ENERGETYKA WODNA
– DOJRZAŁA TECHNOLOGIA W ODPOWIEDZI NA WSPÓŁCZESNE WYZWANIA

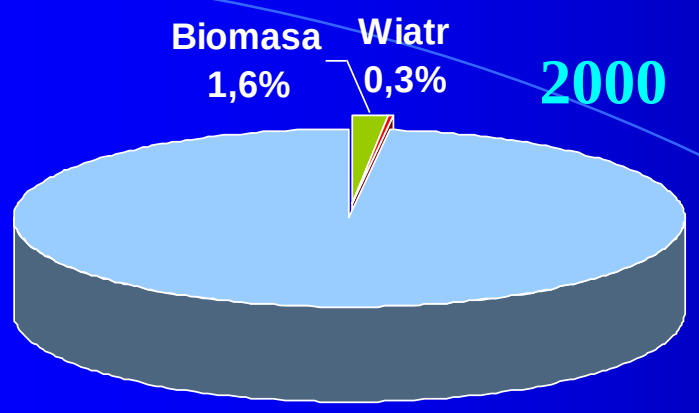
Janusz Steller

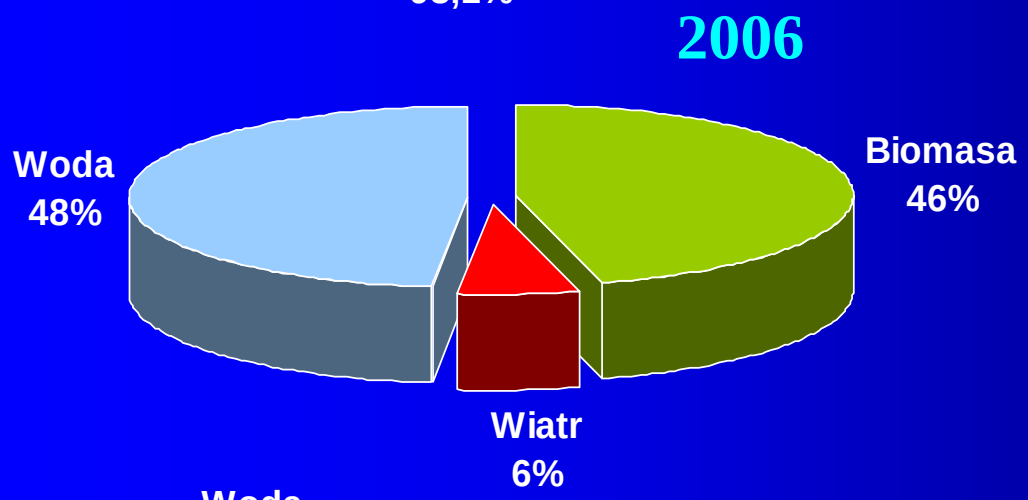
Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
Towarzystwo Elektrowni Wodnych

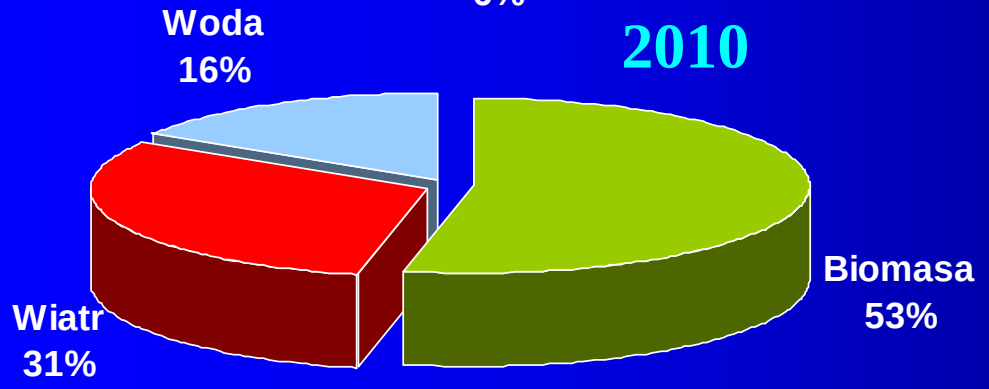
1. Wprowadzenie
   - energetyka wodna a inne rodzaje OZE w Polsce
   - polski potencjał hydroenergetyczny i jego wykorzystanie
2. Rodzaje elektrowni wodnych - aspekty systemowe i hydrotechniczne
3. Wodne maszyny energetyczne
   - maszyny grawitacyjne
   - turbiny wodne
4. Uwagi końcowe

IMP P.A.N. GDAŃSK
Towarzystwo Elektrowni Wodnych
ENERGIA ODNAWIALNA w zastosowaniach
Konferencja Jurata 25-28.11.2007
INFOTECH®

Energetyka wodna a inne rodzaje OZE w Polsce





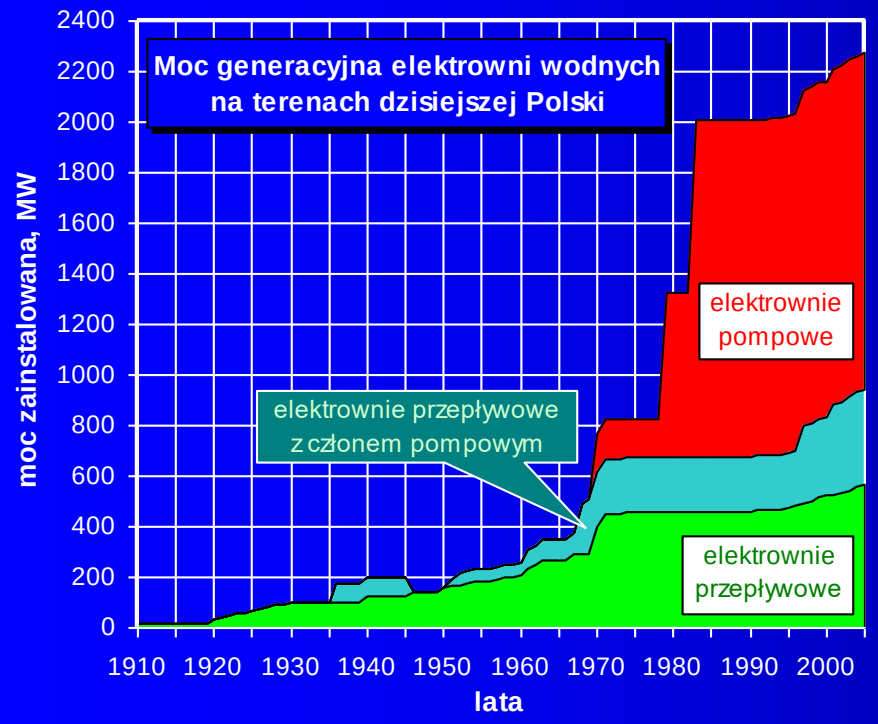


źródło:

Energia elektryczna ze źródeł niekonwencjonalnych i odnawialnych w zakupach zakładów energetycznych, Biuletyn URE 5/2001

Kamieński Z. (M.G.)
Stan obecny i perspektywy rozwoju wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce
ECO-€URO-ENERGIA 2007

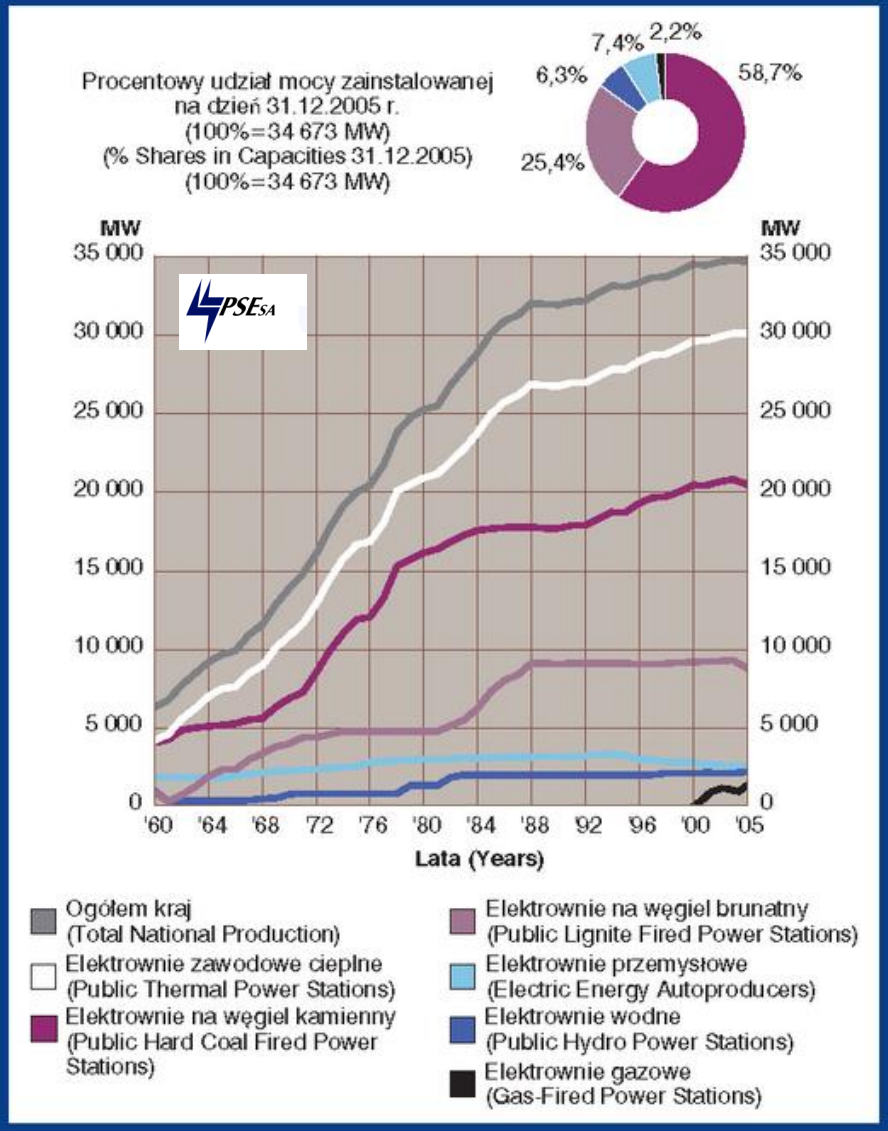
Hydroenergetyka polska w roku 2005



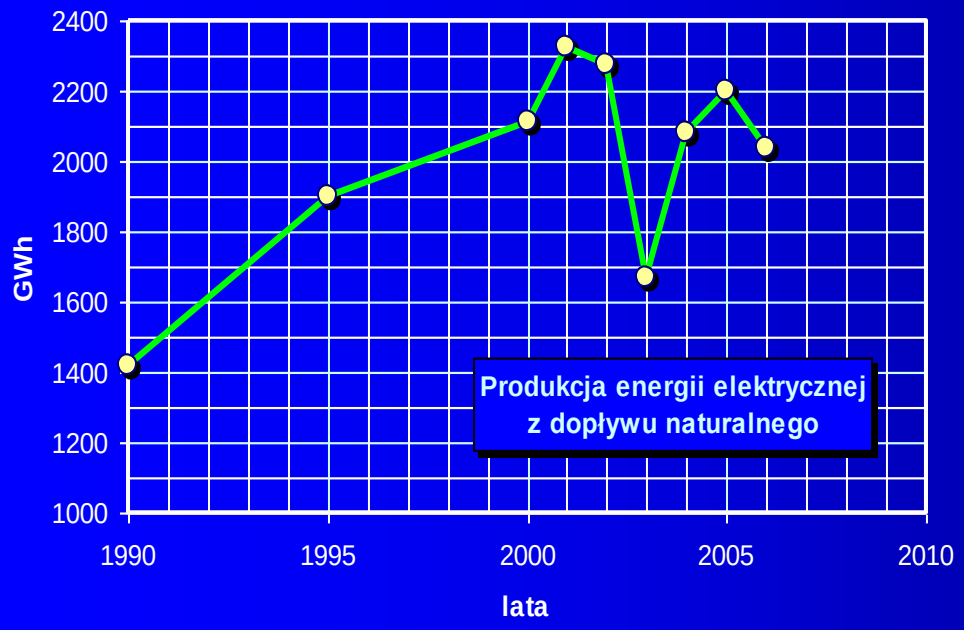
sherpa
small hydro in action

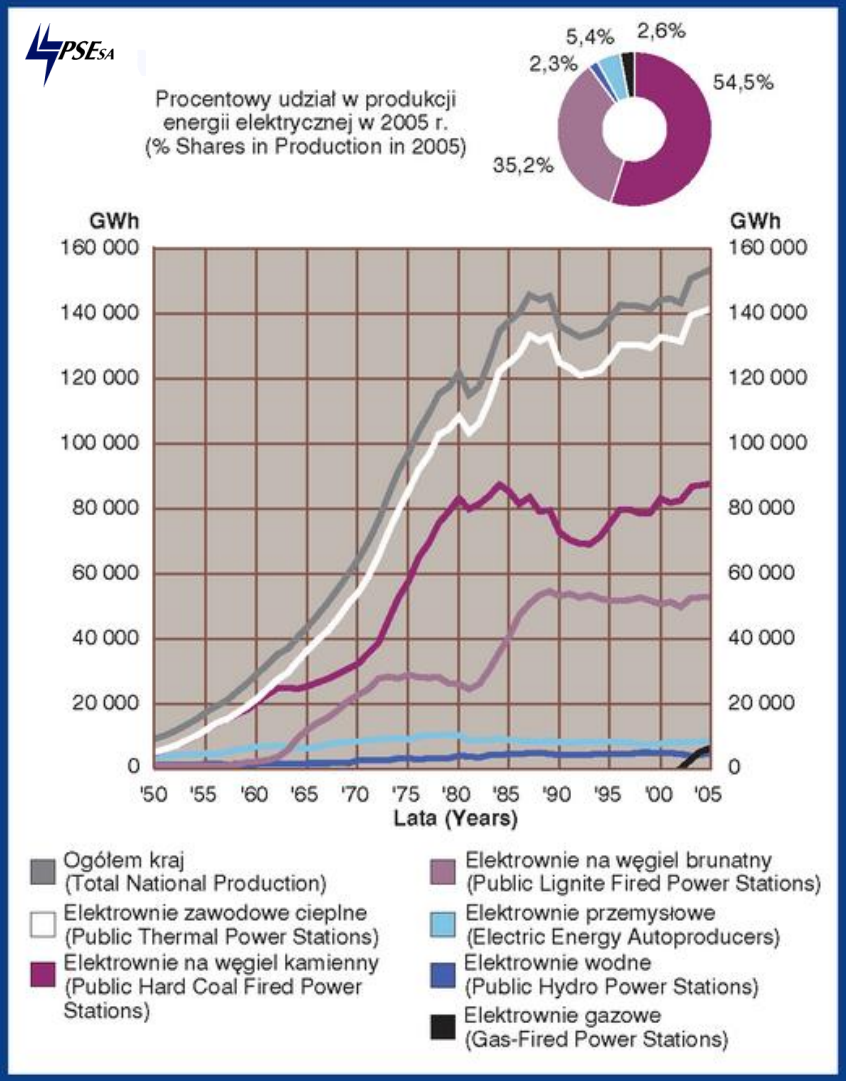
Towarzystwo Elektrowni Wodnych

Moc zainstalowana
Installed Capacity



Hydroenergetyka polska w roku 2005

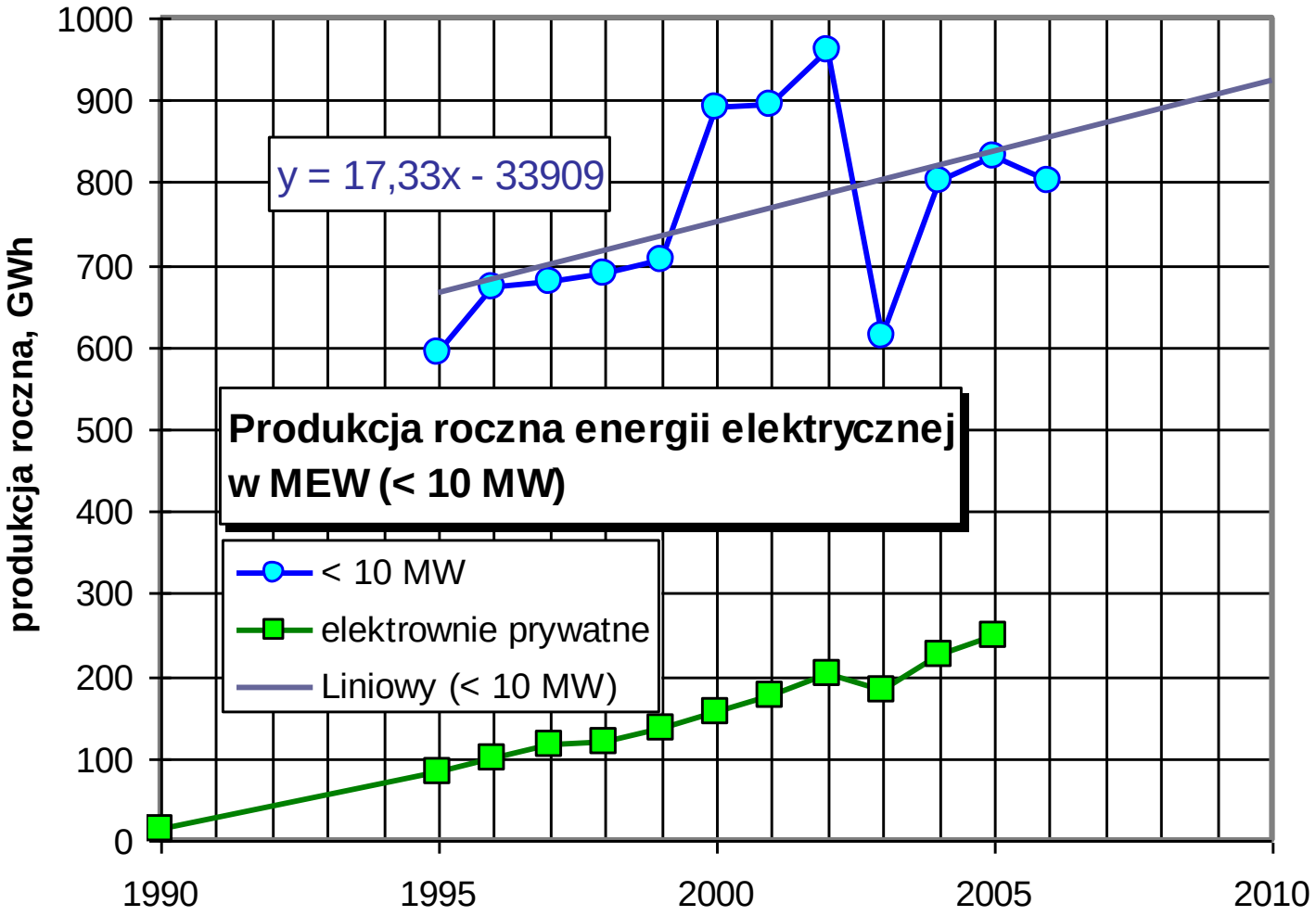




sherpa
small hydro in action

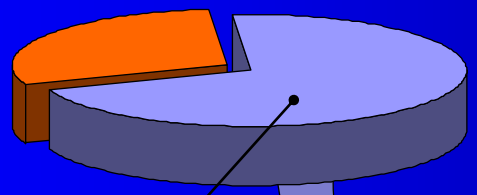
Towarzystwo Elektrowni Wodnych

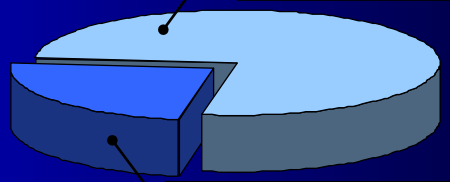
Produkcja roczna MEW



Potencjał hydroenergetyczny Polski

Towarzystwo Elektrowni Wodnych





Wykorzystanie technicznego potencjału hydroenergetycznego w wybranych krajach Unii Europejskiej (25)

L.p.	Kraj	Potencjał, TWh/rok	Produkcja, GWh/rok	Wykorzystanie, %	Udział w bilansie, %
1	Austria	56	39 931	71.3	63.9
2	Finlandia	20	10 776	53.9	14.4
3	Francja	72	61 103	84.9	10.9
4	Grecja	15	2 800	18.7	5.1
5	Hiszpania	70	23 038	32.9	9.4
6	Irlandia	1	912	91.2	3.6
7	Litwa	3	354	11.8	2.0
8	Łotwa	6	2 463	41.1	62.0
9	Niemcy	26	23 124	88.9	4.0
10	**Polska**	**12**	**2 278**	**18.9**	**1.6**
11	Portugalia	25	7 800	31.2	16.9
12	Republika Czeska	4	2 492	62.3	3.3
13	Słowacja	7	5 268	75.3	16.2
14	Słowenia	9	3 403	37.8	23.2
15	Szwecja	130	66 529	51.2	45.6
16	Węgry	5	194	3.9	0.5
17	Włochy	105	39 519	37.6	13.9
18	Zjednoczone Królestwo		4 785		1.2
	Unia Europejska	**> 571**	**297 386**	**52.1**	**9.9**

Krajowe elektrownie wodne o mocy >10 MW

Lp	Elektrownia	Typ	Moc MW	Produkcja GWh/rok	Użytkownik/ Właściciel
1	Żarnowiec	pompowa	680	991	ESP SA
2	Żar Porąbka	pompowa	500	636	ESP SA
3	Włocławek	zbiornikowa/ przepływowa	162	770	Energa
4	Żydowo	pompowa	152	184	Energa
5	Solina	z członem pompowym	200	131	ESP SA
6	Niedzica		92	78	ZEW Niedzica
7	Dychów		79	27	ESP SA
8	Rożnów	zbiornikowa/ przepływowa	56	138	ZEW Rożnów-Czchów
9	Koronowo		25	38	Energa
10	Tresna		21	35	ESP SA
11	Dębe		20	87	ZE Warszawa-Teren
12	Porąbka		13	28	ESP SA
13	Wały Śląskie		10	44	Energia Pro

Wybrane elektrownie uruchomione i planowane do uruchomienia po roku 2000

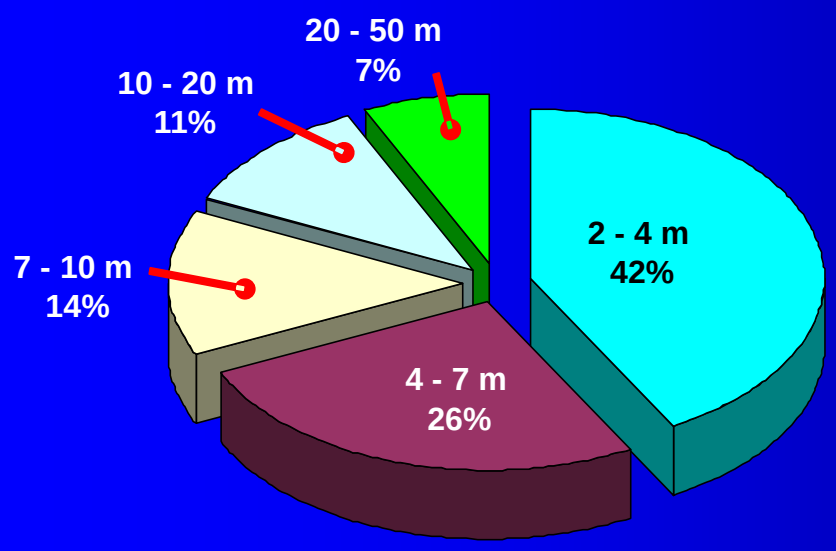
L.p.	Elektrownia	Rzeka	Rok	Moc, MW	Inwestor
1	Kozielno	Nysa Kłodzka	2001	1,85	RZGW Wrocław
2	Więcmierzyce	Nysa Kłodzka	2001	1,89	Hydroenergia Sp. z O.O.
3	Topola	Nysa Kłodzka	2002	1,20	RZGW Wrocław
4	Kościuszko	Wisła	2003	3,08	Fundacja Ks.Siemaszki
5	Januszkowice	Odra	2003	1,50	Elektrownie Górnej Odry
6	Łączany	Wisła	2004	2,50	ZEW Niedzica
7	Krępna	Odra	2004	1,50	Elektrownie Górnej Odry
8	Krapkowice	Odra	2006	1,50	Elektrownie Górnej Odry
9	Smolice	Wisła	2006	2,00	ZEW Niedzica
10	Rakowice	Bóbr	2006	1,92	ESP SA
11	Dobrzeń	Odra	w budowie	1,50	Elektrownie Górnej Odry
12	Malczyce	Odra	w budowie	9,00	RZGW Wrocław
13	Świnna Poręba	Skawa	w budowie	5,00	RZGW Kraków

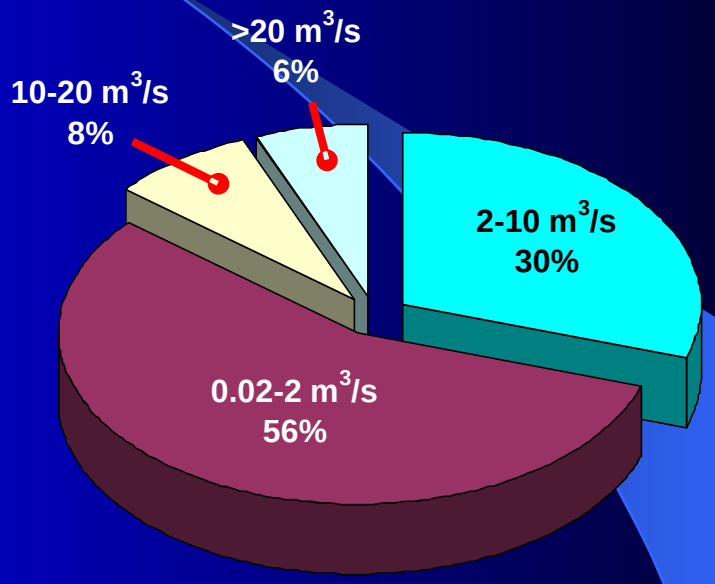
Potencjał hydroenergetyczny Polski, GWh/rok

Potencjał hydroenergetyczny	teoretyczny	techniczny
Wisła z dopływami	16457	9270
Wisła	9305	6177
Dopływy lewobrzeżne	892	513
Dopływy prawobrzeżne	4914	2580
Odra z dopływami	5966	2400
Odra	2802	1273
Dopływy lewobrzeżne	1615	619
Dopływy prawobrzeżne	1540	507
Rzeki Przymorza	582	280
Razem	23005	11950

