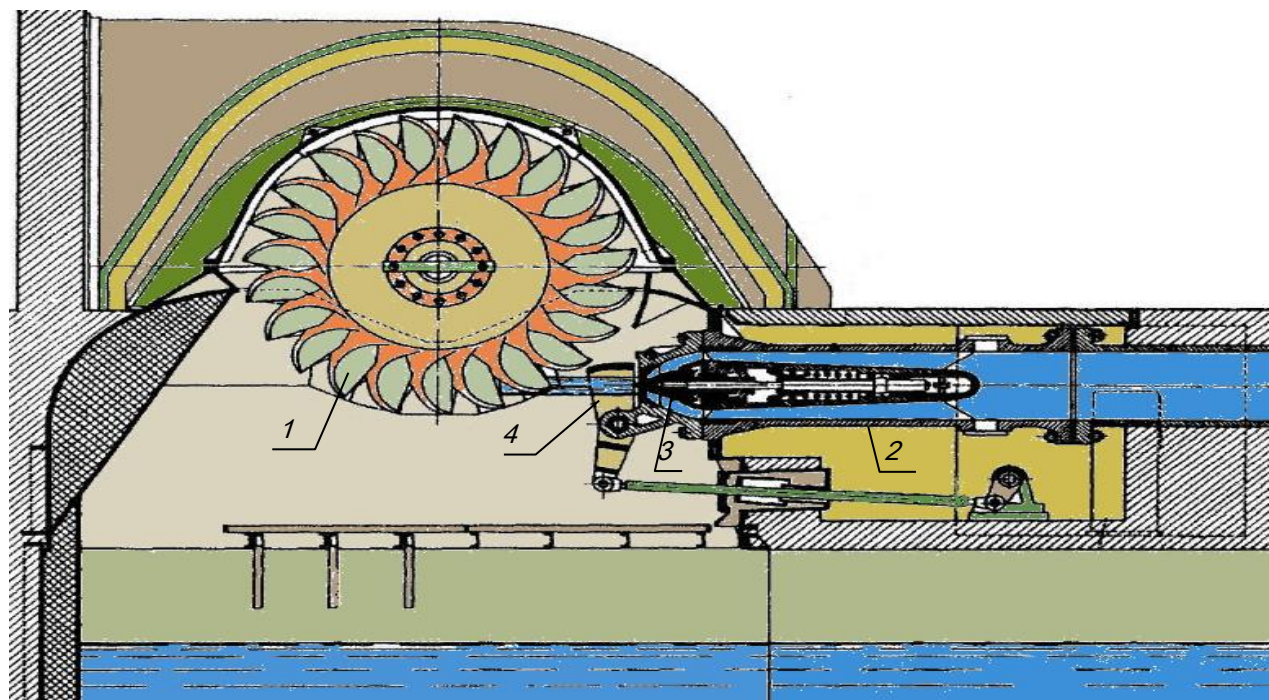


# TURBINA PELTONA

## 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

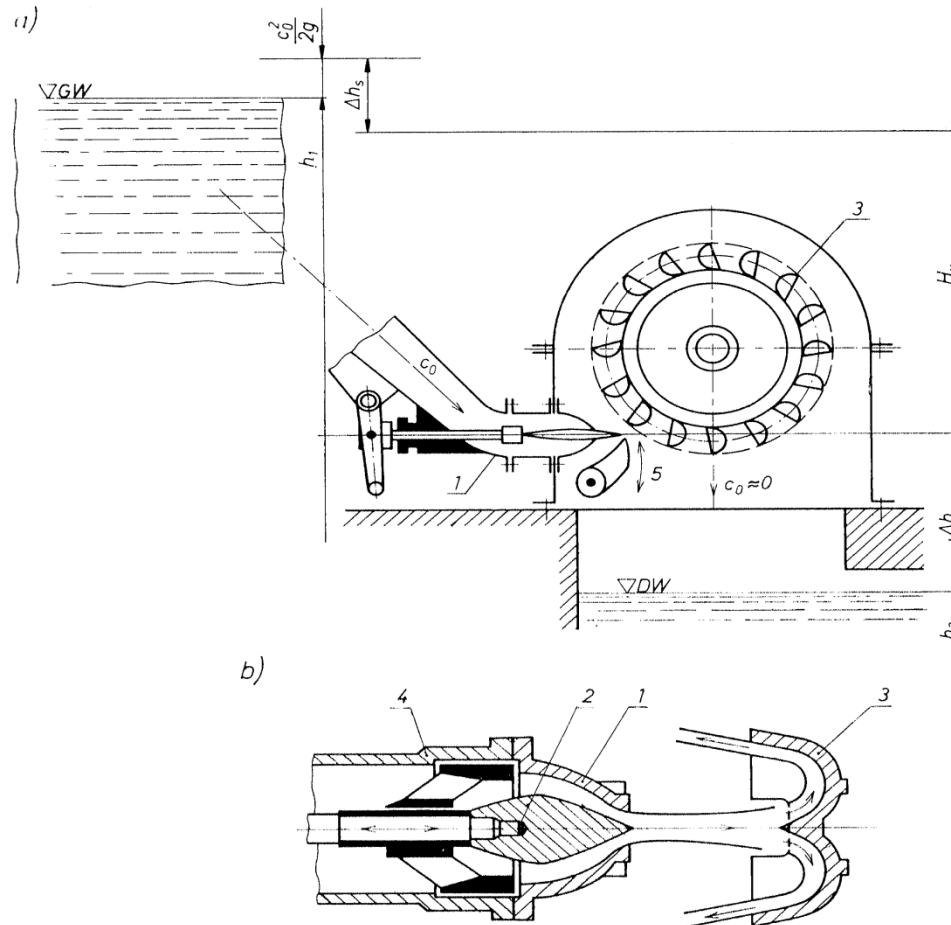
na wirnik przez odchylenie go od wirnika. W tym czasie iglica powoli zamyka dyszę, nie wywołując w rurociągu wzrostu ciśnienia, które mogło by spowodować efekt uderzenia hydraulicznego.



