

# Bangunan Tenaga Air: Pendahuluan

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan  
Fakultas Teknik UGM

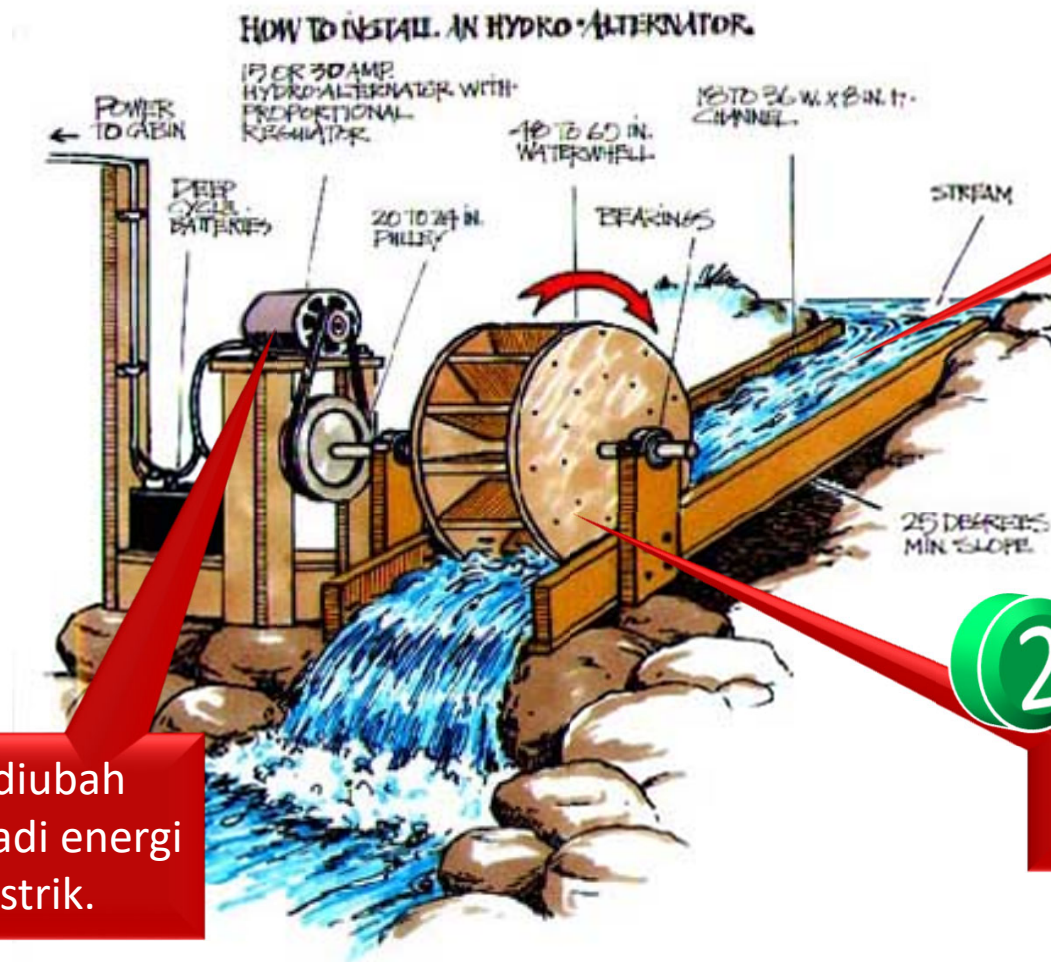
oleh

Djoko Luknanto

oleh Djoko Luknanto

# KONSEP PERUBAHAN ENERGI DALAM BTA

# Energi Air-Energi Putar-Energi Listrik



1 Energi air karena beda tinggi hulu-hilir

2 ... diubah menjadi energi putar ...

3 ... diubah menjadi energi listrik.

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan FT UGM

oleh Djoko Luknanto

# SEJARAH BANGUNAN TENAGA AIR

# Sejarah Bangunan Tenaga Air

Sejarah pemakaian tenaga air dibagi dalam 5 tahap sebagai berikut:

1. Kira-kira 2000 tahun yang lalu orang telah menggunakan tenaga air untuk kincir air, berdasarkan tenaga kinetik  $E = \frac{1}{2} mV^2$ , sampai kira-kira pertengahan abad ke 18 (1760), dimana timbul revolusi industri yang pertama.
2. Setelah orang dapat menggunakan tenaga uap sebagai bahan penggerak tenaga, maka tenaga uap merupakan tenaga yang terbanyak dipakai (populer).
3. Setelah tenaga air, tenaga uap dan tenaga minyak dapat diubah menjadi tenaga listrik, apalagi setelah orang dapat mengalirkan tenaga listrik dengan kawat bertegangan tinggi jarak jauh, maka tenaga air menjadi sumber tenaga yang populer terutama di Norwegia, Swedia, Jerman, Australia, Swiss, Italia, Jepang, dll.
4. Setelah Perang Dunia I, dunia mengalami krisis ekonomi yang besar, maka tenaga uap dan minyak merupakan tenaga yang lebih sukar digunakan.
5. Sekarang di beberapa negara yang telah maju, telah mulai diusahakan sumber tenaga nuklir, bahkan juga tenaga matahari dan angin.



Kincir Air yaitu mesin yang mengubah energi air (aliran) menjadi energi putar.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_wheel](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel)



## Kincir Air

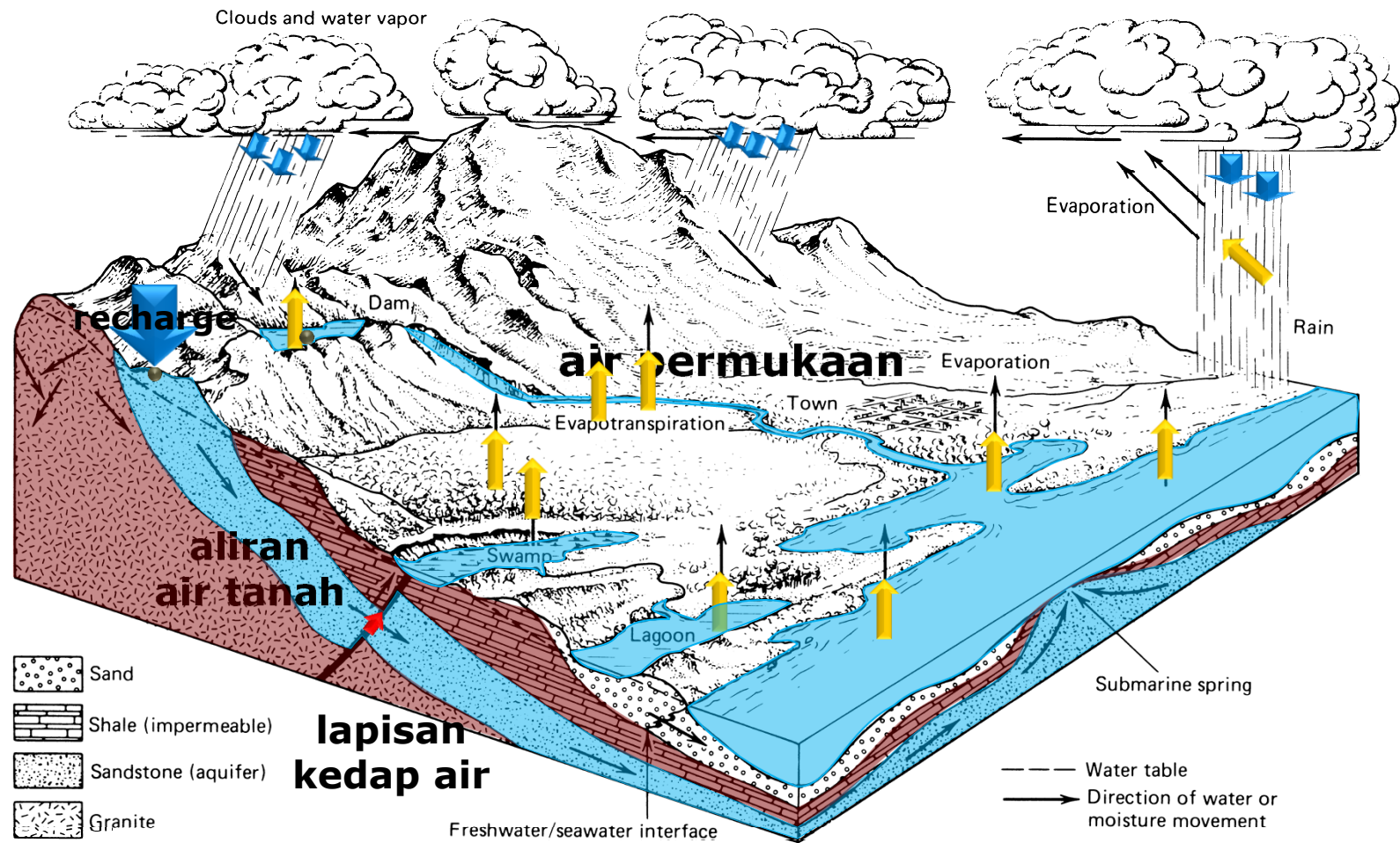
<https://en.wikipedia.org/wiki/Watermill>

# Renungan Bangunan Tenaga Air

- Bangunan Tenaga Air (BTA)/Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan ilmu yang sudah mapan dan berumur tua sekali.
- Kebanyakan PLTA di dunia merupakan proyek serbaguna yang melayani berbagai tujuan, oleh karena itu pada umumnya proyek PLTA berskala besar. Dibutuhkan pengetahuan dari pelbagai bidang ilmu untuk menguasainya.
- Karena telah berumur tua, maka banyak ahli yang menguasai PLTA secara menyeluruh sudah meninggal dan karyanya tidak diterbitkan lagi. Tidak banyak perguruan tinggi yang mengajarkan PLTA secara komprehensif lagi.
- Walaupun lebih ramah lingkungan dan terbarukan, namun BTA/PLTA masih kalah jauh pembangkitan energinya dibandingkan tenaga nuklir.

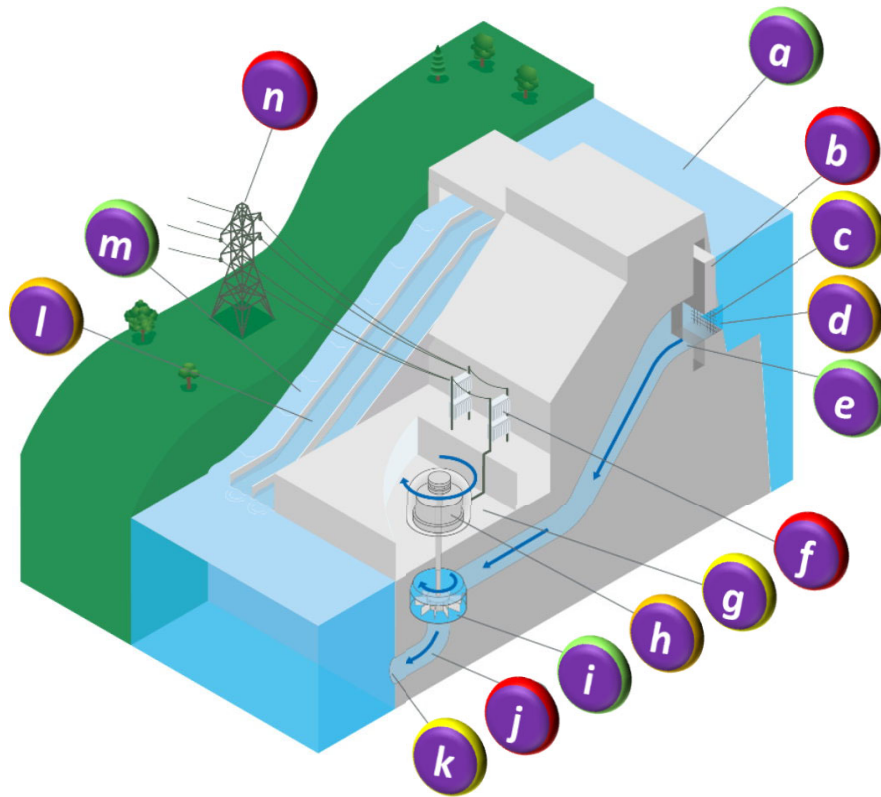


# Tenaga Air Terbarukan - Siklus Hidrologi



Gambar dari Groundwater Hydrology 2ed, 1980, Keith Todd halaman 15

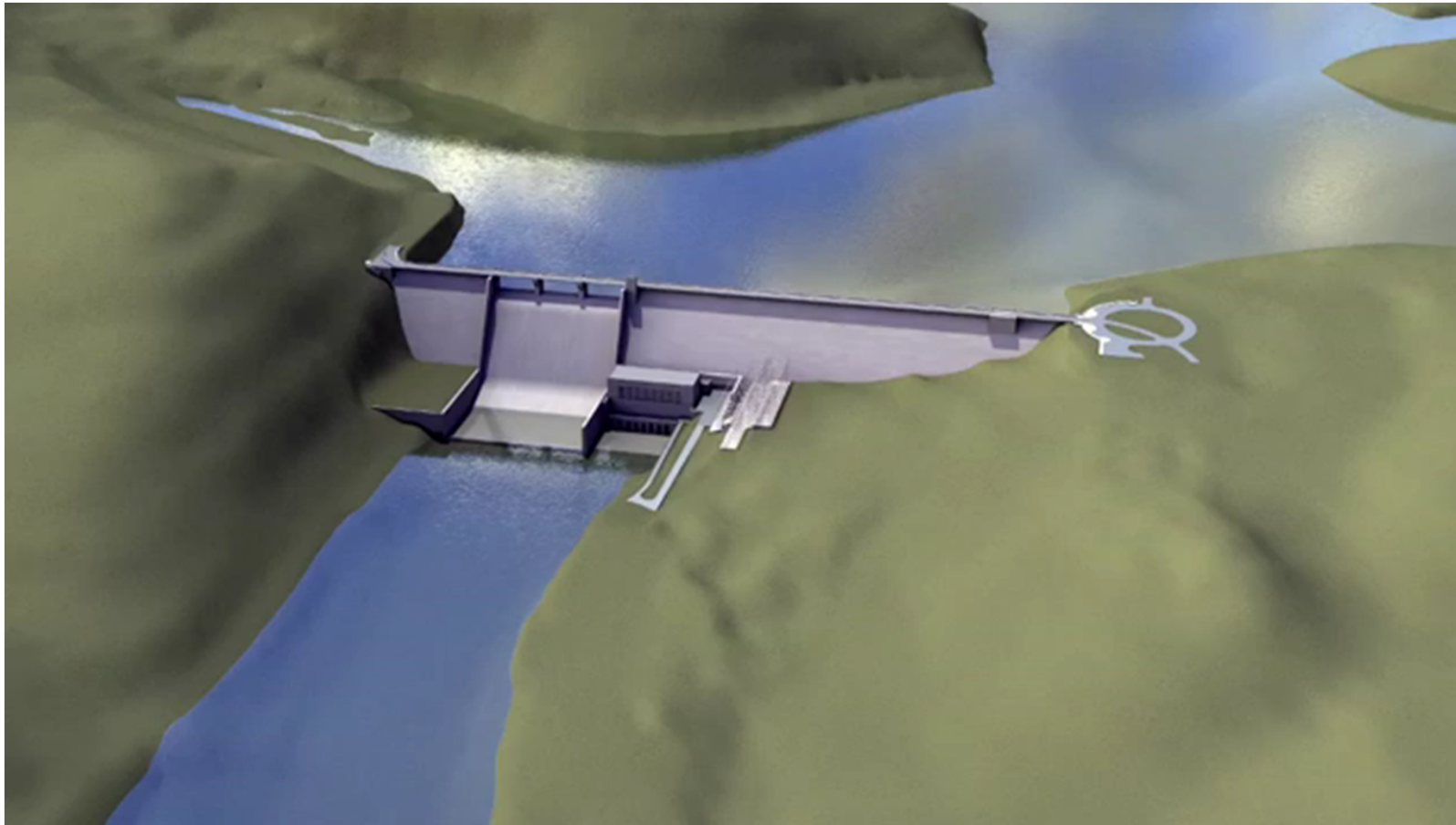
# IHA: Cara Kerja BTA



- a. Waduk
- b. Pintu intake
- c. Penyaring sampah
- d. Bangunan pengambilan
- e. Pipa pesat
- f. Transformator
- g. Rumah turbin
- h. Generator
- i. Turbin
- j. Pipa isap
- k. Outlet
- l. Pelimpah
- m. Tangga ikan
- n. Jaringan pembawa

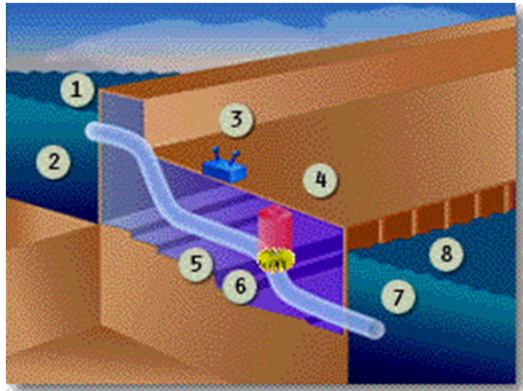
<https://www.hydropower.org/types-of-hydropower>

# TVA: Cara Kerja BTA



<https://www.tva.com/energy/our-power-system/hydroelectric/how-hydroelectric-power-works>

# How Hydroelectric Generation Works



1. Forebay
2. Intake
3. Transformer
4. Generator
5. Penstock
6. Turbine
7. Draft tube
8. Tailrace

- In very simple terms, electricity is produced by spinning electro-magnets inside a coil of wire in a generator to create a flow of electrons. To keep the electro-magnets spinning, a hydroelectric station uses falling water. Here is how it works:
- Most hydroelectric stations use either the natural "drop" of the river or build a dam across the river to raise the water level and provide the drop needed to create a driving force. Water at the higher level (the forebay) goes through the intake into a pipe, called a penstock, which carries it down to the turbine. The turbine is a type of water wheel.
  - The turbine is connected to a generator. When the turbine is set in motion, it causes the generator to rotate, and electricity is produced. The falling water, having served its purpose, exits the generating station through the draft tube and the tailrace where it rejoins the main stream of the river.

# Tujuan Proyek Serbaguna

1. Pembangkit tenaga listrik (murah)
2. Pengendalian/pencegahan banjir
3. Pengairan
4. Kebutuhan air minum/air baku
5. Perikanan darat
6. Lalulintas air
7. Pengendalian kadar garam dan sedimen/endapan
8. Rekreasi, pariwisata dan industri
9. dlsb.

# Contoh Proyek Serbaguna

- Indonesia: Waduk di DPS Citarum: Saguling, Cirata dan Jatiluhur (150 MW), Waduk Karangates (105 MW), Waduk Asahan (604 MW), Waduk Riam Kanan (20 MW)
- Ethiopia: *Grand Ethiopian Renaissance Dam* (GERD) di hulu Sungai Nil, menimbulkan kontroversi karena sungai Nil melewati tiga negara.
- Sudan: Dam Merowe di Sungai Nil bagian tengah.
- Mesir: Bendungan Aswan (*Nile Project*) di hilir Sungai Nil
- USA: Tennessee River Scheme (Tennessee Valley Authority)
- Uni Sovyet: Dam Sayano-Shushenskaya di Sungai Yenisei
- India: Damodar Valley Corporation (DVC)
- Australia: Snowy Mountain River Scheme
- Thailand: Dam Bhumibol
- Ghana: Volta River Project

# RRC: *Three Gorges Dam*



1. BTA (Rumah Turbin)
2. BTA (Rumah Turbin)
3. Bangunan Pelimpah
4. Saluran Navigasi Kapal
5. <https://youtu.be/b8cCsUBYSkw>

# Daftar Isi

## A. Sejarah Bangunan Tenaga Air

## B. Konsep BTA

1. [Pendahuluan](#) (4,0MB)
2. [Efisiensi Hidraulika](#) (1,01MB)
3. [Diameter Ekonomis](#) (0,7MB)
4. [Kolam Tando](#) (3,1MB)
5. [Diagram Beban Harian](#) (1,0MB)
6. [Garis Masa-Debit](#) (1,47MB)
7. [Rippl Diagram](#) (0,98MB)
8. [Bendungan](#) (1,14MB)
9. [Pipa Pesat](#) (2,56MB)
10. [Angker Blok](#) (1,44MB)
11. [Kolam Pasir](#) (0,7MB)
12. [Kisi Sampah](#) (1,12MB)
13. [Turbin Air](#) (1,70MB)
  - [Lengkap](#) (9,24MB) ← Gabungan dari Topik 1 sampai dengan 13
  - [Gambar BTA](#) (5,7MB pdf) ← ilustrasi/gambar BTA untuk menjelaskan Topik 1-13



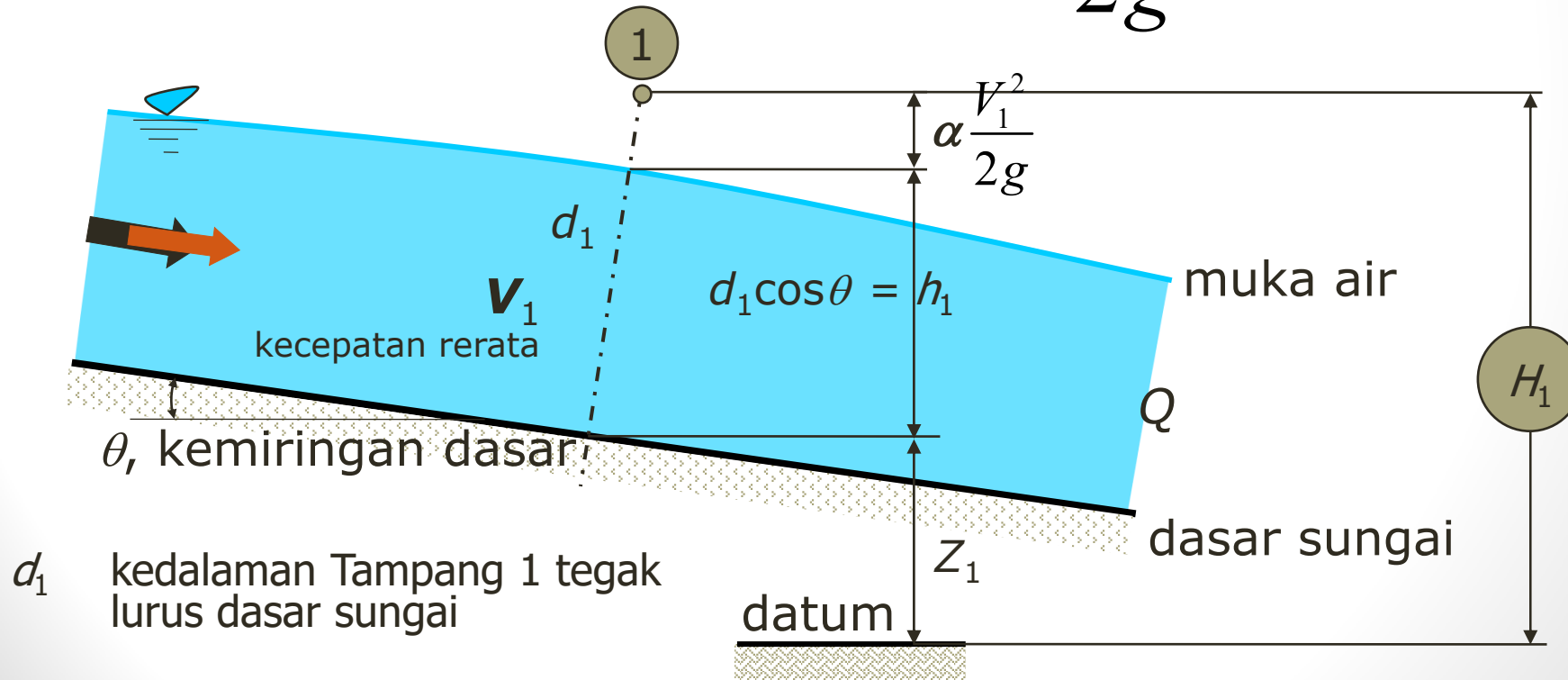
# BTA Daring – (*online*, berbasis web)