Produkcja roczna (2005): **2176 GWh**

Rozkład piętrzeń dla obiektów MEW ze względu na zakres spadów niwelacyjnych i przepływów





Na podstawie prac studialnych ENERGOPROJEKTu Warszawa (1979)

Towarzystwo Elektrowni Wodnych

sherpa
small hydro in action

Pozaenergetyczne korzyści wynikające z budowy obiektów hydroenergetycznych

- regulacja (utrzymanie) poziomu wód powierzchniowych i gruntowych
- ochrona przeciwpowodziowa
- odciążenie dróg kołowych od transportu towarów masowych poprzez stworzenie odpowiednich warunków dla rozwoju żeglugi rzecznej;
- zmniejszenie zużycia paliw i odciążenie środowiska wskutek uruchomienia dróg kołowych prowadzących przez zapory;
- nowe miejsca pracy zarówno na czas budowy, jak i eksploatacji obiektów hydroenergetycznych;
- atrakcyjne miejsc aktywnego wypoczynku

Pozaprodukcyjne korzyści dla sektora energetycznego

- udział w regulacji częstotliwości, mocy i napięcia sieci elektroenergetycznej
- wzrost bezpieczeństwa sieci dzięki możliwości dostarczania mocy interwencyjnej, zapoczątkowania odbudowy sieci (black-start) lub pracy na sieć wydzieloną

Subiektywne źródła barier dla rozwoju hydroenergetyki polskiej

- postrzeganiem energetyki wodnej wyłącznie poprzez pryzmat produkcji energii elektrycznej
- ignorowaniem osiągnięć współczesnej inżynierii środowiska, pozwalającej w znacznym stopniu ograniczyć niepożądane skutki oddziaływania budowli piętrzących i sztucznych zbiorników wodnych na otoczenie

Umowne kryteria podziału elektrowni wodnych

Spad

- Elektrownie niskospadowe (<15 m)
- Elektrownie średniospadowe (<50 (70) m)
- Elektrownie wysokospadowe (>50 (70) m)

Moc

- Małe elektrownie wodne (<5 (10) MW)
  (w tym: mikro- i minielektrownie wodne)
- Duże elektrownie wodne (>5 (10) MW)

Retencja wody górnej

- Elektrownie przepływowe (bez retencji)
- Elektrownie zbiornikowe (ze zbiornikiem retencyjnym
  z wyrównaniem sezonowym, tygodniowym, dobowym)

Umowne kryteria podziału elektrowni wodnych

Sposób zasilania zbiornika górnego

- Elektrownie pracujące na dopływie naturalnym
- Elektrownie pompowe
- Elektrownie z członem pompowym

Sposób doprowadzenia wody do maszyn

- Elektrownie przyzaporowe
- Elektrownie derywacyjne (derywacja ciśnieniowa/bezciśnieniowa)

Współpraca z innymi elektrowniami

- Elektrownie samotne
- Elektrownie w kaskadzie zwartej

Funkcja w systemie elektroenergetycznym

- Praca w podstawie obciążenia
- Praca podszczytowa i szczytowa
- Praca regulacyjna i interwencyjna

IMP P.A.N. GDAŃSK

Towarzystwo Elektrowni Wodnych

RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
- Elektrownia przepływowa

Inwestor: **RZGW Wrocław**

Dostawca hydrozespołów: **Mavel**

H = **4.2 – 6.4 m**

P = **2 × 4.5 MW**

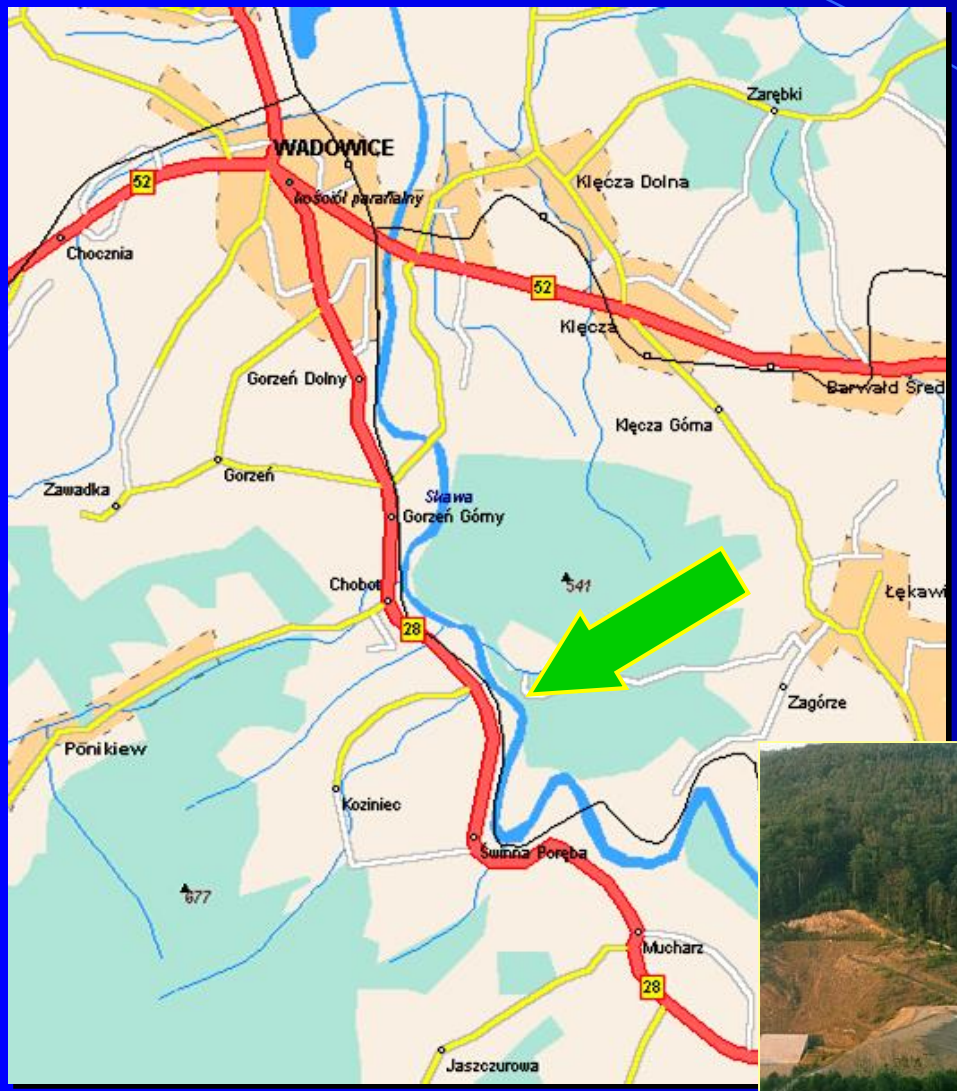
EW Januszkowice na Górnej Odrze
H = 2.3 m, Q_{max} = 30 m^3/s
RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
elektrownia wodna przepływowa w kanale obejściowym stopnia wodnego

MEW Pruszcz II

rzeka Radunia
spad : ok. 5 m
moc zainstalowana : 250 kW

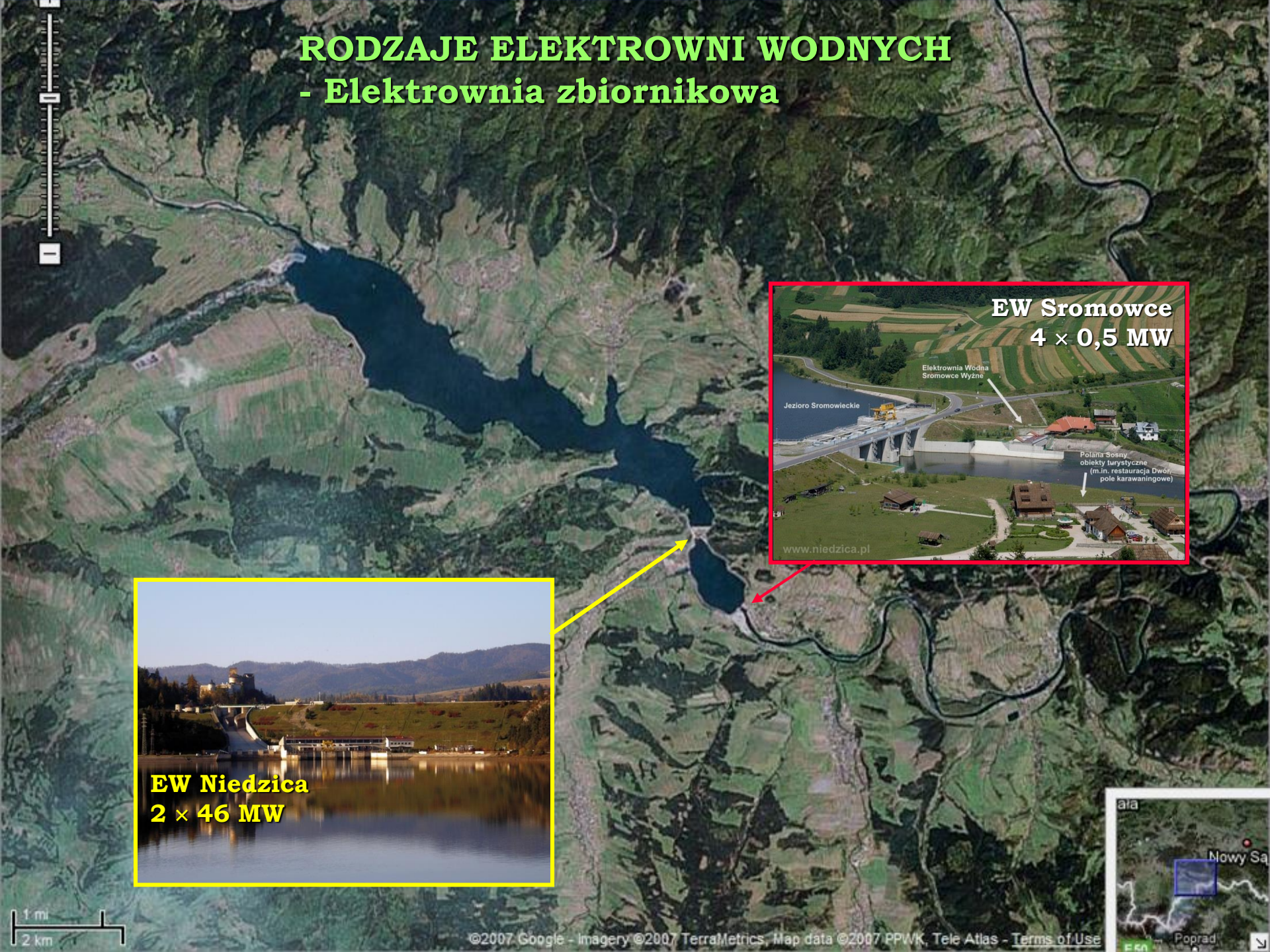
RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
elektrownia wodna przepływowa w świetle jazu

RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
- Elektrownia zbiornikowa

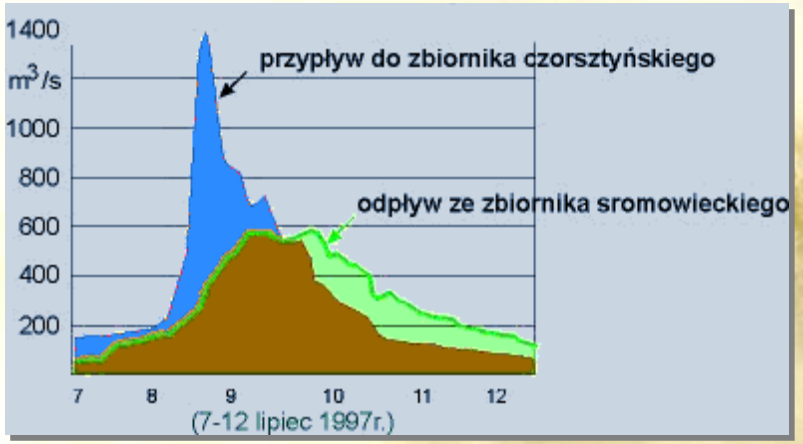


EW Świnna Poręba

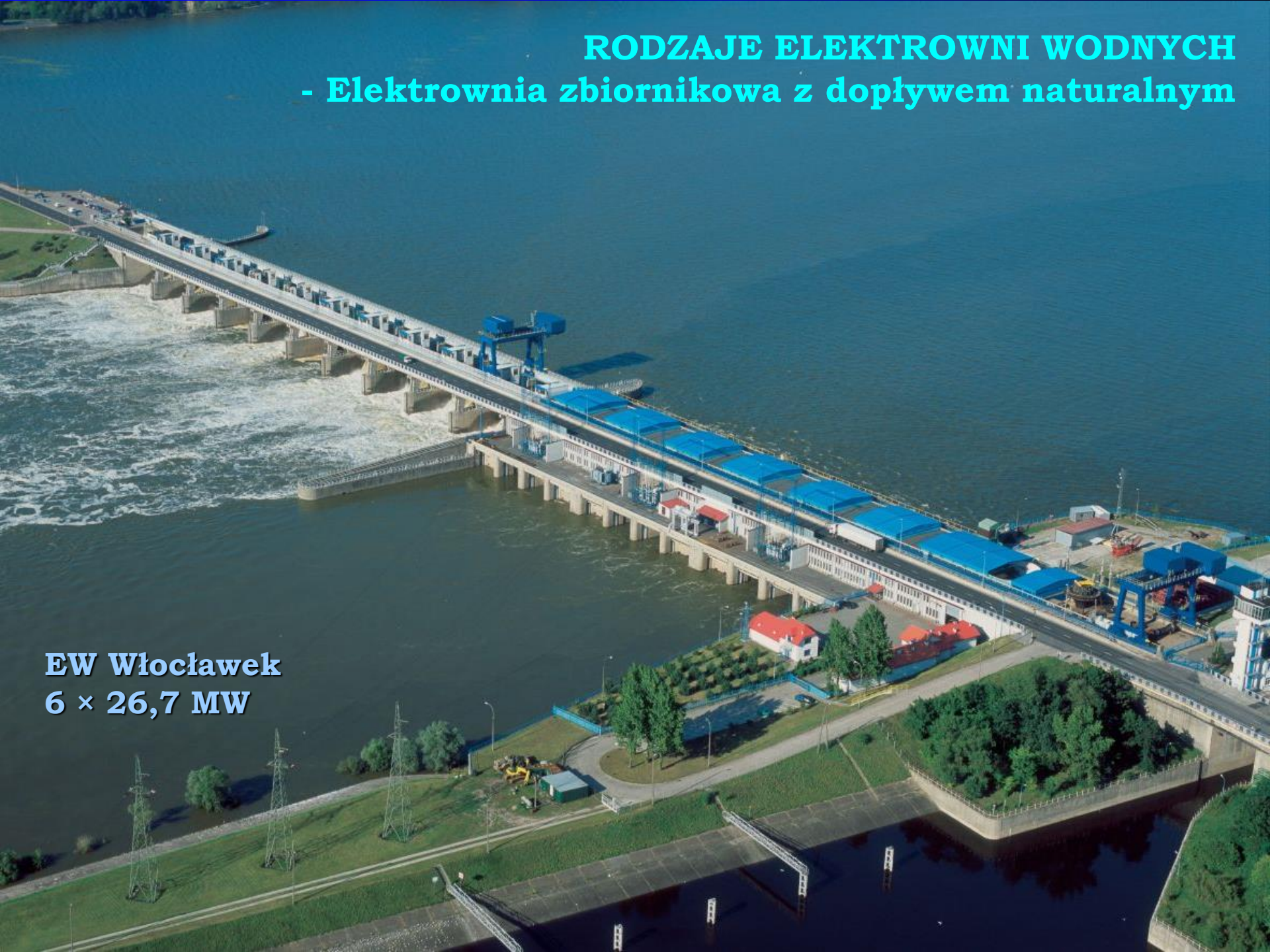
RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
- Elektrownia zbiornikowa



EW Niedzica
- elektrownia zbiornikowa jako obiekt wielozadaniowy



RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
- Elektrownia zbiornikowa z dopływem naturalnym

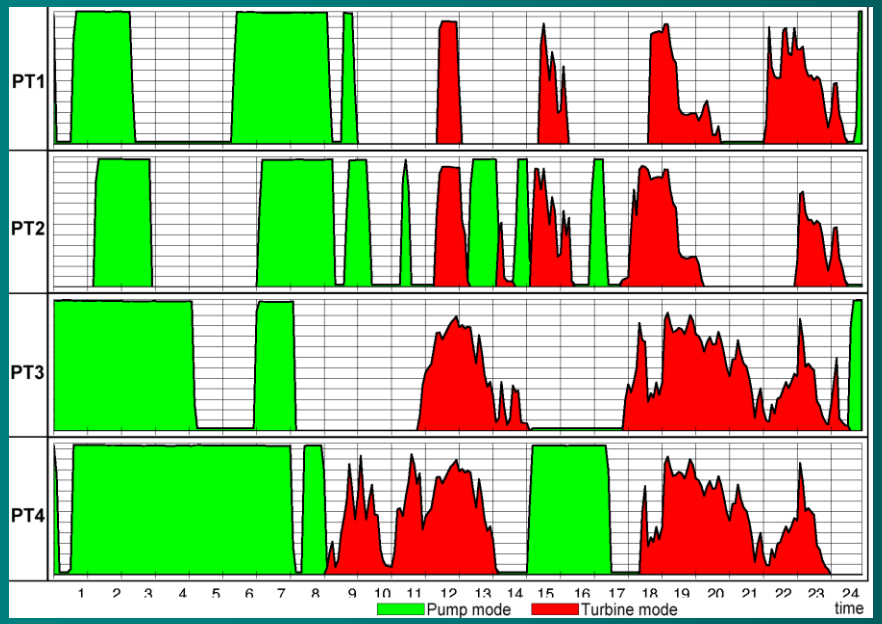


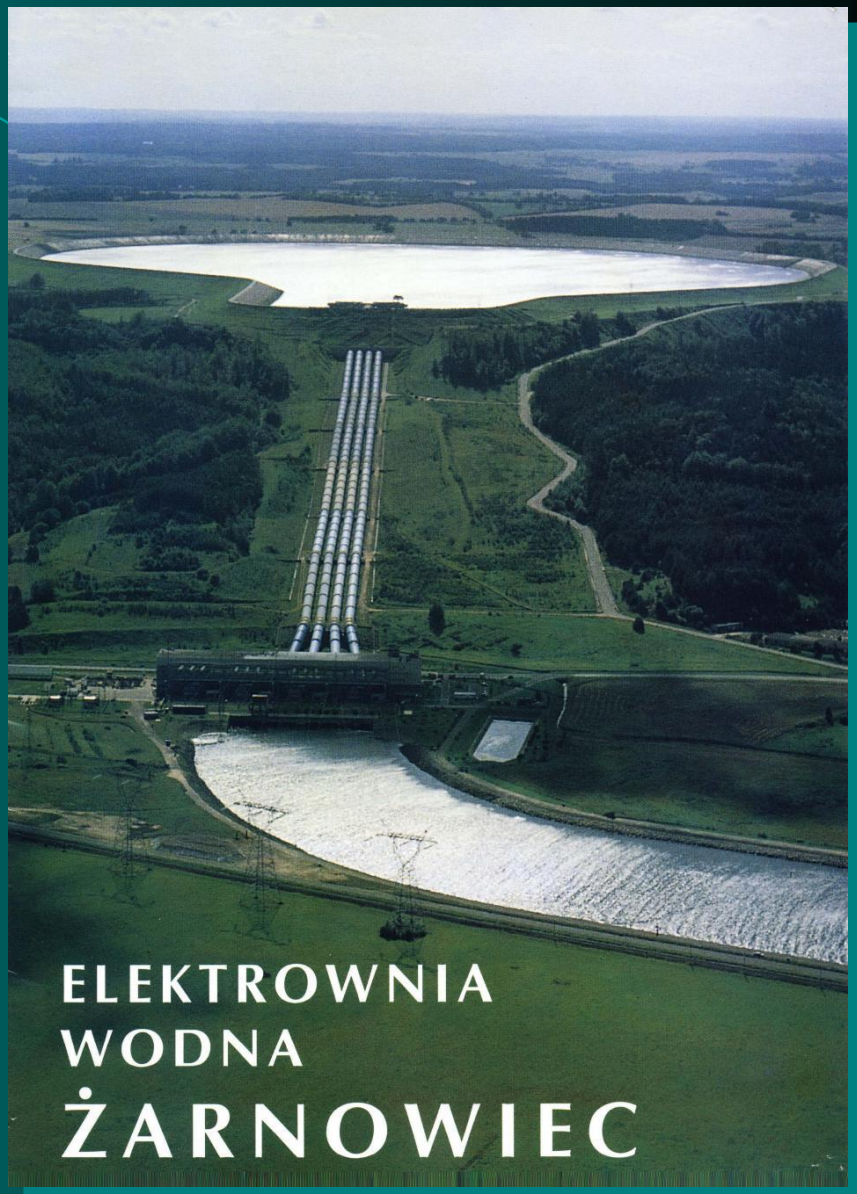
EW Włocławek
6 × 26,7 MW

RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
Elektrownia szczytowo-pompowa

Przykład obciążenia dobowego pewnej elektrowni szczytowo-pompowej

Źródło: H.Reinhardt,A.Ruprecht:
Improvement of older hydro power plants
for the requirement of the new market. HYDROFORUM'2005



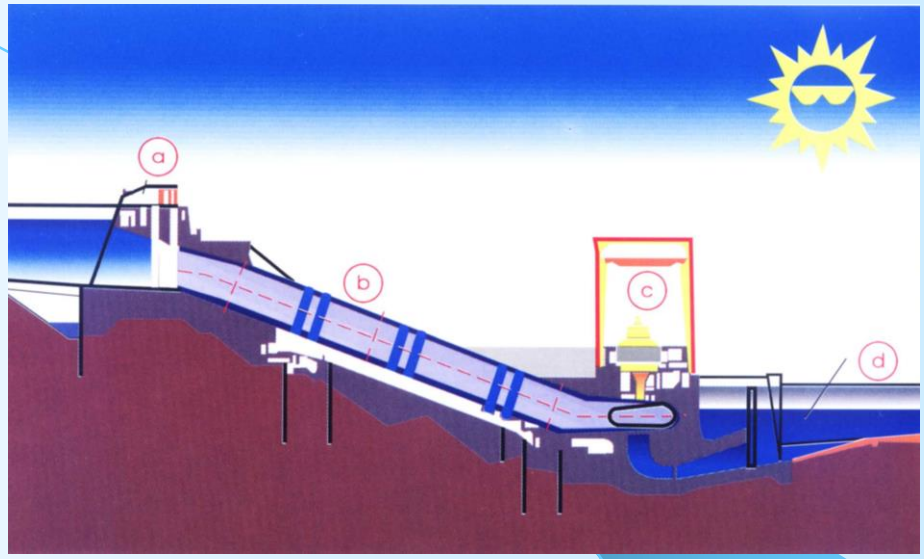


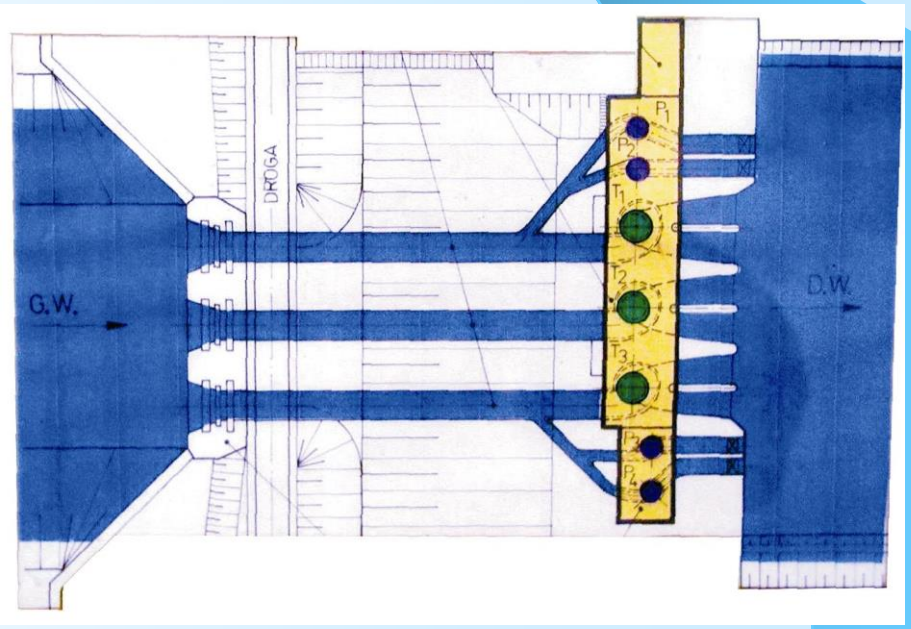
RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
elektrownia z członem pompowym