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

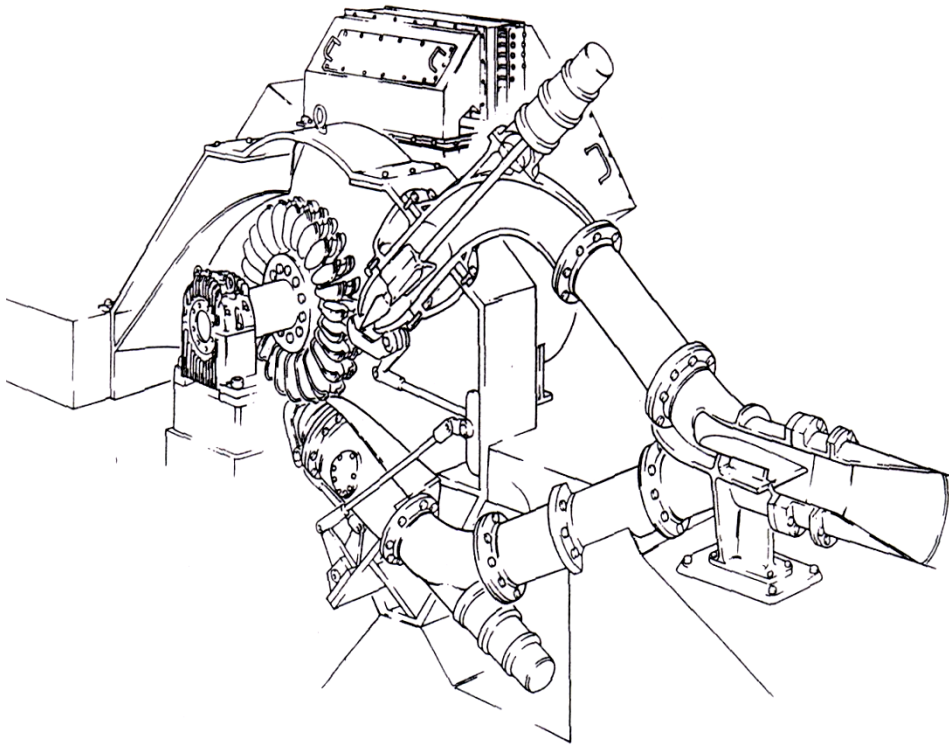
# TURBINA PELTONA

## zasada działania



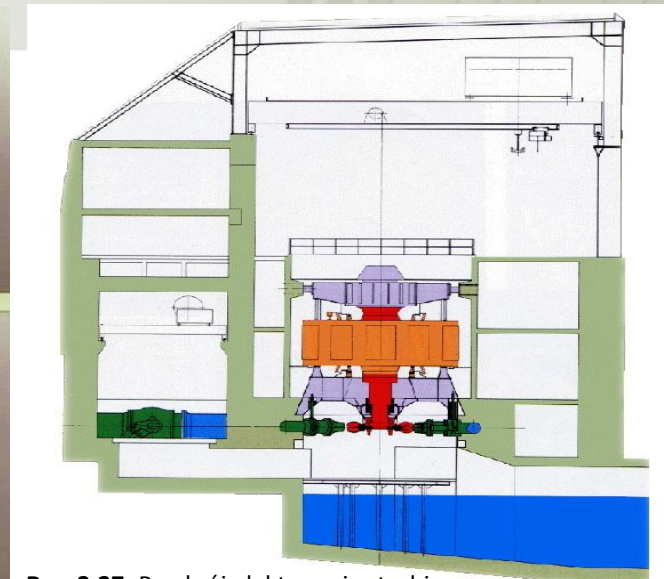
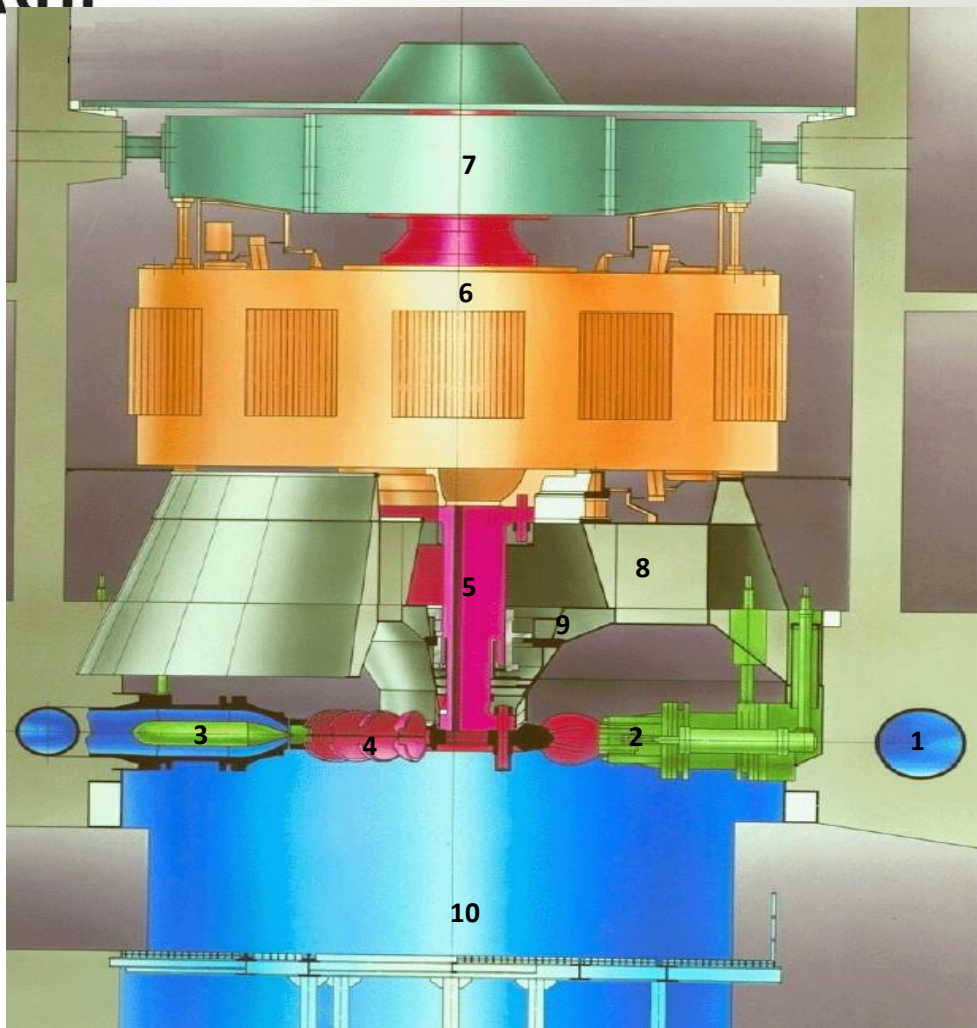
Rys. 12.4. Turbina Peltona: a) doprowadzenie wody i wirnik turbiny; b) dysza i łopatką wirnika  
 1 – dysza; 2 – iglica; 3 – łopatką; 4 – rura ciśnieniowa doprowadzająca wodę; 5 –  
 odchylacz strugi (strumienia);  $\Delta h_s$  – straty spadujące przy przepływie wody przez  
 utorciagi, budowle i urządzenia

# TURBINA PELTONA o osi poziomej





# TURBINA PELTONA o osi pionowej



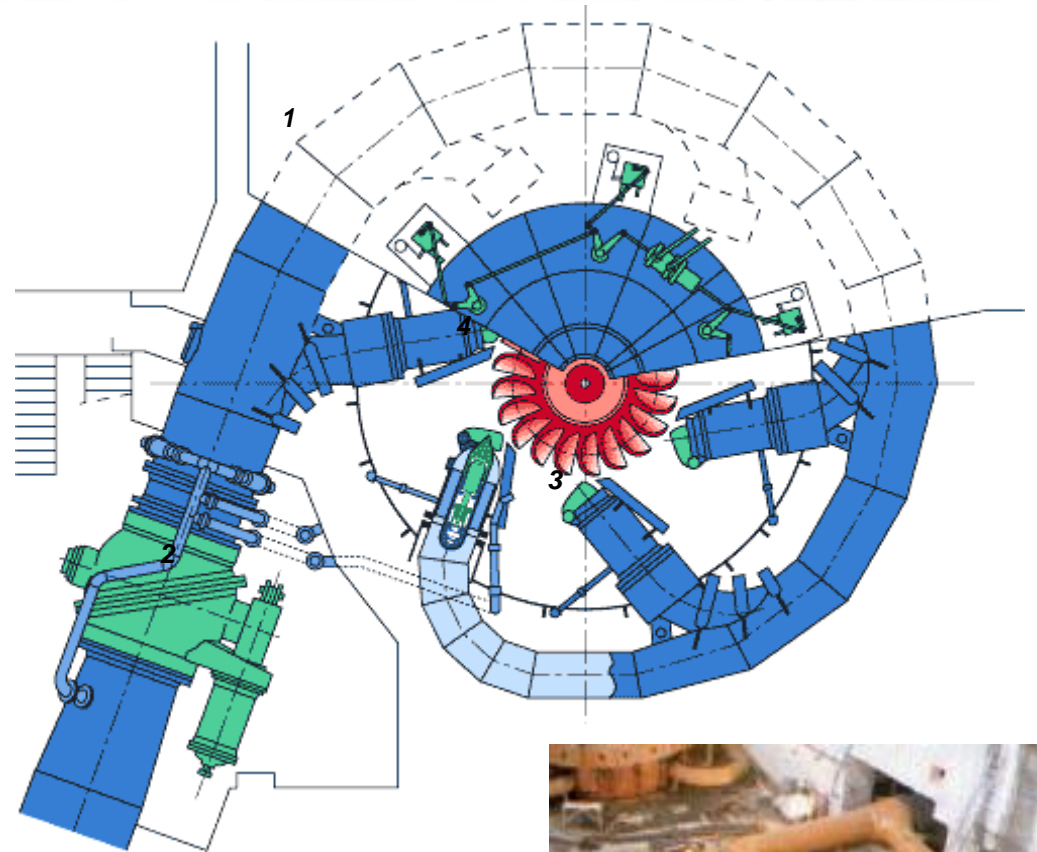
Rys. 3.27. Przekrój elektrowni z turbiną Peltona.