- Seluruh topik dalam tayangan ini beserta artikel tambahan dapat diakses via <http://luk.staff.ugm.ac.id/bta/>
- Setiap tautan lokal “<file:///D:/My%20Stuffs/>” dalam tayangan ini dapat diubah menjadi “<http://>” untuk mengacu ke artikel yang sama di internet.
- Kebanyakan artikel dalam BTA Daring dapat diakses secara bebas, namun beberapa lainnya karena alasan keamanan dan kekhususan (antara lain hanya untuk mahasiswa pengikut kuliah), membutuhkan *username* dan *password* untuk melihat/ mengunduhnya.
- *Username:Password*
  - *mhs:jtsftugm*
  - *mahasiswa:jtslftugm*

# Konsep energi pada tampang

- Energi pada Tampang 1:

$$H_1 = Z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha \frac{V_1^2}{2g}$$



# Konsep energi pada saluran

- Energi pada Tampang  $i$

$$H_i = Z_i + d_i \cos \theta + \alpha \frac{V_i^2}{2g}$$

dengan

$H$  : tinggi tenaga total (m)

$Z$  : elevasi dasar saluran (m)

$\theta$  : kemiringan dasar saluran (rad,  $^\circ$ )

$d$  : kedalaman saluran, diukur tegak lurus dasar saluran (m)

$V$  : kecepatan rerata saluran (m/d)

$\alpha$  : koefisien koreksi tenaga kinetik

$g$  : percepatan gravitasi (m/d<sup>2</sup>)

$V^2/2g$  : tinggi kecepatan (m)

# Konsep energi pada saluran

- Jika kemiringan saluran kecil, maka  $\theta \approx 0$ , maka  $d \approx h$  sehingga energi pada Tampang  $i$

$$H_i = Z_i + h_i + \alpha \frac{V_i^2}{2g}$$

dengan

$H$  : tinggi tenaga total (m)

$Z$  : elevasi dasar (m)

$\theta$  : kemiringan dasar saluran (rad,  $^\circ$ )

$h$  : kedalaman saluran diukur vertikal (m)

$V$  : kecepatan rerata saluran (m/d)

$\alpha$  : koefisien koreksi tenaga kinetik

$g$  : percepatan gravitasi (m/d<sup>2</sup>)

$V^2/2g$  : tinggi kecepatan (m)

# Konsep energi pada saluran

- Dalam bentuk yang lebih umum energi pada Tampang  $I$ , dinyatakan dalam rumus Bernoulli sebagai berikut:

$$H_i = Z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \alpha \frac{V_i^2}{2g}$$

dengan

$H$  : tinggi tenaga total (m)

$Z$  : elevasi dasar (m)

$\theta$  : kemiringan dasar saluran (rad,  $^\circ$ )

$p$  : tekanan hidrostatika di dasar saluran (T/m $^2$ )

$V$  : kecepatan rerata saluran (m/d)

$\alpha$  : koefisien koreksi tenaga kinetik

$g$  : percepatan gravitasi (m/d $^2$ )

$V^2/2g$  : tinggi kecepatan (m)

# Bangunan Tenaga Air

- Definisi: BTA adalah bangunan yang mengubah energi air menjadi energi putaran (mekanis), selanjutnya diubah menjadi energi listrik.
- Energi air dinyatakan dalam rumus Bernoulli:

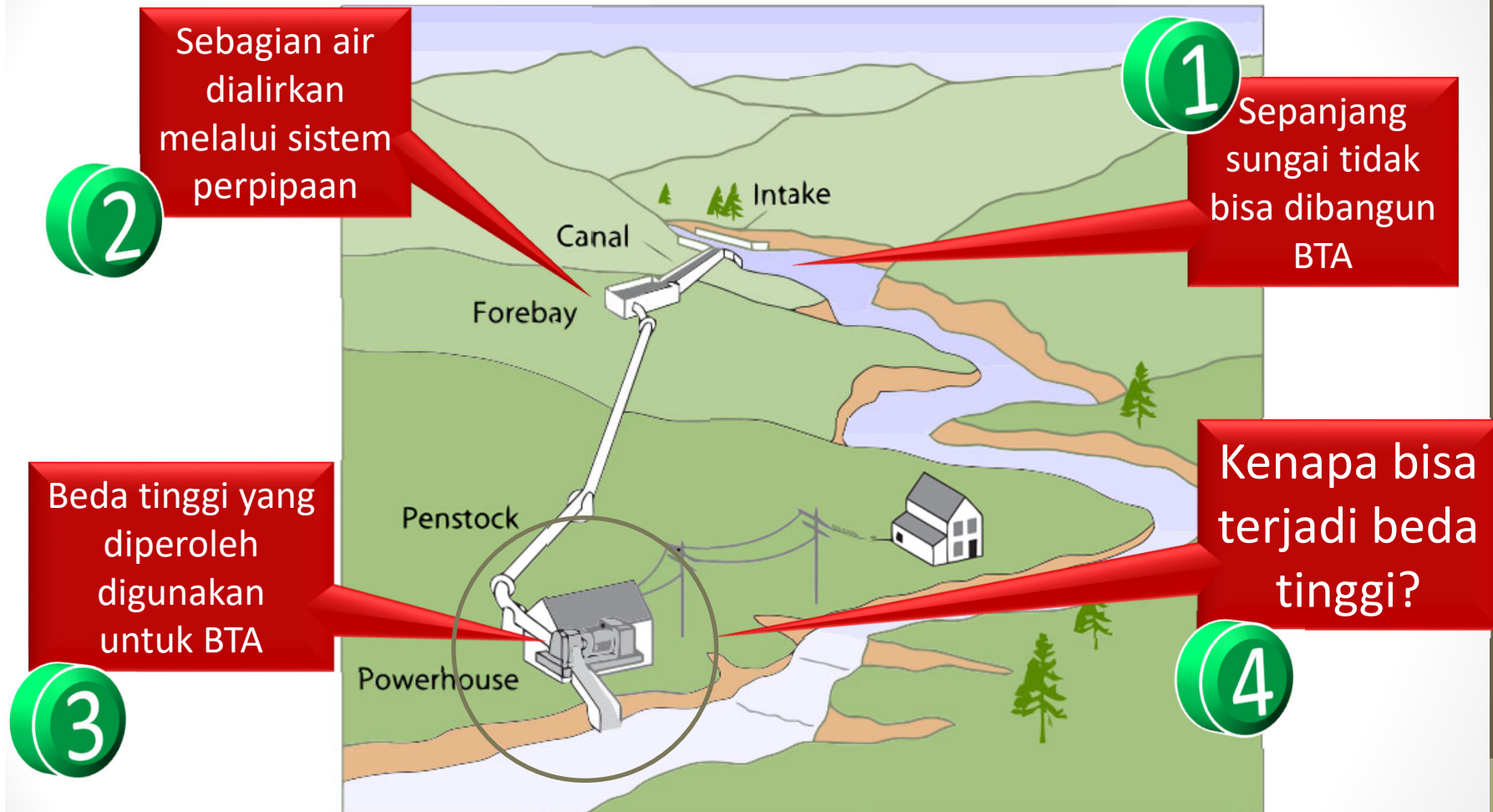
$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

dengan  $E$  adalah energi air total,  $z$  adalah energi potensial (tinggi elevasi),  $\frac{p}{\gamma}$  adalah energi tekanan hidrostatika (tinggi tekanan),  $\frac{V^2}{2g}$  adalah energi kecepatan air (tinggi kecepatan),  $\alpha$  adalah koefisien koreksi energi.

# Dua Parameter Penting Tenaga Air

- Dasar dari tenaga air adalah
  1. Debit ( $Q$ ) yaitu volume air tiap satuan waktu pada sungai atau bangunan tenaga air.
  2. Tinggi energi ( $H$ ) yaitu beda energi sebelum dan sesudah bangunan pembangkit listrik (turbin)
- Kedua parameter ini merupakan variabel yang berubah dengan waktu dan tempat di sungai.
- Kedua parameter ini sangat penting dalam penentuan tenaga air yang dapat diproduksi, maka survei harus dilakukan seteliti mungkin, meliputi jangka yang panjang.

# BTA diperoleh dari Beda Tinggi



In this microhydropower system, water is diverted into the penstock. Some generators can be placed directly into the stream.

Sumber: [https://en.wikipedia.org/wiki/Micro\\_hydro](https://en.wikipedia.org/wiki/Micro_hydro), Zimbabwe



# Jenis-jenis BTA

Terdapat banyak cara untuk klasifikasi jenis BTA, salah satunya adalah pengelompokan menjadi 4 jenis yaitu

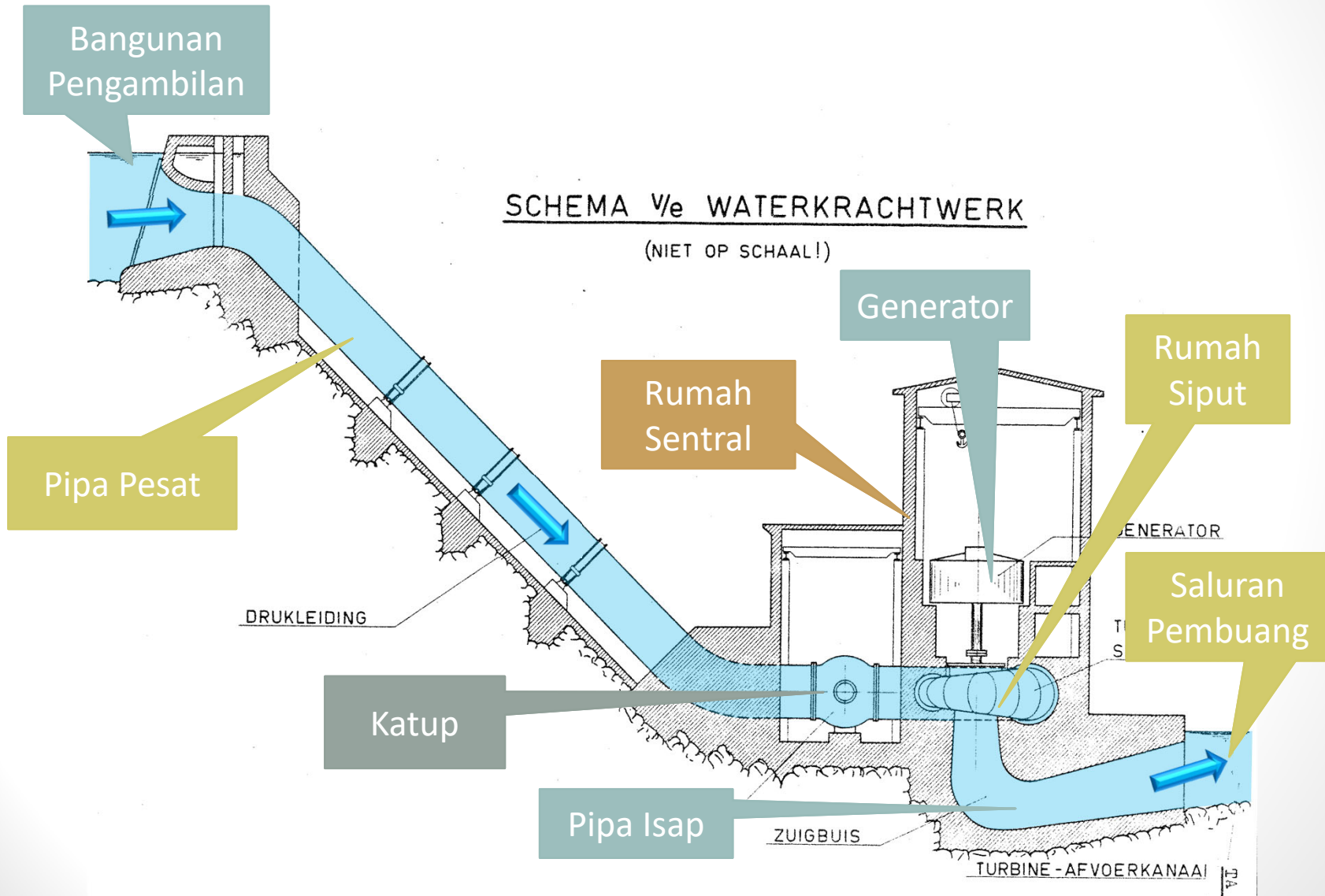
1. **BTA Sungai:** BTA yang terletak langsung atau tidak langsung di sungai atau sekitarnya, biasanya BTA jenis ini tidak mempunyai waduk besar.
2. **BTA Waduk:** BTA yang mengumpulkan air dalam jumlah besar untuk menaikkan energi air dalam sebuah waduk.
3. **BTA Waduk-Pompa:** BTA yang menggunakan 2 waduk air: atas dan bawah yang berfungsi sebagai baterai. Pada saat pasok listrik berlebih air dipompa ke waduk atas, pada saat kebutuhan listrik bertambah, air digunakan untuk menggerakkan turbin.
4. **BTA Lautan:** BTA yang menggunakan gerak ombak maupun pasang-surut laut.



BTA yang terletak langsung atau tidak langsung di sungai atau sekitarnya, biasanya BTA jenis ini tidak mempunyai waduk besar

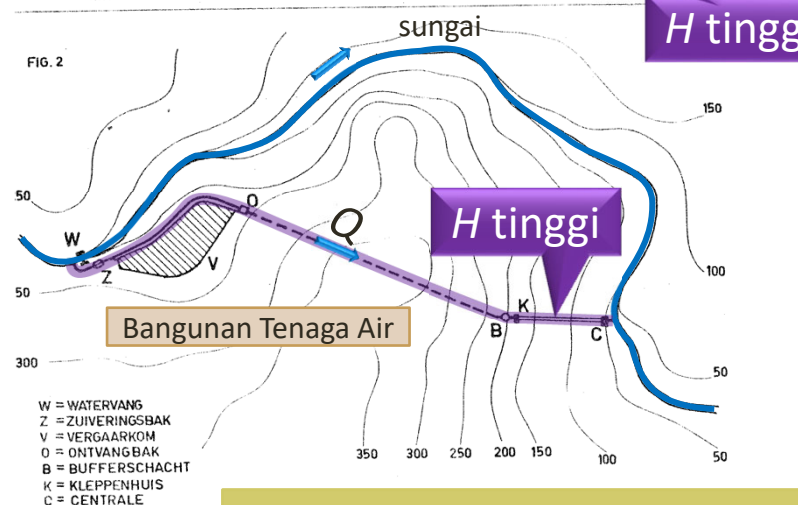
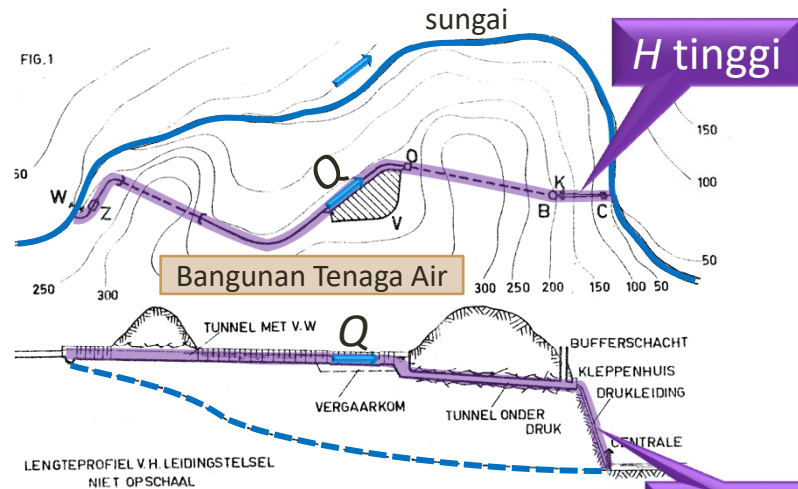
## BTA SUNGAI

# TA 1: Skema BTA (tanpa skala)



# TA 7: Skema BTA dengan KTH

FIG. 1  
VOORBEELDEN VAN DE SITUATIE VAN EEN VERGAARKOM VAN  
EEN AFTAPWERK OP GROTE AFSTAND VAN HET BEGIN VAN DE DRUKLEIDING.

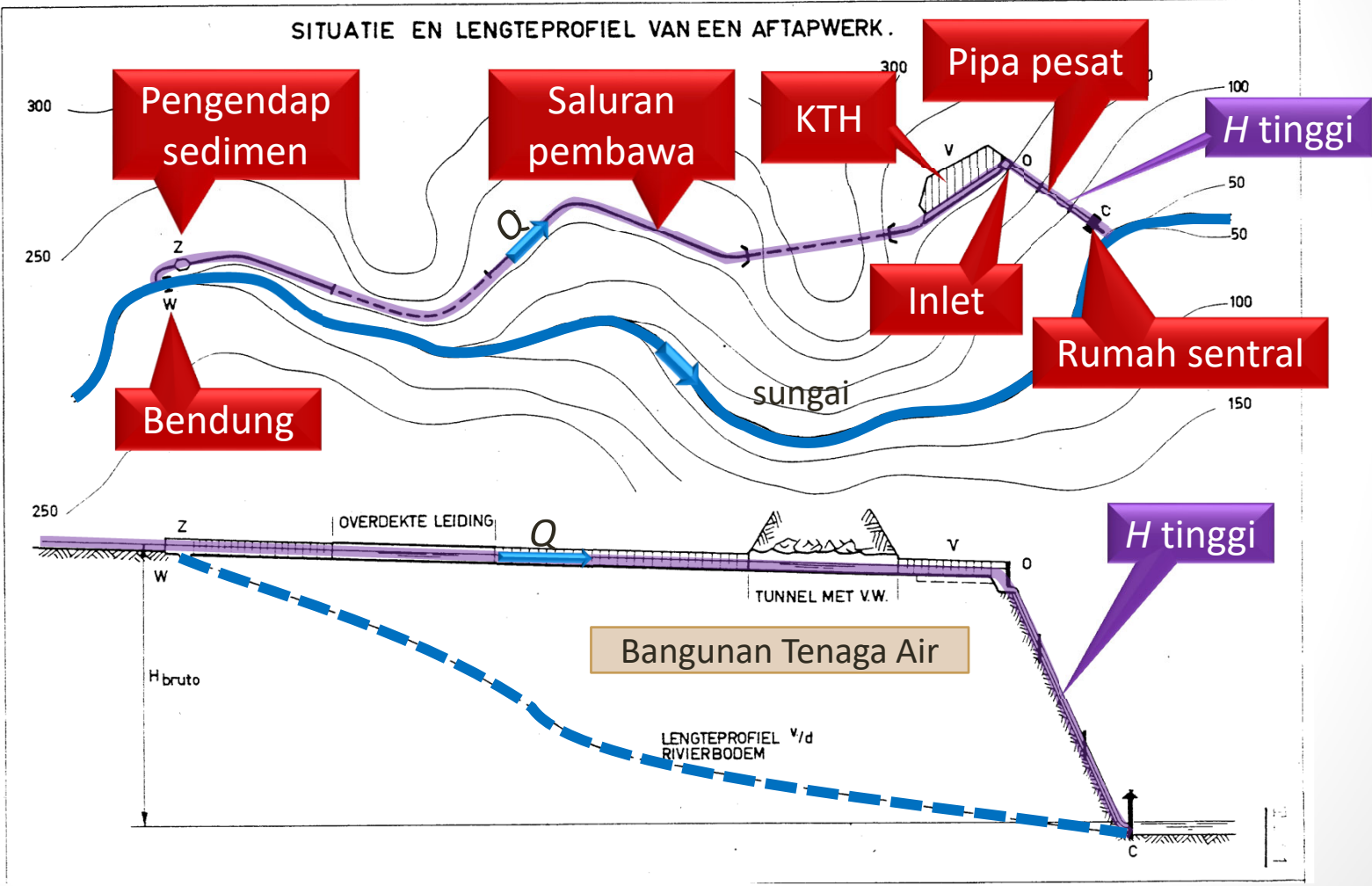


W = WATERVANG  
Z = ZUIVERINGSBAK  
V = VERGAARKOM  
O = ONTVANGBAK  
B = BUFFERSCHACHT  
K = KLEPPENHUIS  
C = CENTRALE

- **Bagian Atas:** Skema Bangunan Tenaga Air (BTA) dengan Kolam Tando Harian (KTH) tepat sebelum masuk ke terowong air.
- **Bagian Bawah:** Skema BTA dengan KTH setelah bangunan pengambilan.
- **Keterangan:** **W:** bangunan pengambilan (bendung), **Z:** bangunan pengendap pasir/sedimen, **V:** KTH, **O:** inlet, **OB:** terowong air (baik bertekanan atau tidak), **K:** Katup (pintu air), **B:** Pendatar Tekan, **BC:** Pipa Pesat, **C:** Rumah Sentral/Turbin.
- Tautan: <http://luk.staff.ugm.ac.id/bta/TA/TA07.html> atau <http://luk.tsipil.ugm.ac.id/bta/TA/TA07.html>

Kedua jenis BTA ini membutuhkan Pendatar Tekan (B), karena panjangnya Pipa Pesat (BC).