EW Dychów

ruch turbinowy
3 × 30 MW

ruch pompowy
4 × 5 MW

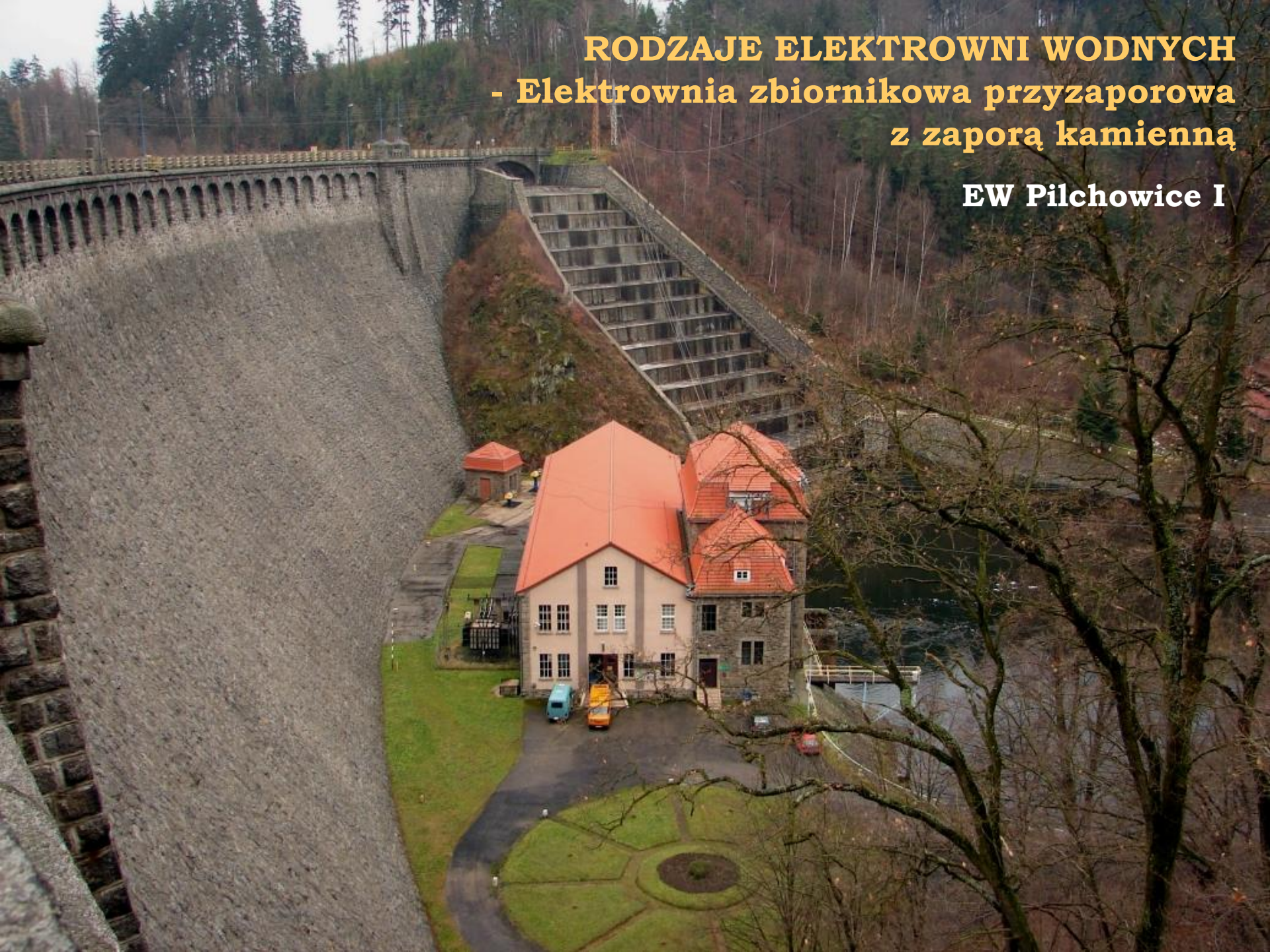




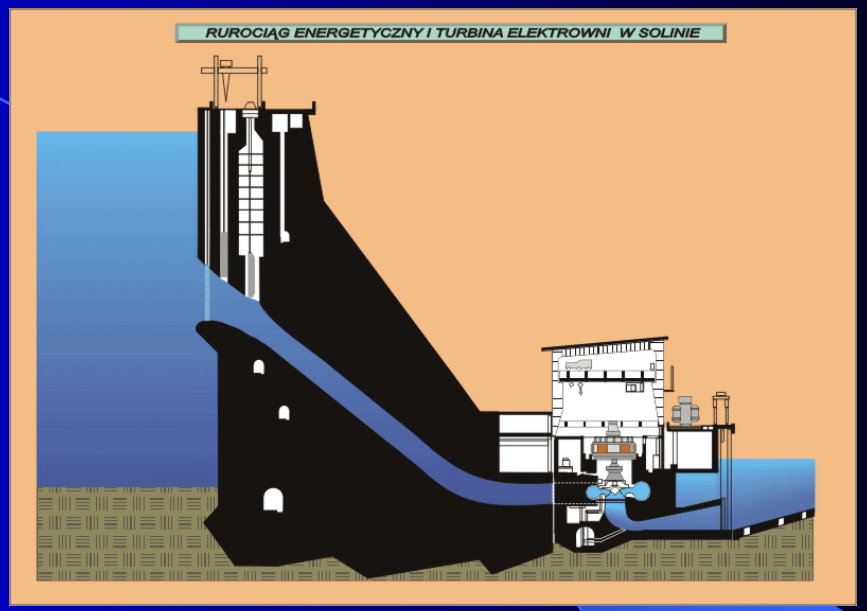
Elektrownie Szczytowo-Pompowe S.A.

RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
- Elektrownia zbiornikowa przyzaporowa z zaporą kamienną

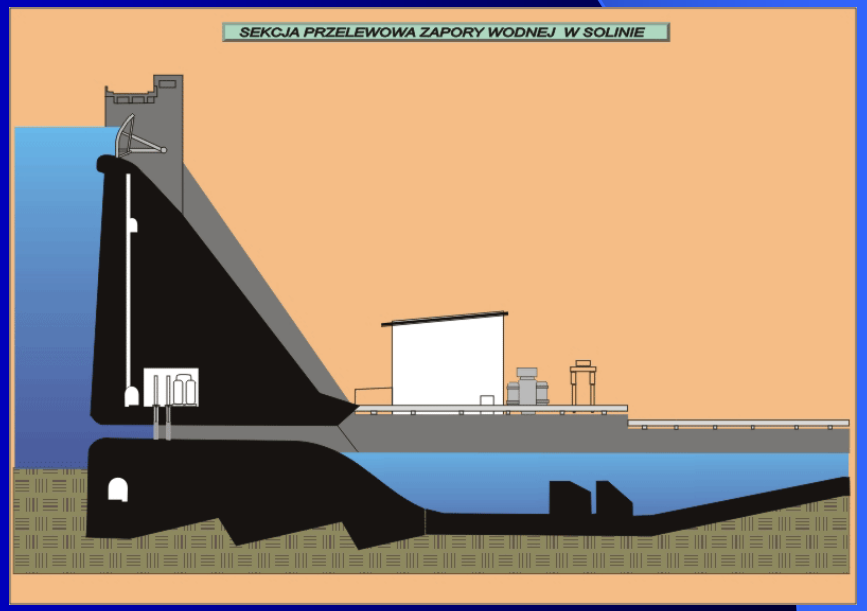
EW Pilchowice I



RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
- Elektrownia przyzaporowa z zaporą betonową

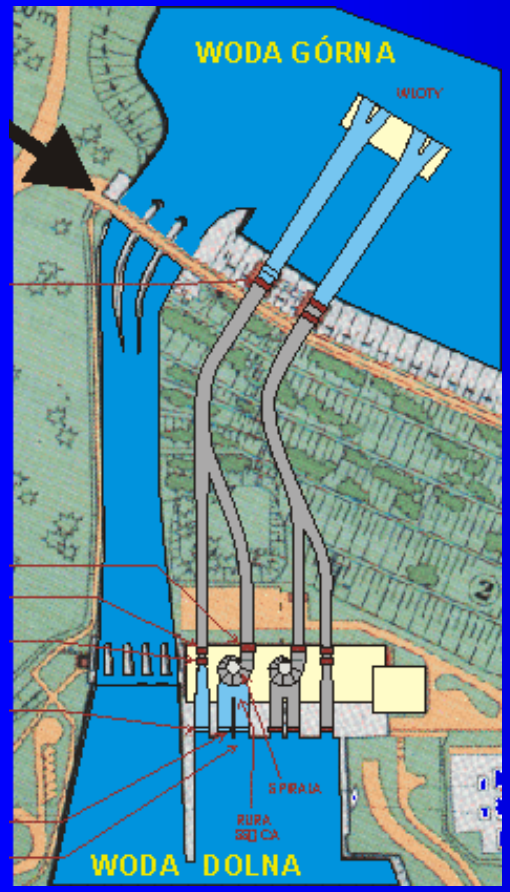


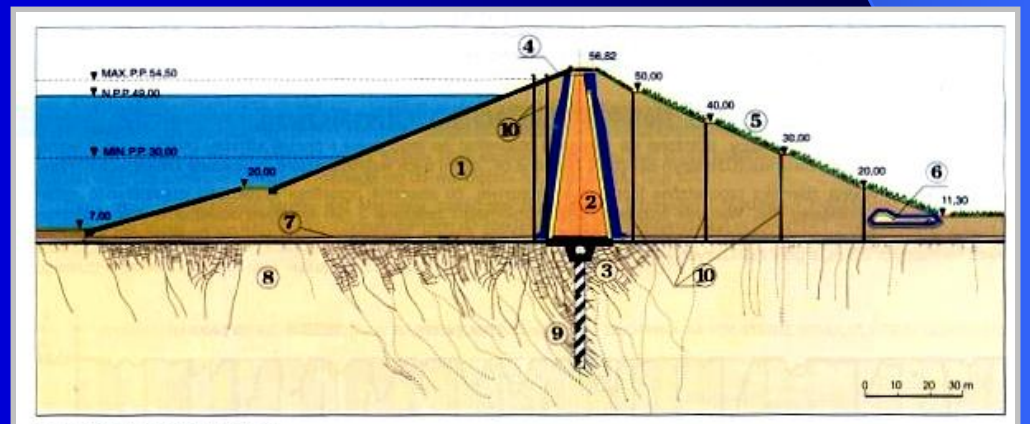
EW Solina
2 x 70 MW + 2 x 30 MW



RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
- Elektrownia przyzaporowa z zaporą ziemną

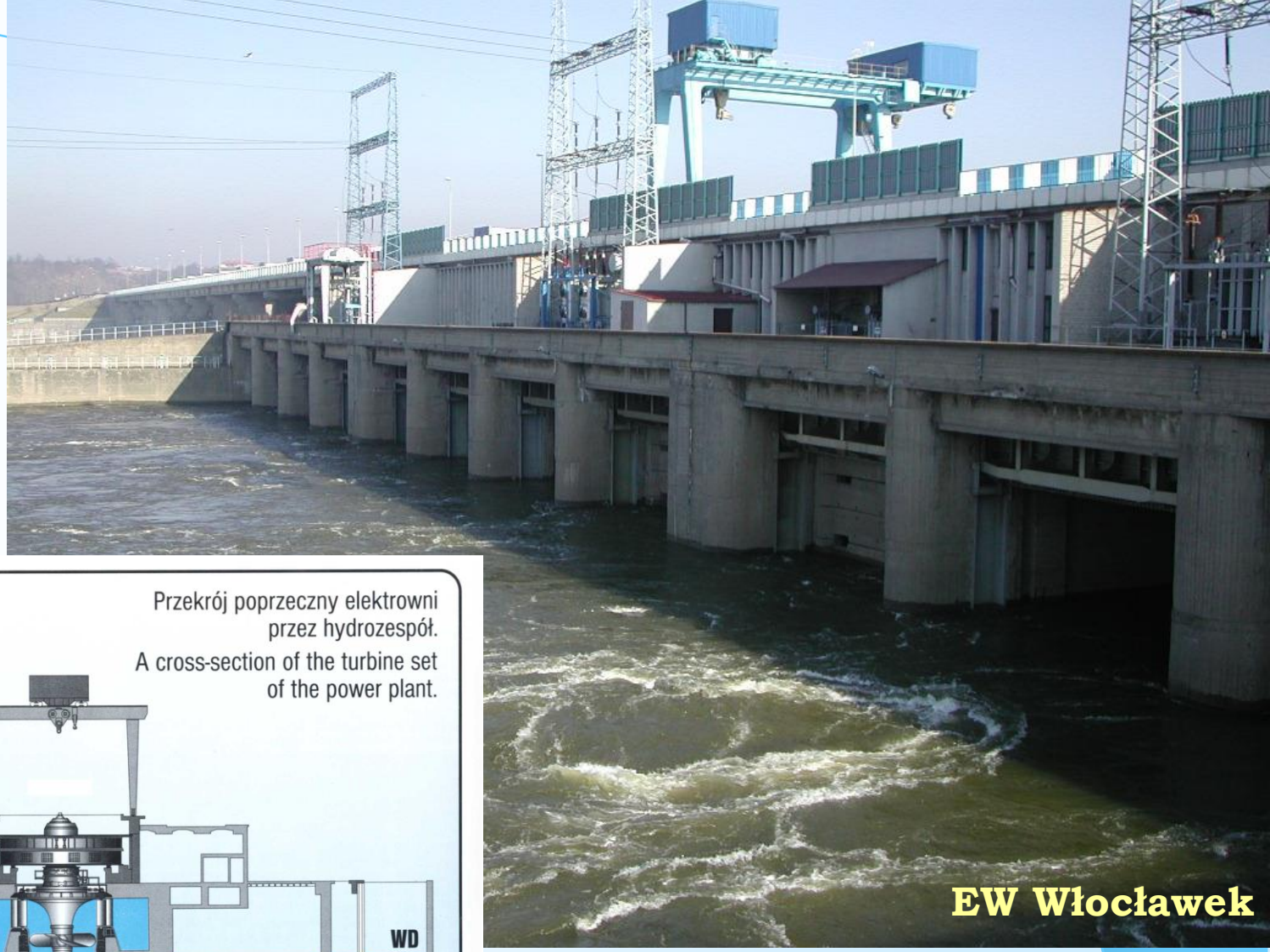
EW Niedzica

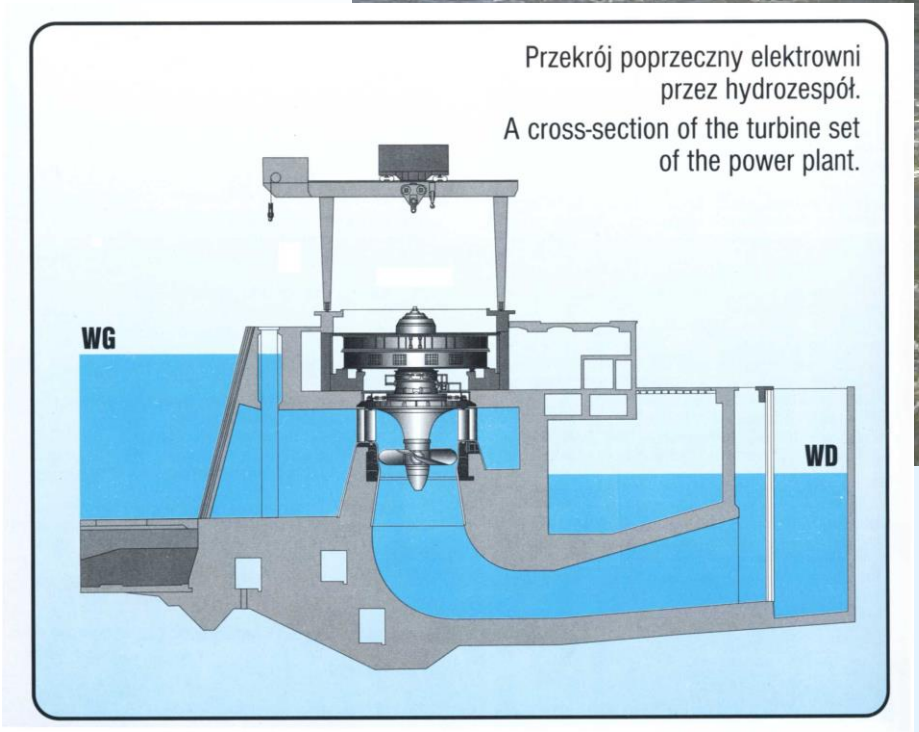




PRZEKRÓJ POPRZECZNY ZAPORY

1. Korpus zapory (grunt gruboziarnisty) 2. Rdzeń uszczelniający zapory (glina z warstwą piasku i tłucznia) 3. Galeria kontrolno-zastrzykowa 4. Ubezpieczenie zapory (płyty betonowe) 5. Zieleń na skarpie 6. Drenaż 7. Grunt rodzimy 8. Podłoże skalne 9. Przesłona cementacyjna uszczelniająca podłoże 10. Aparatura kontrolno-pomiarowa

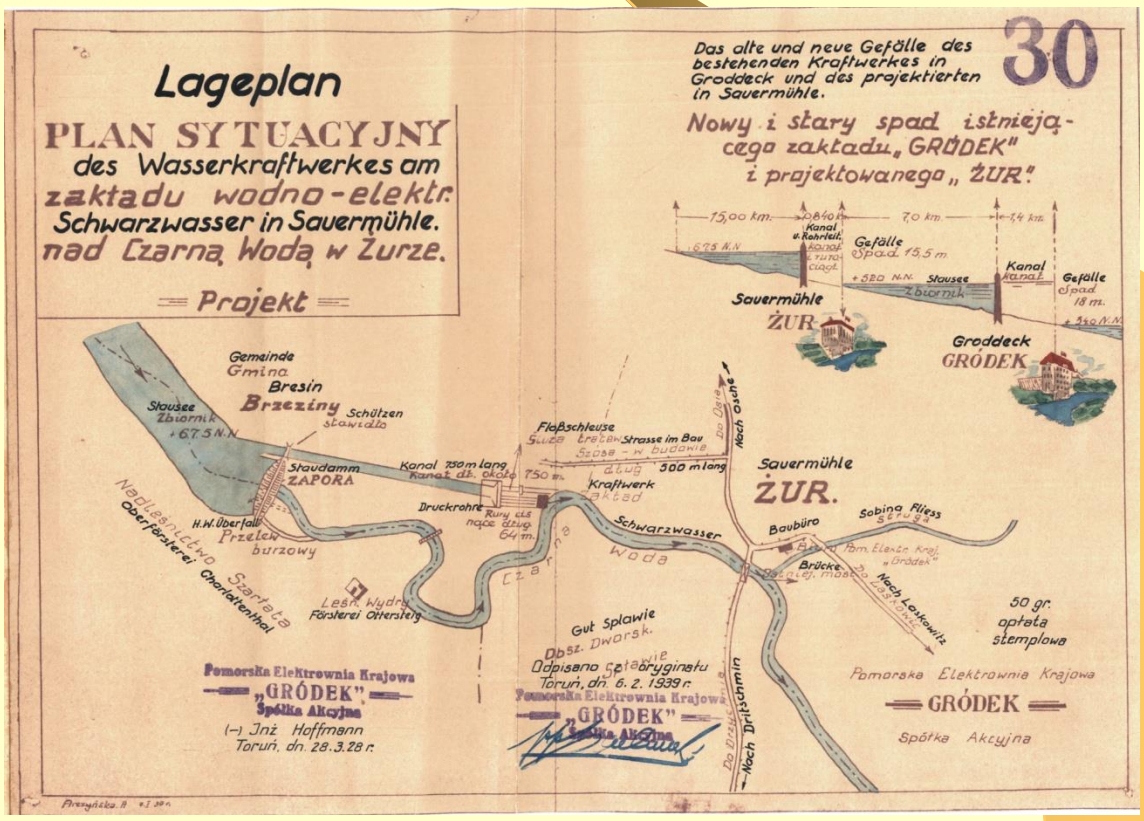




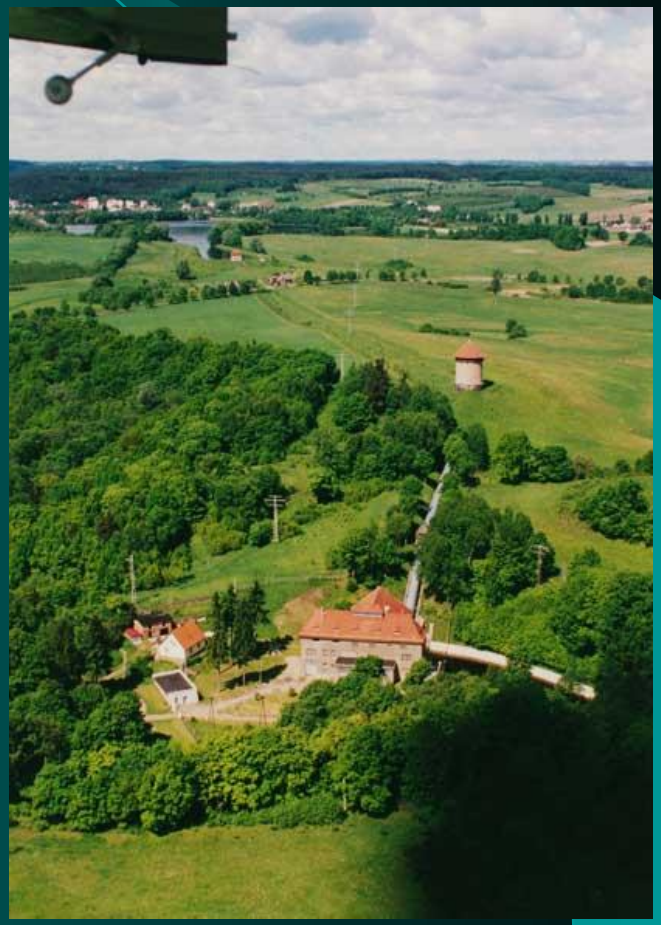
RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
Elektrownia przyzaporowa

RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
Elektrownie derywacyjne

EW Żur
2 × 4,0 MW

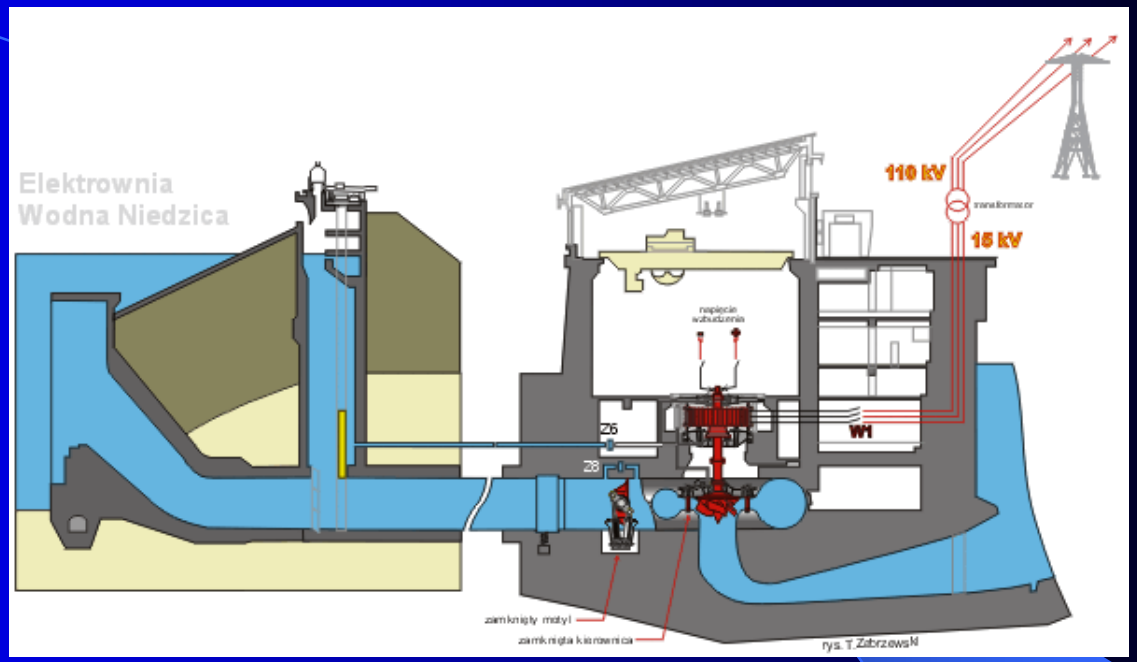


RODZAJE ELEKTROWNI WODNYCH
Elektrownie derywacyjne



EW Bielkowo
3 × 2,4 MW

Ujęcia wody
i urządzenia odcinające


Elektrownia
Wodna Niedzica
110 kV
15 kV
transformator
napięcie wzbudzenia
Z6
Z8
W1
zamknięty motyl
zamknięta kierownica
rys. T. Zabrzewski