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](http://www.powerspout.com)

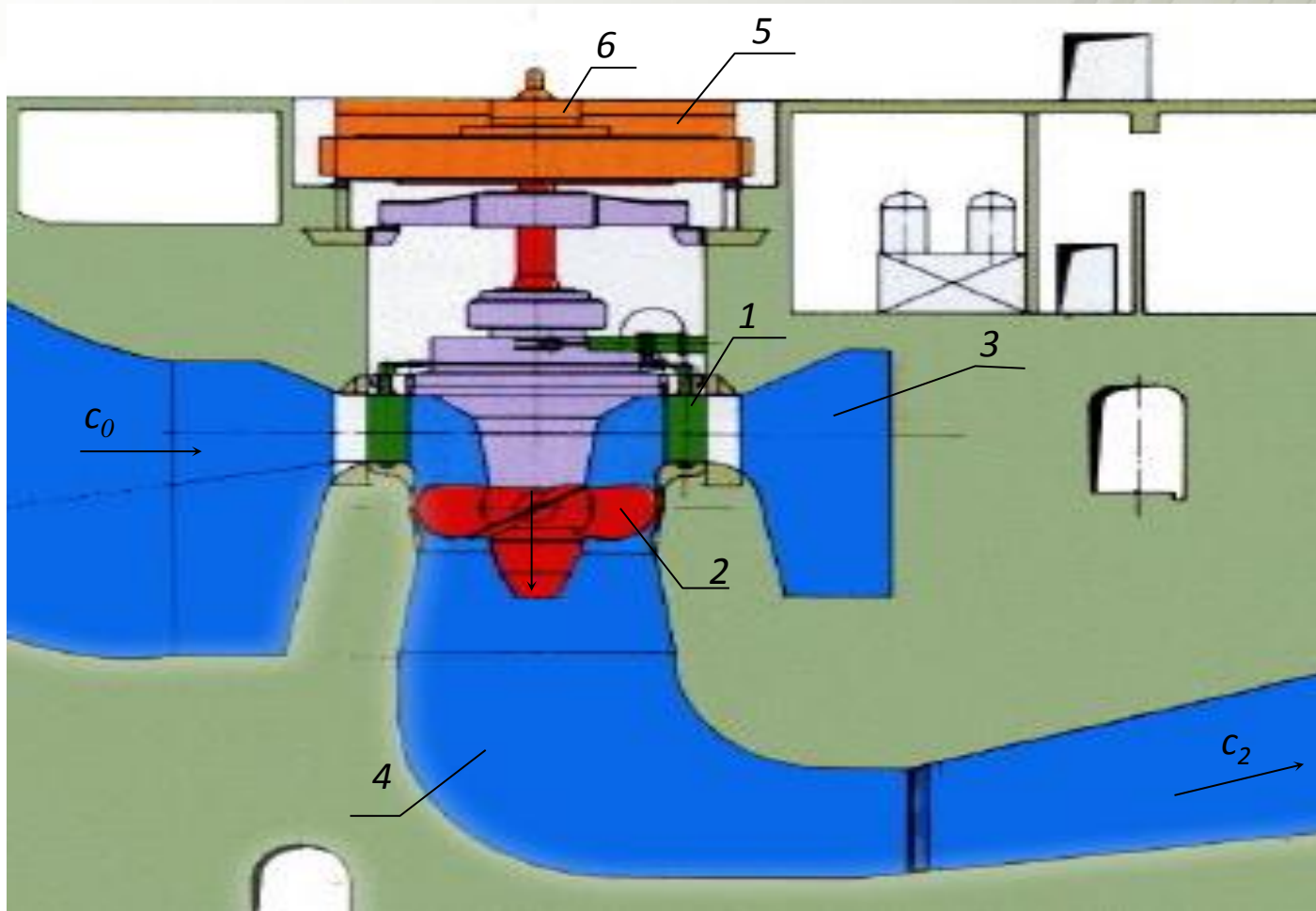
# TURBINA Kaplana

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  $c_2$



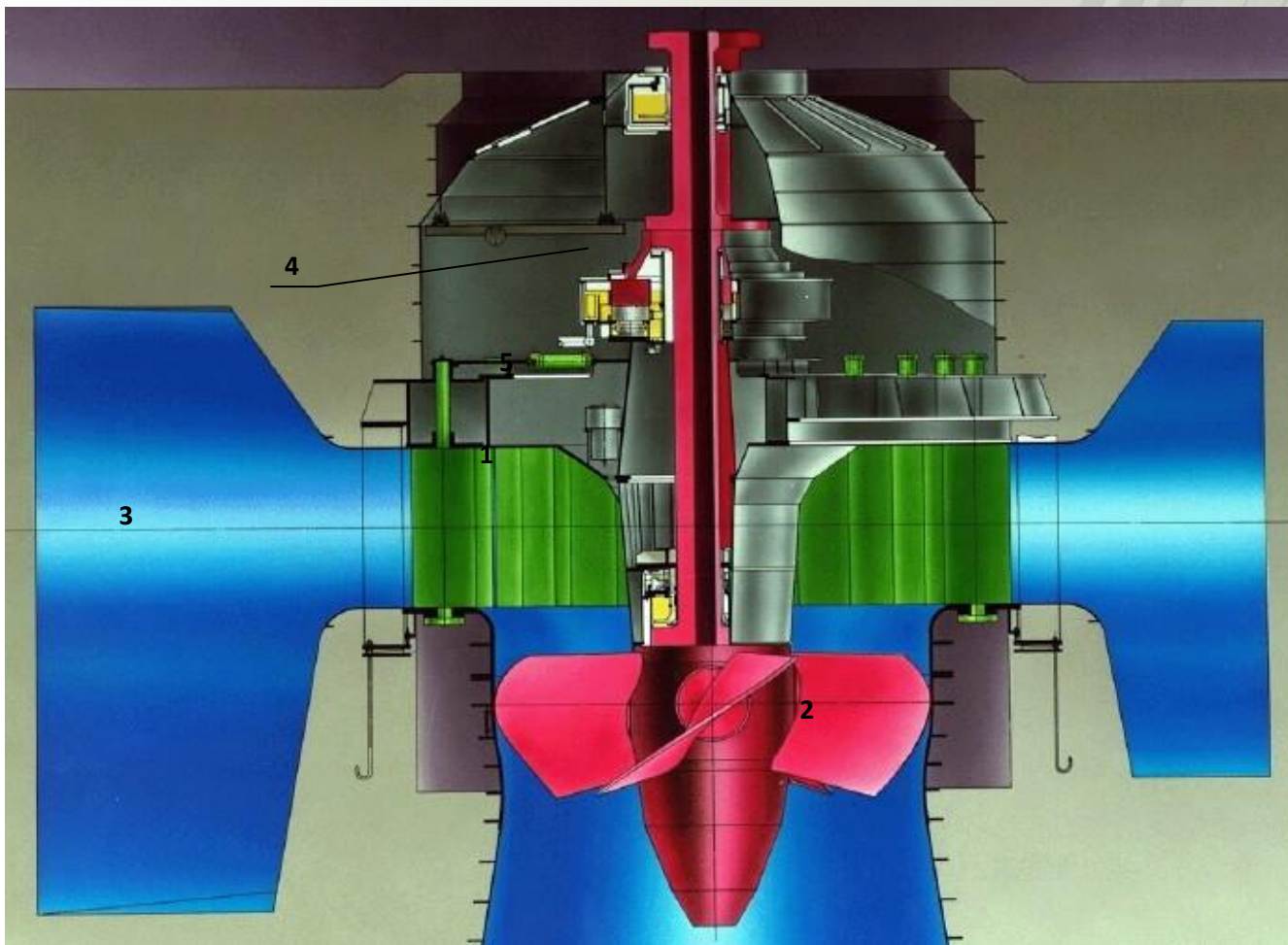
# TURBINA Kaplana



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