# BTA dengan Bendung – TA 21

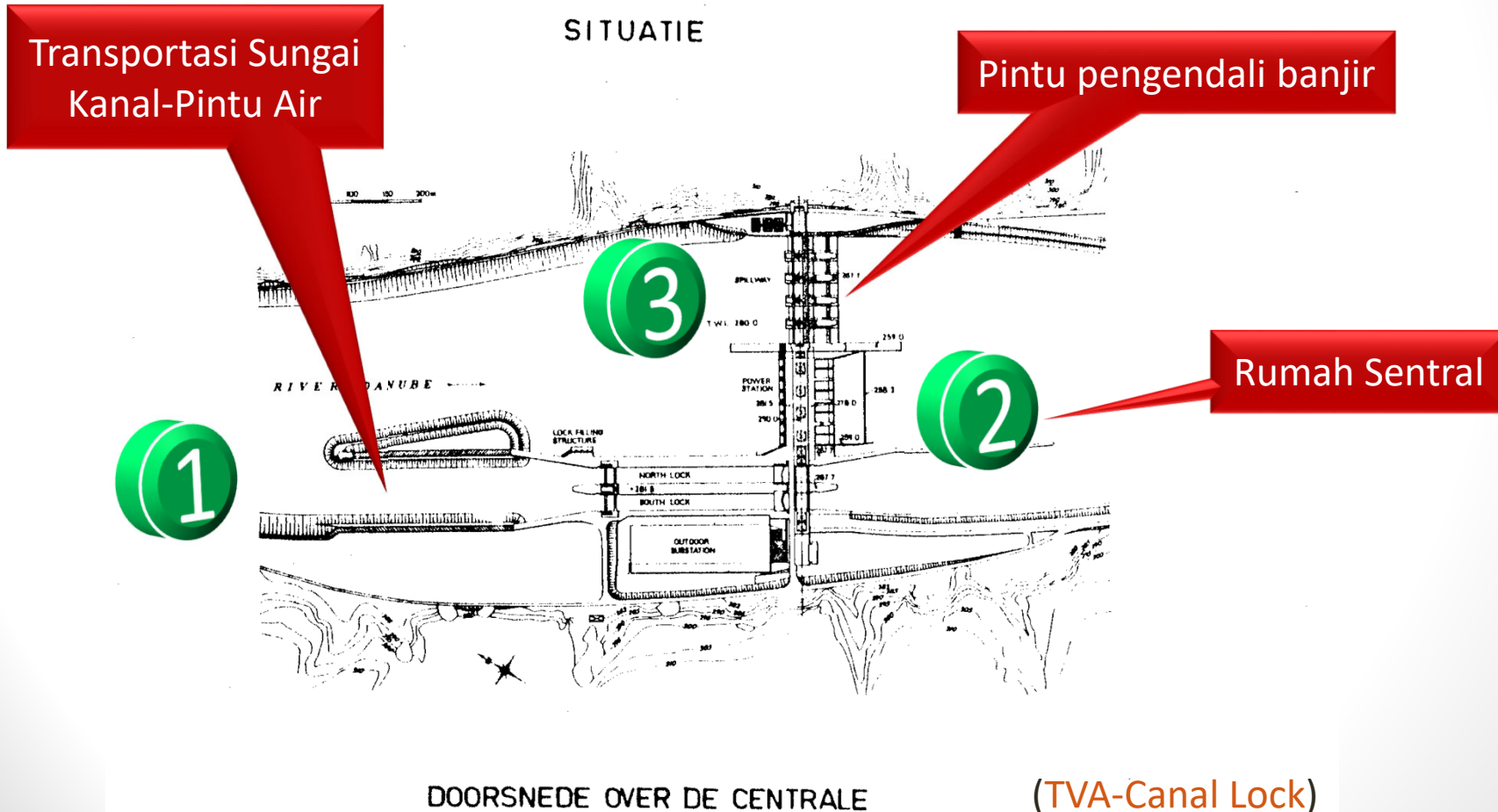


# BTA di tengah sungai – TA 19

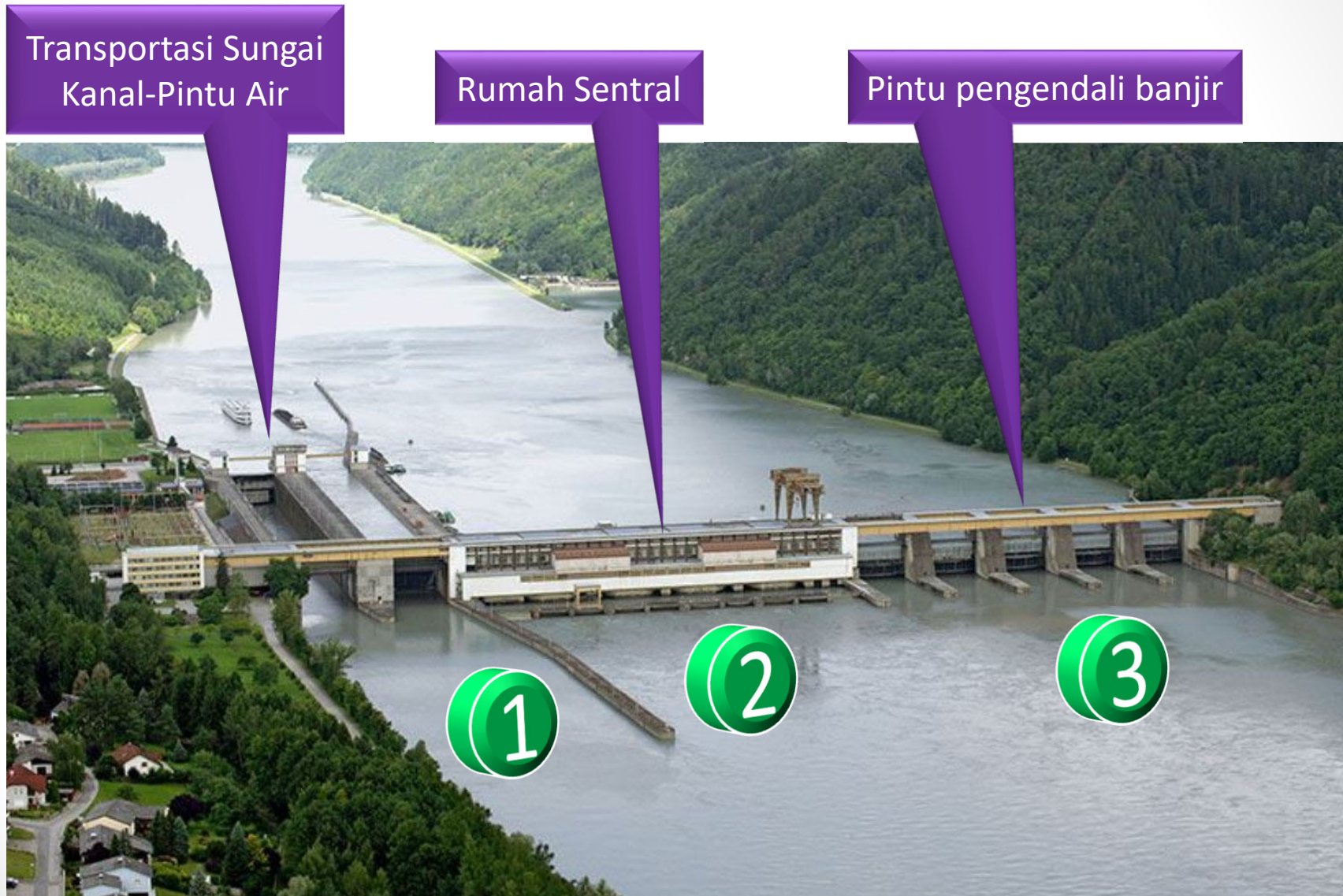
## Tata Letak BTA Aschach

VOORBEELD VAN EEN RIVIER-WATERKRACHTWERK  
(W.K.W. ASCHACH IN DE DONAU, OOSTENRIJK)

TA 19



# BTA Aschach di Sungai Danube



# BTA di tengah sungai – TA 19

## Potongan Lintang Rumah Sentral Aschach

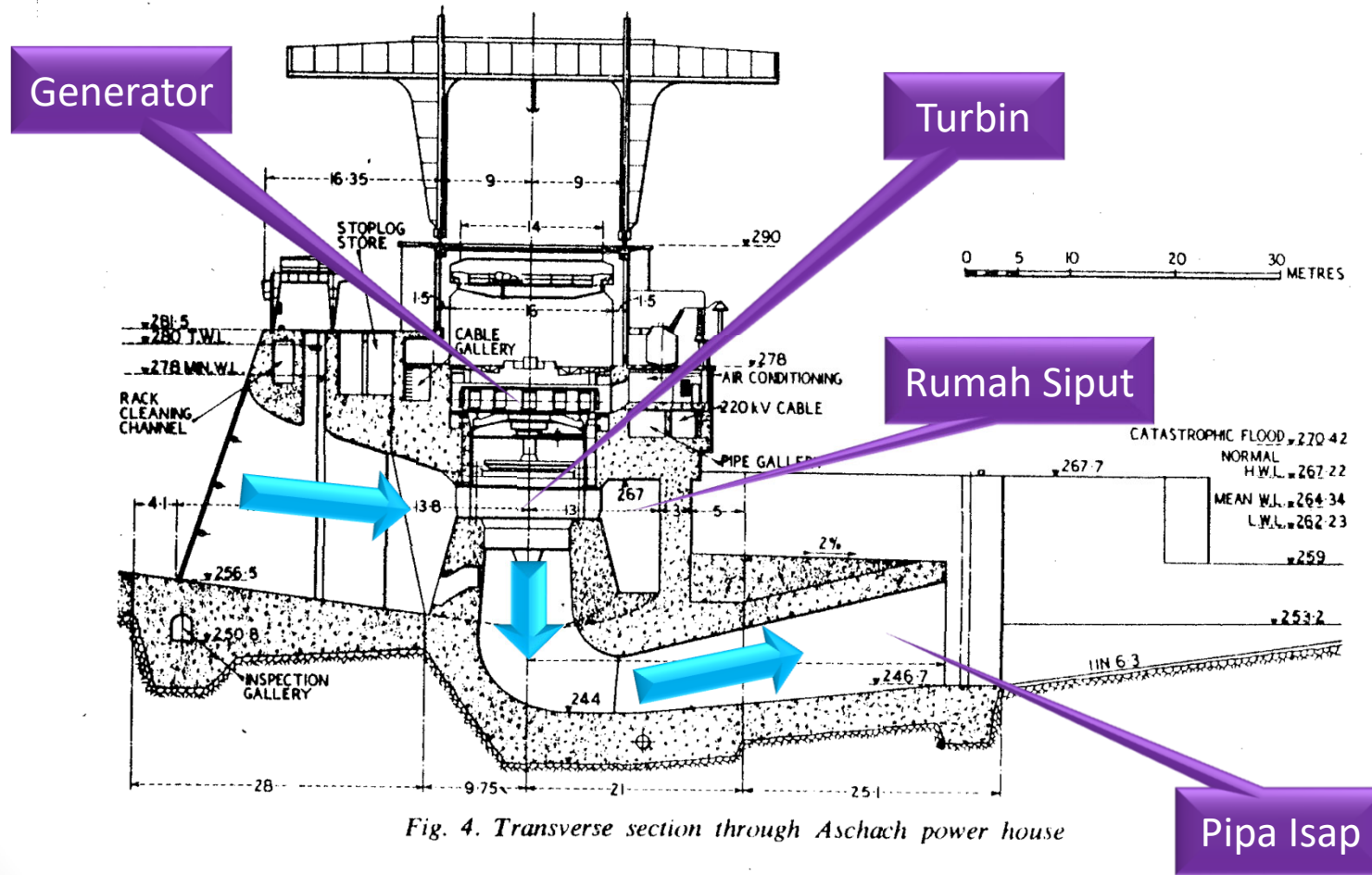


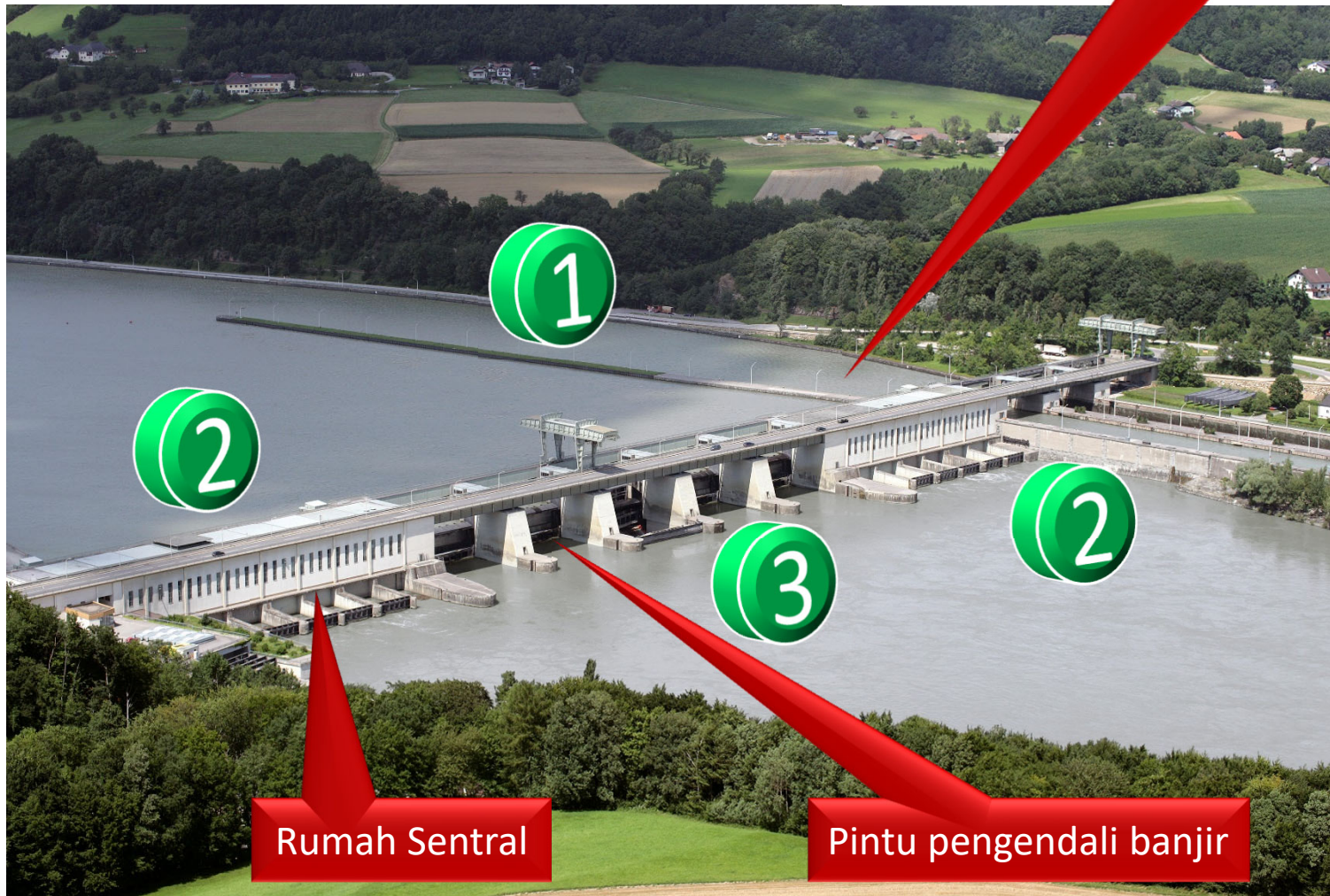
Fig. 4. Transverse section through Aschach power house

uit: WATER POWER, aug. 1959



# BTA di tengah sungai Danube Ybbs-Persenbeug, Austria

Transportasi Sungai  
Kanal-Pintu Air



Rumah Sentral

Pintu pengendali banjir

# BTA di tengah sungai Danube Ybbs-Persenbeug, Austria

Rumah Sentral



Generator

# BTA di tengah sungai Danube Freudenau, Vienna

Transportasi Sungai  
Kanal-Pintu Air



1

<https://www.verbund.com/en-at/about-verbund/visitors-centre-freudenau>

Rumah Sentral

Pintu pengendali banjir

# BTA di tengah sungai Danube Freudenau, Vienna

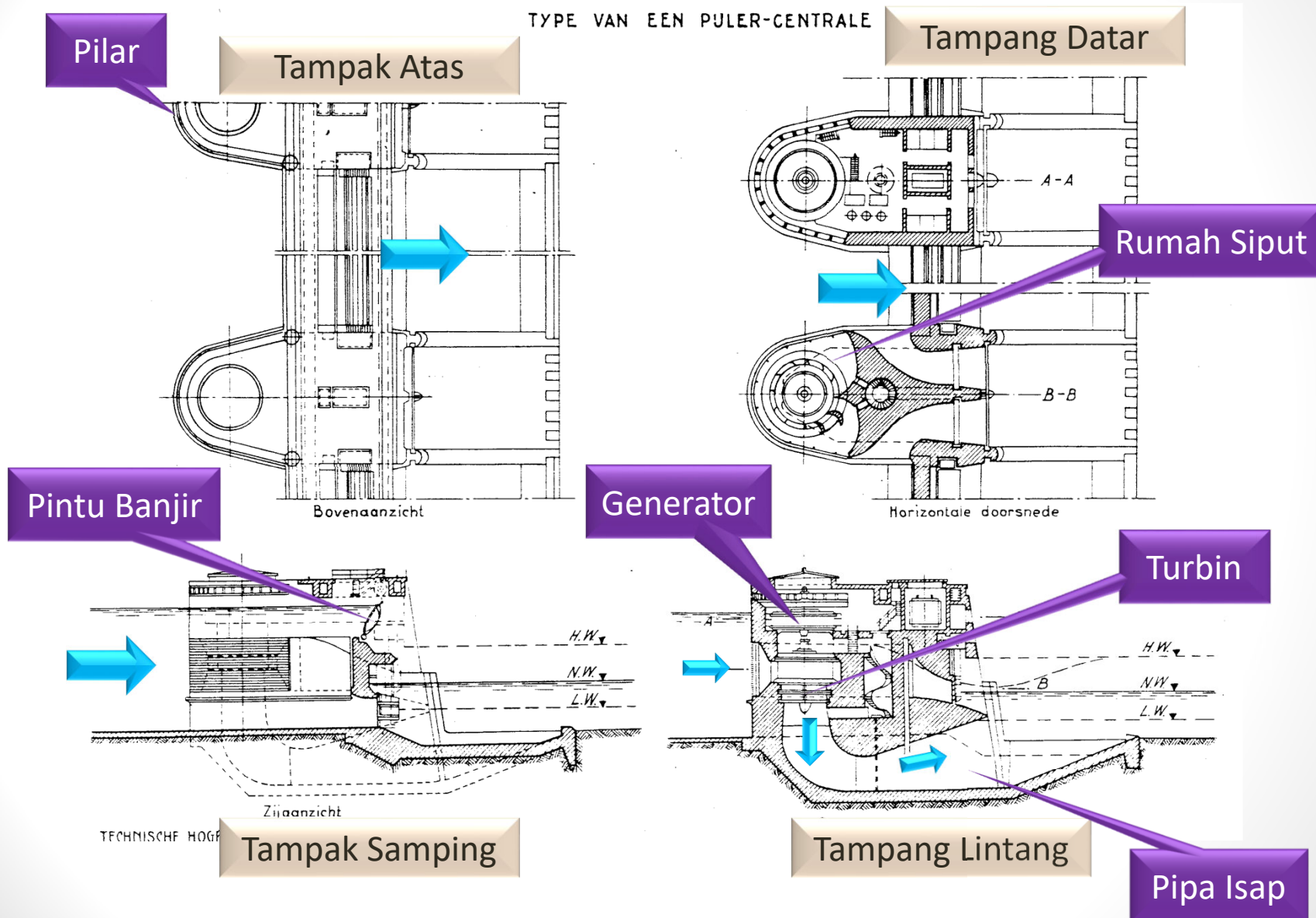
Transportasi Sungai  
Kanal-Pintu Air

Rumah Sentral

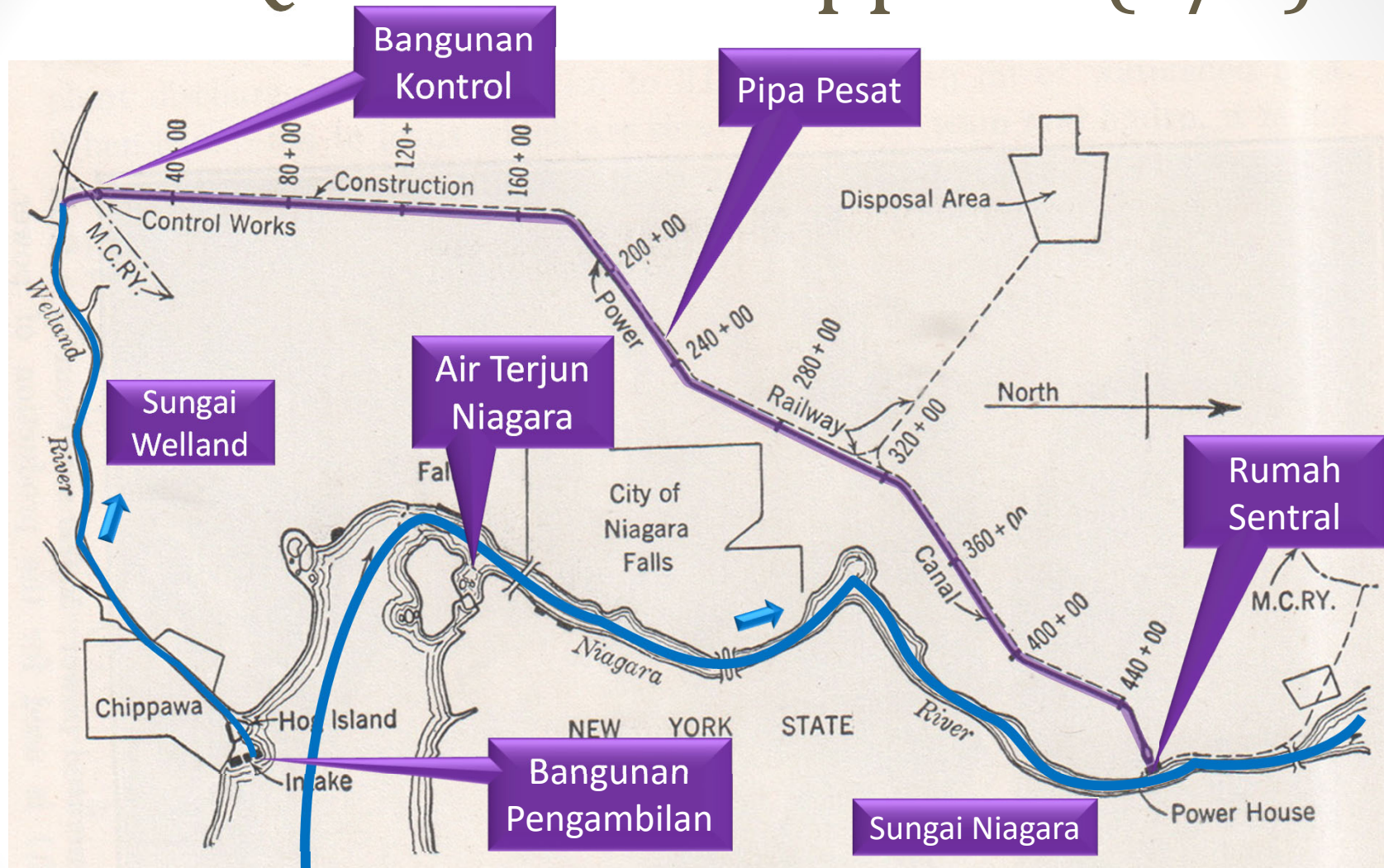


[https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk\\_Freudenau](https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk_Freudenau)