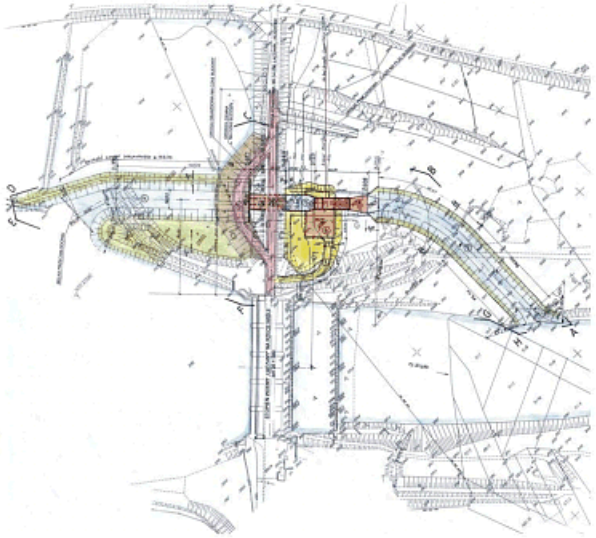
EW Niedzica

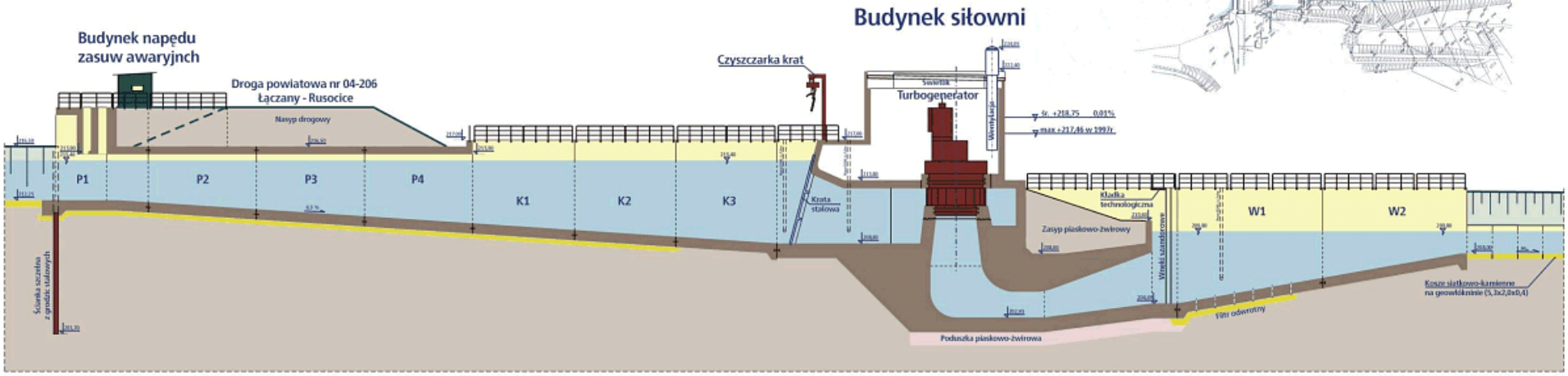
Ujęcia wody i urządzenia odcinające

Mała Elektrownia Wodna przy stopniu wodnym Łączany na rzece Wiśle

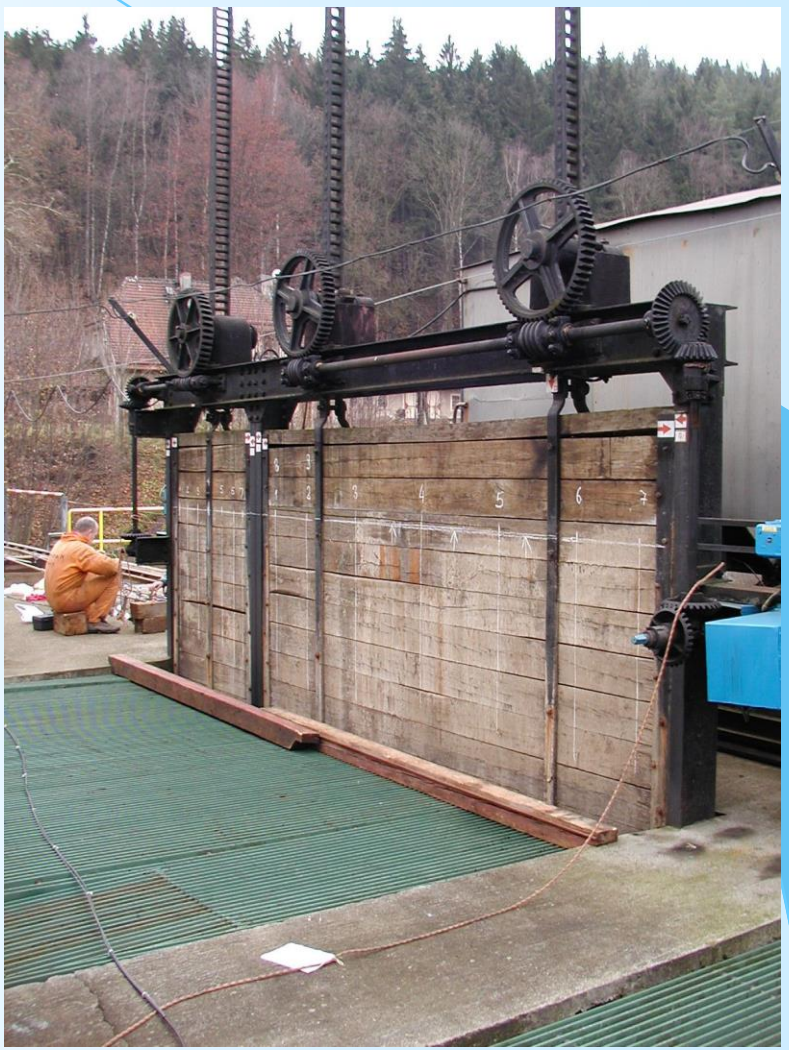
Generalny wykonawca:

SKANSKA | Skanska Oddział Hydrotrest

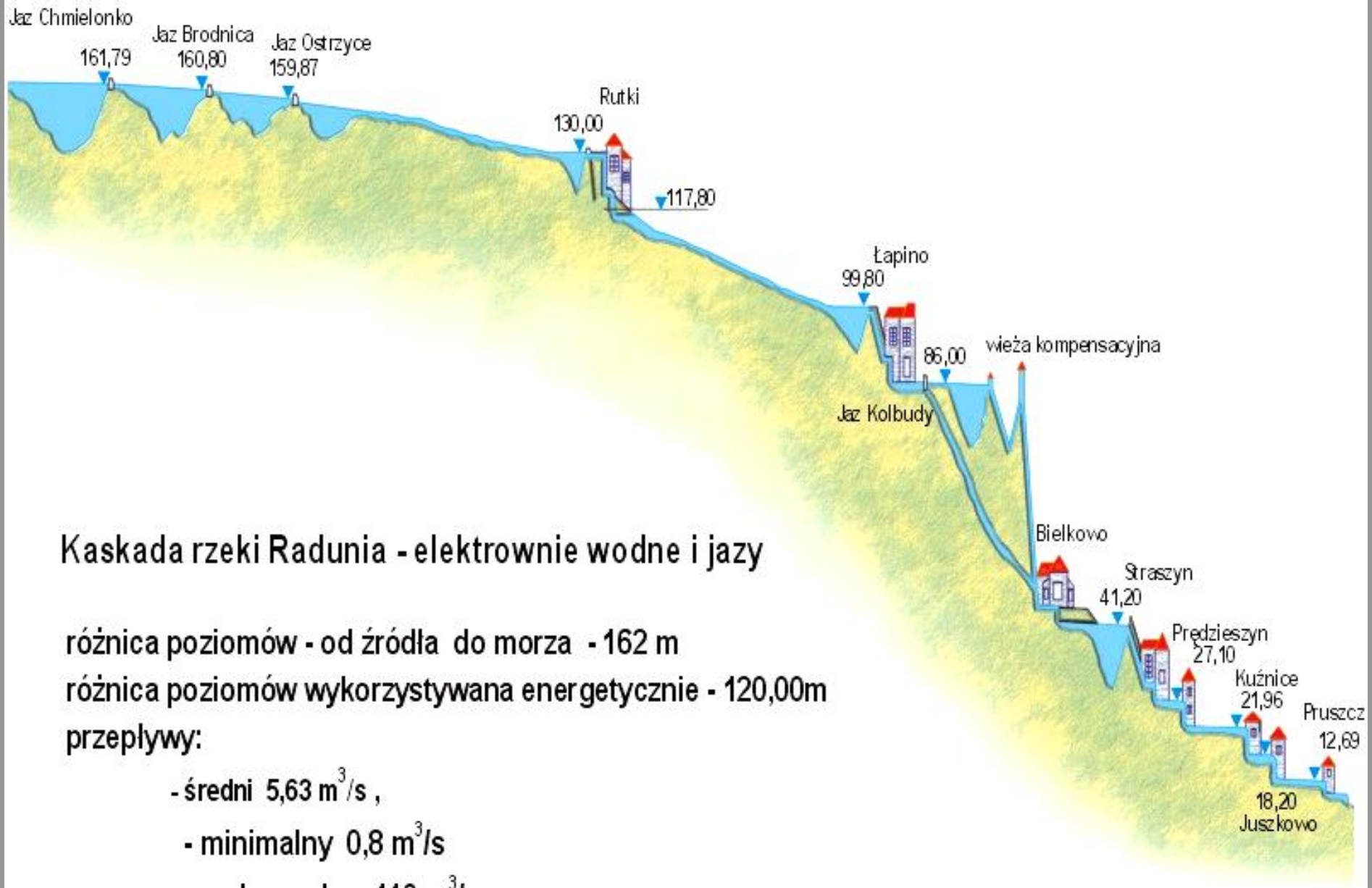




Ujęcia wody i upusty
EW Pilchowice II



Kaskady elektrowni wodnych



Kaskada rzeki Radunia - elektrownie wodne i jazy

różnica poziomów - od źródła do morza - 162 m

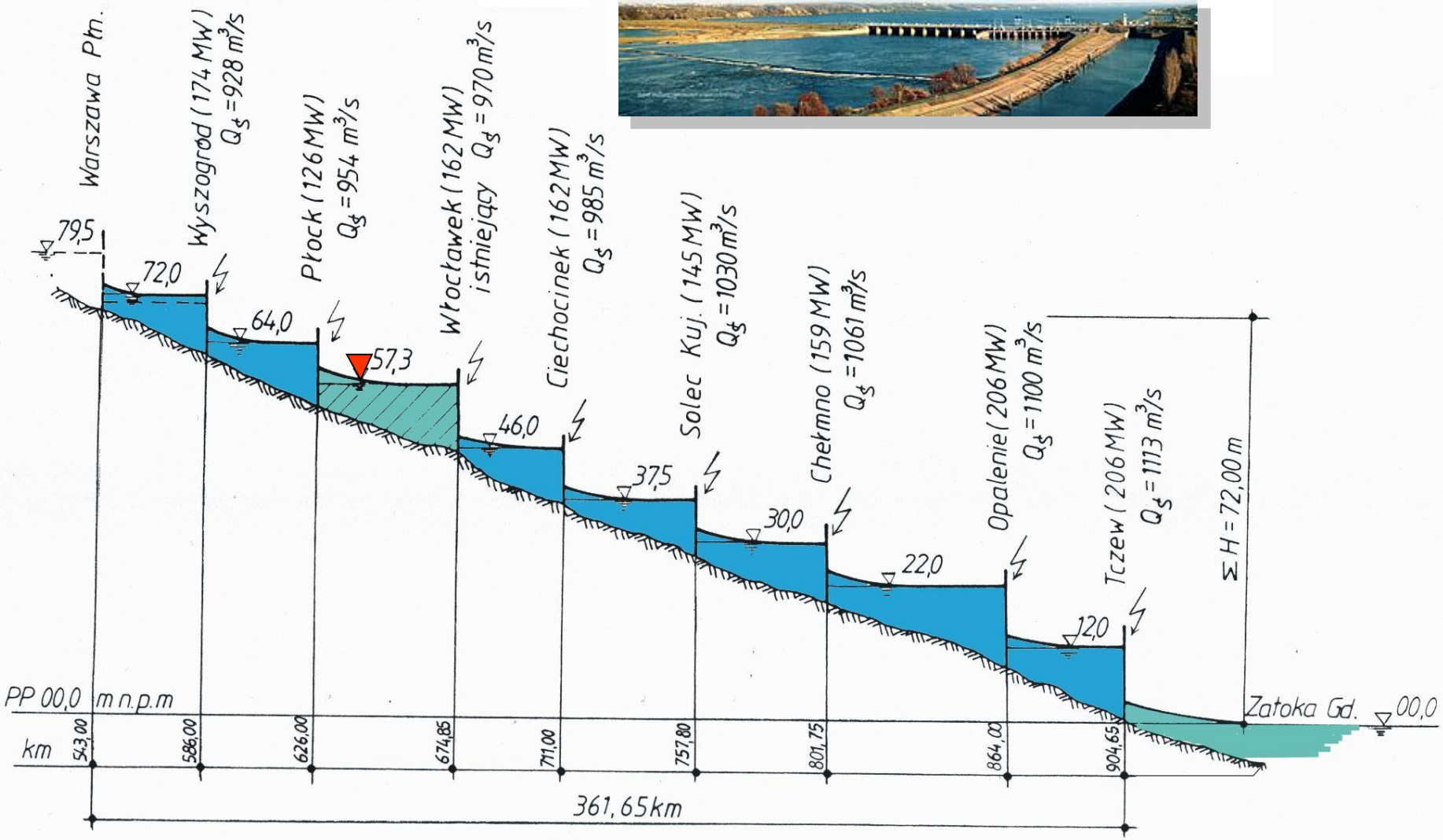
różnica poziomów wykorzystywana energetycznie - 120,00m

przepływy:

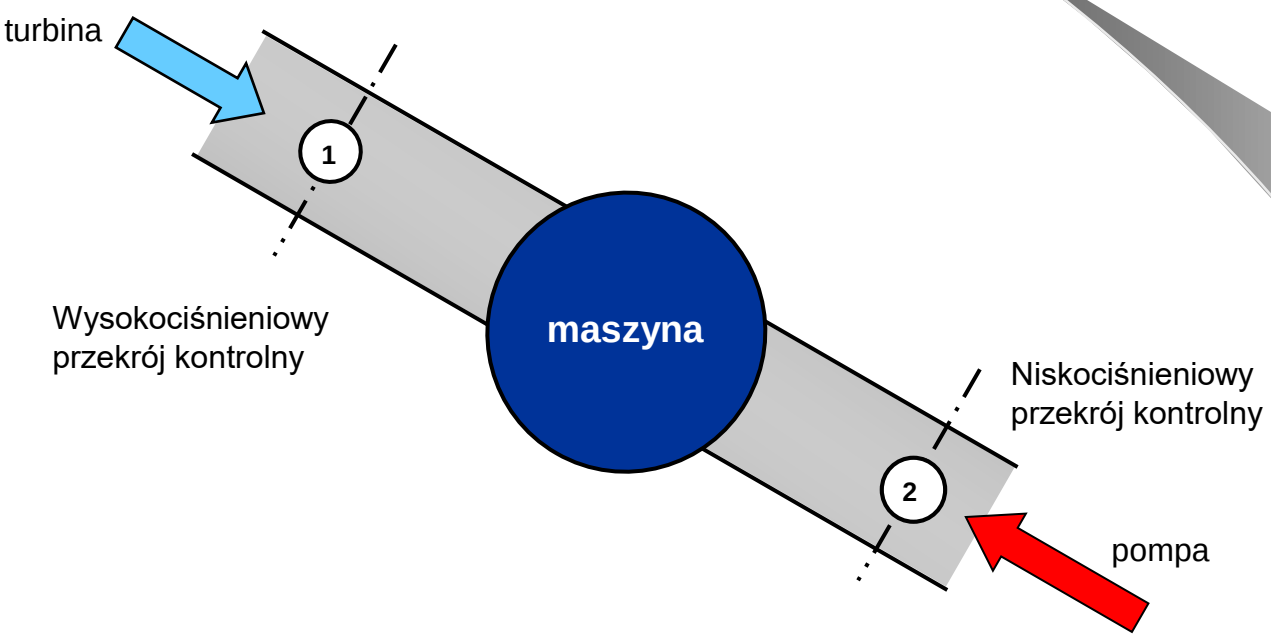
- średni 5,63 m^3/s ,
- minimalny 0,8 m^3/s
- maksymalny 110 m^3/s

Kaskady elektrowni wodnych

KASKADA DOLNEJ WISŁY

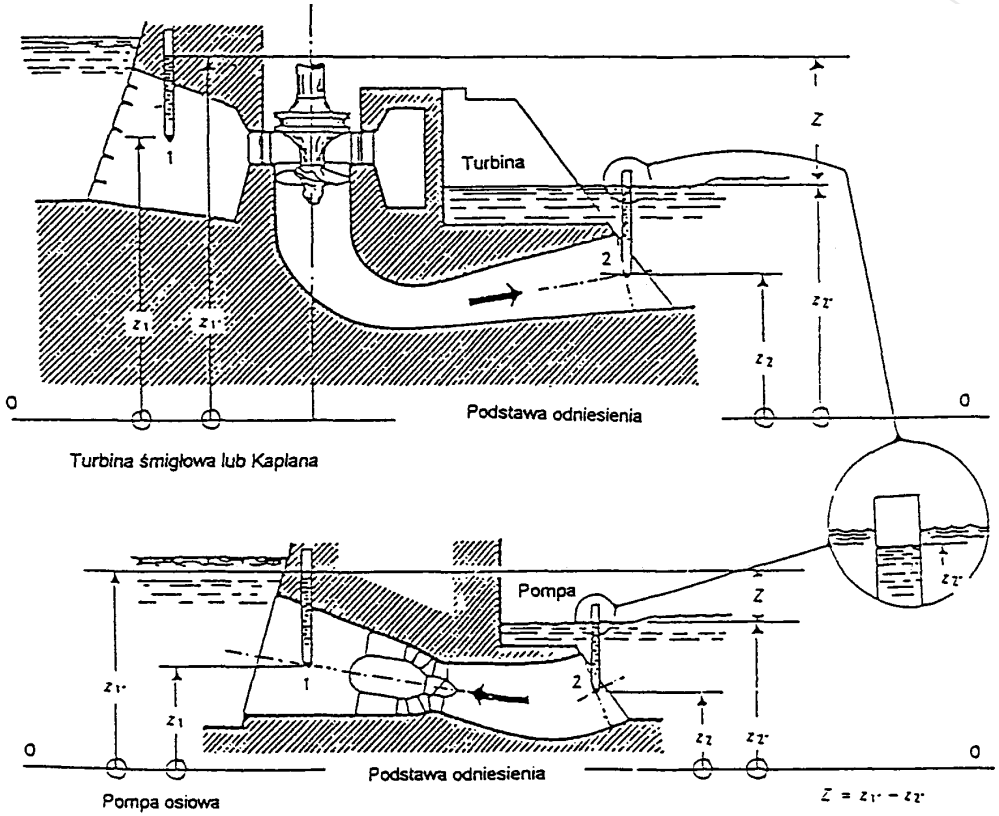


WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE
spad i jednostkowa energia hydrauliczna wg normy PN EN 60041



$$E = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + \left(z_1 - z_2\right) g$$

WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE
spad i jednostkowa energia hydrauliczna dla maszyn niskospadowych

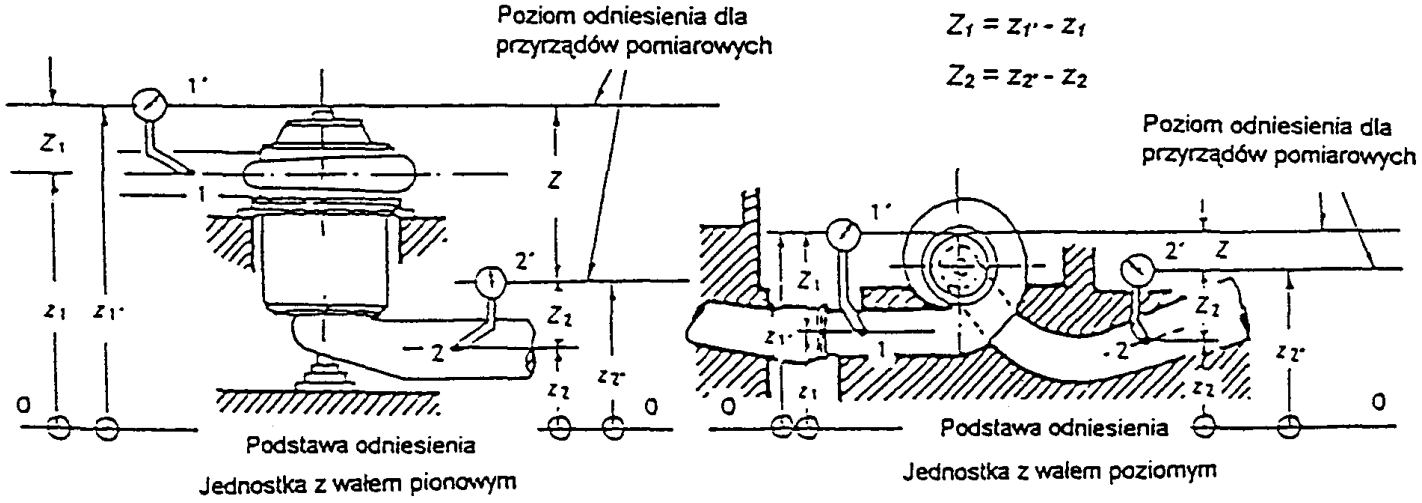


$$E=\overline{g}\cdot(z_{1'}-z_{2'})\cdot\left(1-\frac{\rho_a}{\overline{\rho}}\right)+\frac{(v_1^2-v_2^2)}{2}$$

PN EN 60041

WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE
spad i jednostkowa energia hydrauliczna dla maszyn średniospadowych

$$E=\frac{(p_{1'}-p_{2'})}{\overline{\rho}}+\overline{g}\cdot(z_{1'}-z_{2'})+\frac{(v_1^2-v_2^2)}{2}$$



PN EN 60041

WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE

- **Maszyny grawitacyjne**

  zasada działania:
  zamiana energii potencjalnej wody na pracę użyteczną

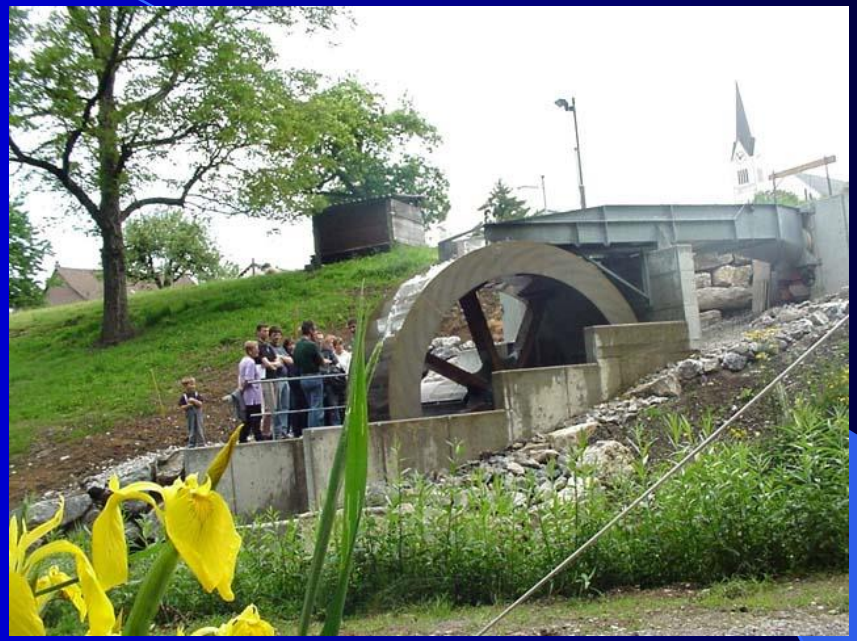
  przykłady:
  koła wodne nasiębierne i śródsiębierne, maszyny ślimakowe

- **Wirnikowe maszyny hydrauliczne**

  zasada działania:
  wymiana momentu pędu napływającej cieczy z wirnikiem maszyny

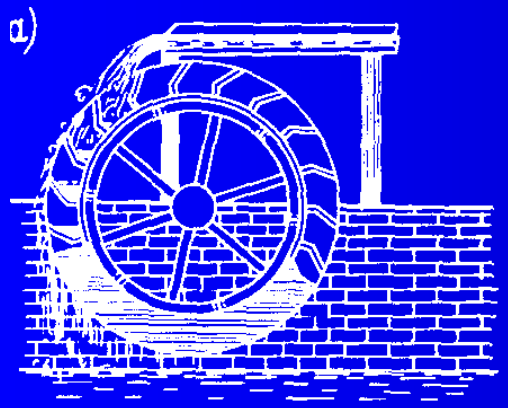
  przykłady:
  turbiny akcyjne i reakcyjne, pompy i pompoturbiny

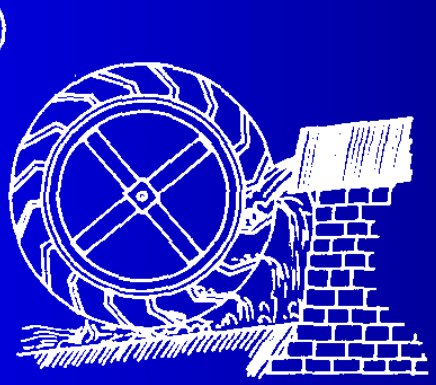
WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE