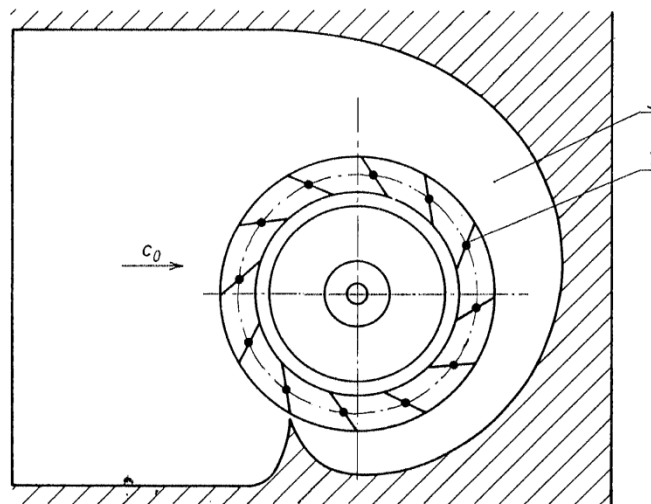
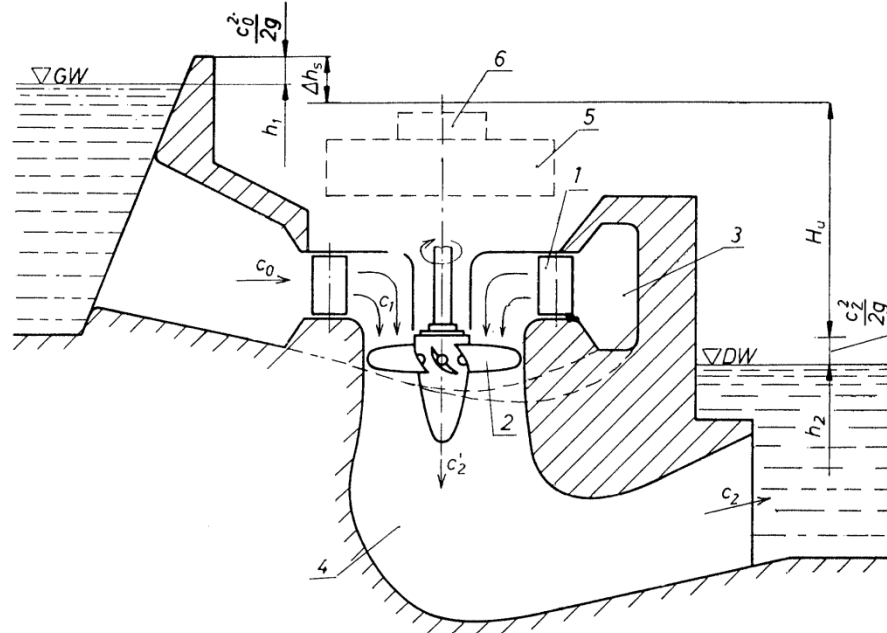


# TURBINA Kaplana



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

# 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

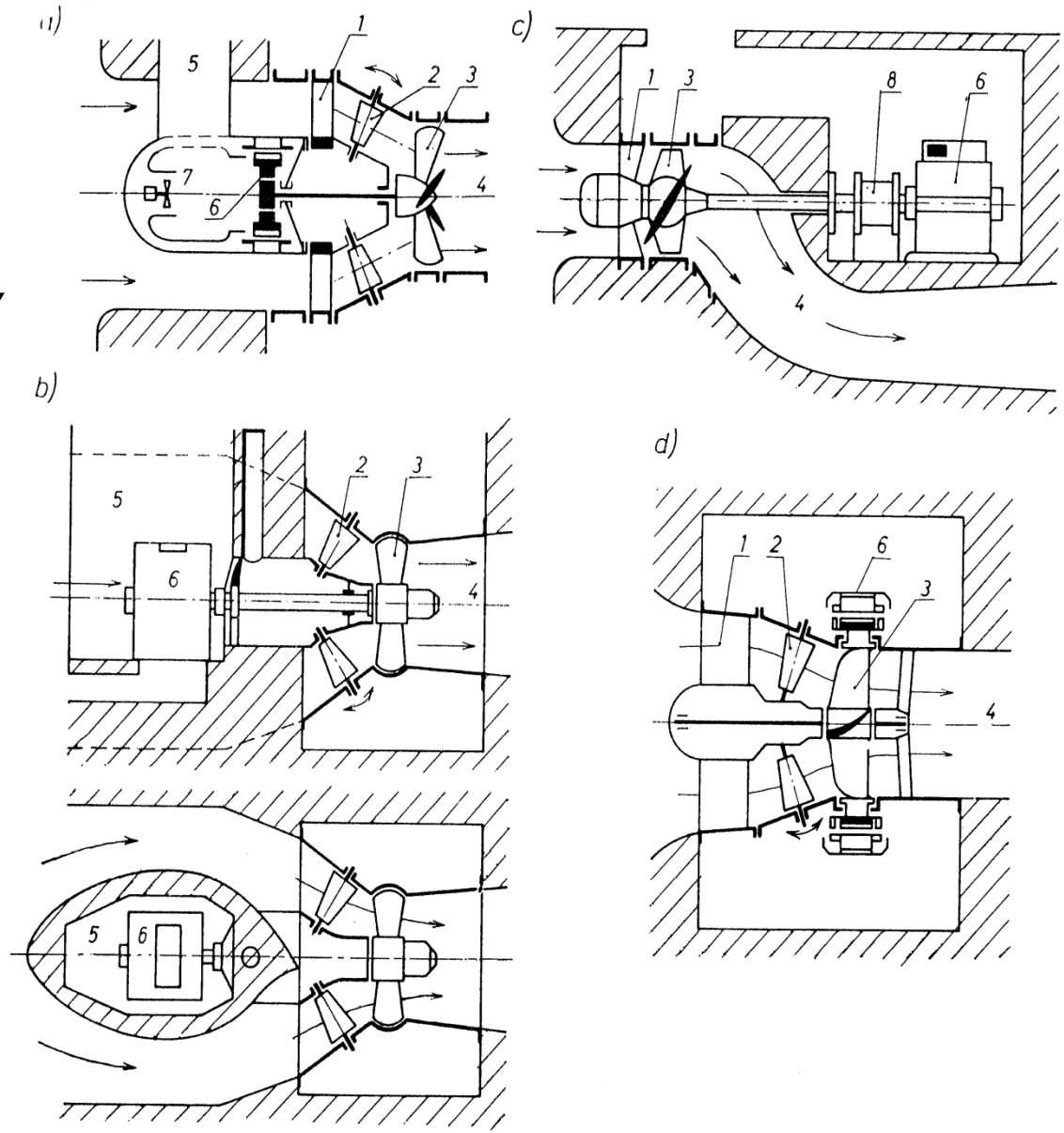
# TURBINA Kaplana

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 m<sup>3</sup>/s.