# BTA pada pilar – TA 20



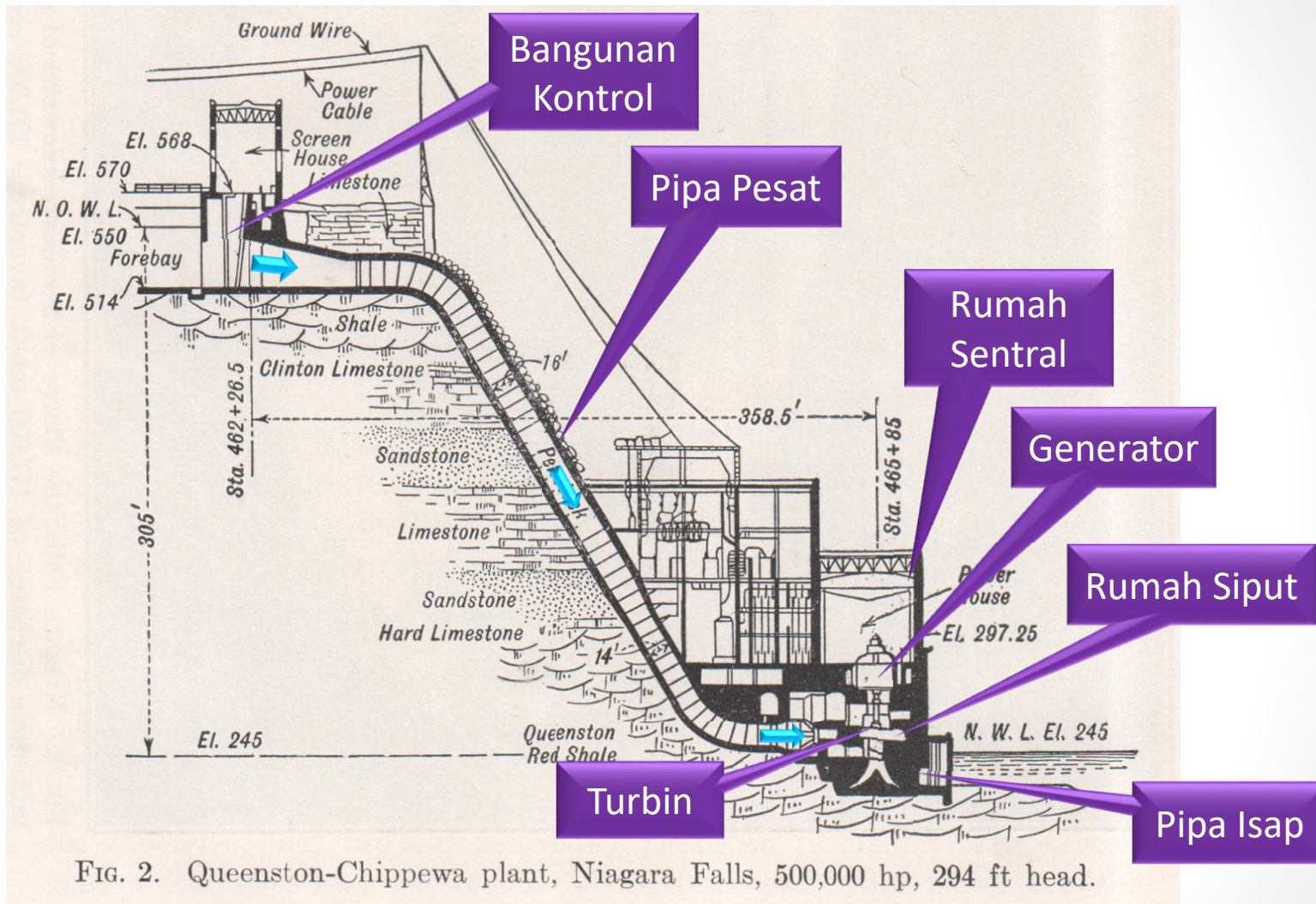
# BTA Queenston-Chippewa (1/3)



Berubah nama menjadi Sir Adam Beck Hydroelectric Generating Stations

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

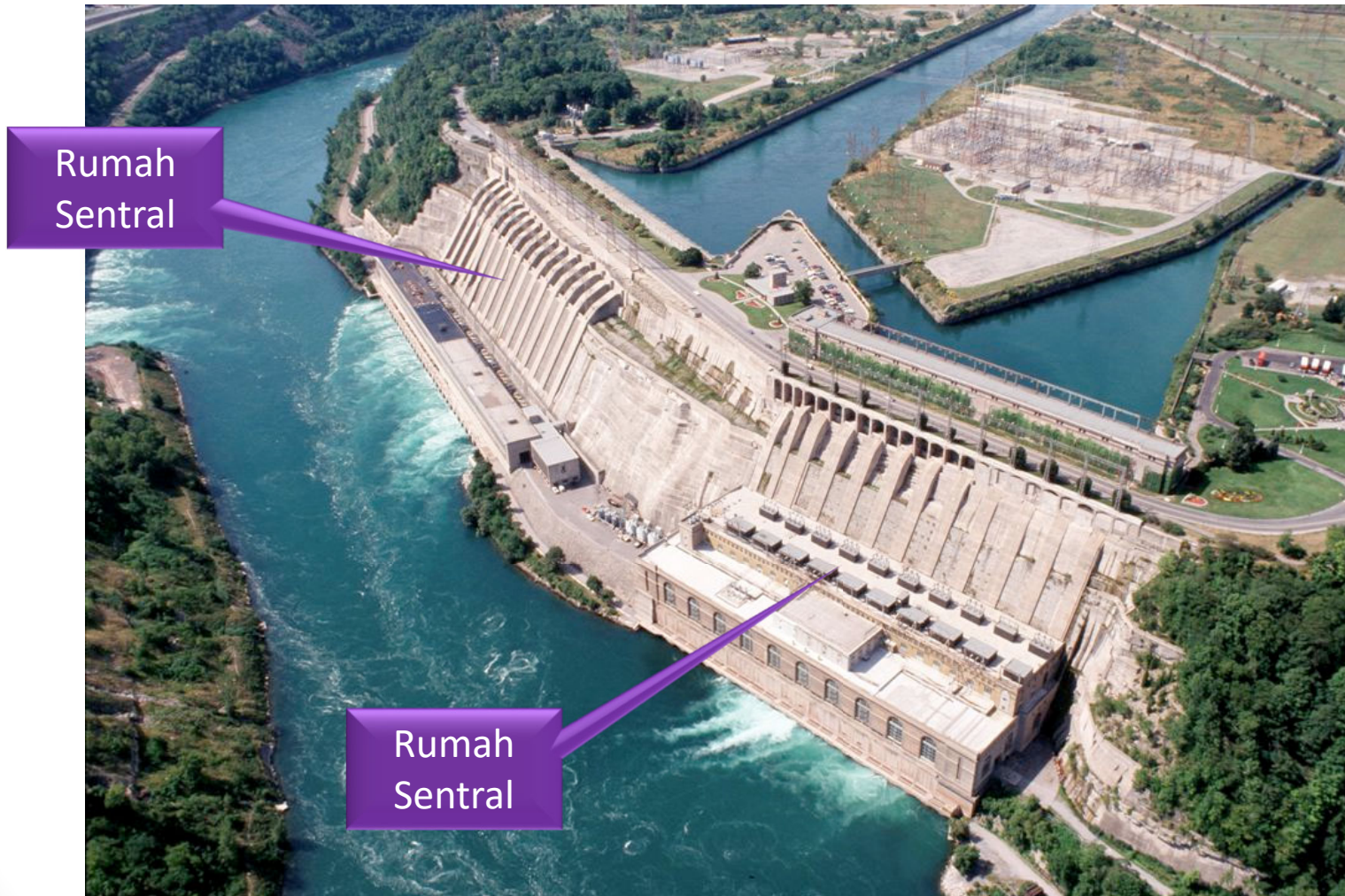
# BTA Queenston-Chippewa (2/3)



Berubah nama menjadi Sir Adam Beck Hydroelectric Generating Stations

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# BTA Queenston-Chippewa (3/3)



Sir Adam Beck Hydroelectric Generating Stations



# BTA Schoelkoff yang runtuh

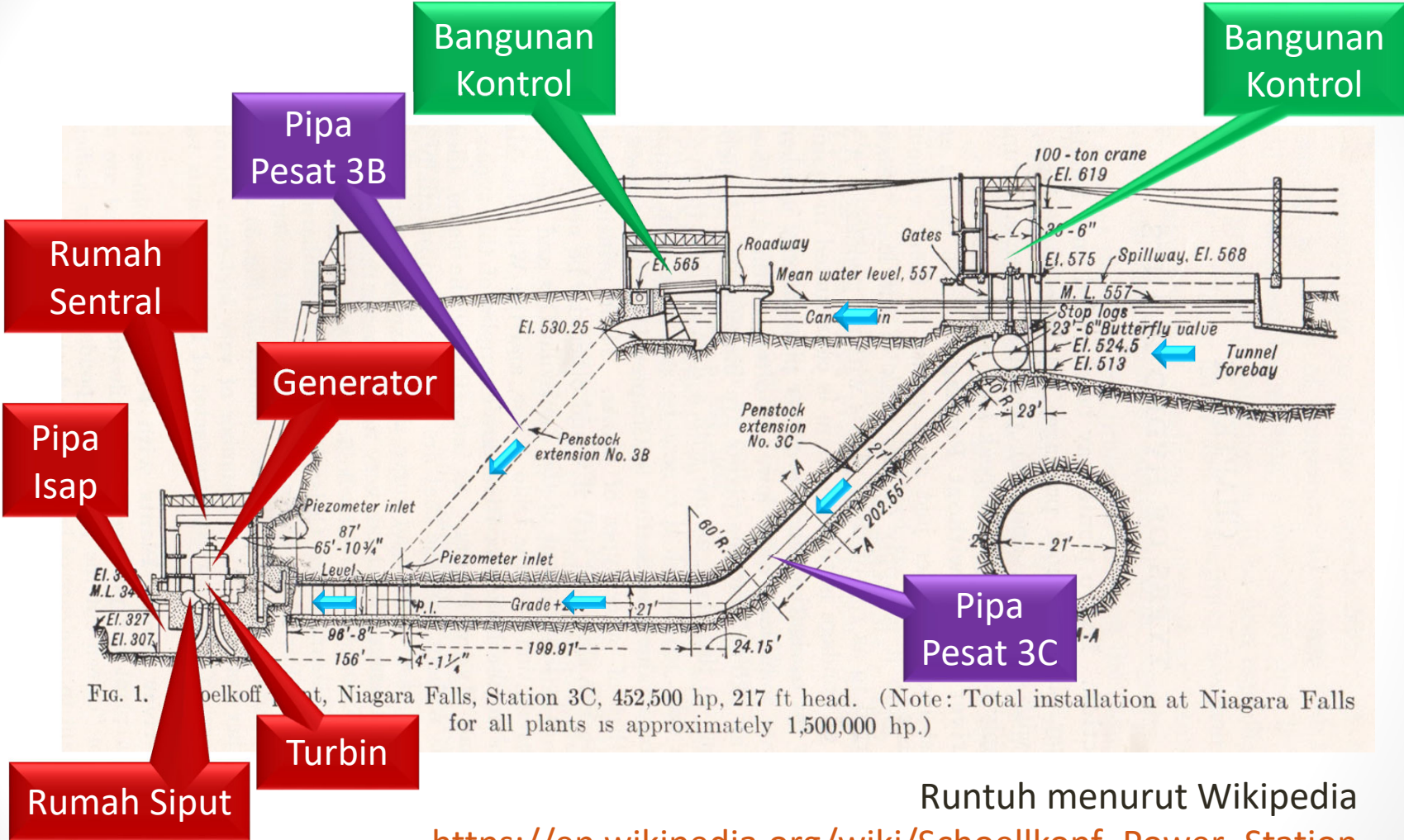


Fig. 1. Schoelkoff plant, Niagara Falls, Station 3C, 452,500 hp, 217 ft head. (Note: Total installation at Niagara Falls for all plants is approximately 1,500,000 hp.)

Runtuh menurut Wikipedia

[https://en.wikipedia.org/wiki/Schoellkopf Power Station](https://en.wikipedia.org/wiki/Schoellkopf_Power_Station)

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# BTA Beauharnois, Canada

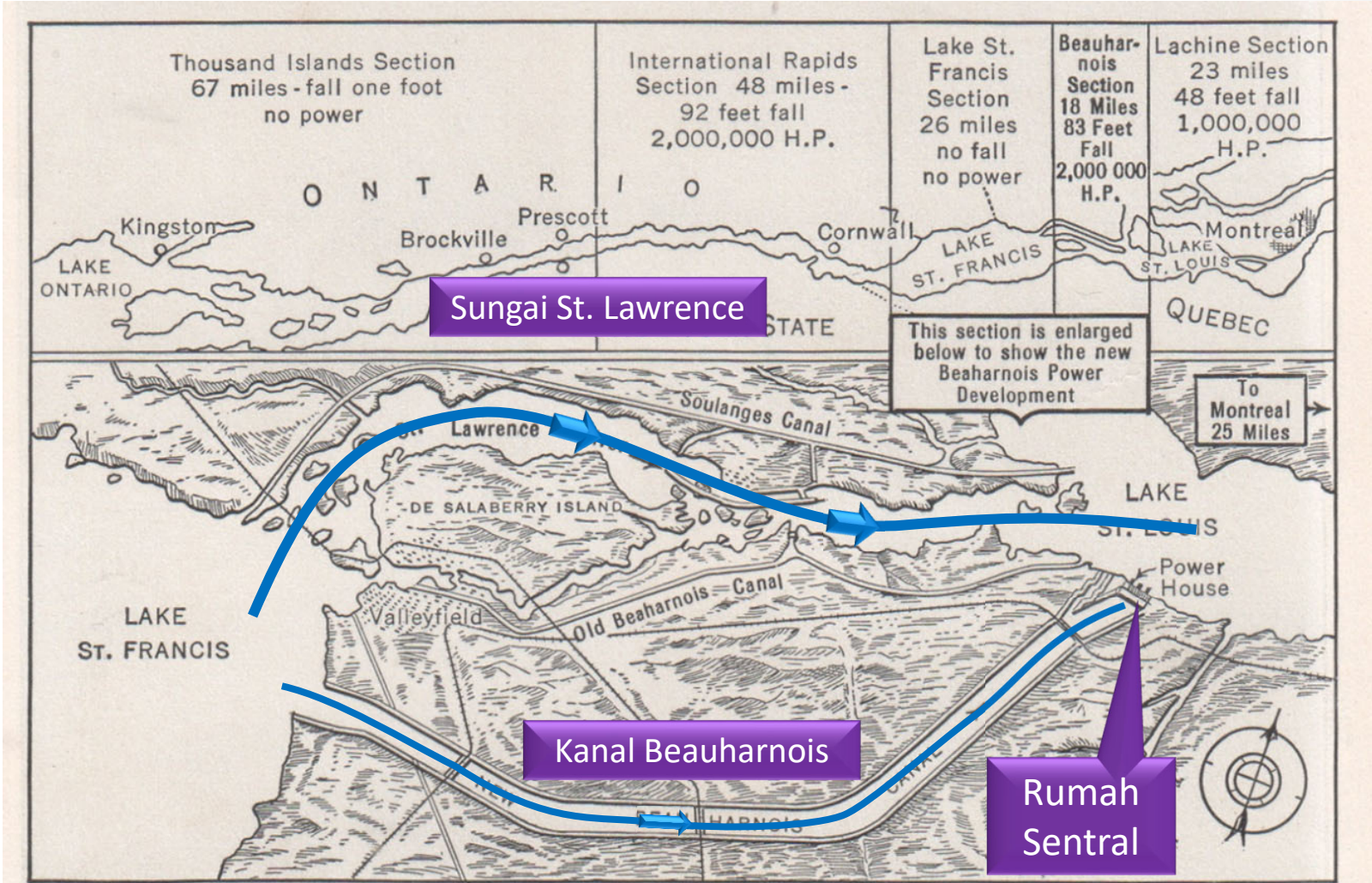


FIG. 4. Beauharnois hydro development on the St. Lawrence River near Montreal, a base load plant, head 83 ft, installation 315,000 kw, 9 units.

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# BTA Beauharnois, Canada



Sumber: Google Earth Pro

# BTA Beauharnois, Canada

Sungai St. Lawrence

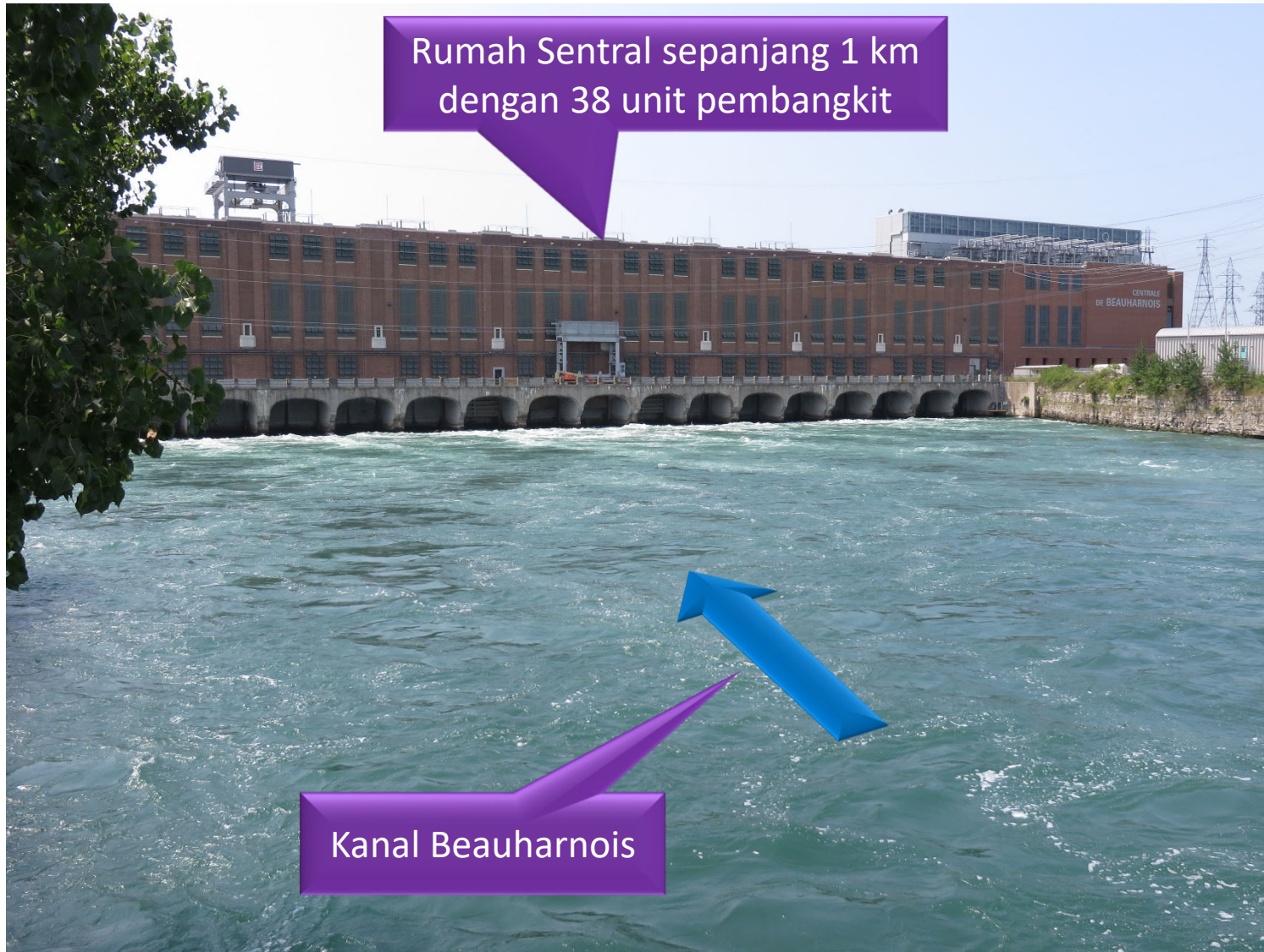
Rumah Sentral sepanjang 1 km  
dengan 38 unit pembangkit



Kanal Beauharnois

Sumber: Google Earth Pro

# BTA Beauharnois, Canada



Rumah Sentral sepanjang 1 km  
dengan 38 unit pembangkit

Kanal Beauharnois

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Centrale de Beauharnois - 2014.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Centrale_de_Beauharnois_-_2014.jpg)

# BTA Beauharnois, Canada

Rumah Sentral sepanjang 1 km dengan 38 unit pembangkit



38 Generator BTA Beauharnois sepanjang 1 km



BTA yang mengumpulkan air dalam jumlah besar untuk menaikkan energi air dalam sebuah waduk

## BTA WADUK

# Bendungan Hoover, AS (1/4)



<https://wallpapermemory.com/493947>



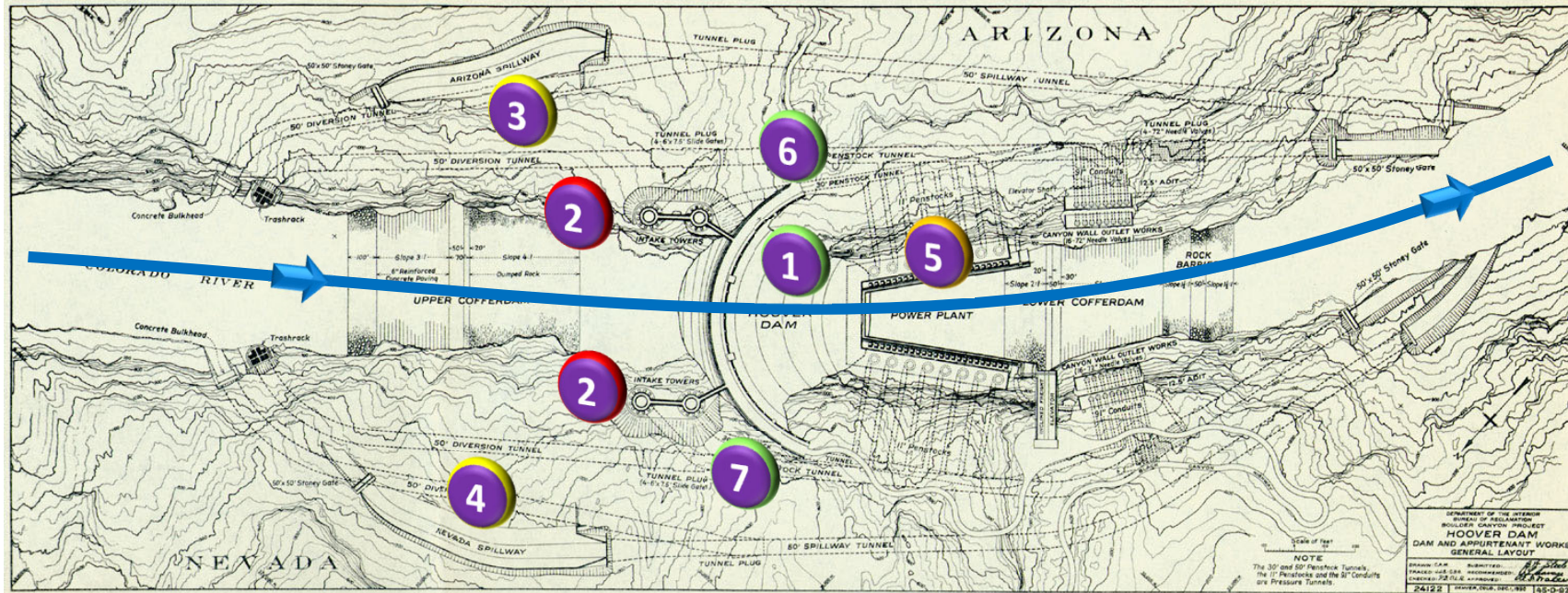
# Bendungan Hoover, AS (2/4)