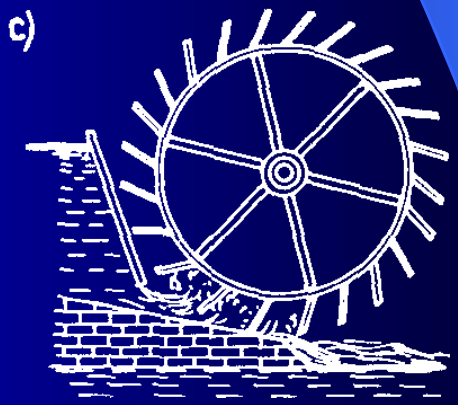


Koła wodne

Bega
Wasserkraftanlagen Gmbh



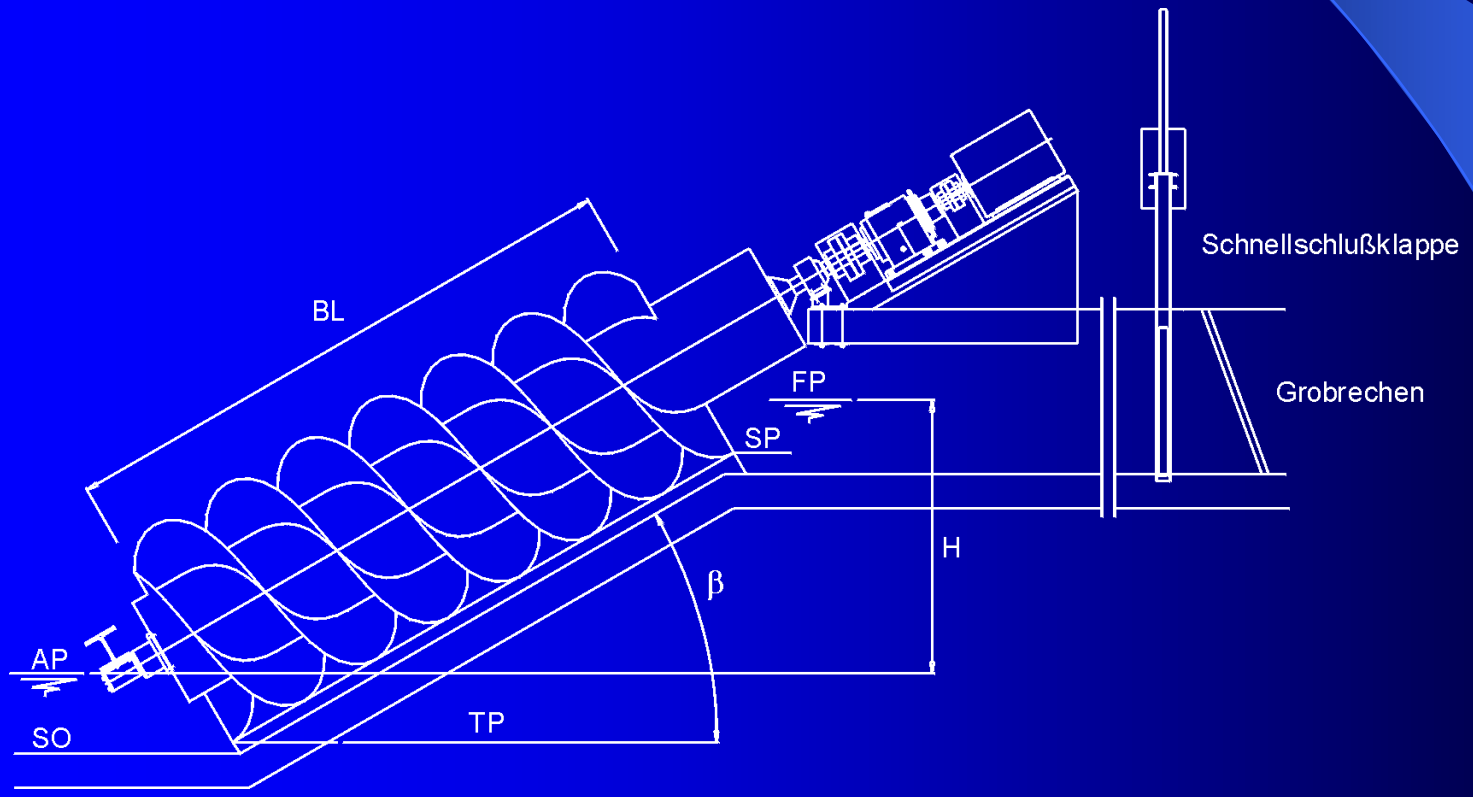




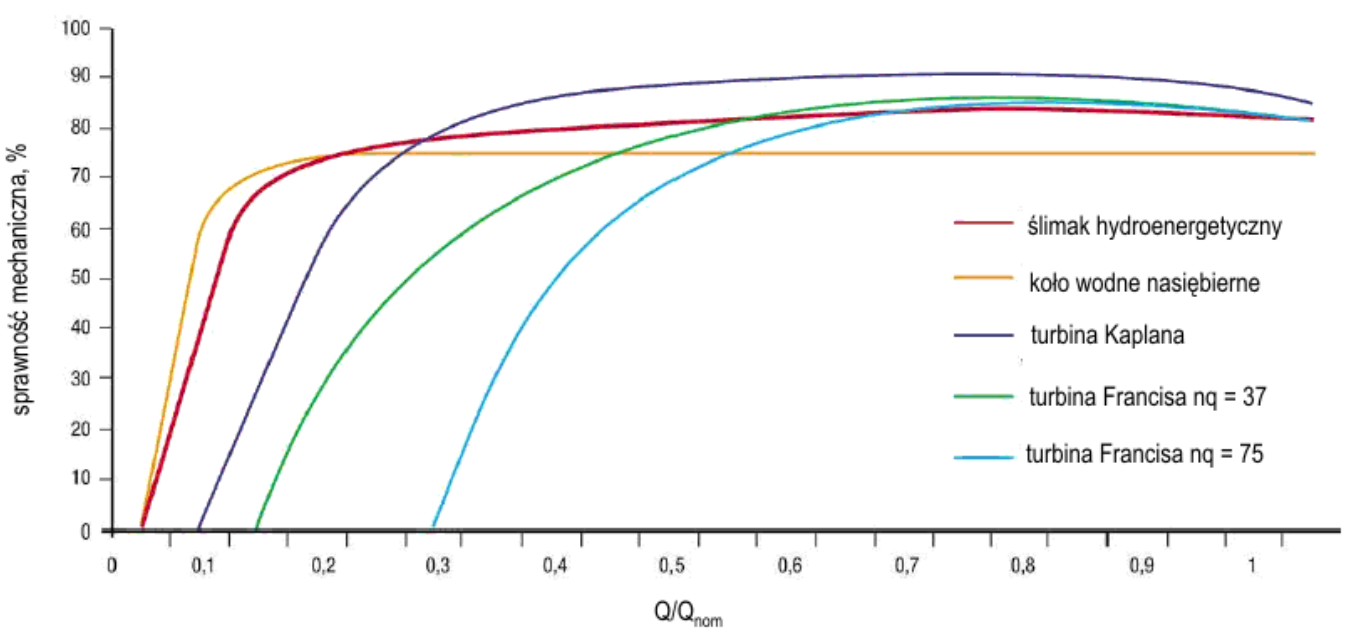
WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE

Ślimaki hydroenergetyczne

RITZ-ATRO Pumpwerksbau GmbH • Max-Brod-Str. 2 • D - 90471 Nürnberg

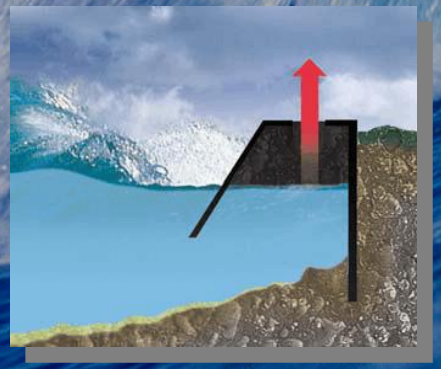


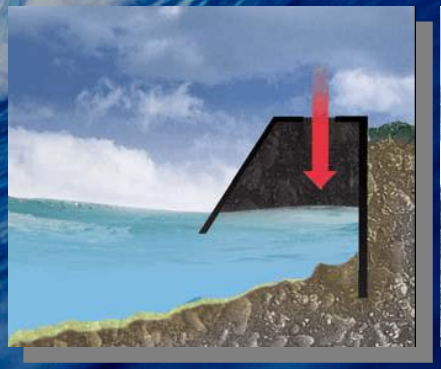
WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE



WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE

LIMPET
(Land Installed Marine Powered Energy Transformer)

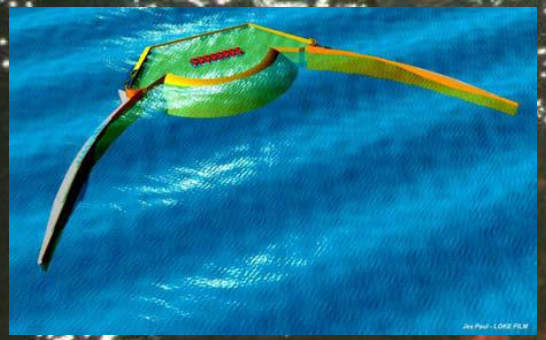


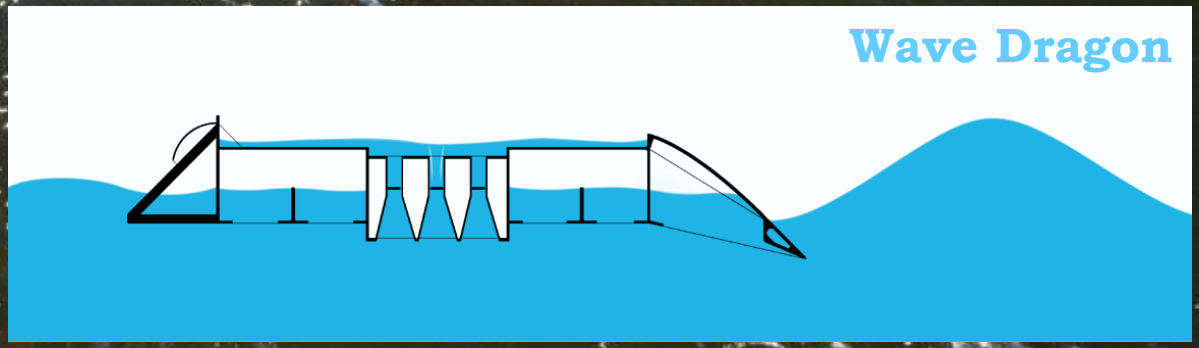


2004 : Sprawdzono niezawodność działania w różnych warunkach falowania

2006-07 : Próby hydrozespołu pełnowymiarowego Atlantic (4 -7 MW)

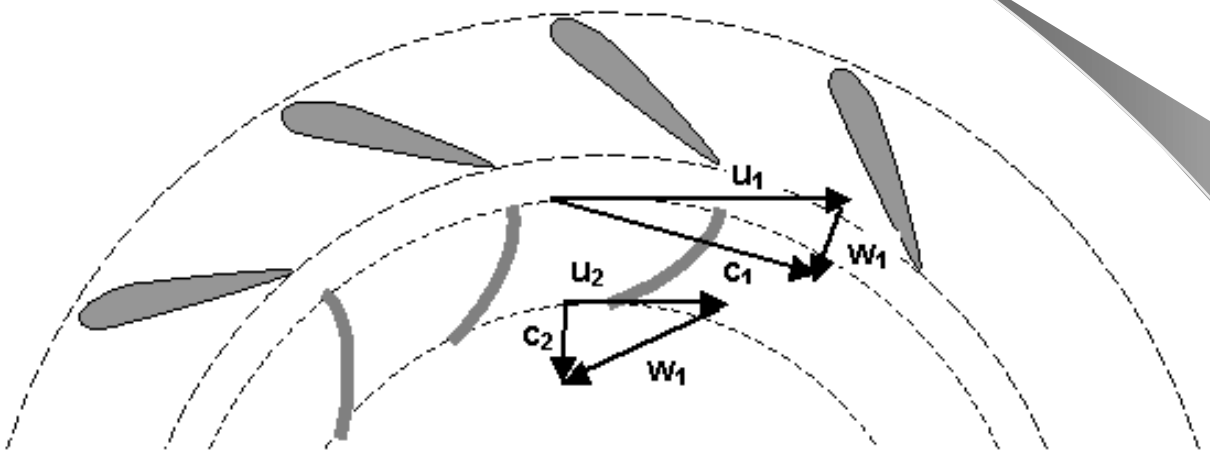
2009-10 : Próby elektrowni pełnowymiarowej





WODNE MASZYNY ENERGETYCZNE

TURBINY WODNE
zasada działania



$$\eta E = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2} = \frac{u_1^2 + c_1^2 - w_1^2}{2} - \frac{u_2^2 + c_2^2 - w_2^2}{2}$$

TURBINY WODNE
prawa podobieństwa i wielkości zredukowane

prędkość obrotowa $n_{HD} = nD/\sqrt{H}$

natężenie przepływu $Q_{HD} = Q/D^2\sqrt{H}$

moc $P_{HD} = P/D^2H^{3/2}$

wyróżniki szybkobieżności

$$n_Q = n_{HD}\sqrt{Q_{HD}}$$

$$n_{sP} = n_{HD}\sqrt{P_{HD}}$$

TURBINY WODNE
podział ze względu na współczynnik reakcyjności

Akcyjne (natryskowe) - ciśnienie wody przed wirnikiem jest równe ciśnieniu atmosferycznemu

a) turbina Peltona

b) turbina Turgo

c) turbina Banki – Michella

Reakcyjne (naporowe) - ciśnienie wody przed wirnikiem jest większe od ciśnienia atmosferycznego

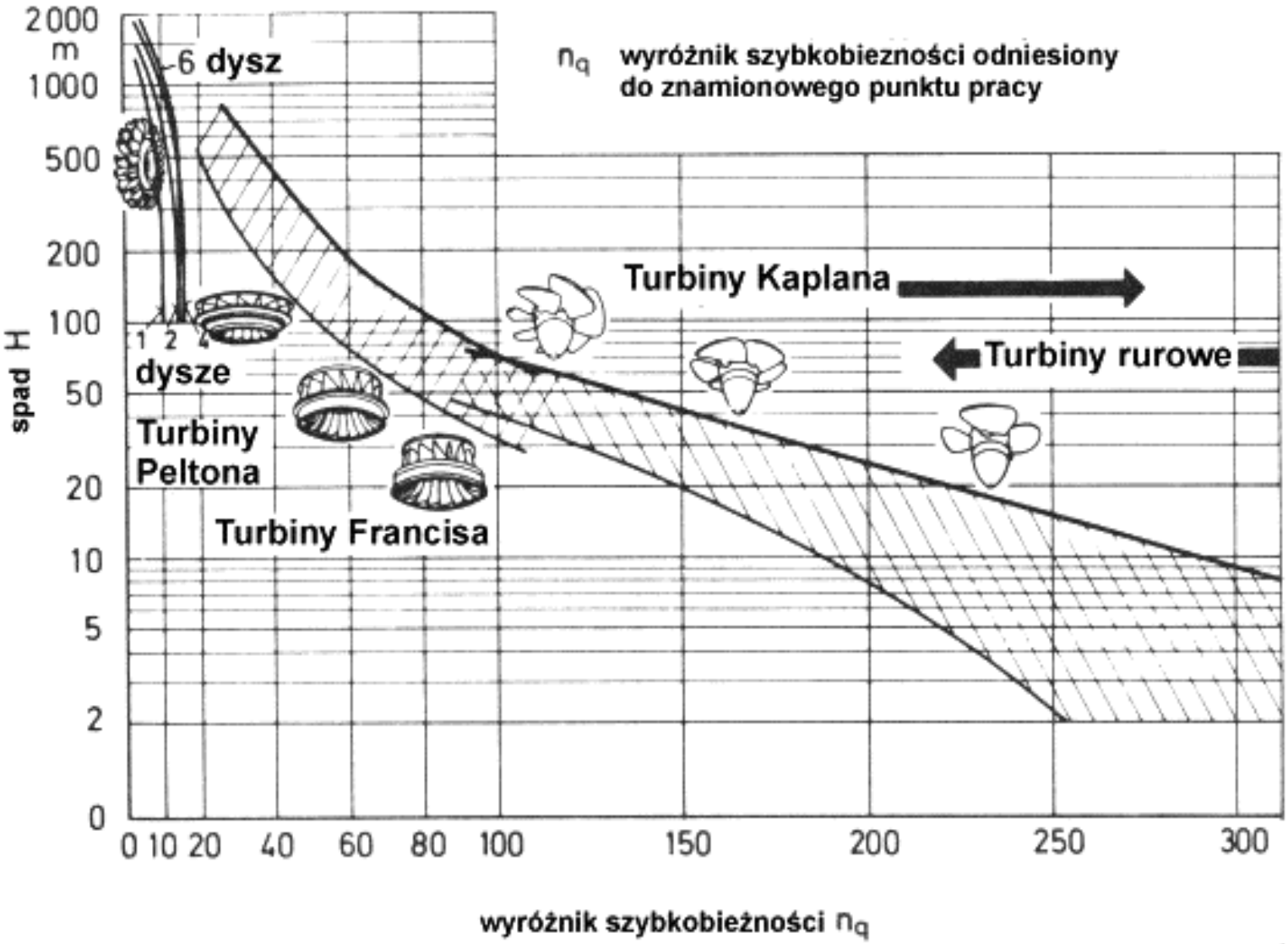
a) turbina Francisa

b) turbina Deriaza

c) turbiny Kaplana i śmigłowe

d) turbina o przepływie poprzecznym

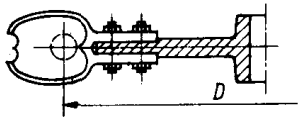
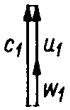
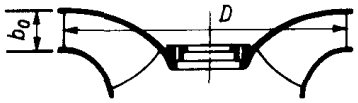
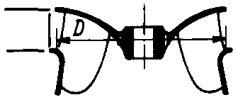
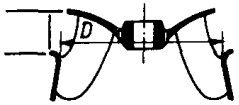
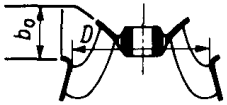
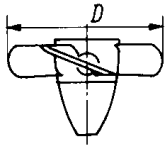
TURBINY WODNE
wyróżnik szybkobieżności



VOITH

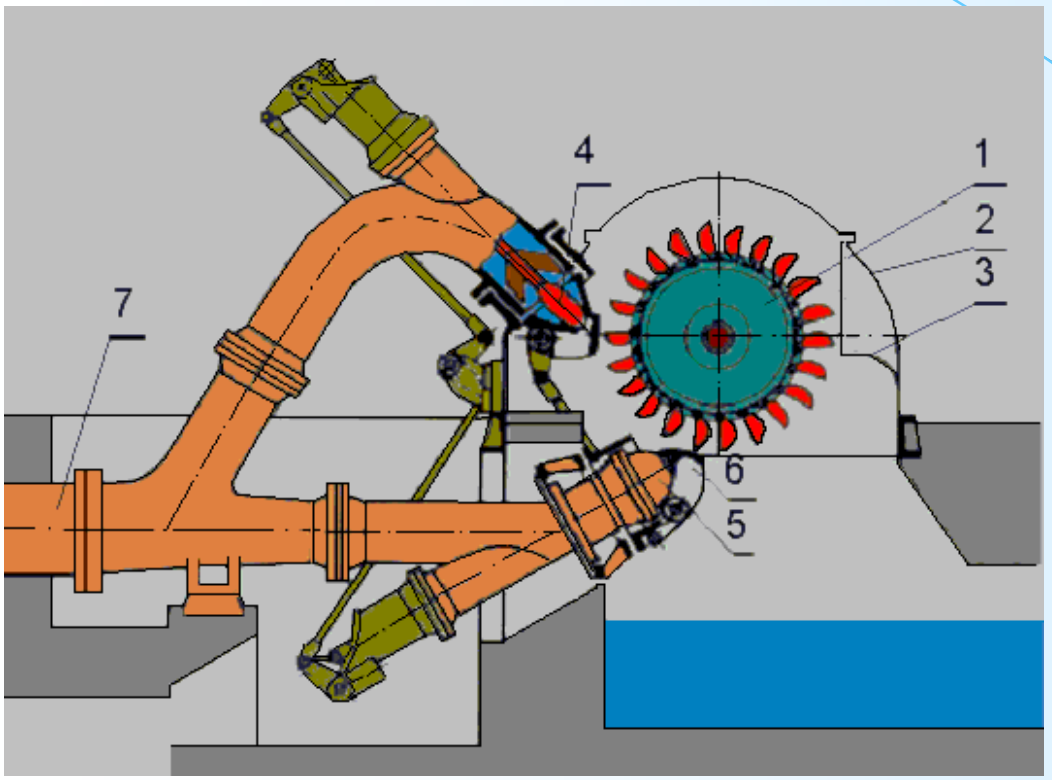
TURBINY WODNE

wyróżnik szybkobieżności

n_s	Profile wirników	Trojkąty prędkości	Typ	Rodzaj
≤ 50			Pelton	Akcyjna
100			Francis	Reakcyjna
150				
250				
300				
420				
450 ÷ 900			Kaplan śmigłowa	

M.Hoffmann (red.): Małe Elektrownie wodne. Poradnik. Wyd. II. Nabba Sp. z O.O., Warszawa, 1992

Turbiny natryskowe (Peltona)



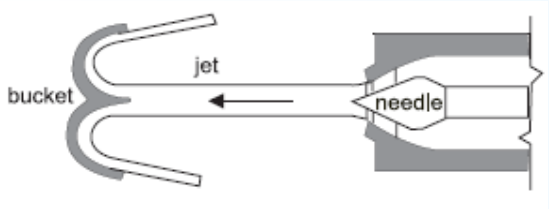
Właściwości:

- spad od H = 30 m do ponad 1 000 m
- wysoka sprawność w zakresie:

  30 –100% Q – turbiny jednodyszowe

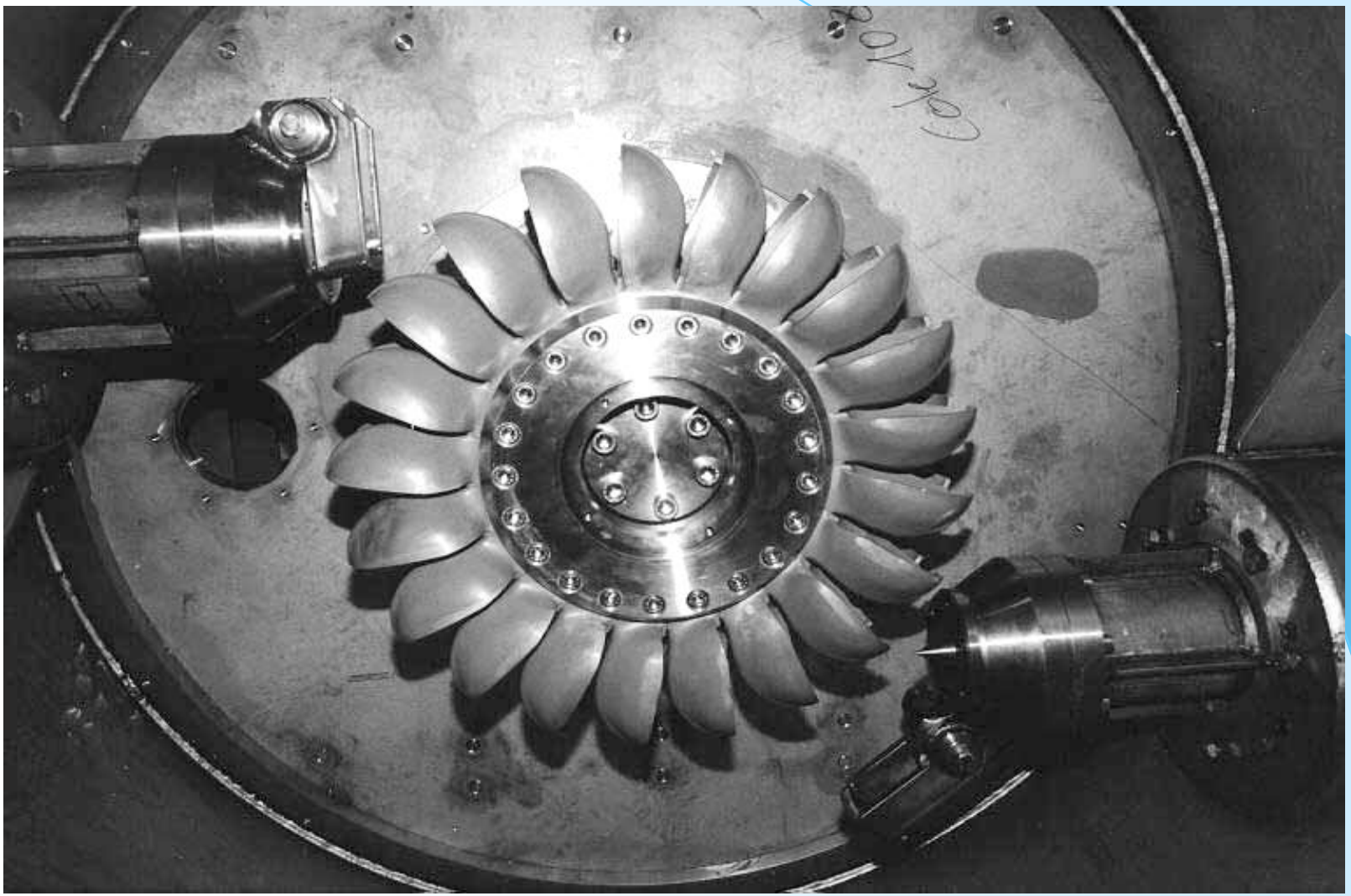
  10 –100% Q – turbiny wielodyszowe

- zastosowanie noża umożliwia odcięcie dopływu wody na wirnik, co umożliwia powolne zamykanie zaworu iglicowego i zapobiega uderzeniu hydraulicznemu w rurociągu (dopuszczalny wzrost ciśnienia w rurociągu wynosi 15 %)

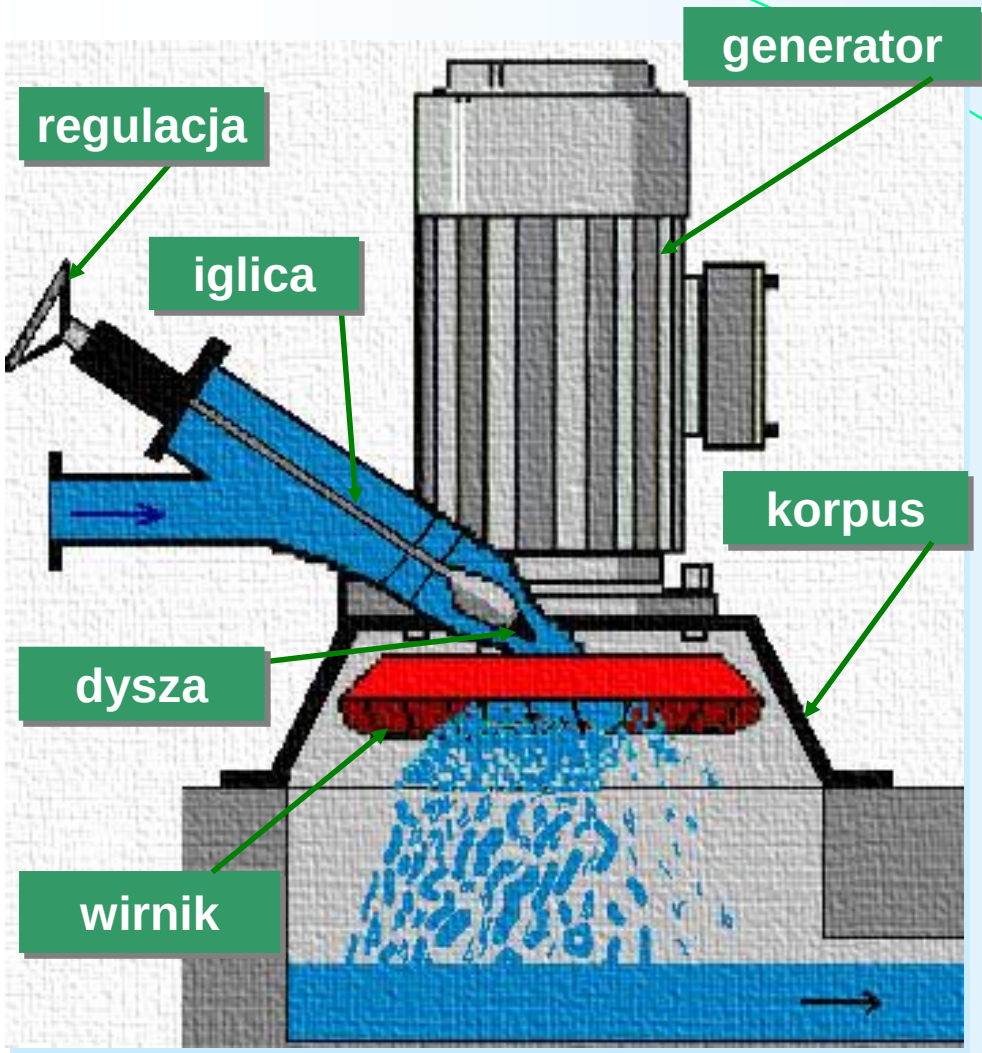


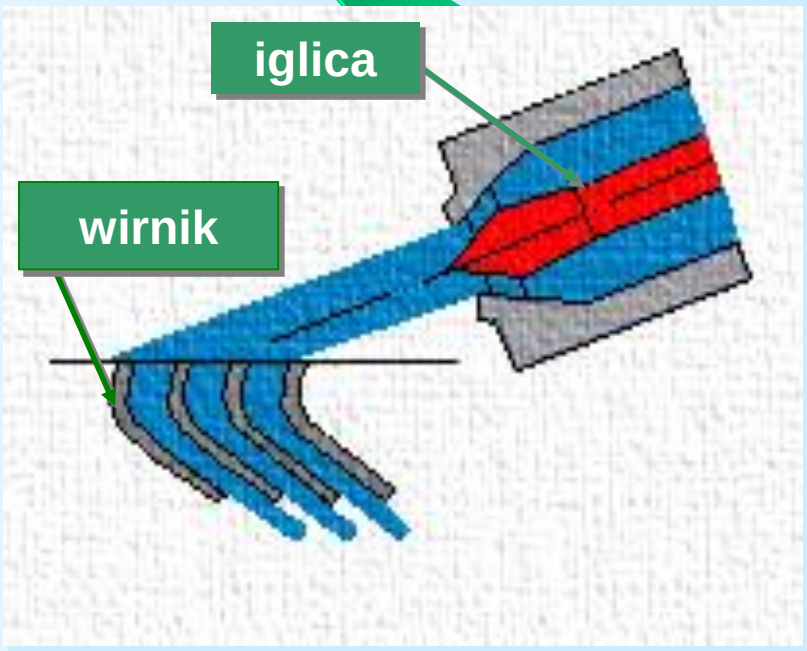
1) wirnik, 2) obudowa, 3) odcinacz wody
4) iglica 5) dysza , 6) nóż 7) rurociąg