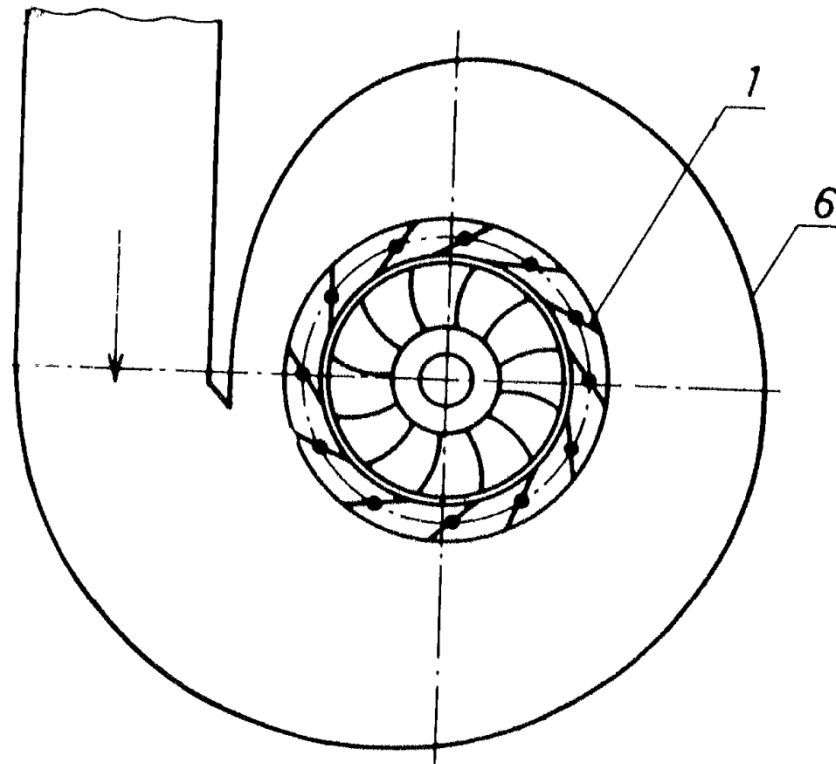
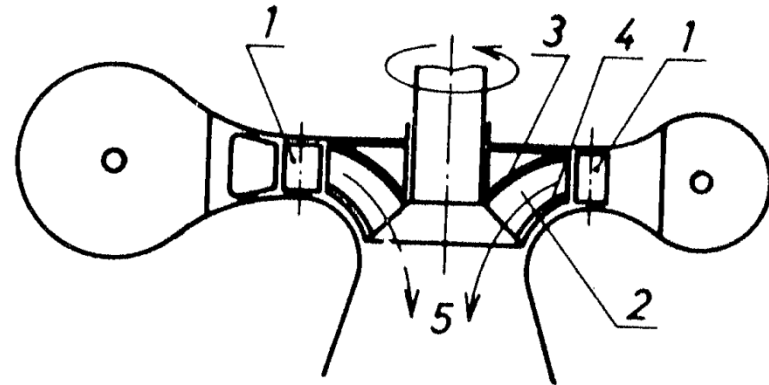
# TURBINY rurowe



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

# TURBINA Francisa

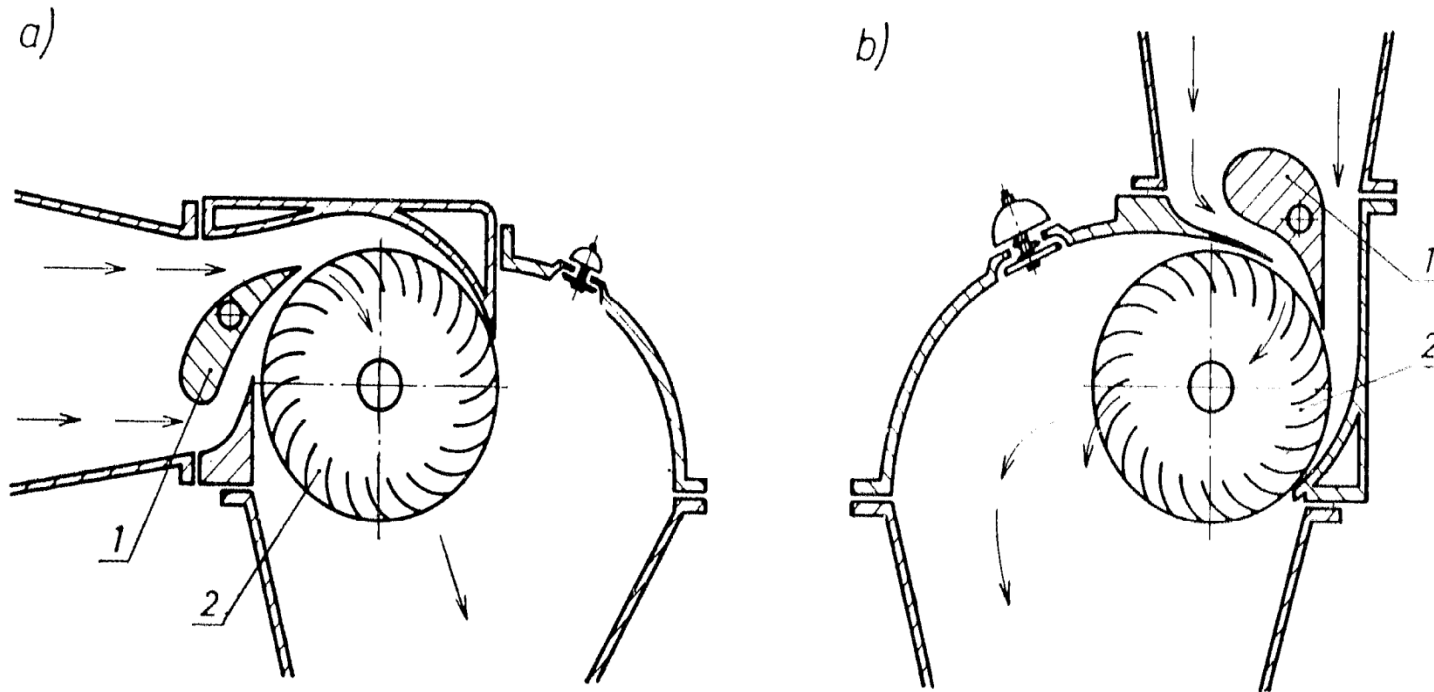
- 1 – nastawialne łopatki kierownicze
- 2 – nieprzestawialne łopatki łączące wieńce 3 i 4
- 5 – rura ssąca
- 6 – metalowa spirala dolotowa