3. Pelimpah Arizona

Sungai Colorado

1. Bendungan Beton

2. Bangunan Pengambilan



4. Pelimpah Nevada

5. Rumah Sentral

6. Penstock Arizona

7. Penstock Nevada

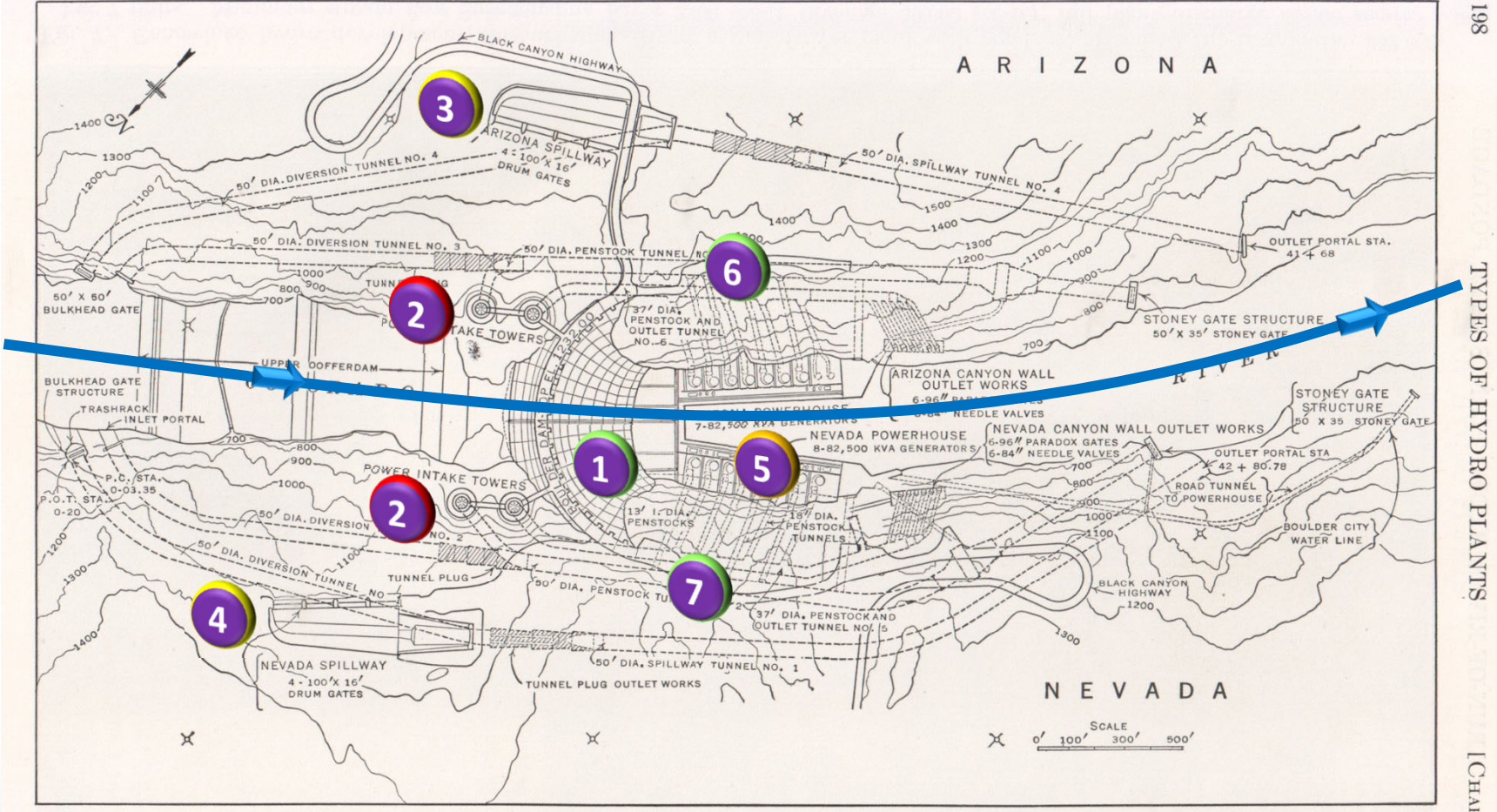
# Bendungan Hoover, AS (3/4)

3. Pelimpah Arizona

Sungai Colorado

1. Bendungan Beton

2. Bangunan Pengambilan



4. Pelimpah Nevada

5. Rumah Sentral

6. Penstock Arizona

7. Penstock Nevada

198 TYPES OF HYDRO PLANTS [CHAP.

<http://luk.staff.ugm.ac.id/bta> Saturday, June 26, 2021

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# Bendungan Hoover, AS (4/4)

2. Rumah Sentral Arizona

1. Bendungan Beton

3. Rumah Sentral Nevada

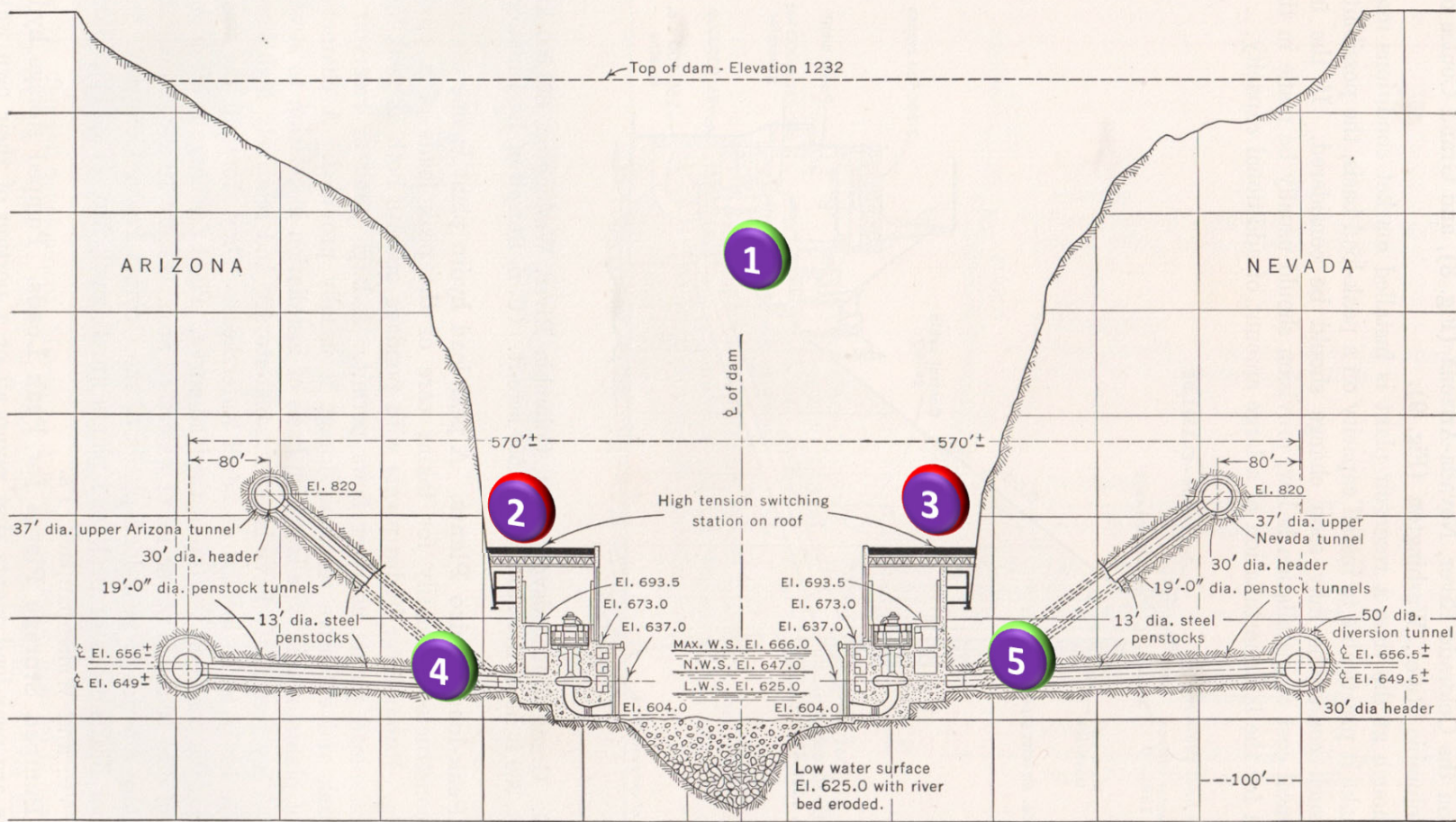


FIG. 8b. Hoover Dam development cross section through powerhouses in gorge just below dam.

4. Penstock Arizona

Pandangan ke arah hilir

5. Penstock Nevada

http://luk.staff.ugm.ac.id/bta Saturday, June 26, 2021

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# Bendungan Grand Coulee, AS

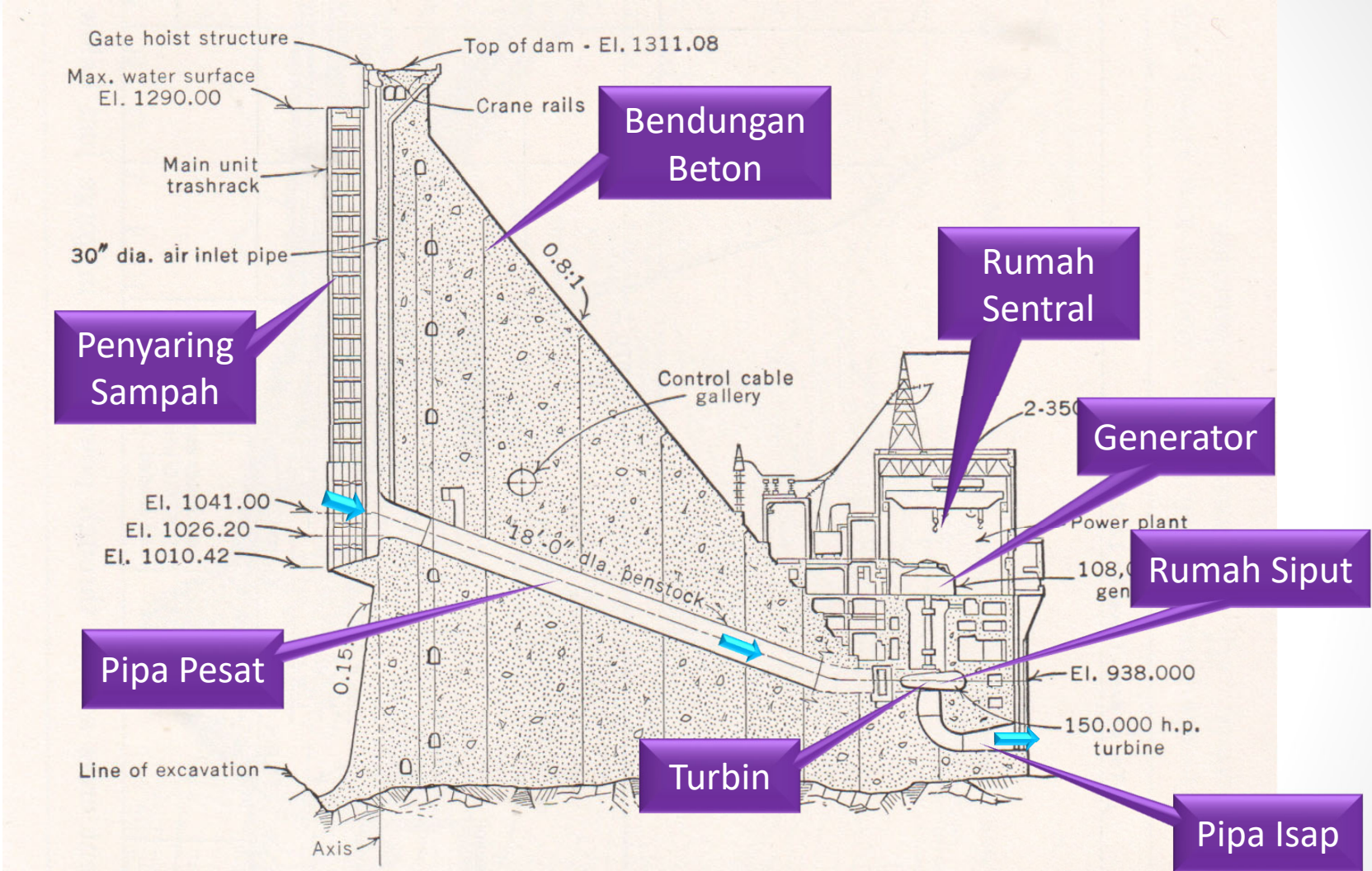


FIG. 9. Grand Coulee development, Columbia River, Washington, 823,000 kva (1944), 330 ft head, live storage 5,350,000 acre-ft. (U. S. Bureau of Reclamation.)

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# Bendungan Grand Coulee, AS



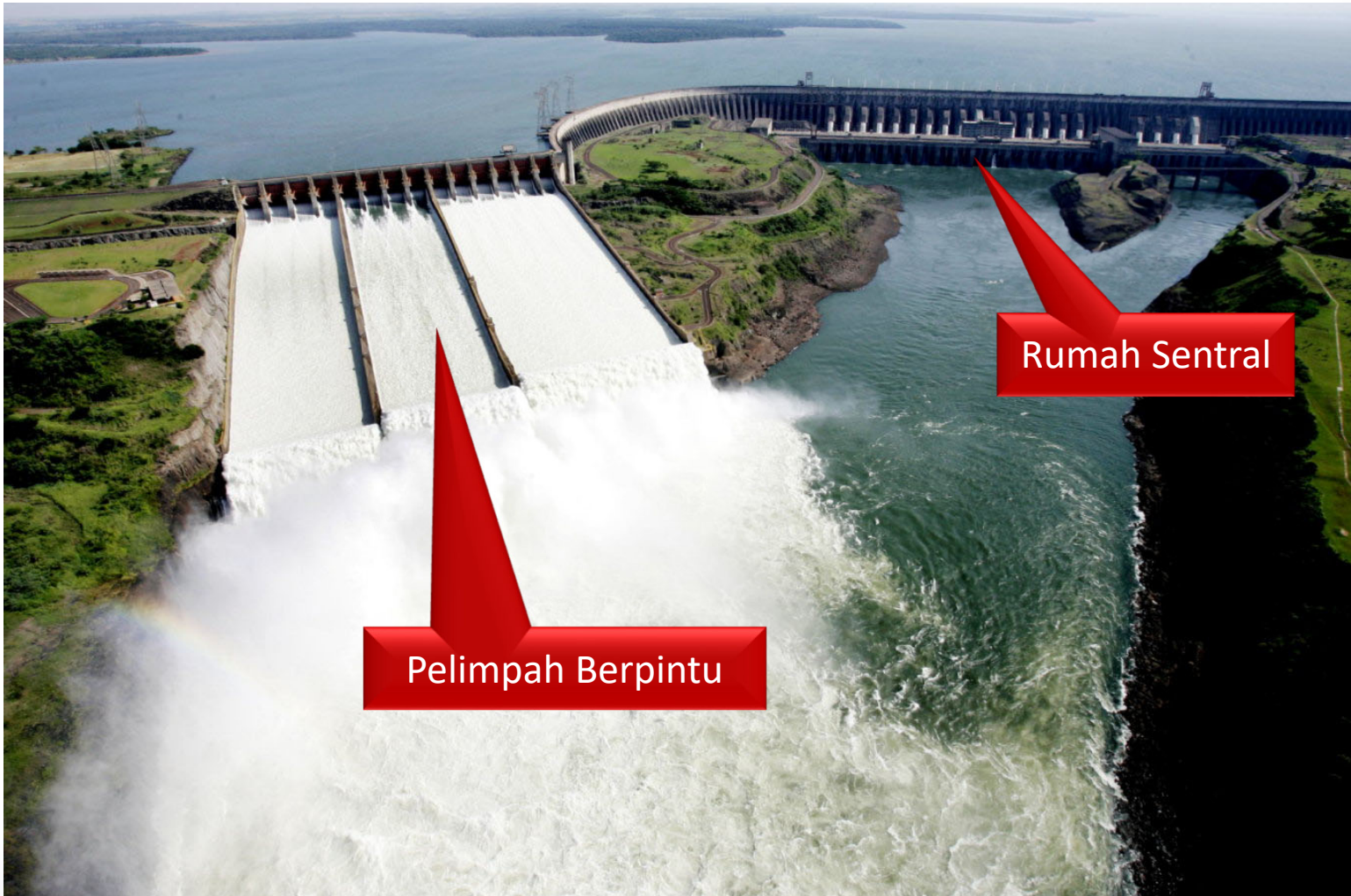
Rumah Sentral

Rumah Sentral

Pelimpah Berpintu

[https://en.wikipedia.org/wiki/Grand\\_Coulee\\_Dam](https://en.wikipedia.org/wiki/Grand_Coulee_Dam)

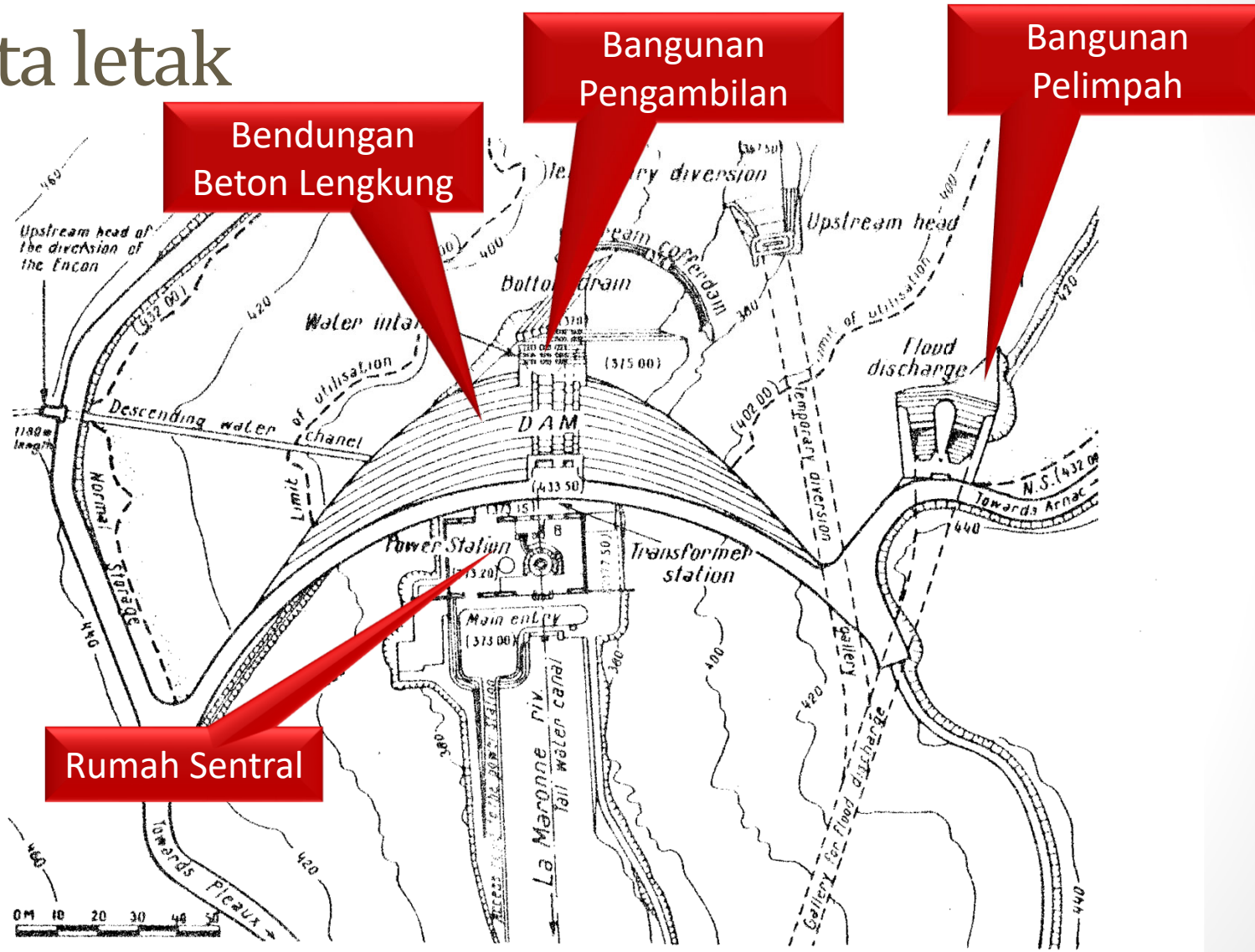
# Bendungan Dua Negara Itaipu Perbatasan Brazil-Paraguay



[https://en.wikipedia.org/wiki/Grand\\_Coulee\\_Dam](https://en.wikipedia.org/wiki/Grand_Coulee_Dam)

# BTA dengan Waduk – TA 16

## Tata letak

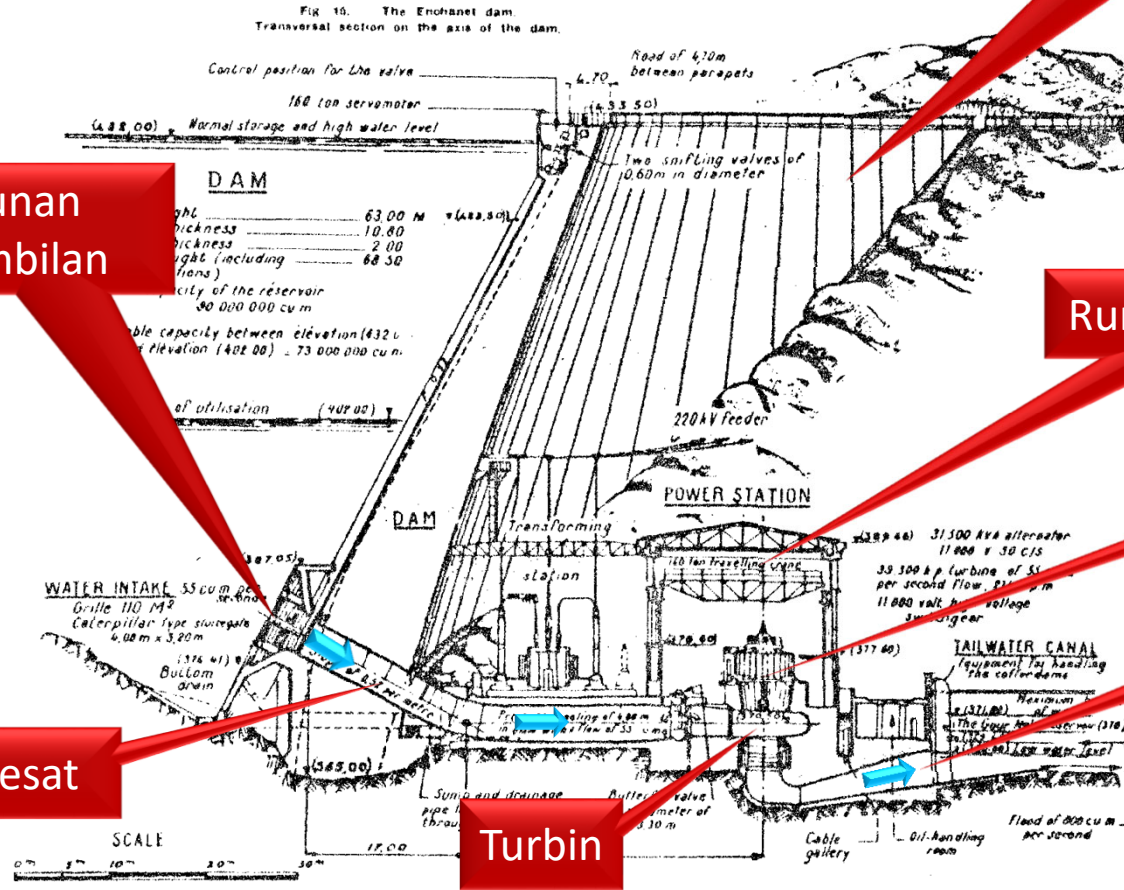


OVERGENOMEN UIT: SUPPLEMENT OP TRAVAUX N°247. T.H.afd.W.&W. Waterkracht.