Wirnik turbiny Peltona

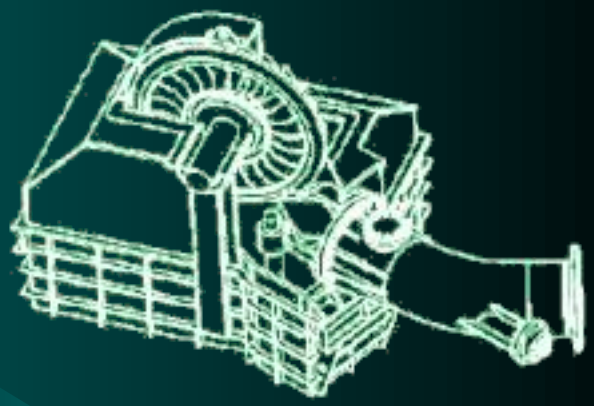


Turbiny Turgo





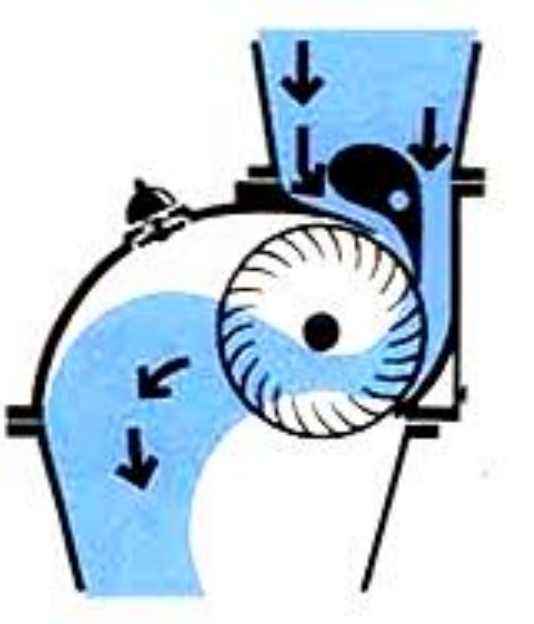
Wirniki turbin Turgo

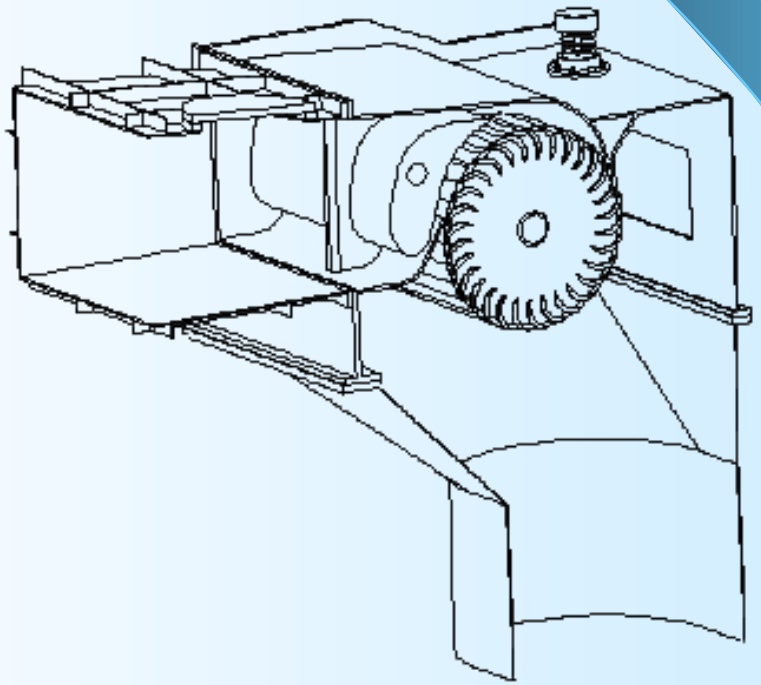


Właściwości:

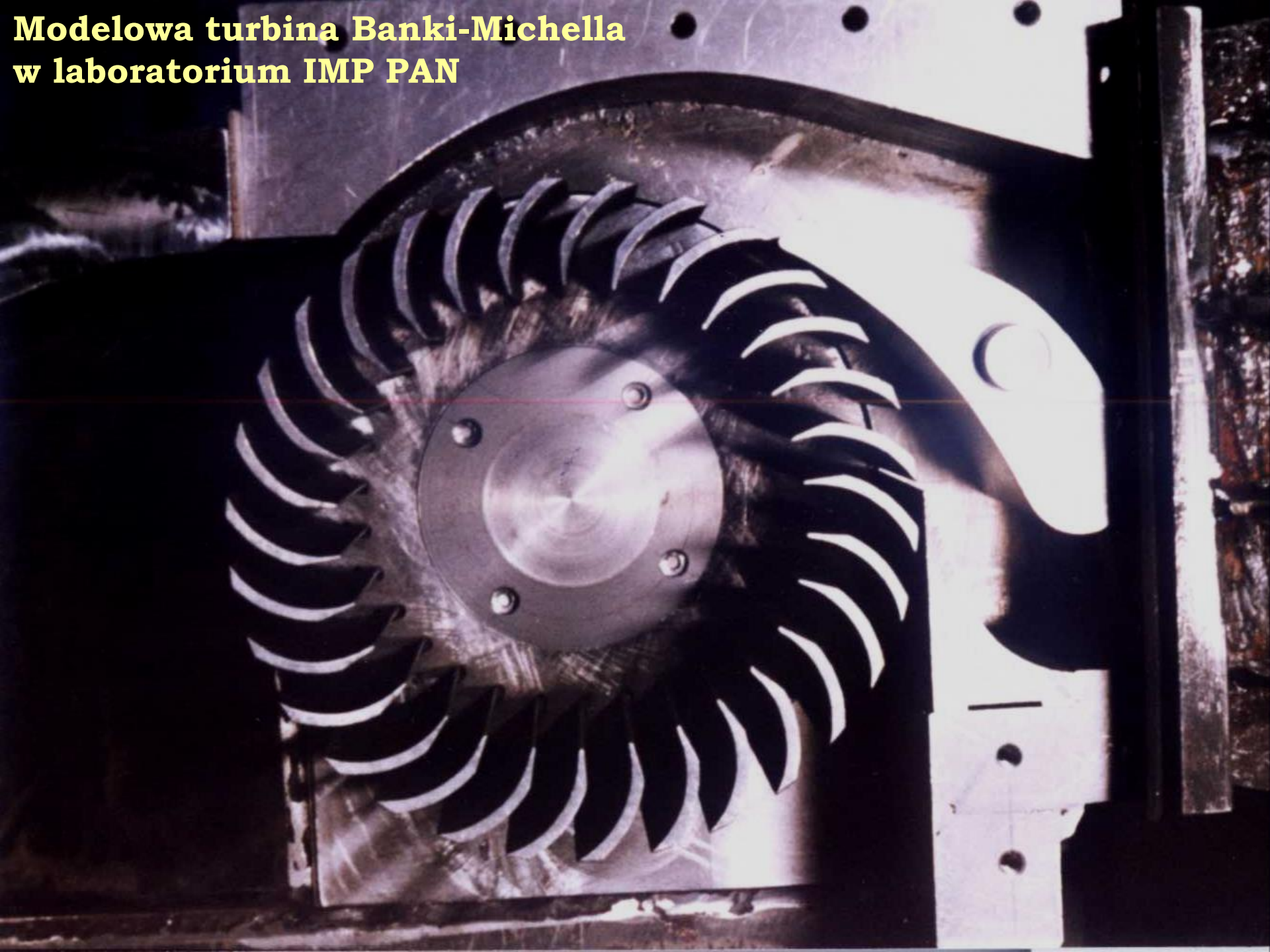
- spad do H = 300 m
- możliwość zastosowania jednej lub dwóch dysz
- małe zużycie elementów przy długiej pracy z dużym obciążeniem
- szeroki zakres regulacji
- wysoka sprawność w szerokim zakresie zmian przepływu i spadu
- większa zwartość konstrukcji niż przy turbinach Peltona
- prosta regulacja iglicą i odchylaczem strugi

Turbiny Banki-Michella w wykonaniu firm Ossberger i Wasserkraft Volk

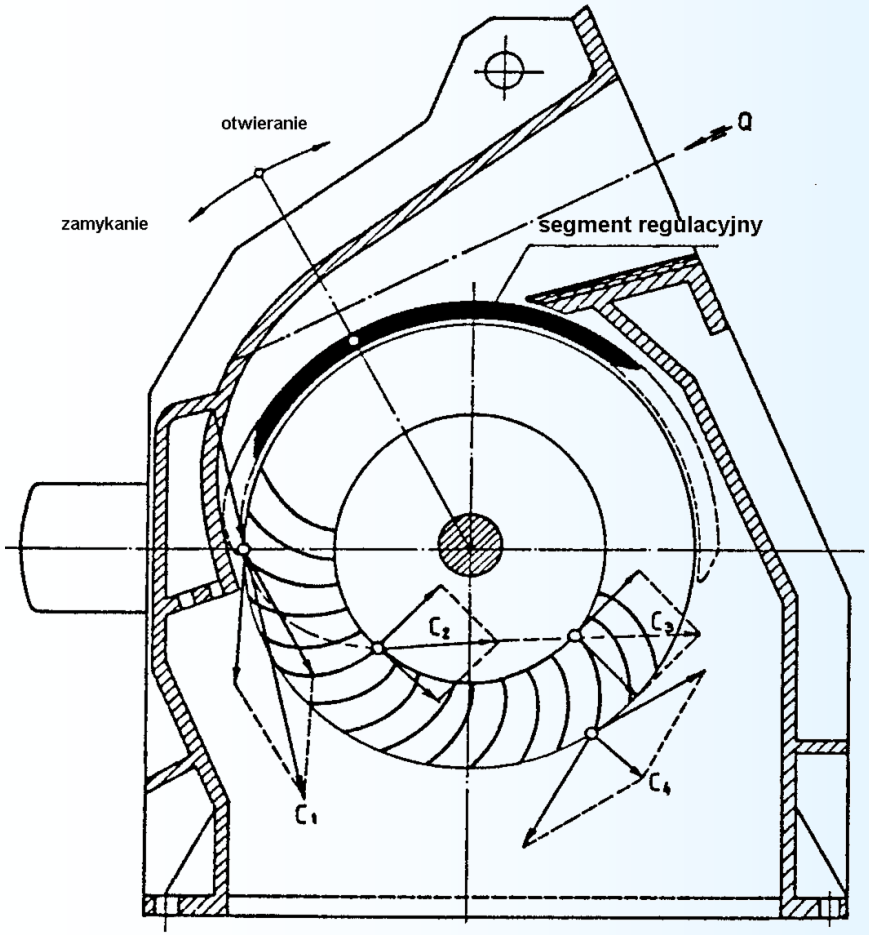




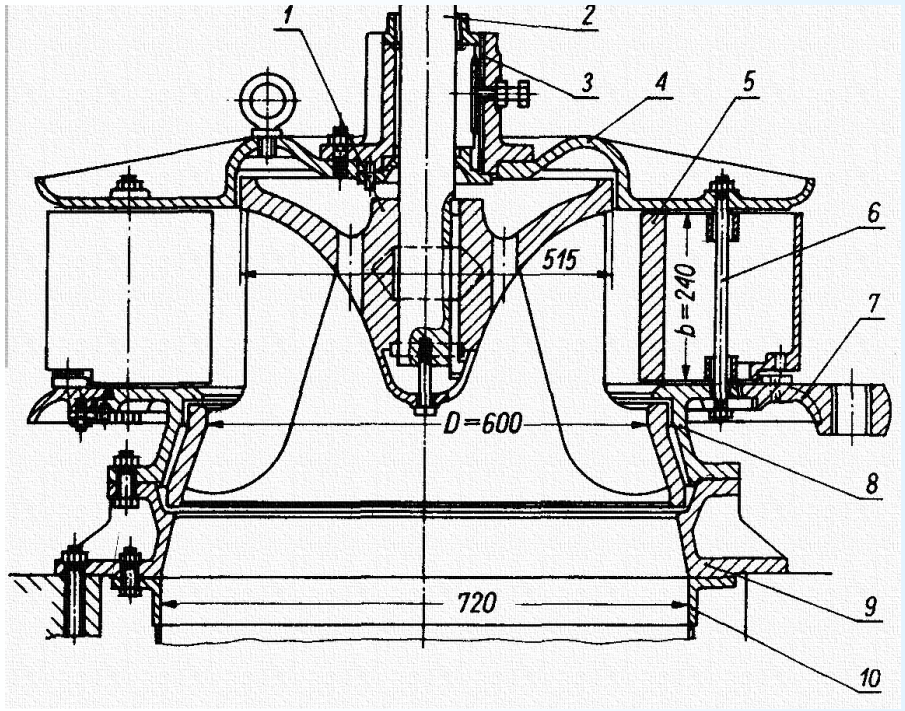
Modelowa turbina Banki-Michella w laboratorium IMP PAN

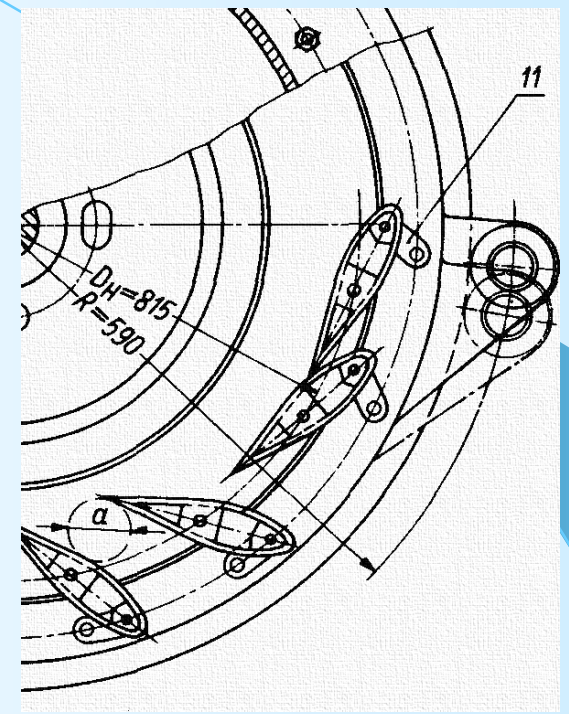


Reakcyjna turbina o przepływie poprzecznym firmy Cink



Turbiny reakcyjne promieniowo-osiowe (Francisa)

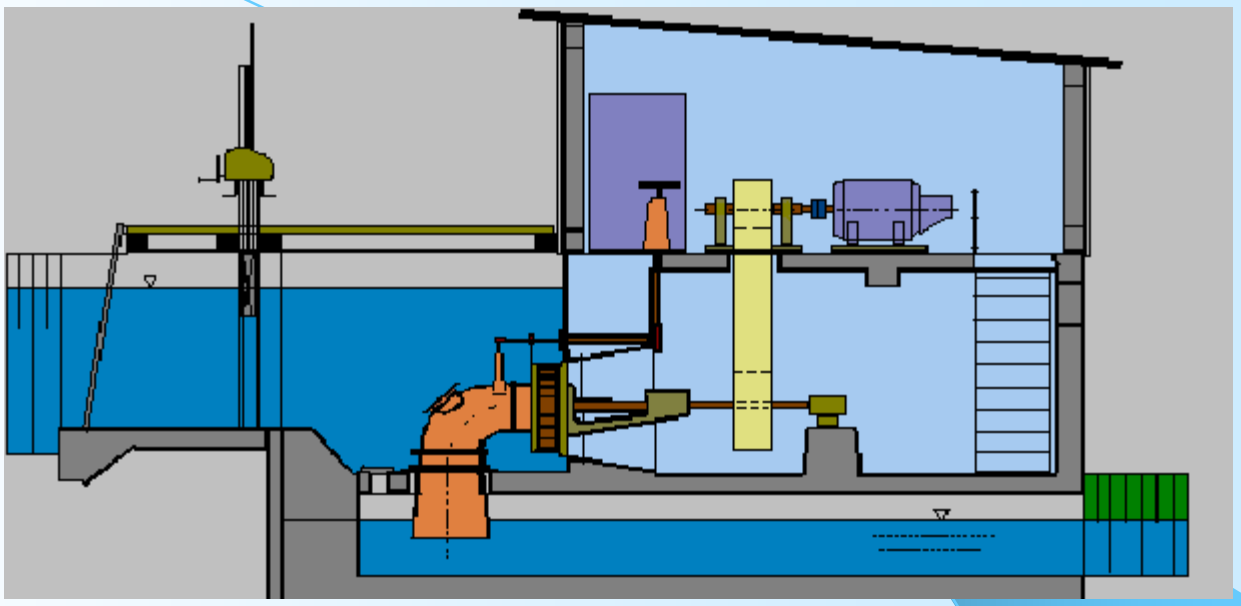




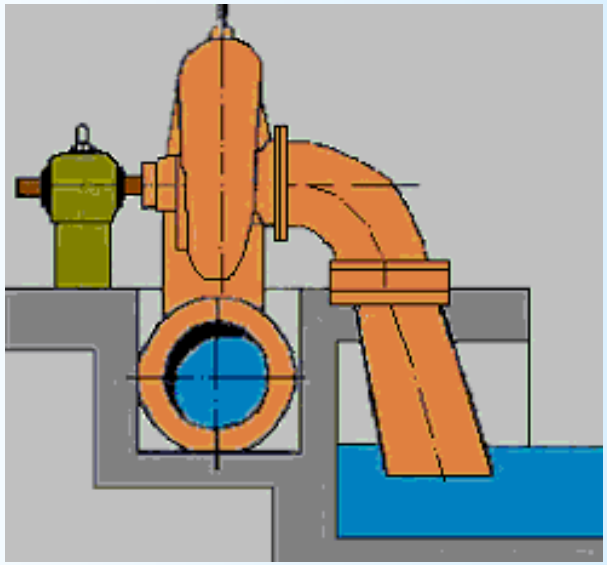
1 - wirnik turbiny, 2 - wał turbiny, 3 - łożysko poprzeczne (prowadzące), 4 - pokrywa kierownicy, 5 - łopatka kierownicy, 6 - sworzeń łopatki kierownicy, 7 - pierścień regulacyjny, 8 - podstawa kierownicy, 9 - pierścień podstawy, 10 - rura ssąca, 11 – łącznik

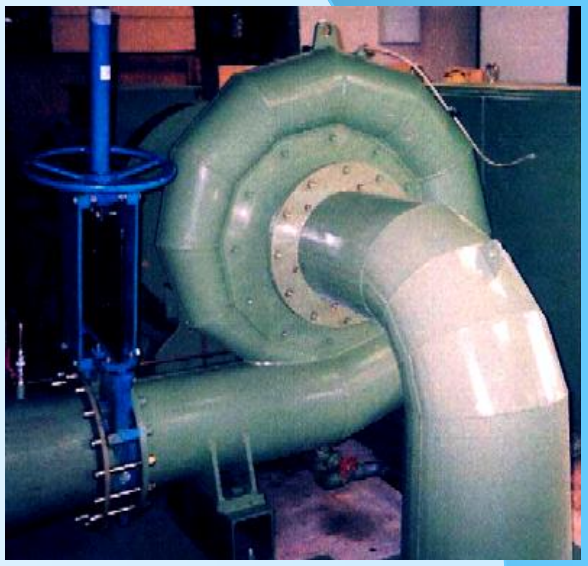
M.Hoffmann (red.): Małe Elektrownie wodne. Poradnik. Wyd. II. Nabba Sp. z O.O., Warszawa, 1992

Turbiny Francisa w MEW



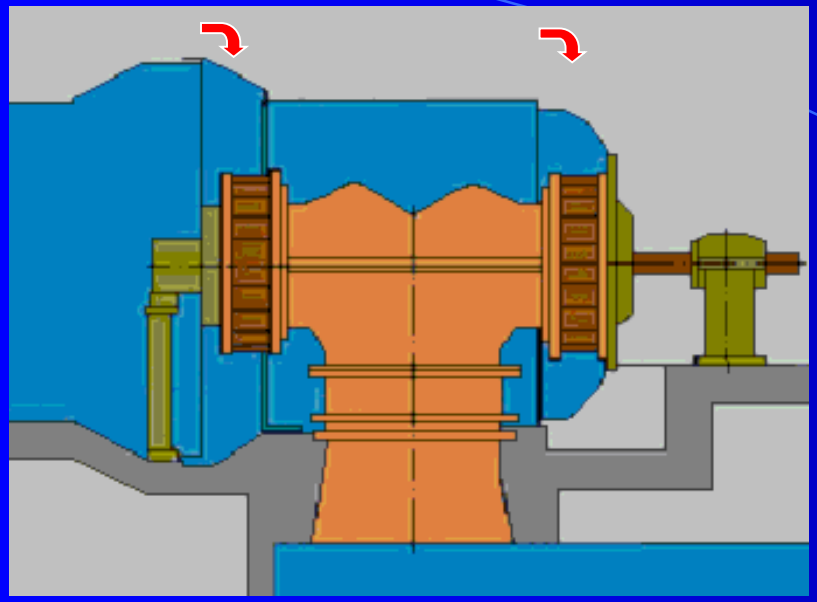
zabudowa
w komorze otwartej





zabudowa
w komorze spiralnej

Turbiny Francisa w MEW

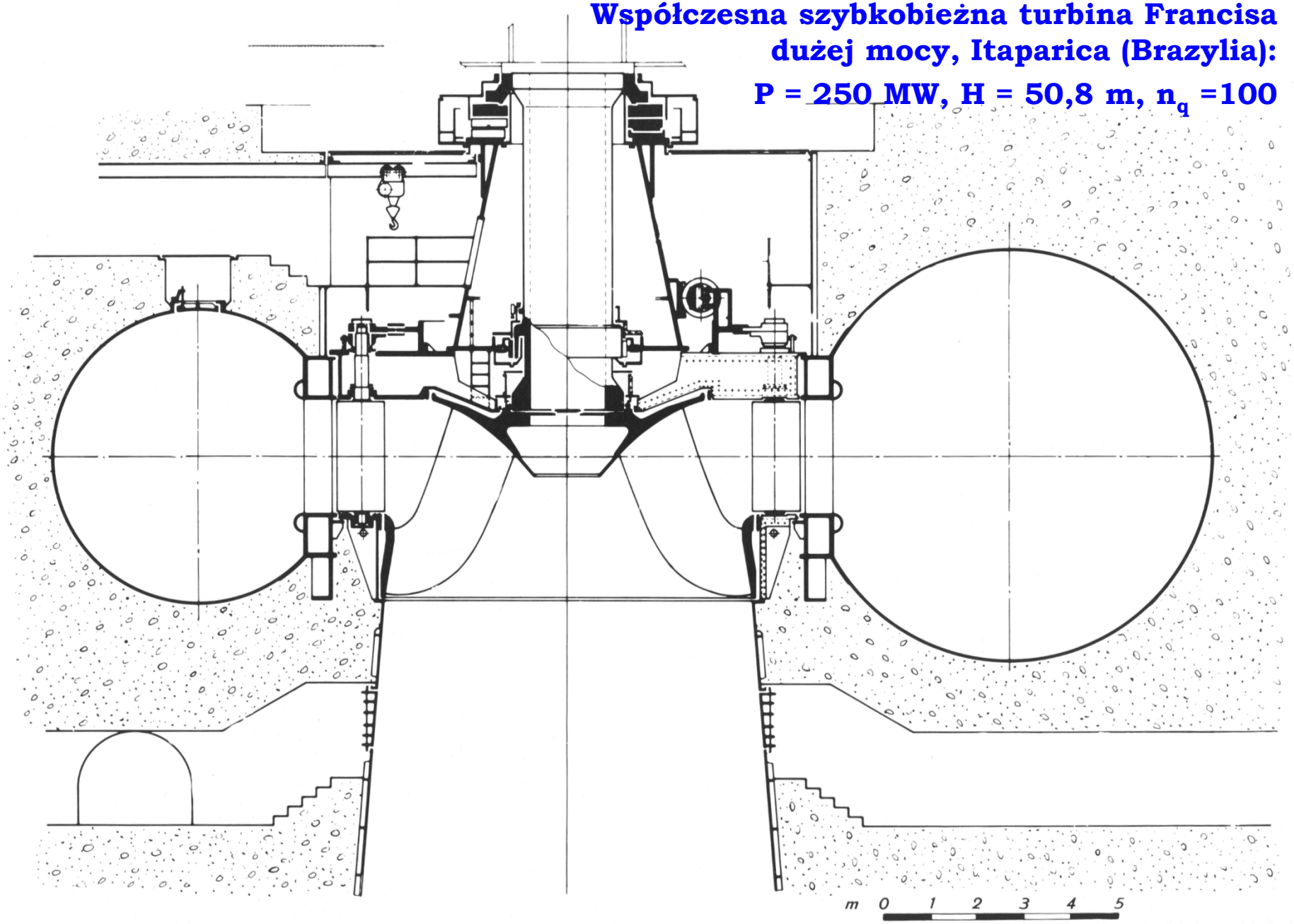


Bliźniacza turbina kotłowa
EW Straszyn (rz. Radunia)