# 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

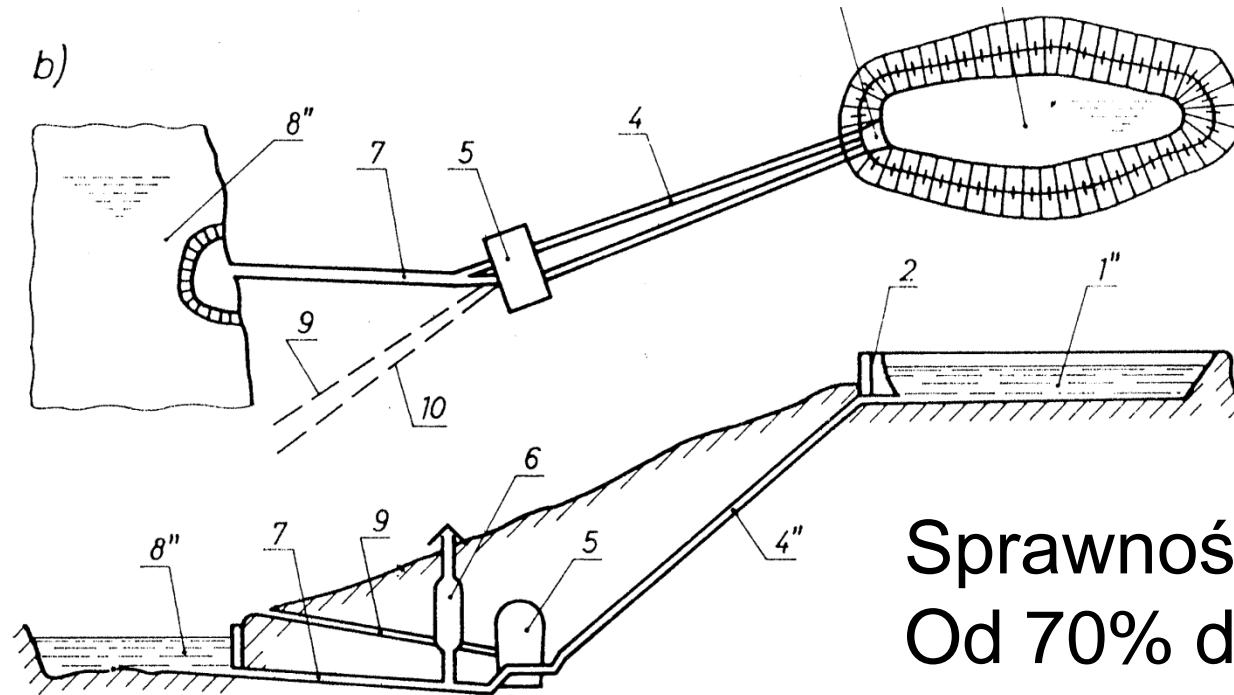
# Elektrownie kaskadowe

- 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

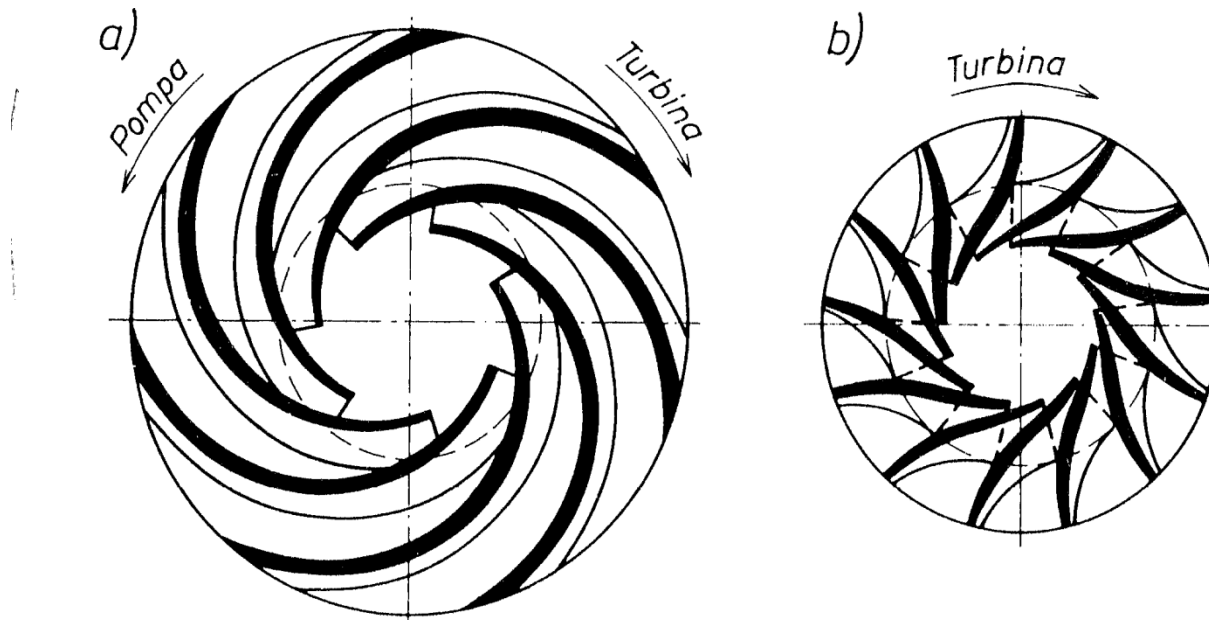
# Elektrownia szczytowo pompowa



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  $52\text{MW}$   $n=250$  obr/min  $D=2,85\text{m}$
- **Porąbka-Żar (1979) – Soła**
  - 4x pompoturbiny  $125/135\text{MW}$   $n=600$  obr/min,  $D=3,1\text{m}$   
 $H=440\text{m}$
- **Żarnowiec (1983)**
  - 3x pompoturbiny  $170/182\text{MW}$   $n=166,7$  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.

## PORĄBKĄ-

### 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 <sup>3</sup>
POJEMNOŚĆ ENERGETYCZNA	2.000.000m <sup>3</sup>
WAHANIE ZWIERCIADŁA WODY	20m
DOPIŁYW ŚREDNI PRZY POMPOWANIU 4 TURBOPOMPAMI	140m <sup>3</sup> /sek
CZAS POMPOWANIA 4 TURBOPOMPAMI	5,5 godz.
ODPIŁYW ŚREDNI PRZY PRACY 4 TURBOPOMP	145m <sup>3</sup> /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 m<sup>3</sup>, 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. m<sup>3</sup>)



# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)



Źródło: [www.niedzica.pl](http://www.niedzica.pl)

# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)



Źródło: [www.wikipedia.pl](http://www.wikipedia.pl)

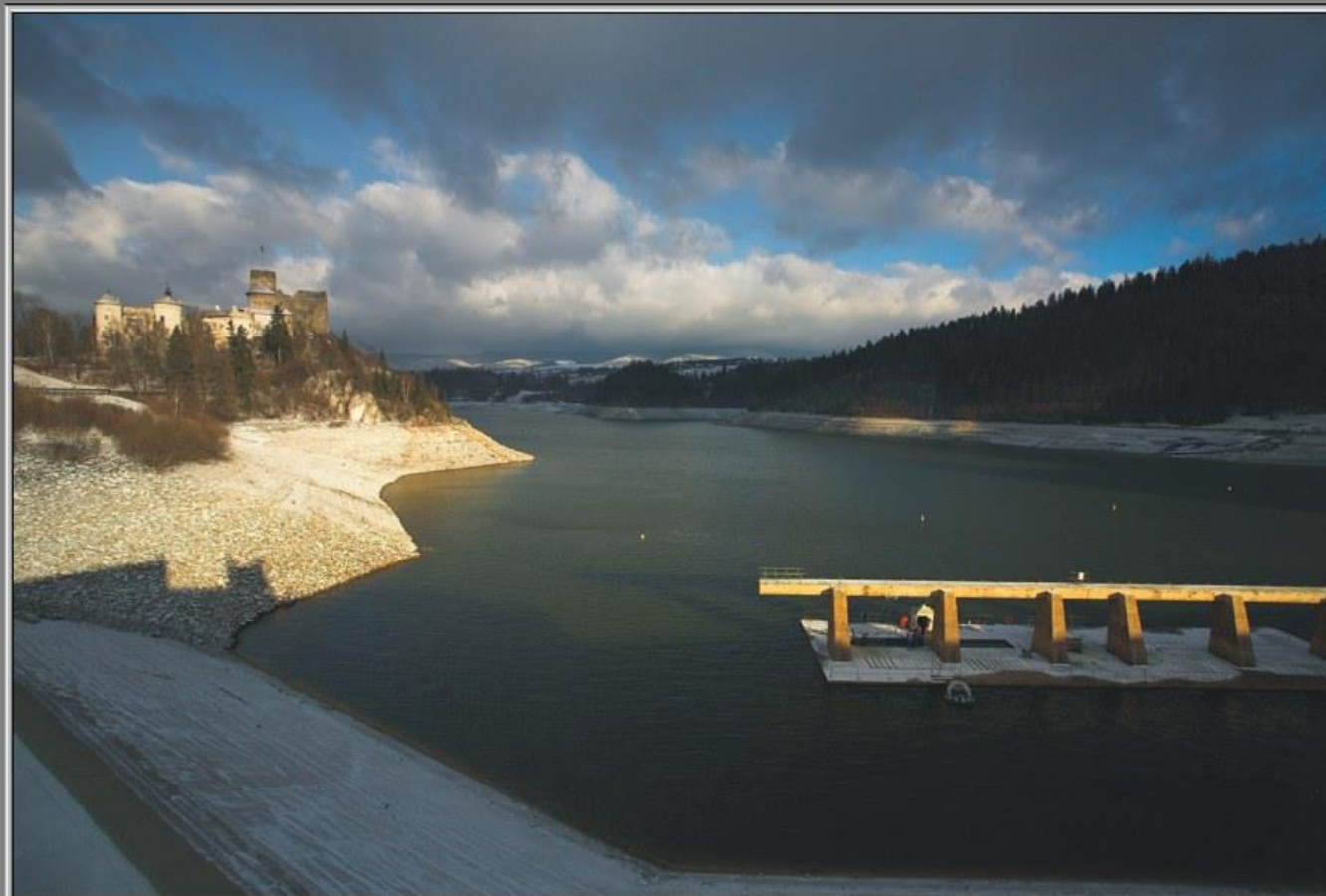


AGH

# 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](http://www.zew-niedzica.com.pl)



# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)







AGH

# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)





AGH

# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)



gniazda zamknięć (wieża zamknięć) - 19.12.2007r.