# BTA dengan Waduk – TA 16

## Potongan Memanjang

VOORBEELD VAN EEN RESERVOIR-WERK  
( met centrale aan de damvoet )



Bendungan  
Beton Lengkung

Bangunan  
Pengambilan

Rumah Sentral

Generator

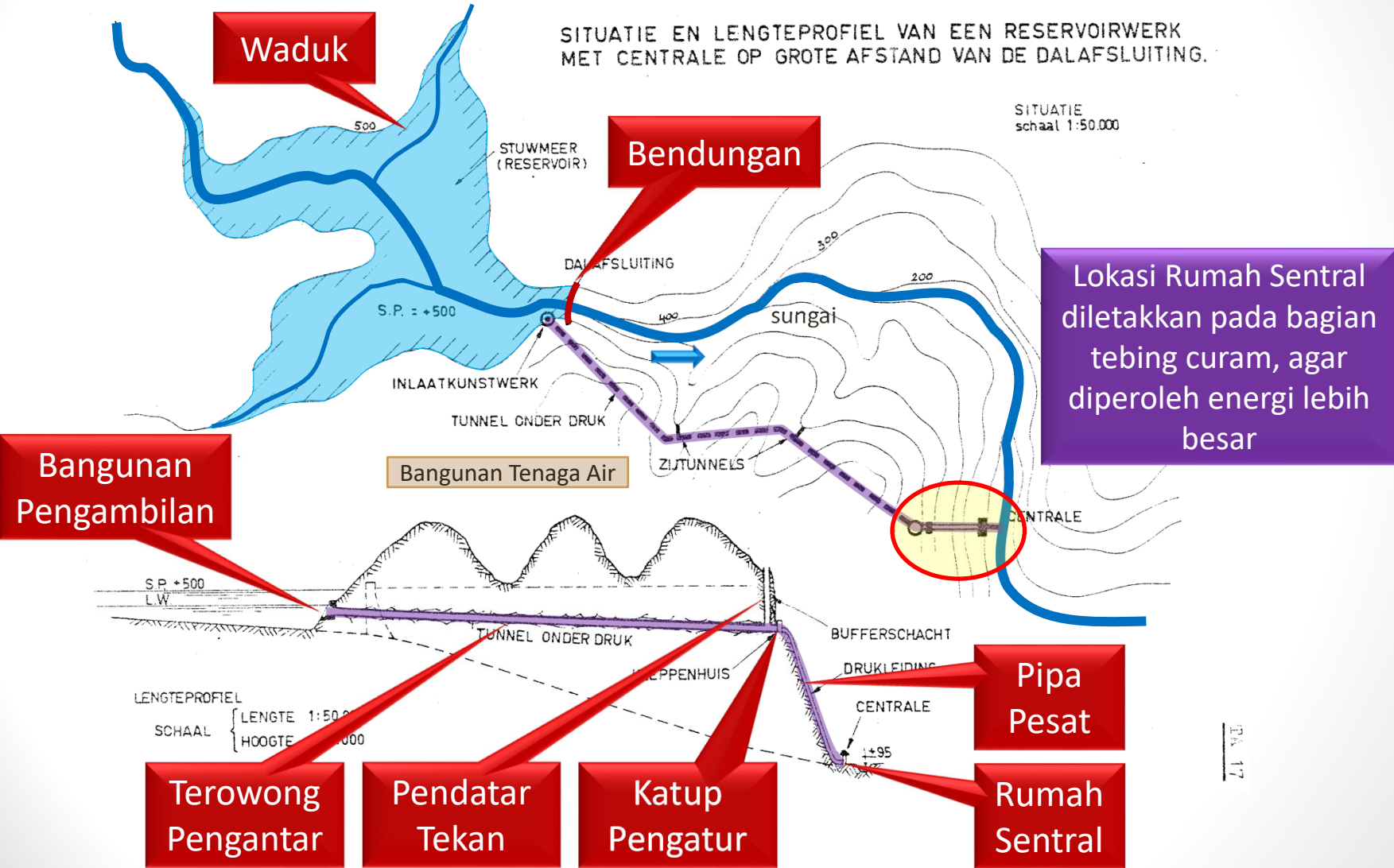
Pipa Pesat

Turbin

Pipa Isap



# BTA dengan Waduk – TA 17





# Bendungan Kariba, Zimbabwe

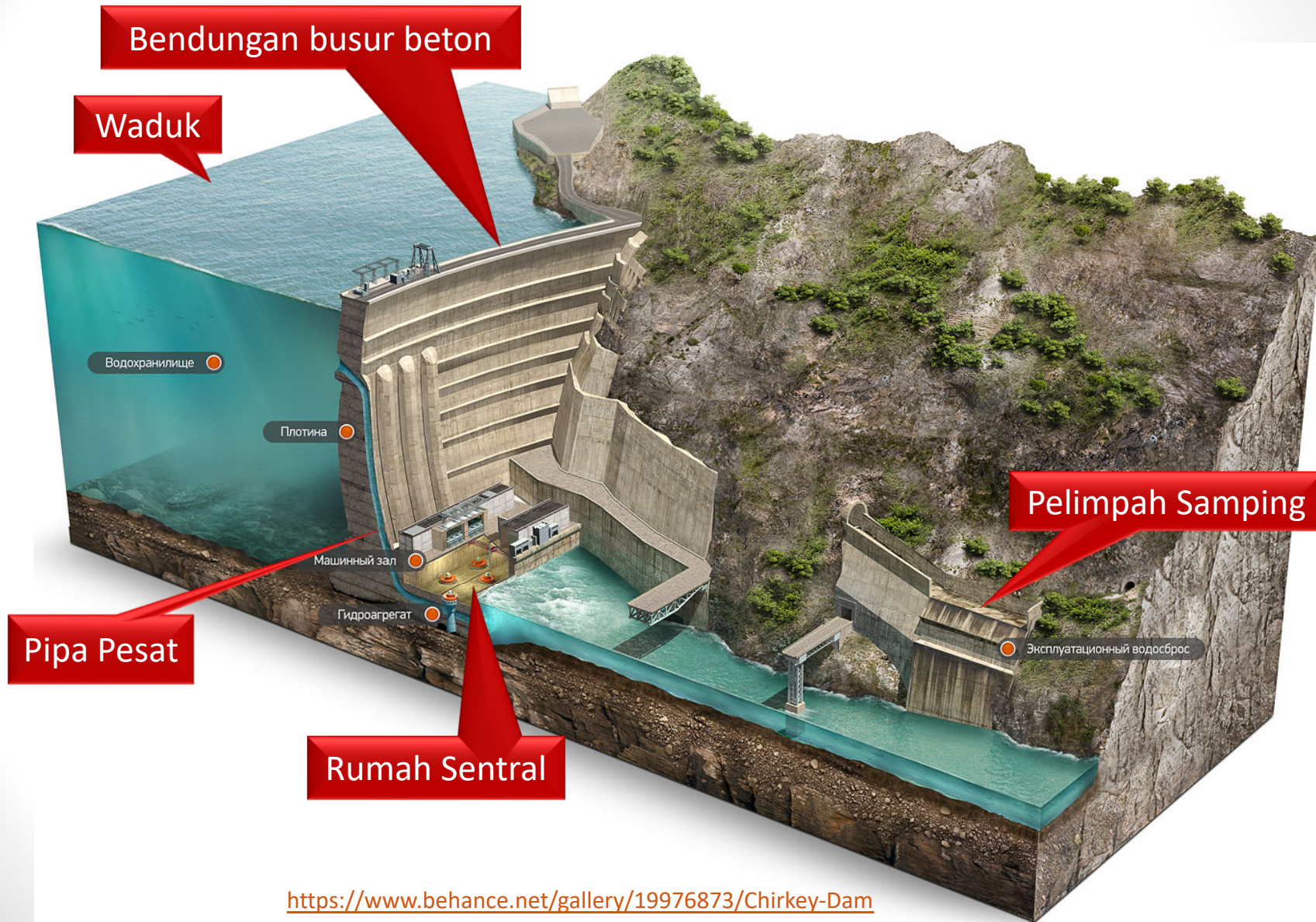


[https://en.wikipedia.org/wiki/Kariba\\_Dam](https://en.wikipedia.org/wiki/Kariba_Dam)

# Bendungan Kariba, Zimbabwe



# Bendungan Chirkey, Dagestan



<https://www.behance.net/gallery/19976873/Chirkey-Dam>

# Bendungan Chirkey, Dagestan



<https://www.behance.net/gallery/19976873/Chirkey-Dam>

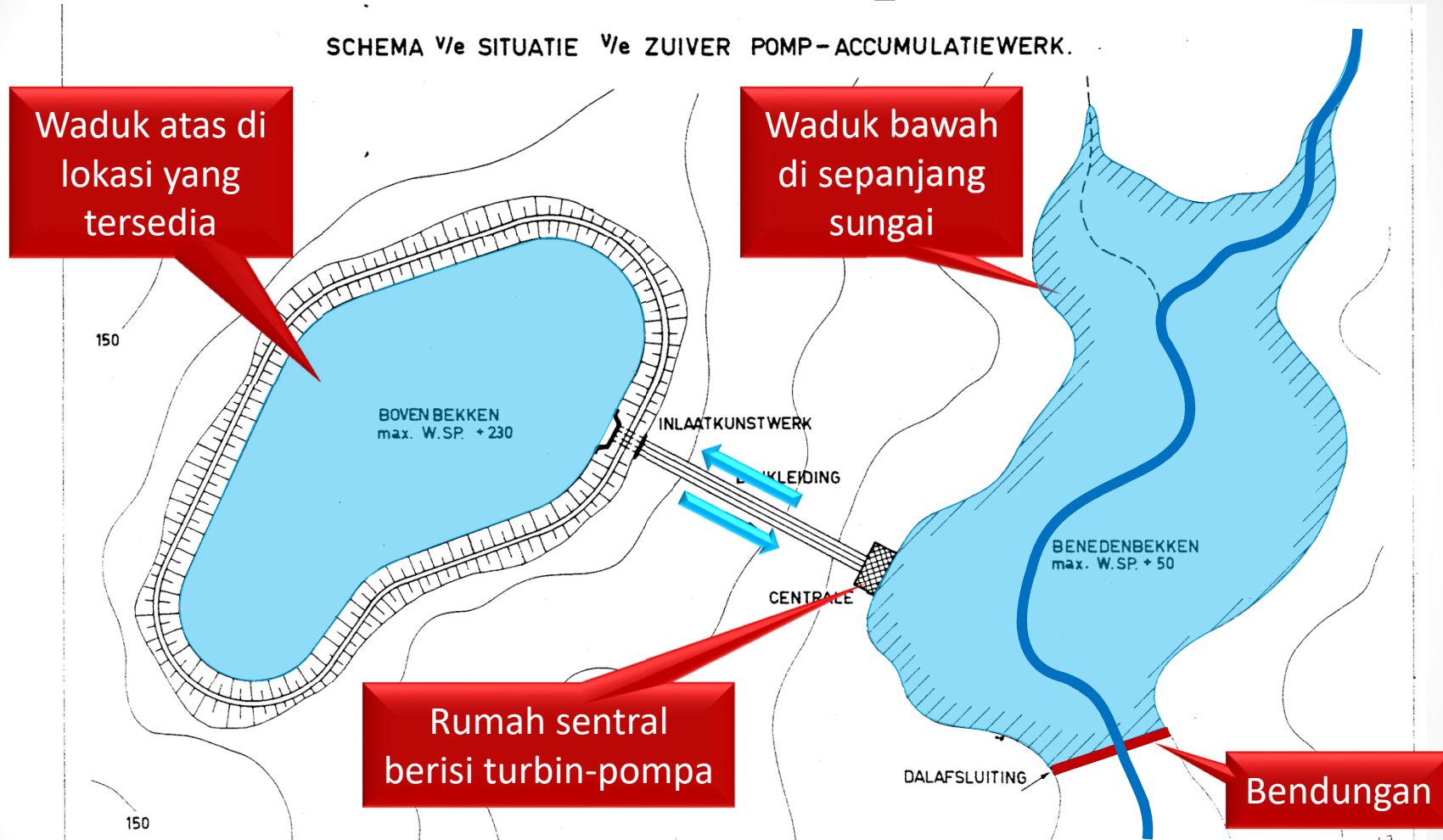


BTA yang menggunakan 2 waduk air: atas dan bawah yang berfungsi sebagai baterai. Pada saat pasok listrik berlebih air dipompa ke waduk atas, pada saat kebutuhan listrik bertambah, air digunakan untuk menggerakkan turbin.

## BTA POMPA

# BTA Waduk & Pompa – TA 23

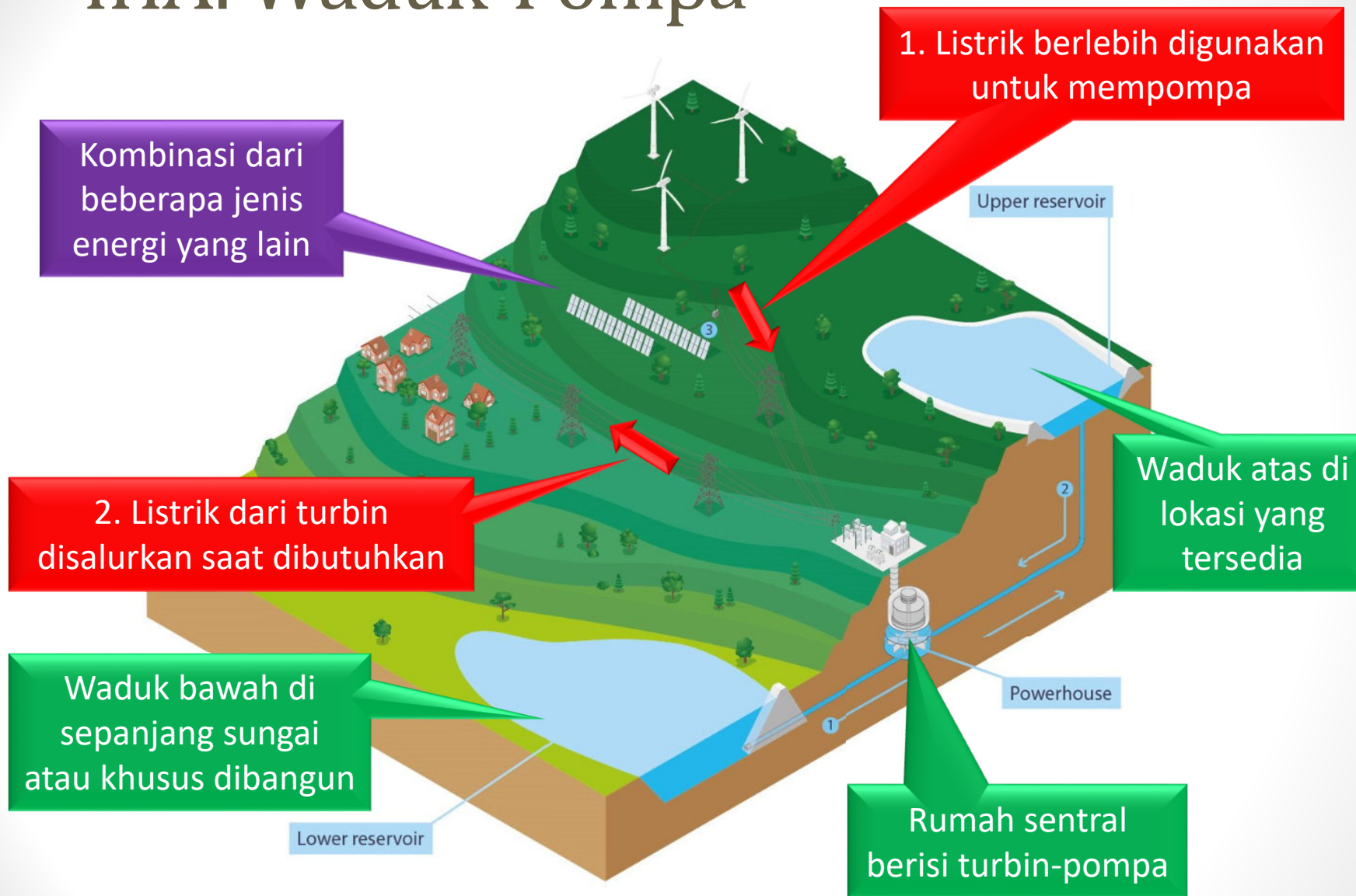
SCHEMA 1/4e SITUATIE 1/4e ZUIVER POMP-ACCUMULATIEWERK.



Jika listrik berlebih, air dipompa ke atas, jika dibutuhkan listrik maka air dialirkan ke bawah memutar turbin. Biasanya dalam sebuah jaringan tenaga listrik.



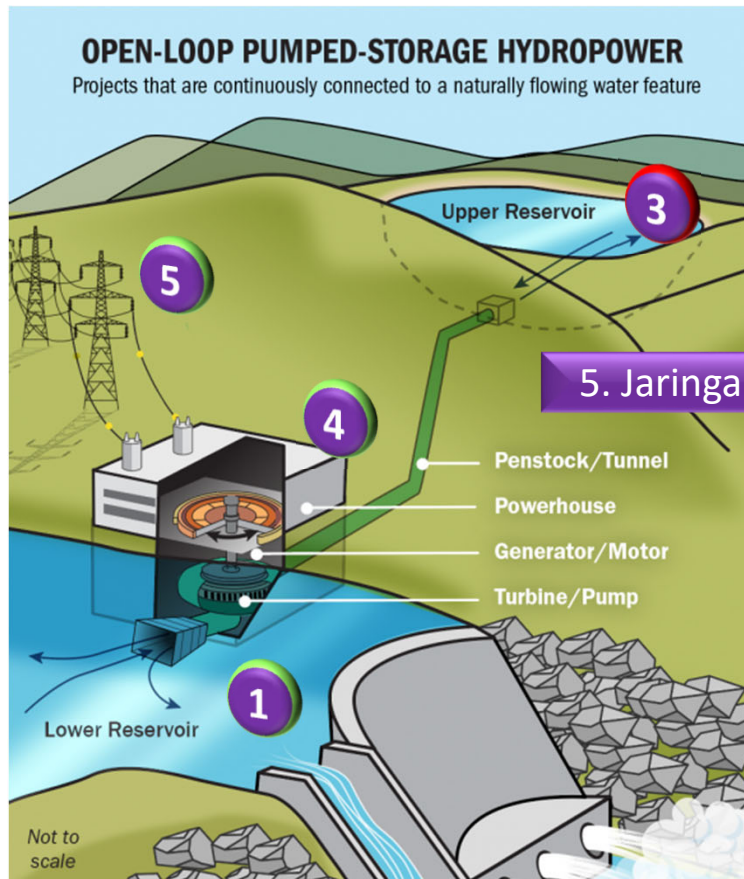
# IHA: Waduk-Pompa



<https://www.hydropower.org/types-of-hydropower>

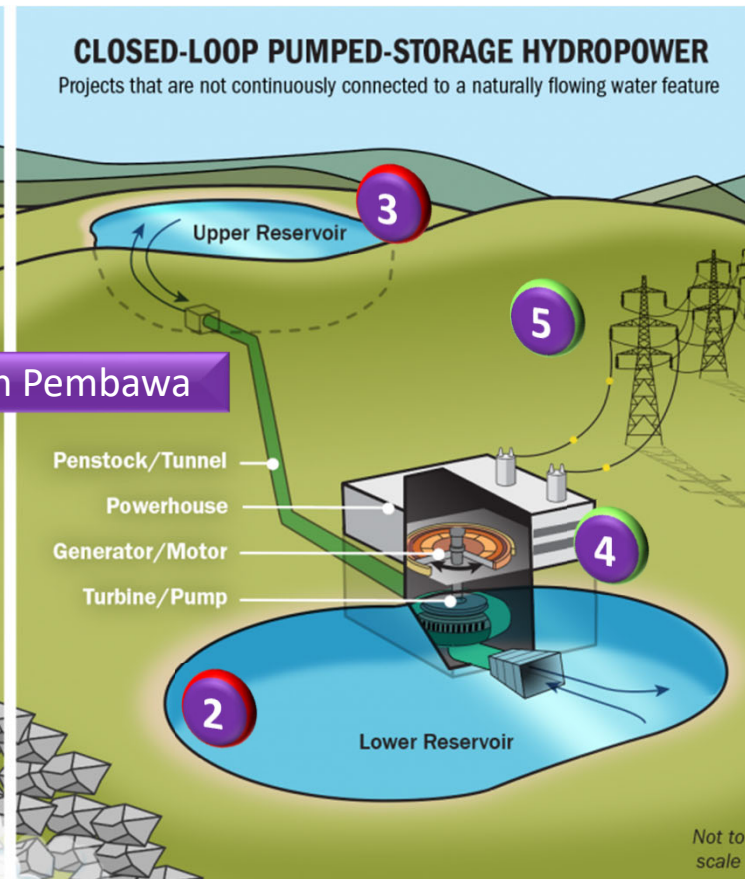
# Waduk-Pompa: Sistem Terbuka & Tertutup