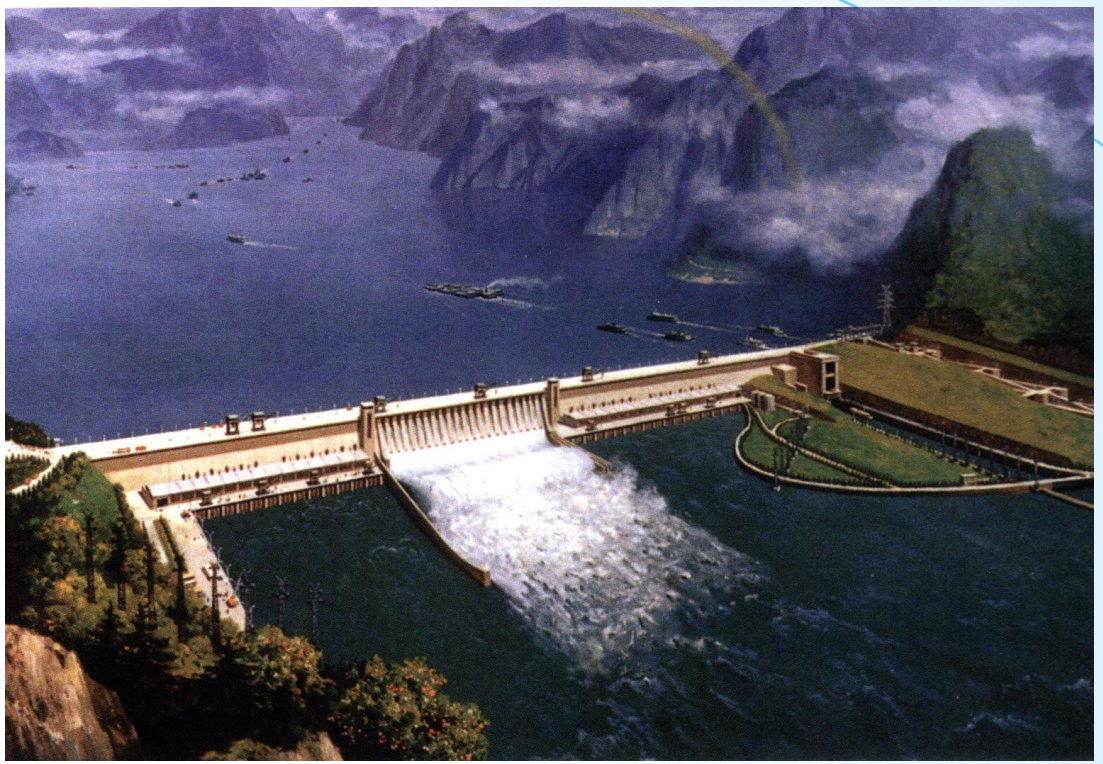
Wał z wirnikami turbiny bliźniaczej
EW Pilchowice II (rz. Bóbr)

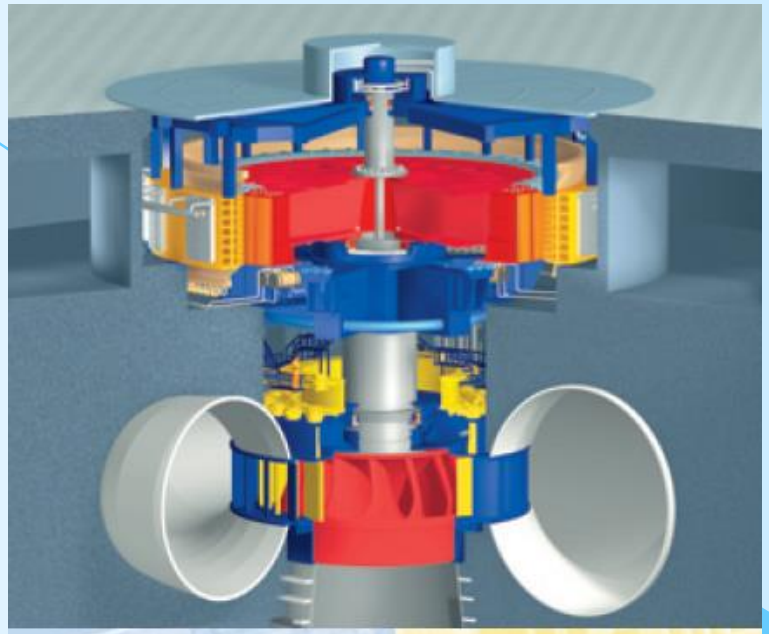
Współczesna szybkobieżna turbina Francisa dużej mocy, Itaparica (Brazylia):

P = 250 MW, H = 50,8 m, n_q =100



źródło: Pierre Henry: Turbomachines Hydrauliques. Choix illustré de réalisations marquantes. EPFL Press, 1992





Unit data	
Rated head	80.6 m
Maximum head	113 m
Minimum head	61 m
Rated flow	996 m³/s
Rated power	700 MW
Max. capacity	840 MVA
Rated speed	75 rpm
Rated frequency	50 Hz
Rated voltage	20 kV
Power factor	0.9
Year of order	1997
Runner diameter	10 m
Runner weight	420 tons

Trzy Przełomy (Sanxia)

VOITH/ALSTOM

Właściwości turbin Francisa:

- optymalny zakres spadu 25 – 350 m. Dla niższych spadów pod względem technicznym i ekonomicznym korzystniejsze jest stosowanie turbin Kaplana.

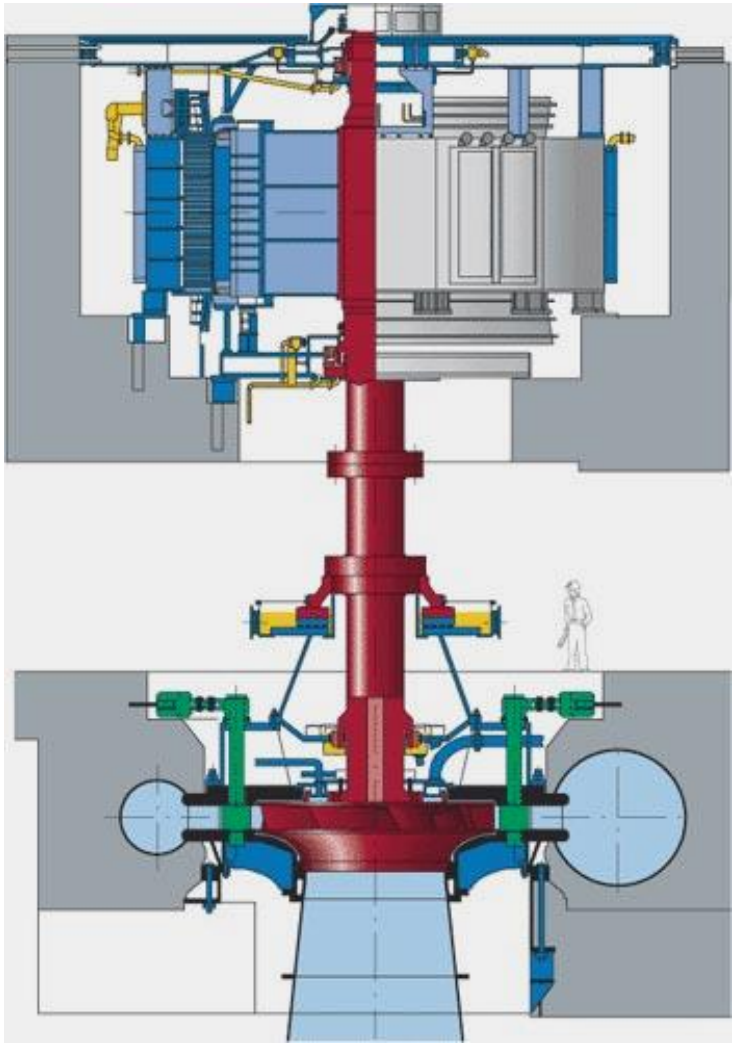
- w elektrowniach niskospadowych woda doprowadzana jest kanałem derywacyjnym, turbiny są zabudowane w komorach otwartych

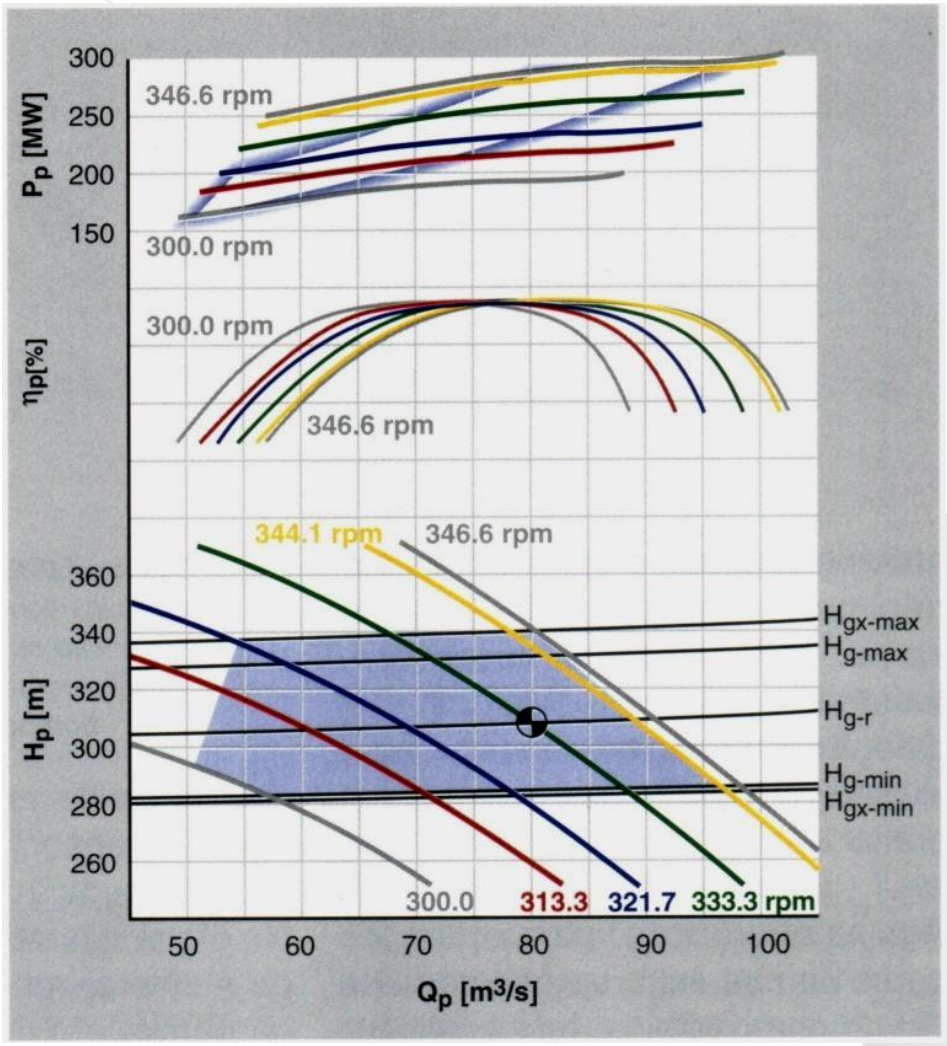
- w elektrowniach średnio- i wysokospadowych woda doprowadzana jest derywacją ciśnieniową, turbiny są zabudowane w spiralach

- turbina Francisa jest turbiną o pojedynczej regulacji – tylko kierownicą

- maszyny hydrauliczne z wirnikiem Francisa stosowane są jako turbiny i pompo-turbiny (Żarnowiec, Solina, Żydowo, Porąbka - Żar)

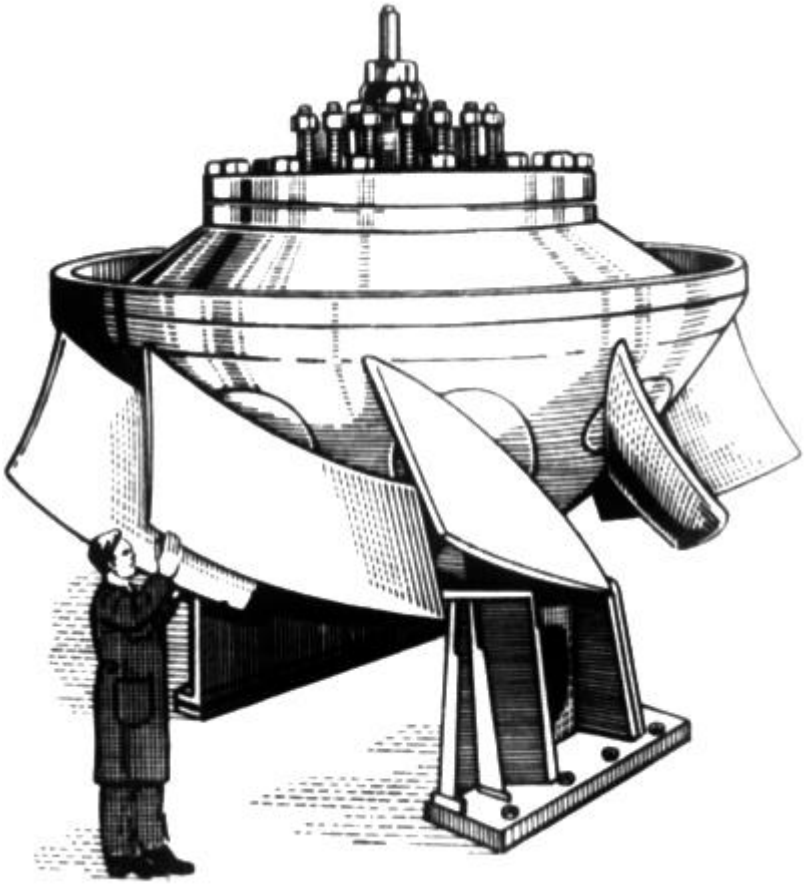
EW Goldisthal (Turyngia): hydrozespół odwracalny o zmiennej prędkości obrotowej