[www.zew-niedzica.com.pl](http://www.zew-niedzica.com.pl)

Fot. Zabrzewski





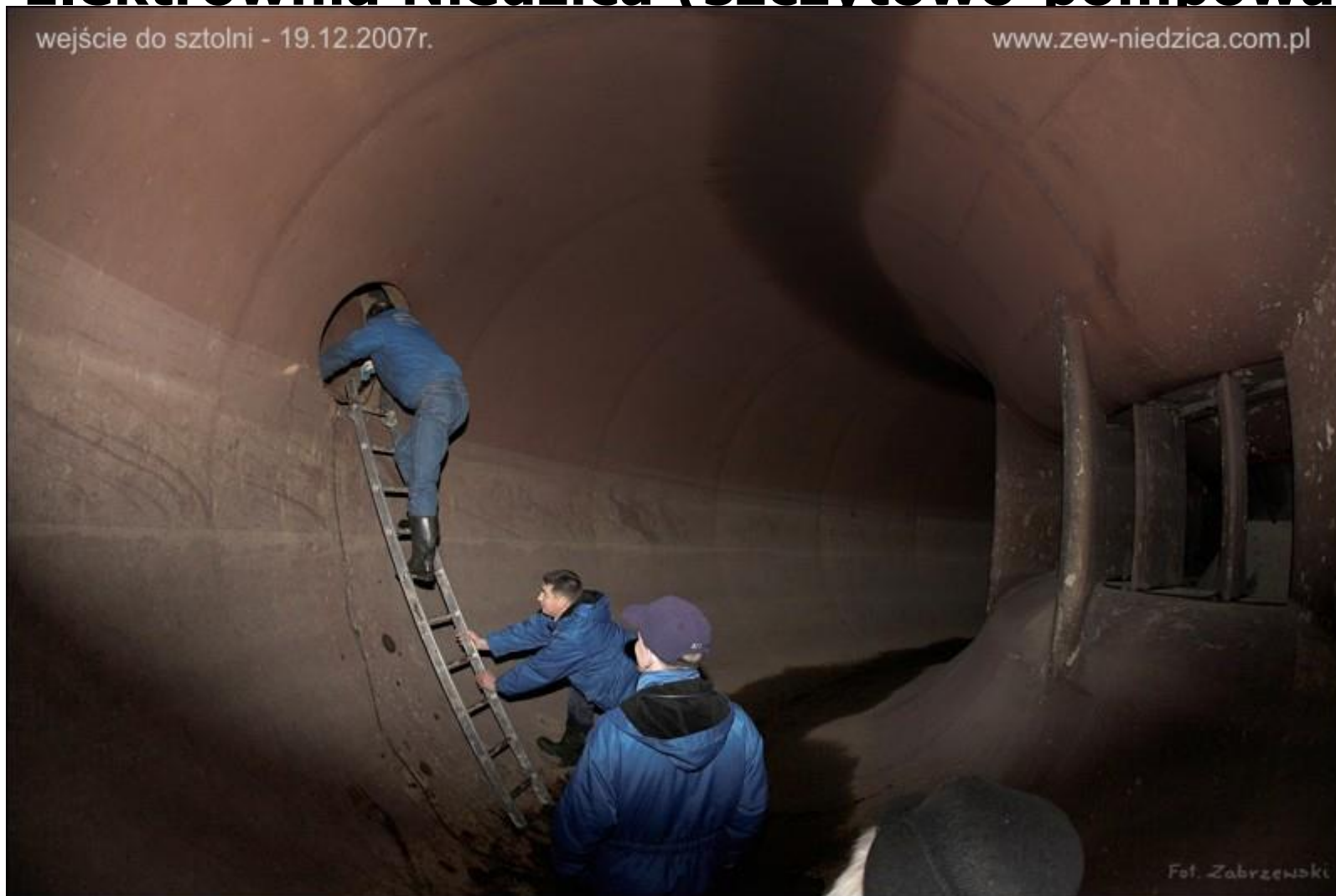
AGH

# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica (szczytowo-pompowa)

wejście do sztolni - 19.12.2007r.

[www.zew-niedzica.com.pl](http://www.zew-niedzica.com.pl)



Fot. Zabrzewski



# Polskie elektrownie wodne

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

## **Elektrownia Sromowce (przeptywowa)**

- Górna woda – Zbiornik Sromowiecki (7,5 mln m<sup>3</sup>, 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](http://www.zew-niedzica.com.pl)

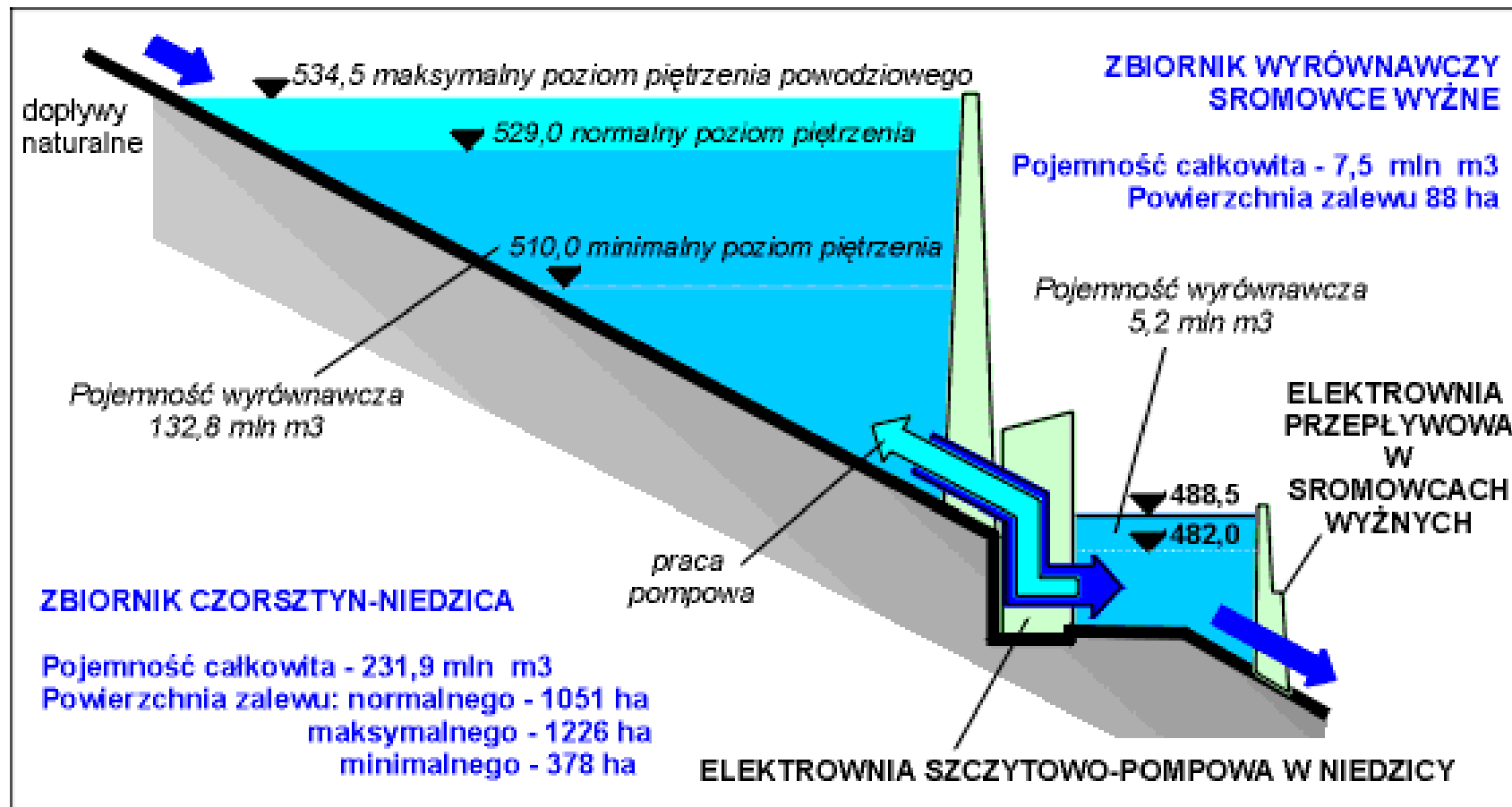




AGH

# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica-Czorsztyń-Sromowce



Źródło: [www.zew-niedzica.com.pl](http://www.zew-niedzica.com.pl)



# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica - fala powodziowa 2001



Źródło: [www.zew-niedzica.com.pl](http://www.zew-niedzica.com.pl)

J. TENETA Wykłady "Czyste energie i ochrona środowiska" AGH 2016



AGH

# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica - fala powodziowa 2001



Źródło: [www.zew-niedzica.com.pl](http://www.zew-niedzica.com.pl)

J. TENETA Wykłady "Czyste energie i ochrona środowiska" AGH 2016

# Polskie elektrownie wodne

## Elektrownia Niedzica – przelew stokowy



Źródło: [www.zew-niedzica.com.pl](http://www.zew-niedzica.com.pl)





# Polskie elektrownie wodne

- **Elektrownia szczytowo-pompowa Młoty (1968...)**  
***pozwolenie na budowę ważne do 2015***
  - dolna woda – sztuczny zbiornik na Bystrzycy (11,3 mln m<sup>3</sup>, 2km długości)
  - Zapora: wysokość 80m, szerokość w koronie 240m.
  - górna woda – zbiornik na szczycie Zamkowej Kopy 6,5 mln m<sup>3</sup>
  - 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





# Polskie elektrownie wodne - Młoty



Zródło: [www.podziemia.eu](http://www.podziemia.eu)



# Polskie elektrownie wodne - Młoty



Źródło: [www.podziemia.eu](http://www.podziemia.eu)

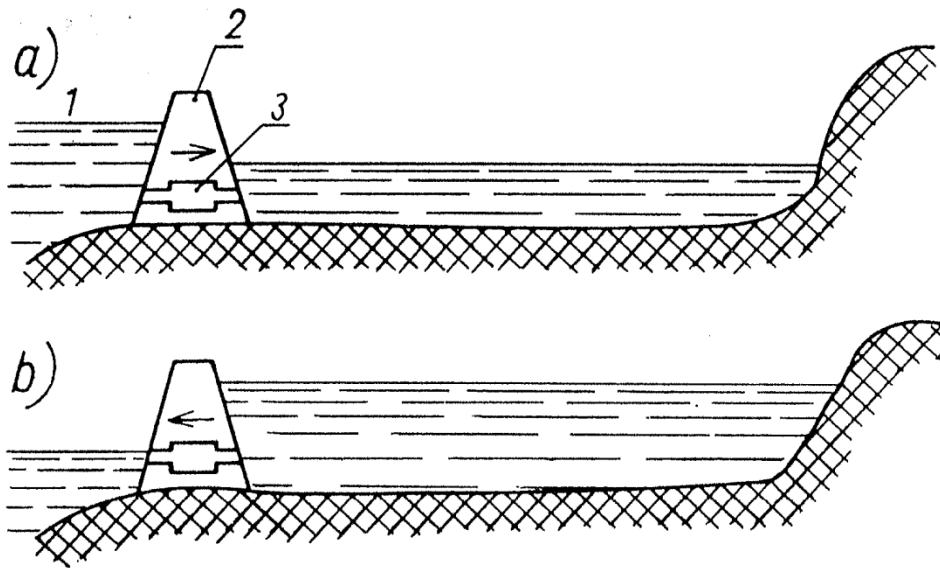


# Polskie elektrownie wodne - Młoty



Źródło: [www.podziemia.eu](http://www.podziemia.eu)

# Morska elektrownia pływowa



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

# Morska elektrownia pływowa - problemy

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

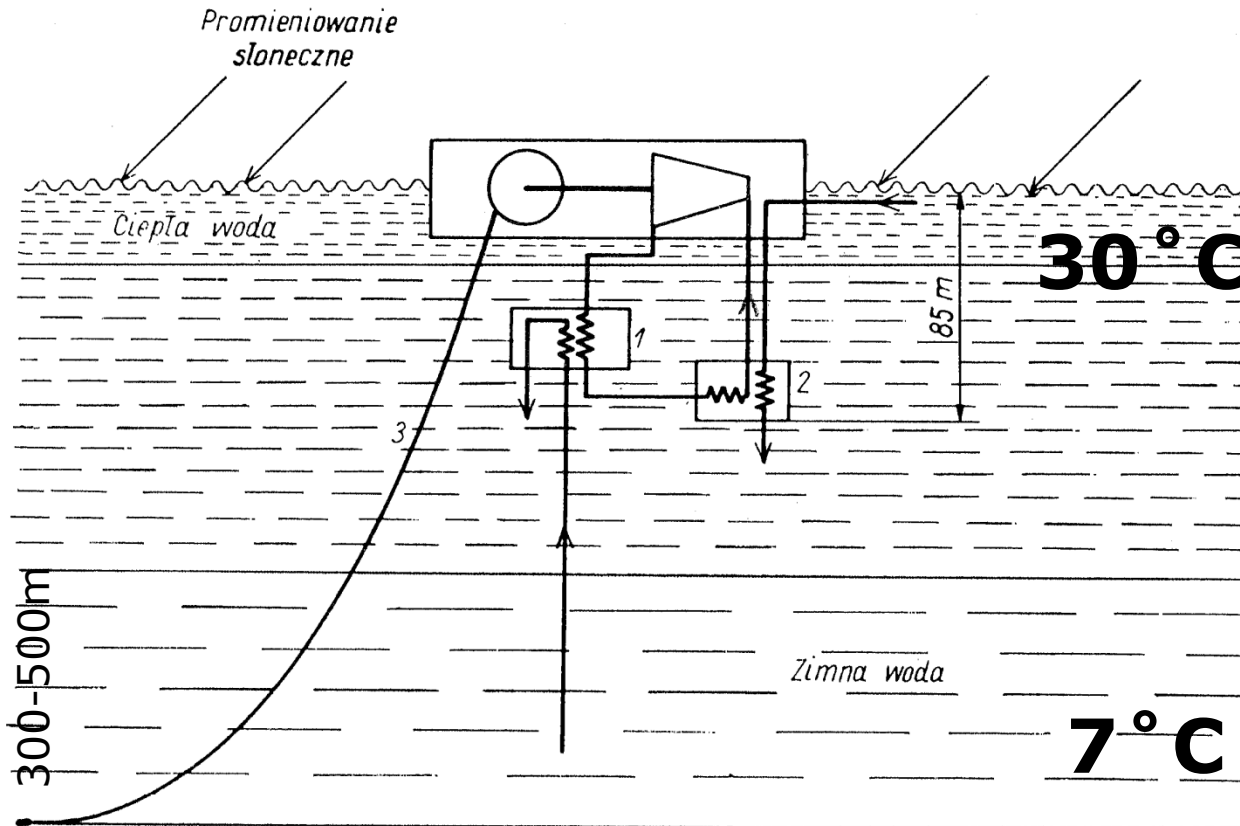
# Największa elektrownia pływowa

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 !!!**