3. Waduk atas di lokasi yang tersedia



1. Waduk bawah di sepanjang sungai

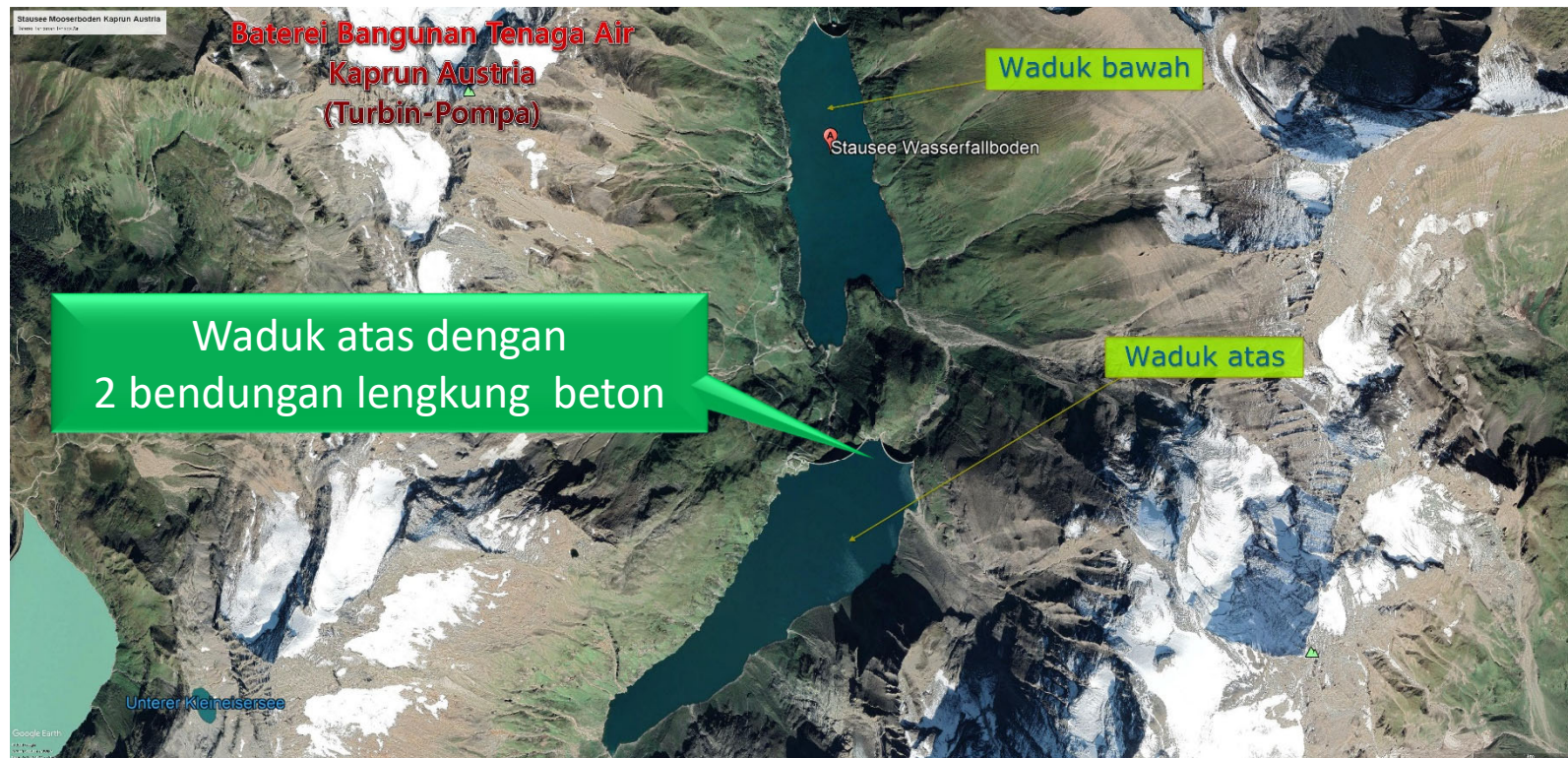
4. Rumah sentral berisi turbin-pompa



2. Waduk bawah dibangun khusus

5. Jaringan Pembawa

# BTA: Waduk-Pompa Kaprun, Austria, dibangun 1954



<https://www.facebook.com/photo.php?fbid=10223982732104145&set=a.10223976154859718>

# BTA: Waduk-Pompa Kaprun, Austria, dibangun 1954

Waduk atas dengan  
2 bendungan lengkung beton



<https://www.verbund.com/en-at/about-verbund/power-plants>

# BTA: Waduk-Pompa Kaprun, Austria, dibangun 1954

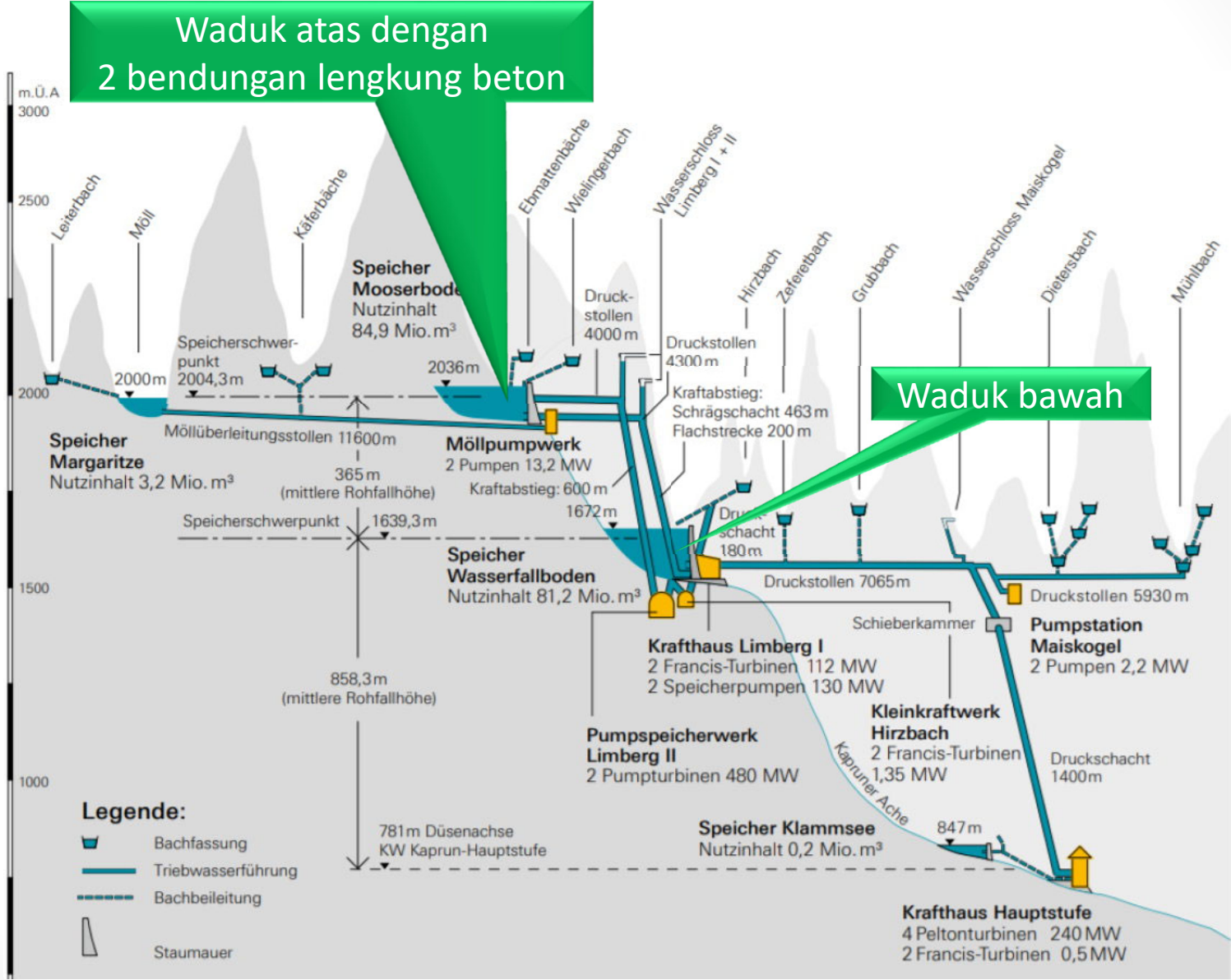


Waduk atas dengan  
2 bendungan lengkung beton

Waduk bawah

[https://id.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk\\_Kaprun](https://id.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk_Kaprun)

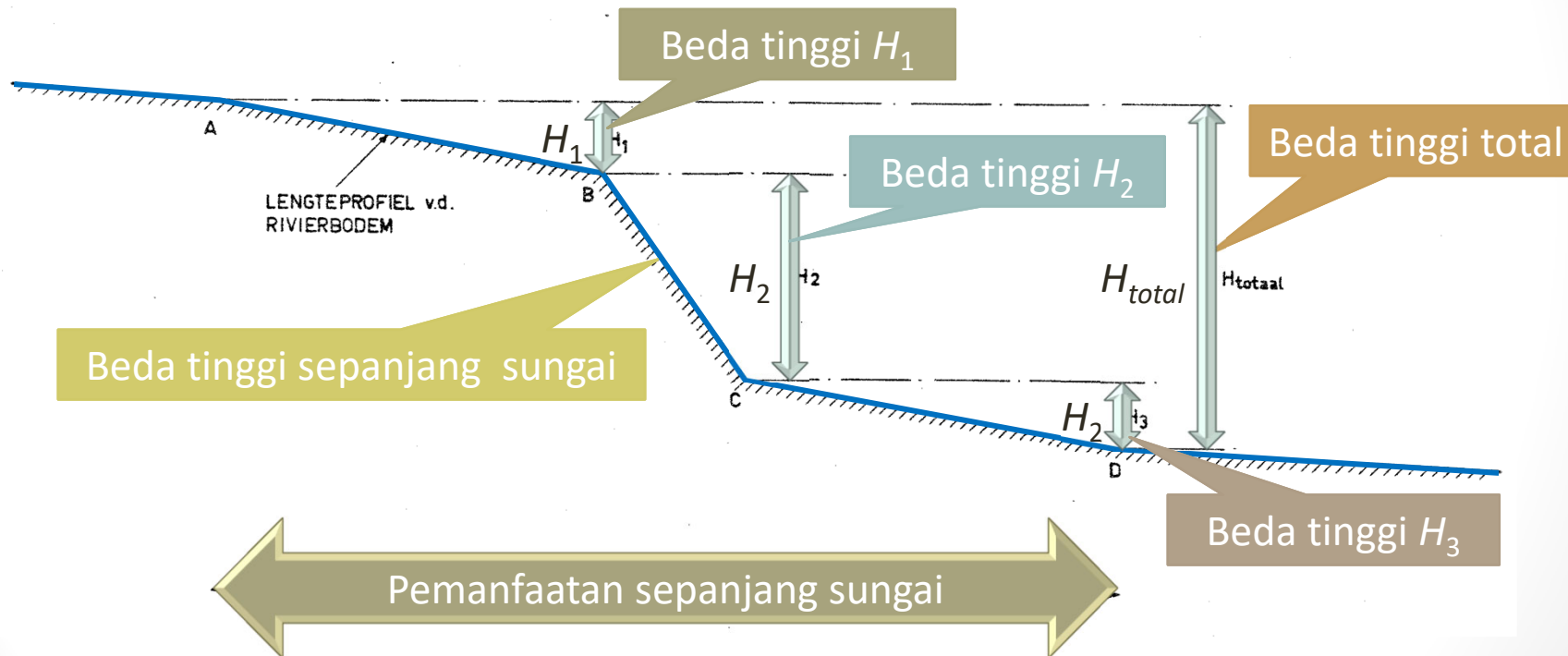
# Skema BTA Waduk-Pompa di Austria



<https://www.researchgate.net/publication/342215580> Pumped-storage hydroelectricity in Austria

# TA 2: Pemanfaatan Beda Tinggi

MOGELIJKHEDEN VOOR BENUTTING  
v.h. VERVAL IN EEN RIVIERTRAJECT.



# BTA Serial dalam sebuah sistem (1/3)

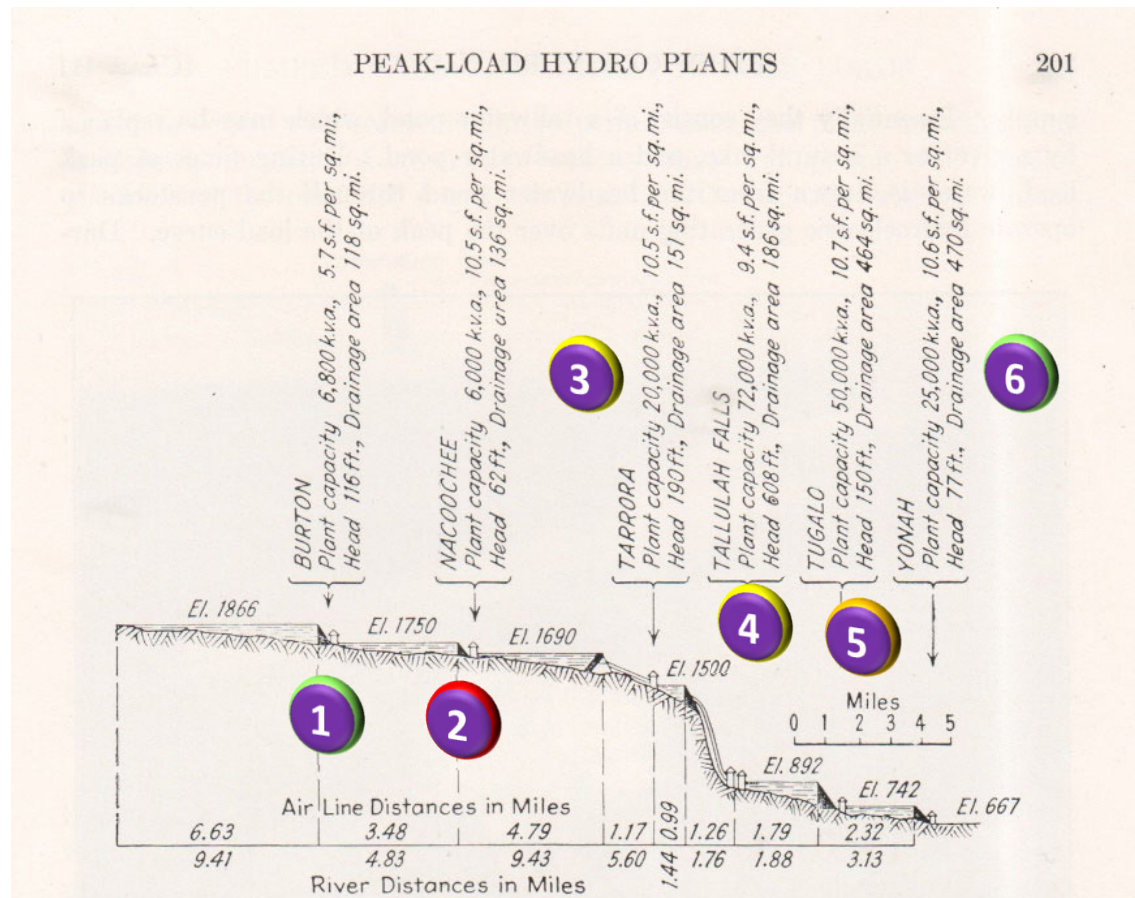
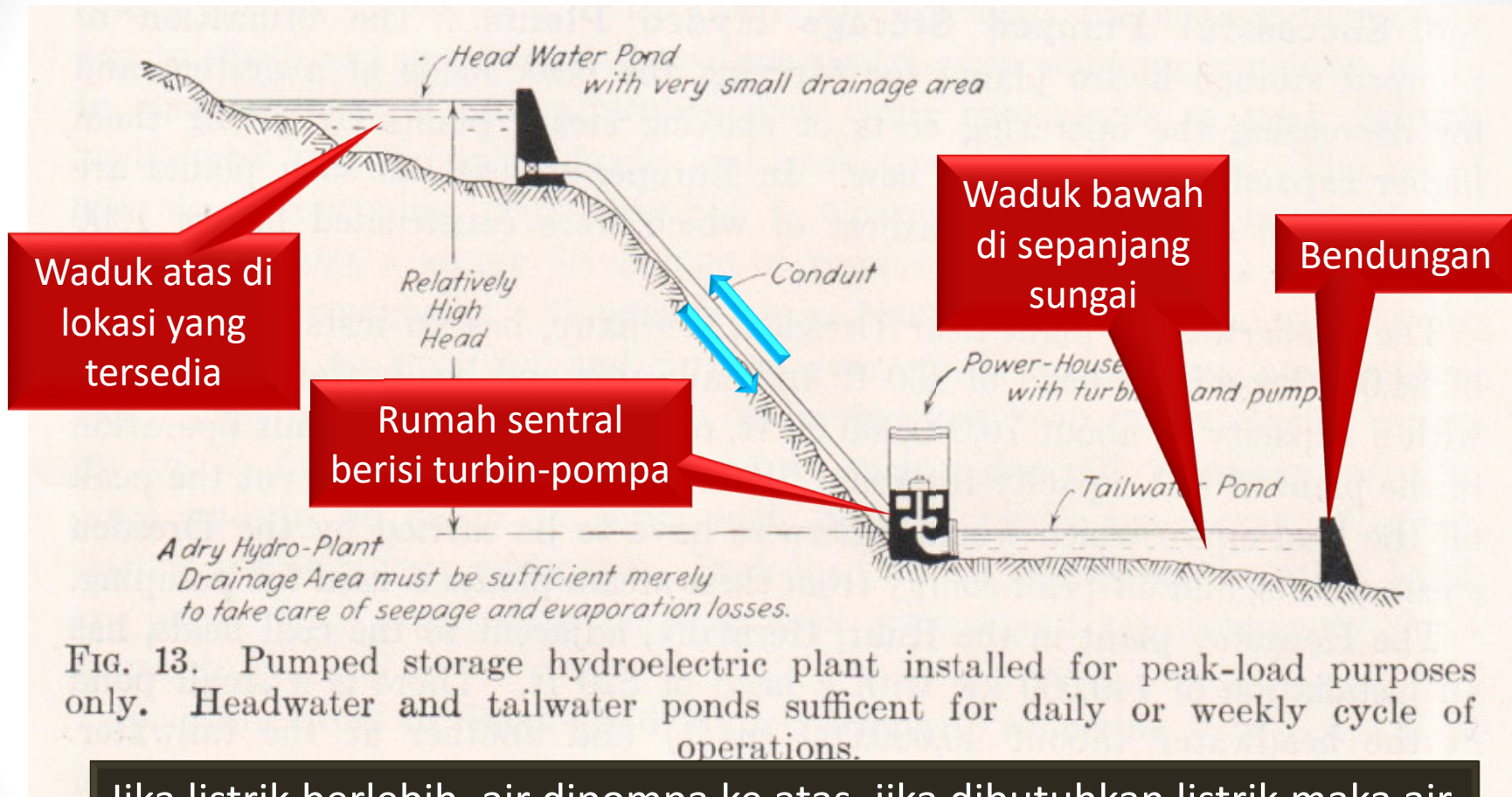


FIG. 10. Peak-load hydro plants of Georgia Power Company on Tallulah and Tugalo Rivers. The two power plants are on the Tugalo River, and the others on its tributary, the Tallulah.

BTA dalam satu sistem seri (6 buah) untuk melayani kebutuhan puncak suatu kawasan



# BTA Serial dalam sebuah sistem (2/3)



Jika listrik berlebih, air dipompa ke atas, jika dibutuhkan listrik maka air dialirkan ke bawah memutar turbin. Biasanya dalam sebuah jaringan tenaga listrik.

# BTA Serial dalam sebuah sistem (1/3)

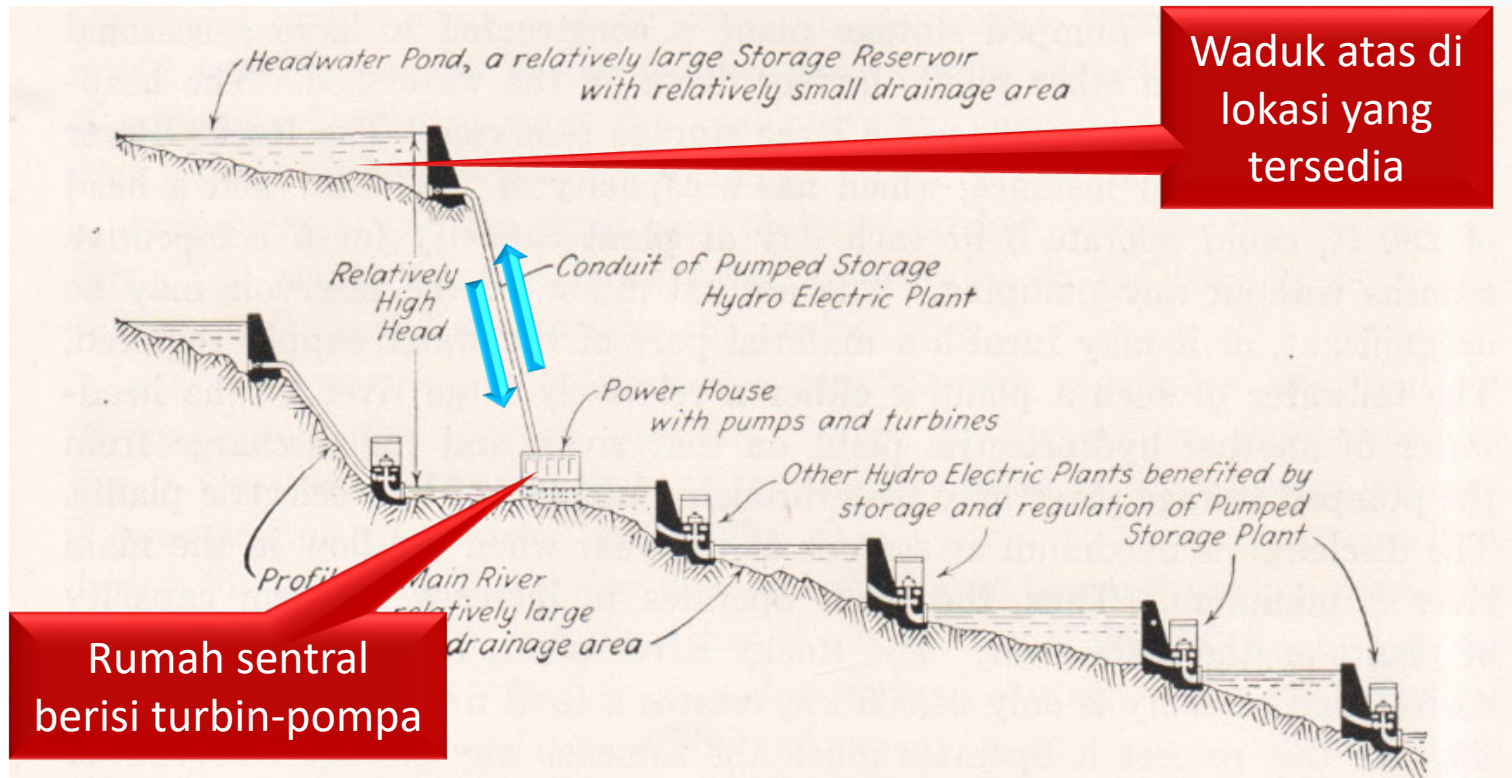


FIG. 14. Pumped storage hydroelectric plant intended for regulation for peak-load purposes. Headwater pond is a large storage reservoir, but drainage area may be very small. Tailwater is a relatively large river and is the headwater of a hydro plant having a relatively large drainage area. The pumped storage provides peak-load service and also seasonal regulation for the other plants.