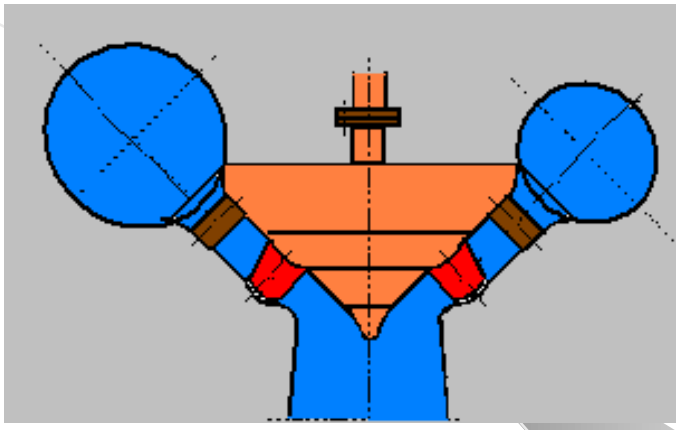




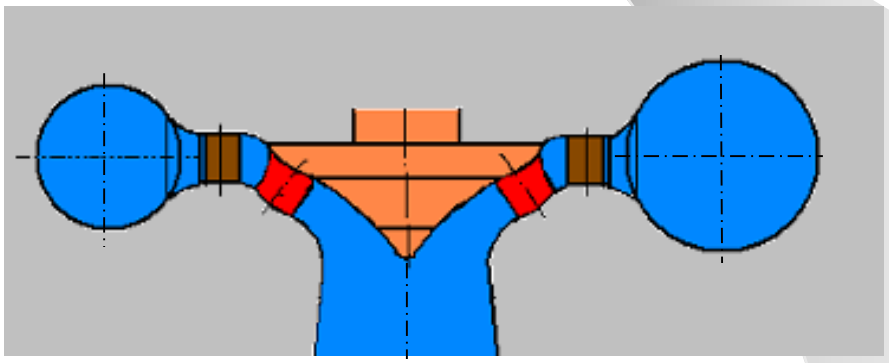
VOITH/SIEMENS

Turbiny Deriaza

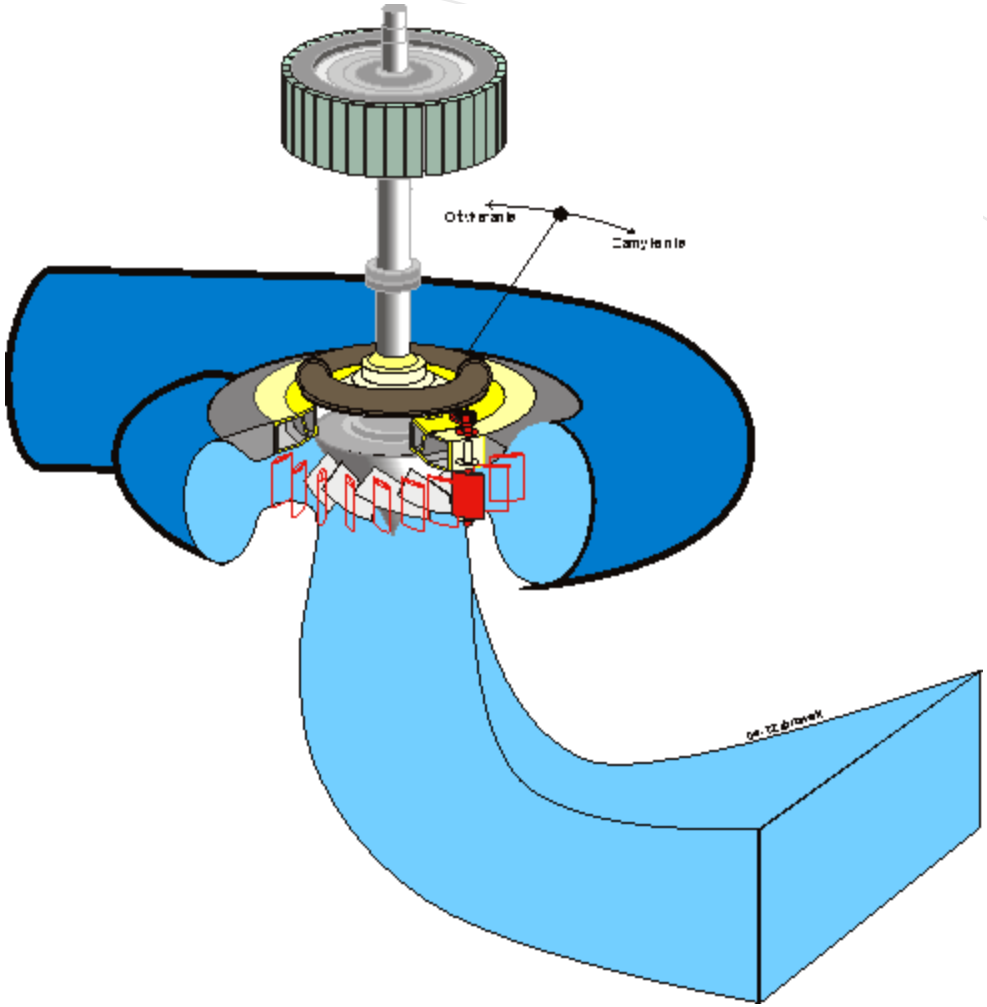


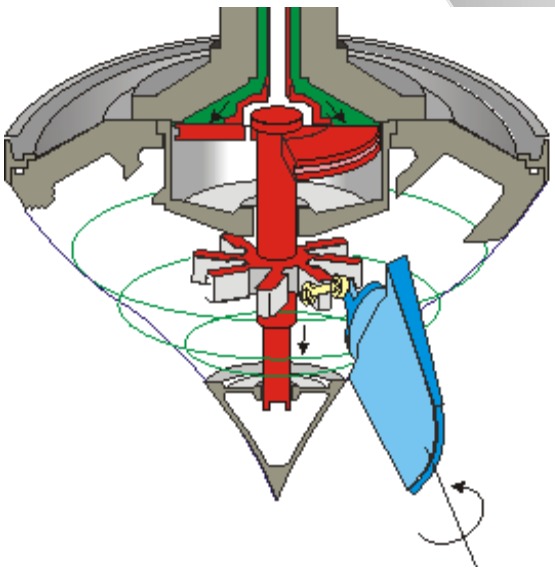


Turbina z kierownicą skośną

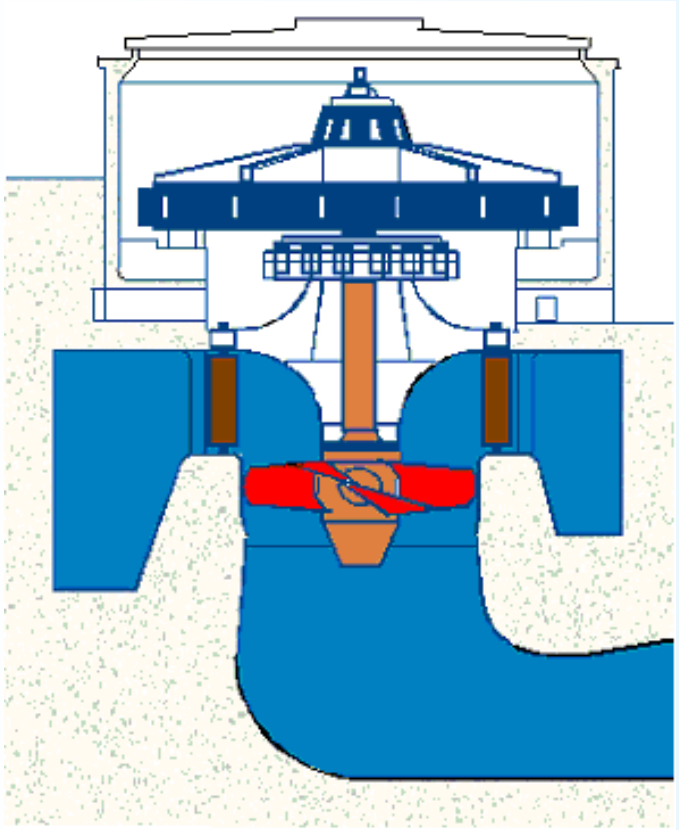


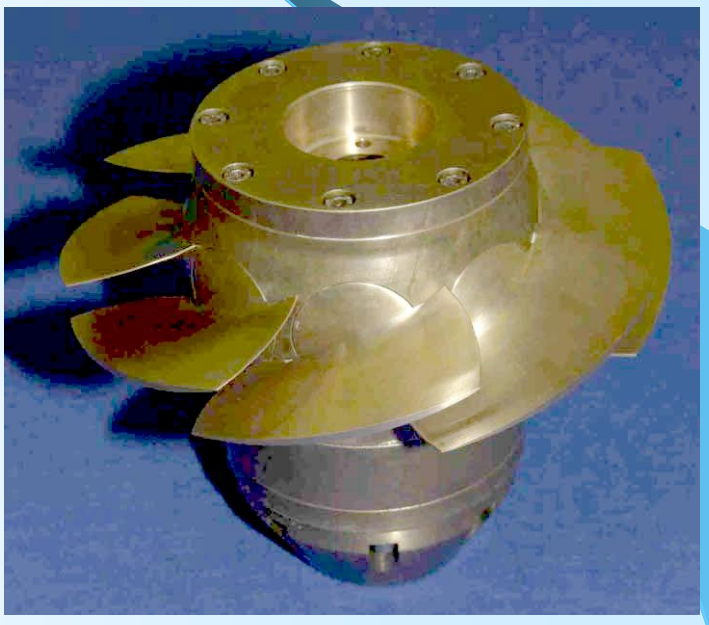
Turbina z kierownicą klasyczną



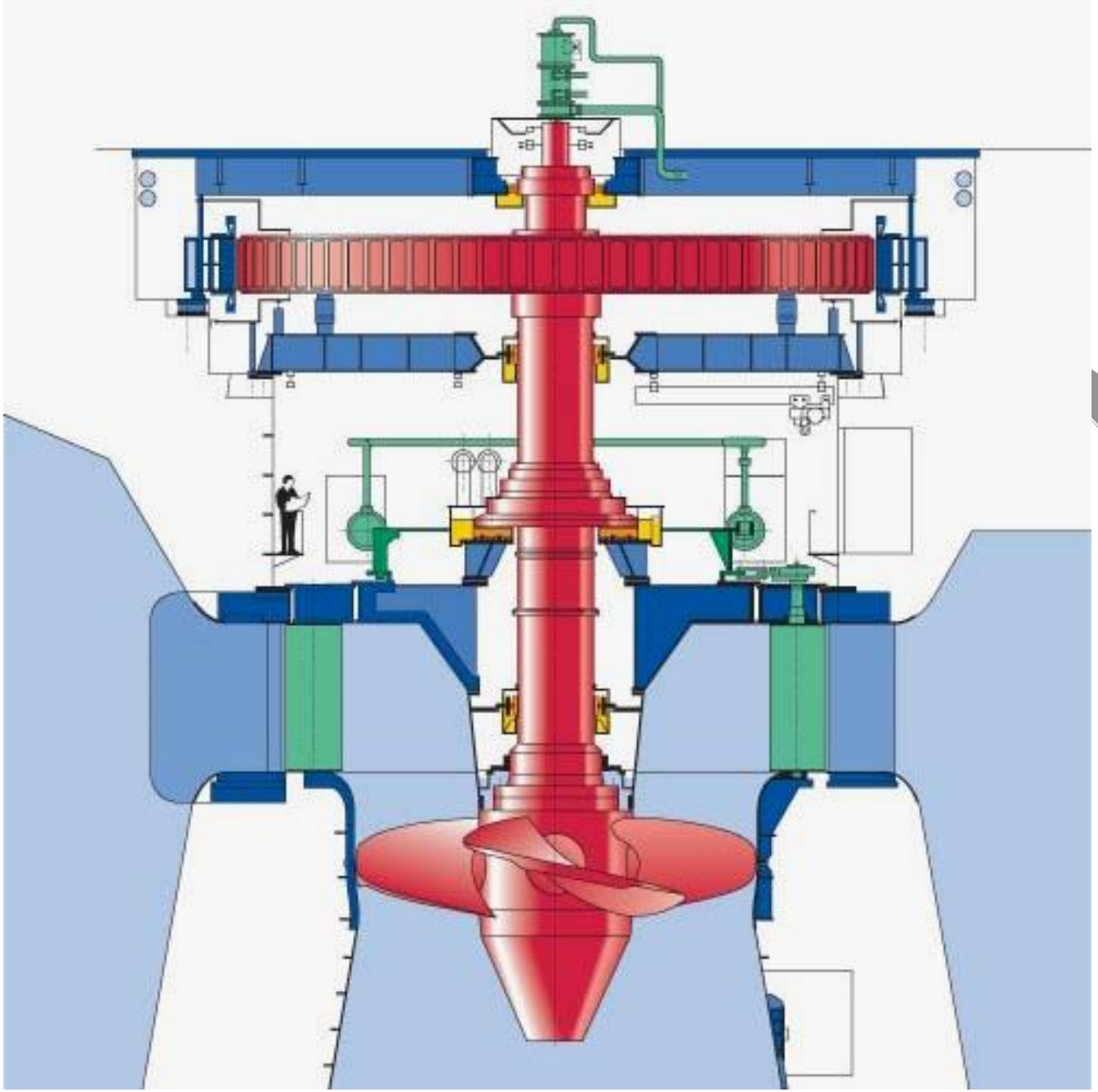


Turbiny Deriaza





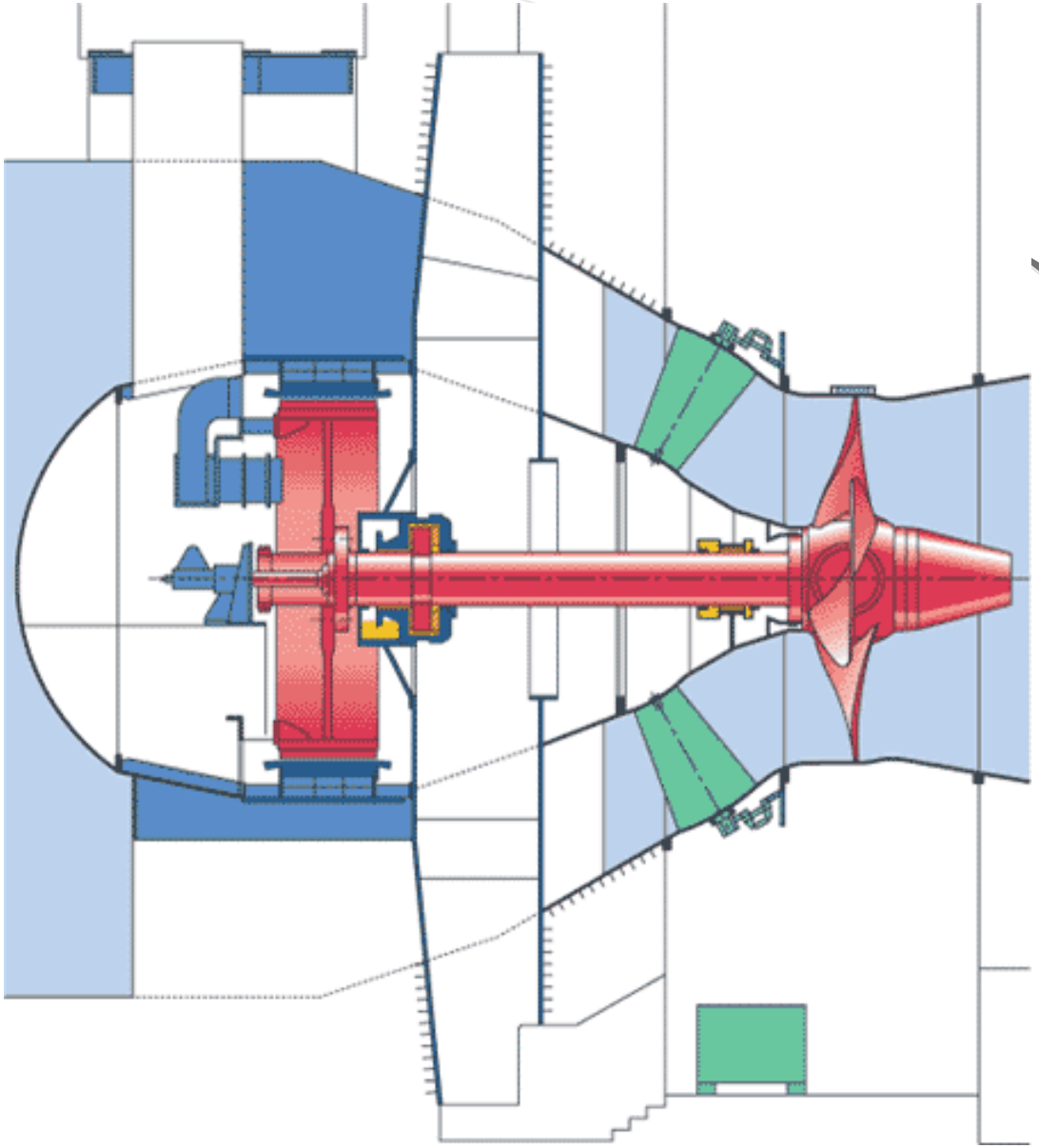
Turbiny Kaplana i śmigłowe



EW Yacyreta

rzeka Parana
P = 20 x 155 MW
H = 22 m

VOITH



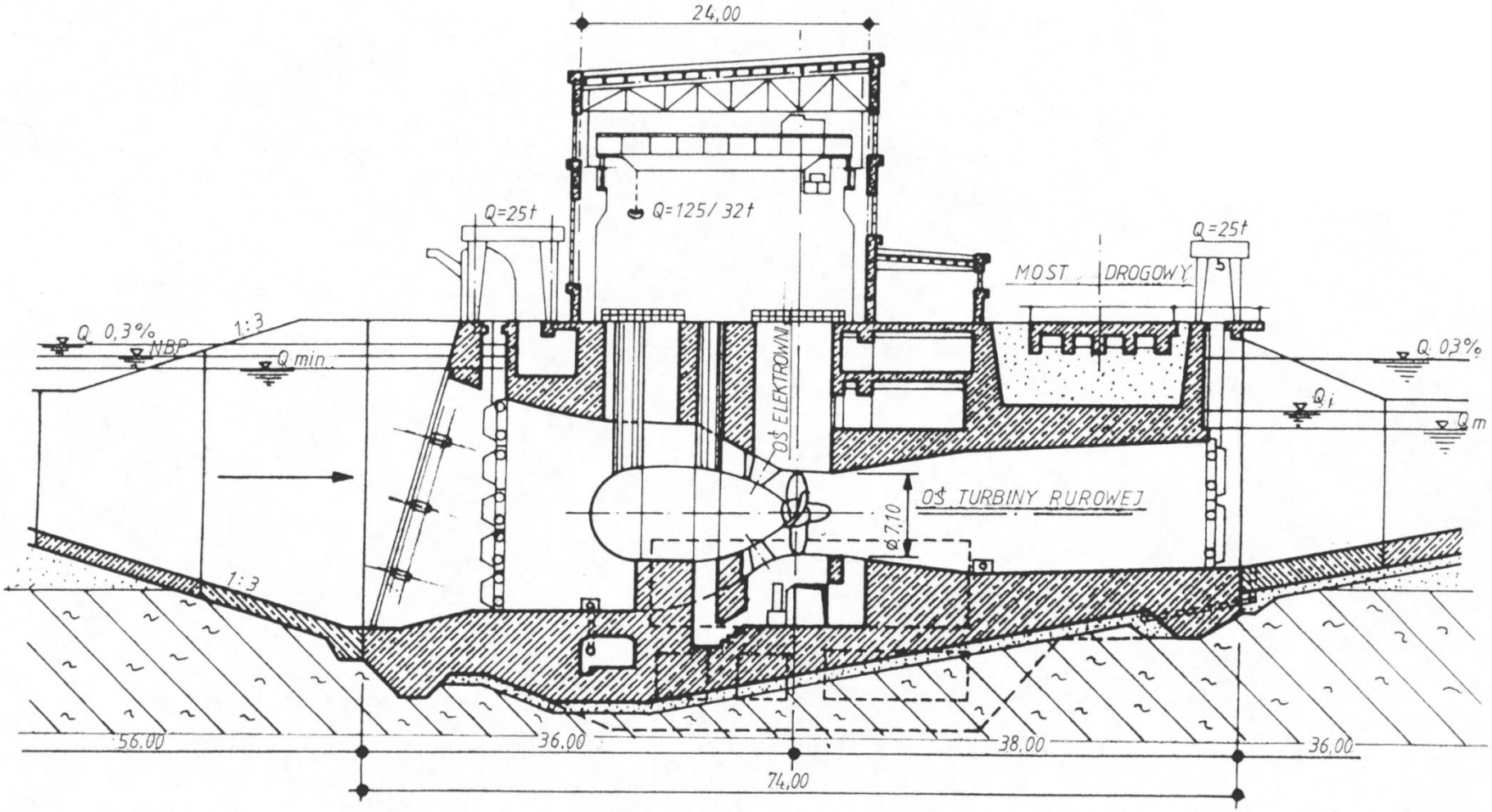
Jing Nan (Chiny)

P = 2 x 35,45 MW
D = 6,3 m

VOITH

Kaskada Dolnej Wisły

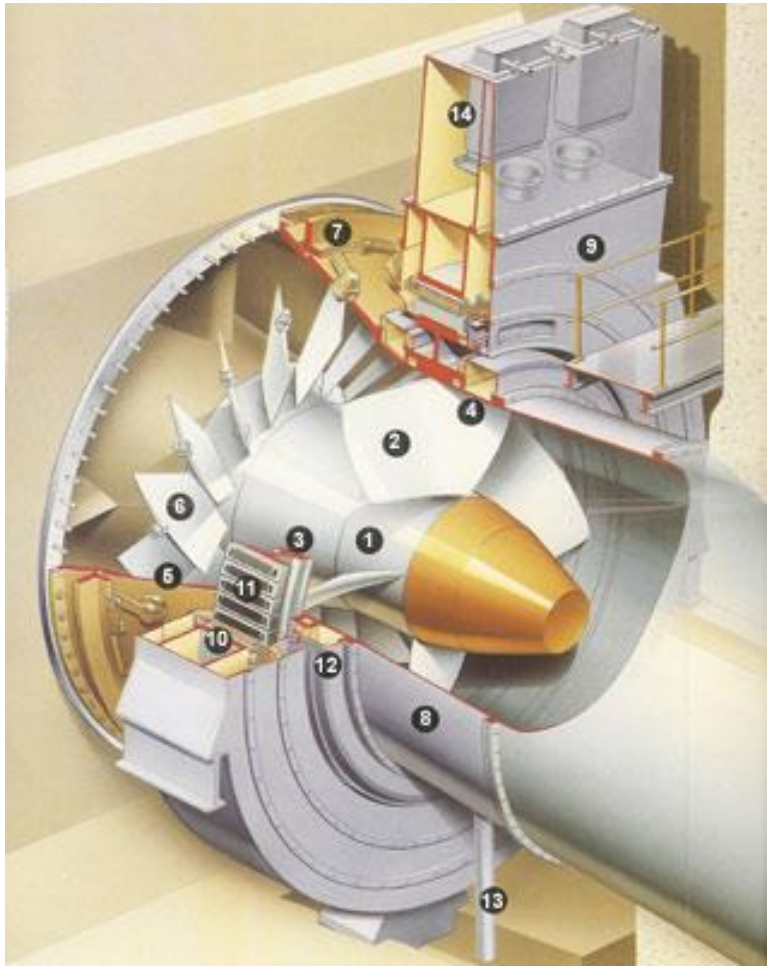
założenia z lat 80-tych

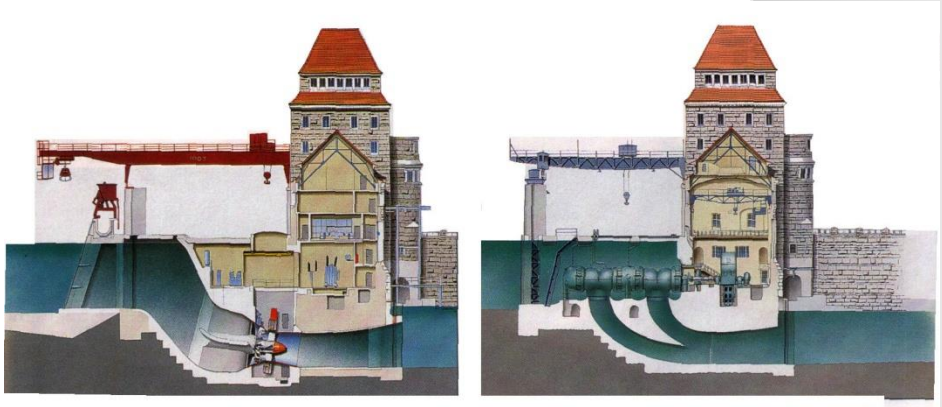


EW Laufenburg na Renie

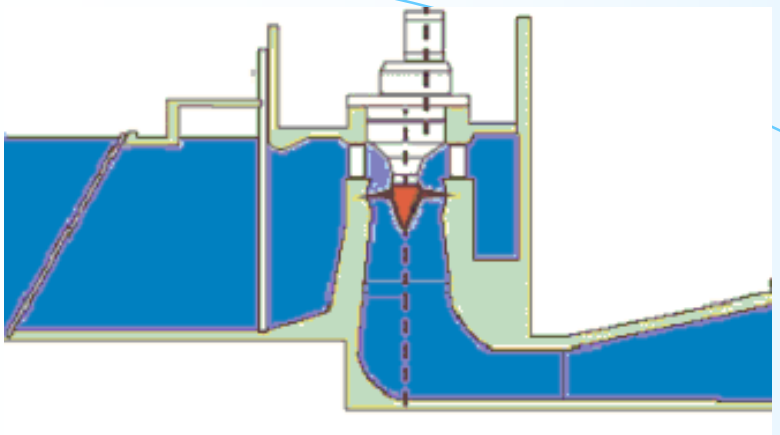
Hydrozespół straflo

P = 10 x 10,6 MW

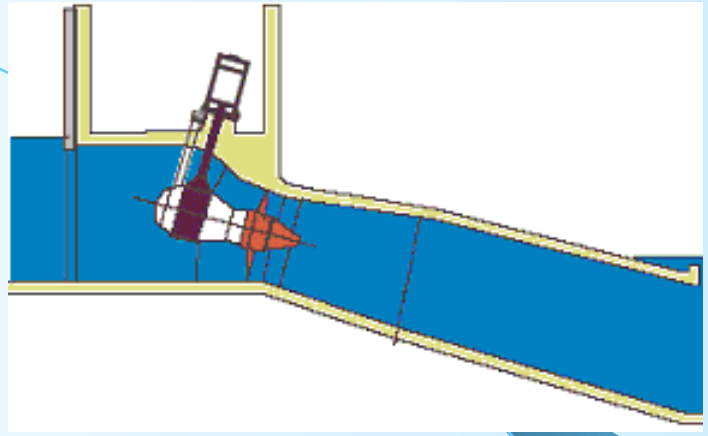




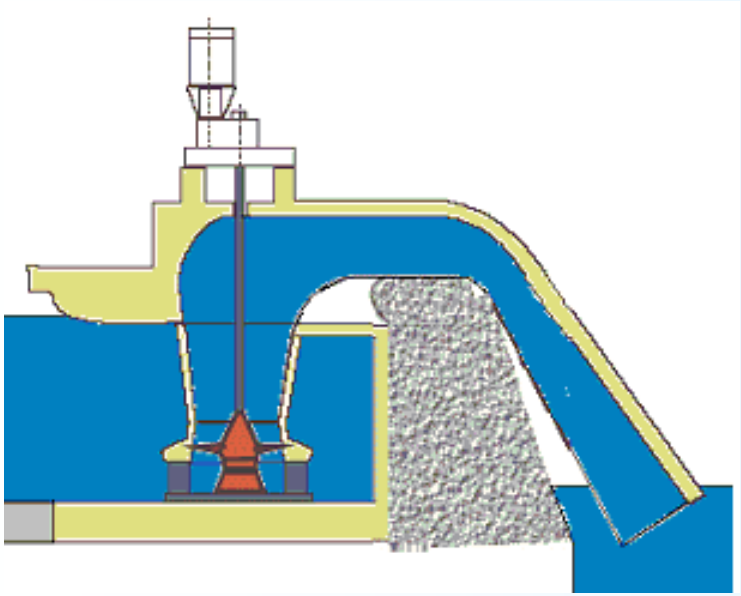
Escher Wyss



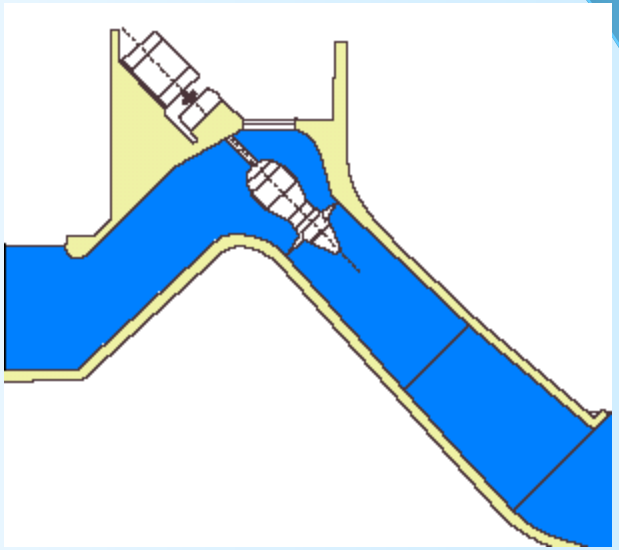
Kaplan w układzie pionowym



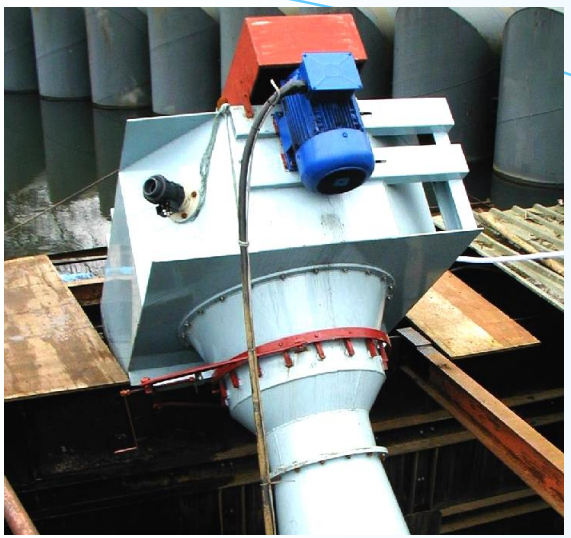
semi -Kaplan
w układzie prostoosiowym

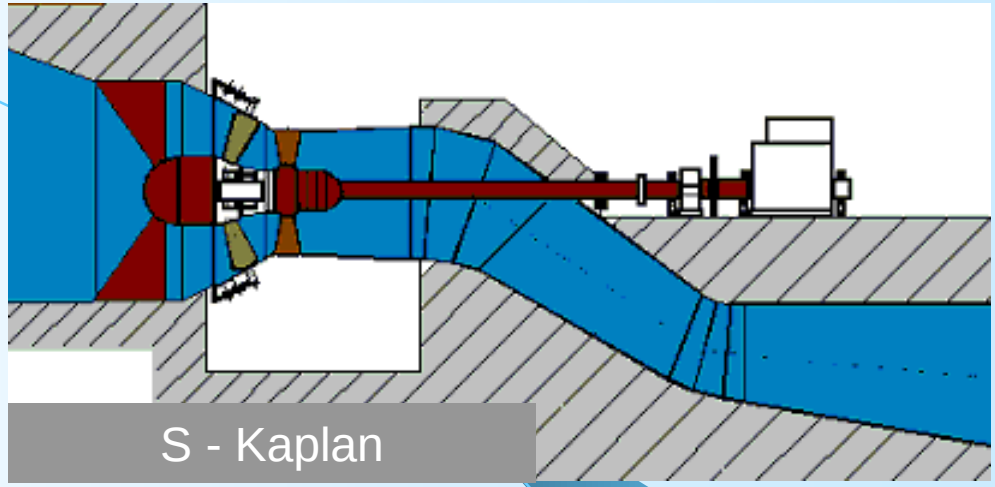


semi-Kaplan w odwróconym lewarze

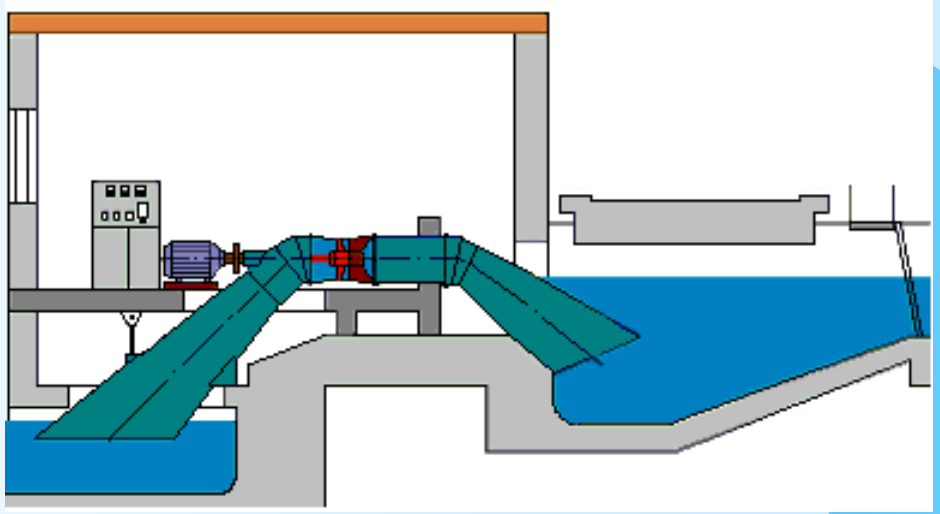


semi-Kaplan w lewarze jednokolanowym



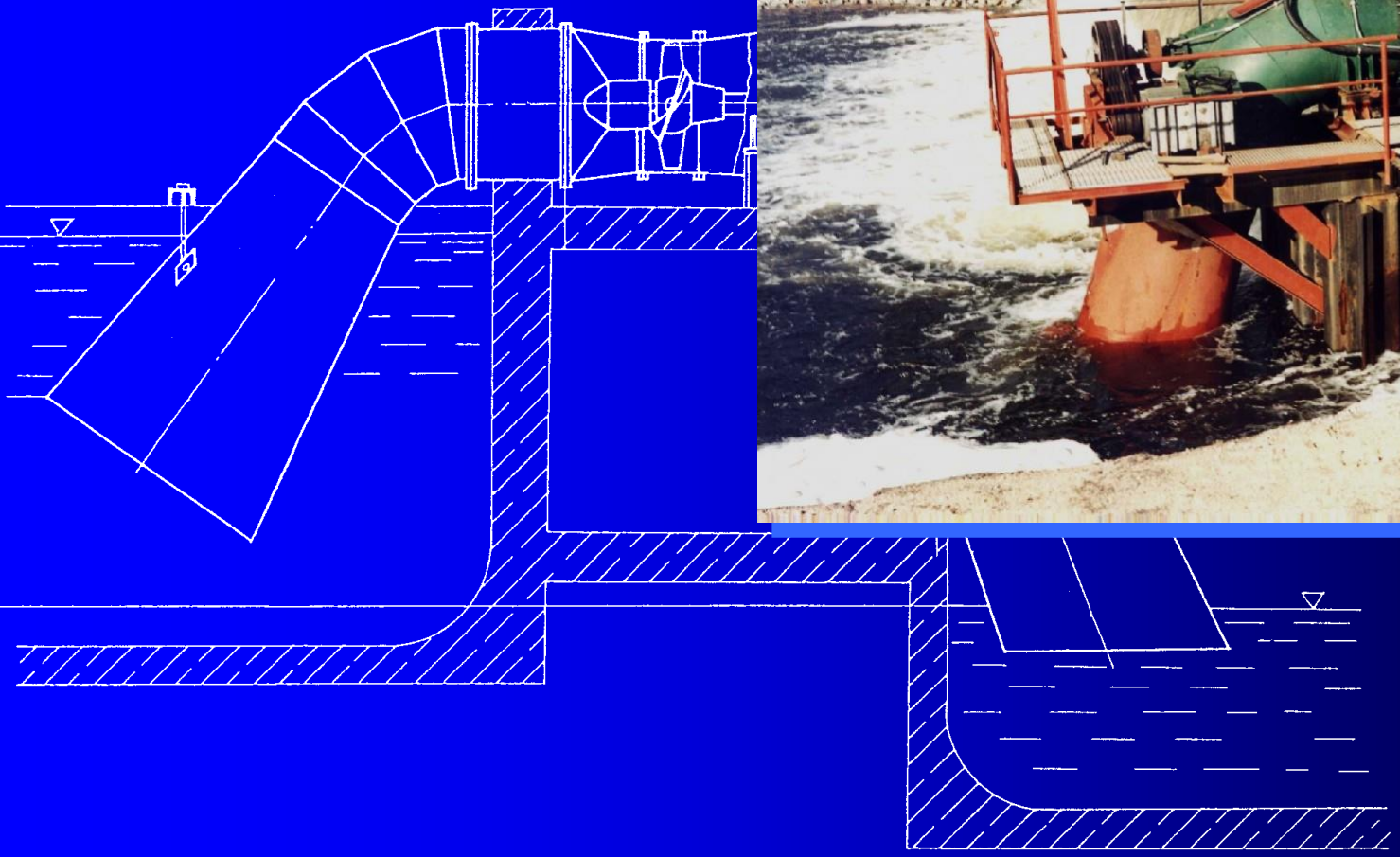


lewarowa turbina śmigłowa pracująca ze zmienną szybkością obrotową



Lewarowa -dwukolanowa

Hydrozespoły lewarowe dla mikroelektrowni wodnych



MEW Jaracz
TSP 1000
***H* = 2.3 m,**
P_{shaft} = 60 kW

Turbiny TSP konstrukcji IMP PAN

KONKLUZJA

Energetyka wodna jest od dawna dojrzałą technologią pozyskiwania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Dokonujący się nadal postęp techniczny w tej dziedzinie służy

- *poprawie sprawności przemian energetycznych*
- *rozszerzeniu zakresu i jakości usług systemowych*
- *sięganiu do zasobów, których wykorzystanie uznawano dotąd za ekonomicznie nieuzasadnione lub niemożliwe (energia fal morskich),*
- *ograniczeniu negatywnych oddziaływań na środowisko naturalne i tworzeniu warunków sprzyjających równowadze ekologicznej, przyjaznej dla człowieka i jego otoczenia*