Sebuah BTA turbun-pompa dapat mendatangkan keuntungan untuk sebuah sistem seri beberapa BTA



BTA yang menggunakan gerak ombak maupun pasang-surut laut

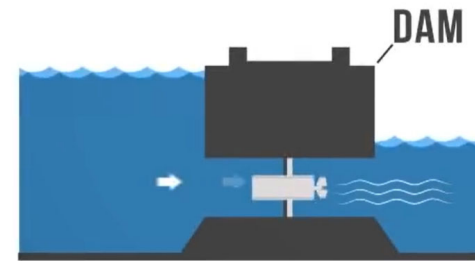
## BTA LAUTAN

# BTA Lautan (1/6)

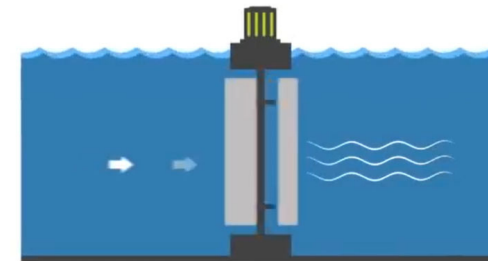
BTA yang menggunakan energi yang berasal dari lautan relatif termasuk baru dan banyak yang masih dalam tahap penelitian maupun pengembangan awal. Ada beberapa jenis BTA ini:

1. BTA dengan menggunakan energi pasang surut laut dengan menggunakan: (a) dam, (b) kincir, dan (c) turbin.

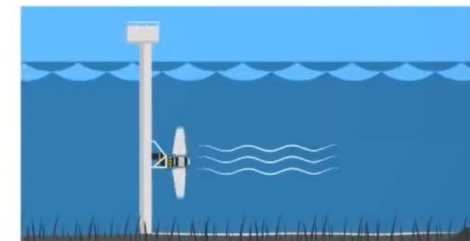
<https://www.youtube.com/watch?v=VkTRcTyDSyk>



**TIDAL BARRAGES**



**TIDAL FENCES**

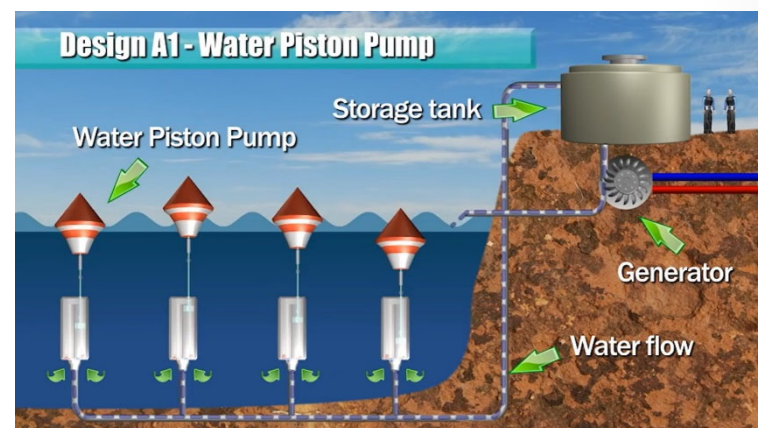
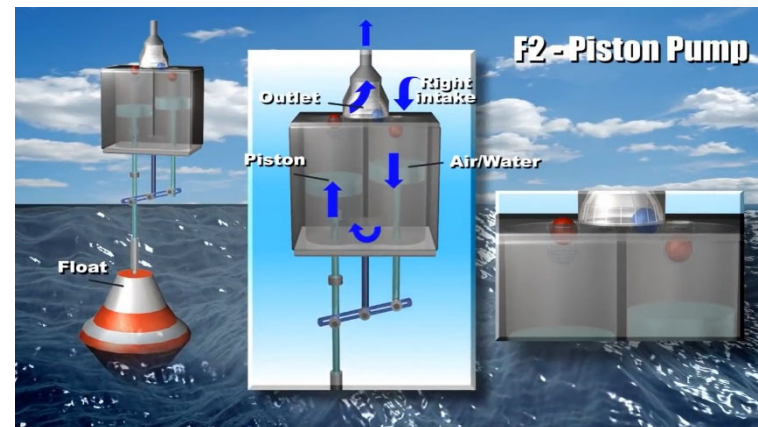
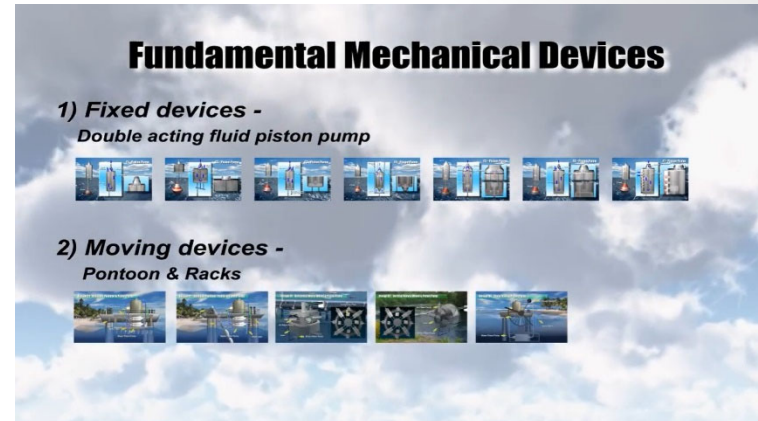


**TIDAL TURBINES**

# BTA Lautan (2/6)

2. BTA dengan menggunakan pompa-piston-*rack* untuk mengubah energi pasang surut laut menjadi gerak mekanik: (a) pompa-piston, (b) ponton dan *rack*. Ada 5 rancangan yang ditawarkan.

<https://www.youtube.com/watch?v=fYfs-qYGzvs>



# BTA Lautan (3/6)

Tubin yang bergerak  
oleh arus pasang surut



3. BTA dengan Turbin Arus Pasang Surut (*Tidal Current Turbine*).

<https://www.youtube.com/watch?v=8-sFLGMSMac>

# BTA Lautan (4/6)



## 4. BTA dengan Tenaga Ombak (*Wave Power Station*).

<https://www.youtube.com/watch?v=gcStpg3i5V8>

# BTA Lautan (5/6)

Stasiun yang mempunyai sistem pelampung

It's equipped with kinetic-energy harvesters called **floats**

Pelampung yang bergerak naik turun karena ombak



5. BTA sistem *WaveStar*, beberapa sistem pelampung pada sebuah stasiun menggerakkan piston.

<https://www.youtube.com/watch?v=7ZN5CthZhvg>



# BTA Lautan (6/6)



6. BTA sistem *CorPower* menggunakan piston yang berada dan digerakkan oleh pelampung.

<https://www.youtube.com/watch?v=mM4qTAqqZYc>

# Perbedaan Irigasi dengan BTA

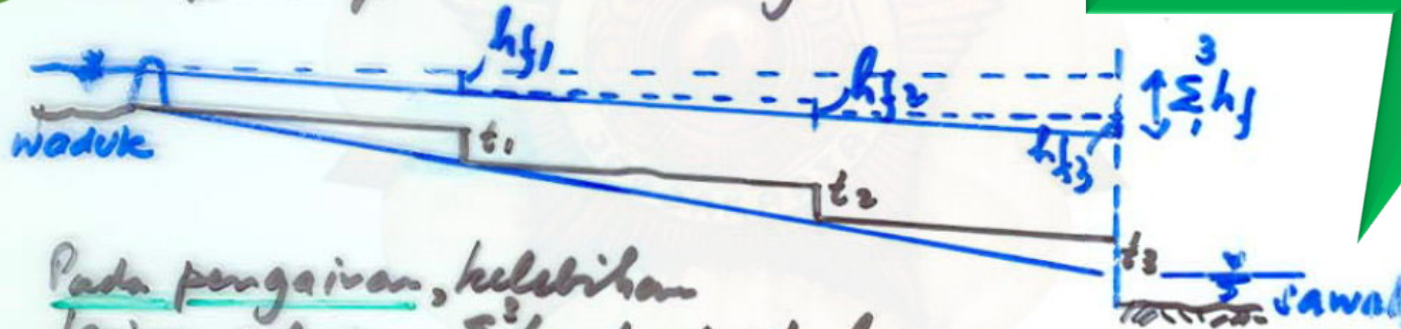
... konsep irigasi dan BTA terkait energi ...

<http://luk.tsipil.ugm.ac.id/bta/ohps/Pendahuluan.pdf>

# Perbedaan Irigasi dengan BTA

Irigasi: energi berlebih dihancurkan agar tidak merusak!

## 1 Beda prinsip BTA dan Pengairan



Pada pengairan, kelebihan terjun sebesar  $\sum t = t_1 + t_2 + t_3$  harus dihancurkan dalam bentuk terjunan agar kecepatan air di sawah tak terlalu besar  $\rightarrow$  erosi.



Pada BTA,  $\Sigma h_f$  harus minim agar  $H_n$  max, karena akan dijual sebagai tenaga listrik

Kecepatan curat:  $v = \sqrt{2gH_n}$  yang menggerakkan turbin impuls. Daya turbin  $P = \eta \cdot 13.33 Q H_n$  DK.

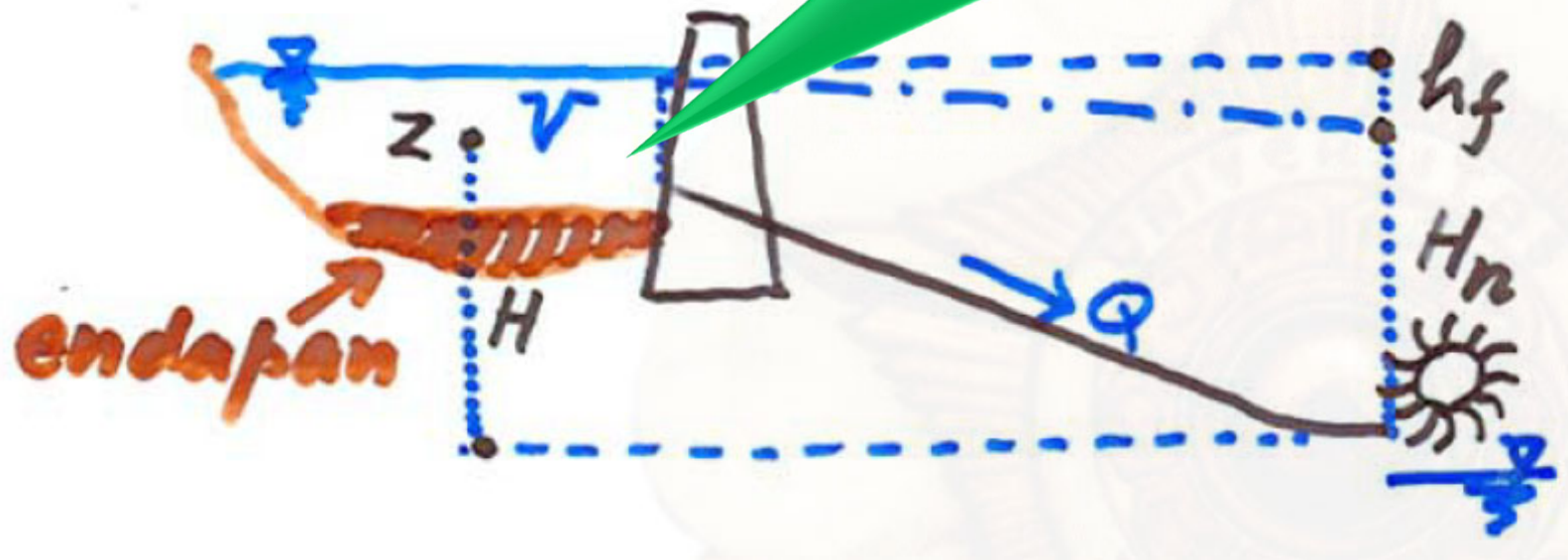
# Dari energi air menjadi energi listrik

... korelasi fisika antara air dan listrik ...

<http://luk.tsipil.ugm.ac.id/bta/ohps/Pendahuluan.pdf>

# Hubungan Antara Energi dan Volume Air (1/3)

Energi tersedia berupa badan air yang berada pada sebuah ketinggian



Suatu badan air dengan volume  $V$  ( $\text{m}^3$ ) air dan dijatuhkan setinggi  $H$  (m)

## Hubungan Antara Energi dan Volume Air (2/3)

- Suatu badan air dengan volume  $V$  ( $\text{m}^3$ ) air dan dijatuhkan setinggi  $H$  (m), maka diperoleh tenaga (energi) sebesar:
- Tenaga Teoretis:

$$E_{\text{teoretis}} = \text{Gaya} \bullet \text{Lintasan} = \text{Berat} \bullet H$$

$$E_{\text{teoretis}} = V \bullet \gamma \bullet H = V \bullet H \text{ Tm}$$

dengan  $\gamma$  adalah berat jenis air ( $\text{T/m}^3$ ), jika nilai  $\gamma = 1 \text{ T/m}^3$ .

## Hubungan Antara Energi dan Volume Air (3/3)

- Tetapi dalam praktek tidak mungkin, karena ada rendemen atau efisiensi; sehingga dikenal yang namanya:
- Tenaga Praktis/Nyata:

$$E_{\text{praktis}} = \text{Efisiensi} \cdot E_{\text{teoretis}}$$
$$E_{\text{praktis}} = \eta \cdot V \cdot \gamma \cdot H = \eta \cdot V \cdot H \text{ Tm}$$

dengan  $\eta$  adalah efisiensi atau rendemen,  $V$  adalah volume air ( $\text{m}^3$ ),  $H$  adalah tinggi terjun (m).

# Hubungan Antara Daya dan Debit Air

Jika rumus energi di depan dibagi dengan  $t$  (waktu) diperoleh:

$$(E/t)_{\text{teoretis}} = (V/t) \cdot H$$
$$(E/t)_{\text{praktis}} = \eta \cdot (V/t) \cdot H$$

dengan mengenali bahwa daya,  $P = E/t$  (Tm/detik), dan debit,  $Q = V/t$  (m<sup>3</sup>/detik), maka:

$$P_{\text{teoretis}} = Q \cdot H$$
$$P_{\text{praktis}} = \eta \cdot Q \cdot H$$

dengan  $\eta$  adalah efisiensi atau rendemen,  $Q$  adalah volume air (m<sup>3</sup>/detik),  $H$  adalah tinggi terjun (m).



# Korelasi antara Daya dan Energi

- Diperoleh rumusan penting yang menghubungkan antara energi total dan daya:

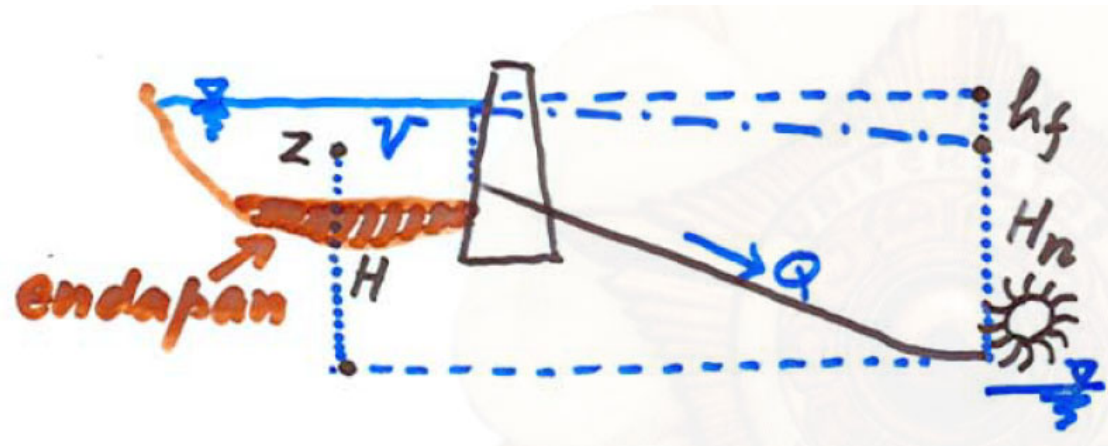
$$E = P \cdot t$$

dengan  $E$  adalah energi dalam Tm,  $P$  adalah daya dalam Tm/detik, dan  $t$  adalah waktu dalam detik atau jam.

- **Daya ( $P$ ):**
  - 1 kw (kilowatt) = 1,36 hp (horse power) = 1,36 dk (daya kuda)
  - 1 dk = 0,736 kw
  - 1 kw = 102 kgm/detik  $\Rightarrow$  1 dk = 75 kgm/detik
  - 1 Tm/detik = 1000 kgm/detik  $\approx$  9,8 kw  $\approx$  13,33 hp
- **Energi, Tenaga ( $E$ ):**
  - 1 kwh = 1 kw • 1 jam = 0,102 Tm/detik • 3600 detik = 367 Tm

# Korelasi antara energi listrik dan air

Energi air tersedia di lapangan



... diubah menjadi tenaga listrik ...

- Total energi yang tersedia

$$E_{praktis} = \eta \frac{VH}{367} \text{ (kwh)}$$

- Daya yang tersedia

$$P_{praktis} = 9,8\eta QH \text{ (kw)} = 13,33\eta QH \text{ (hp)}$$

# Efisiensi atau Rendemen

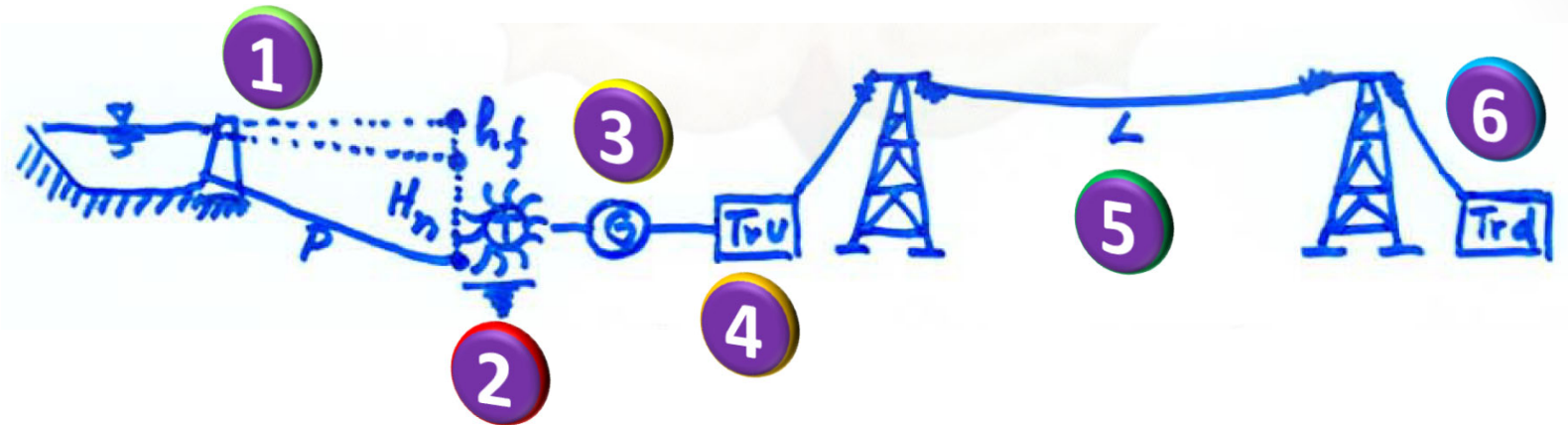


- Efisiensi atau rendemen ( $\eta$ ) adalah perbandingan (dalam %) antara tenaga yang keluar dari suatu mesin atau alat dibagi dengan tenaga yang masuk mesin alat tersebut.

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\%$$

- dengan  $\eta$  adalah efisiensi,  $P_{output}$  adalah daya keluar, dan  $P_{input}$  adalah daya masuk. Nilai  $0 < \eta < 1$ .
- Nilai efisiensi total suatu sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh efisiensi masing-masing bagian yang membentuk sistem tersebut.

# Efisiensi dalam sistem PLTA



Bagian utama dari sistem PLTA

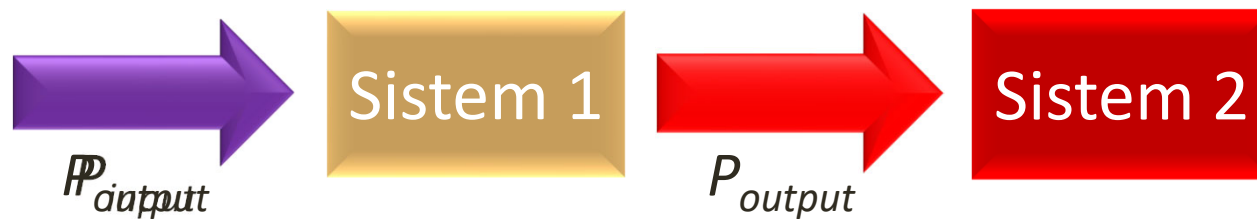
1. Bangunan Air
2. Turbin
3. Generator
4. *Step Up Transformer*
5. Jaringan tegangan tinggi
6. *Step Down Transformer*

# TVA Canal-Lock



... kembali ke [jenis BTA](#) ...

# Efisiensi Gabungan



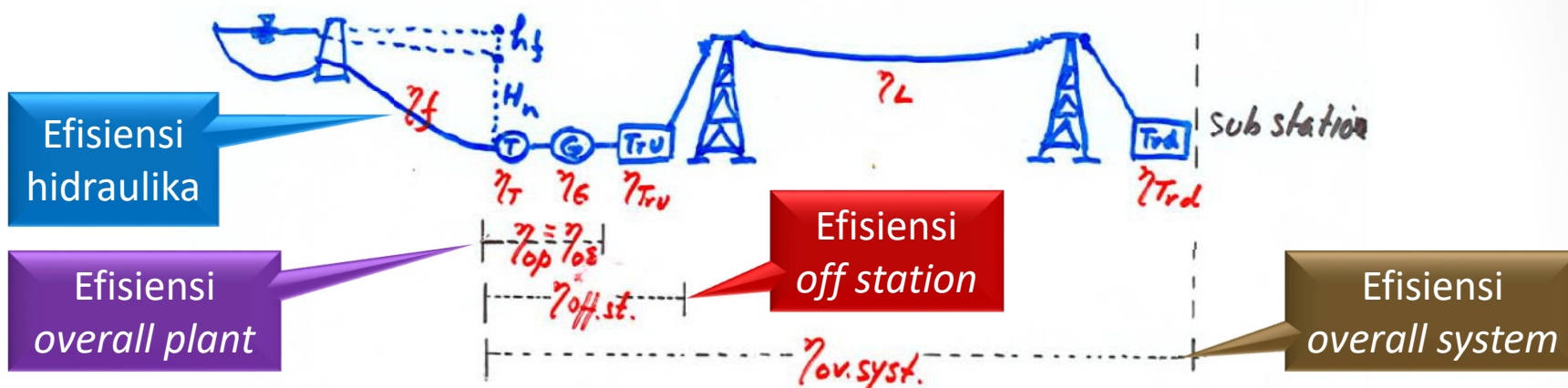
- Efisiensi atau rendemen ( $\eta$ ) suatu sistem gabungan secara konsisten didefinisikan sebagai

$$\eta_{gabungan} = \frac{P_{kanan}}{P_{kiri}} = ?$$

- dengan  $\eta_{gabungan}$  adalah efisiensi,  $P_{kanan}$  adalah daya keluar paling kanan, dan  $P_{kiri}$  adalah daya masuk sebelah kiri.
- Bagaimana cara menghitungnya?

# Efisiensi unsur BTA (1/5)

\* Contoh efisiensi tiap unsur.



$\eta_f$  = efisiensi gesekan }  $\eta_H$  = efisiensi hidrolisik  $\approx 95\%$   
 $\eta_G$  = " bocoran }  
 $\eta_T$  = " turbin = 85-95% Tergantung macam/tipe dan beban (Lih. gb. TA.40)

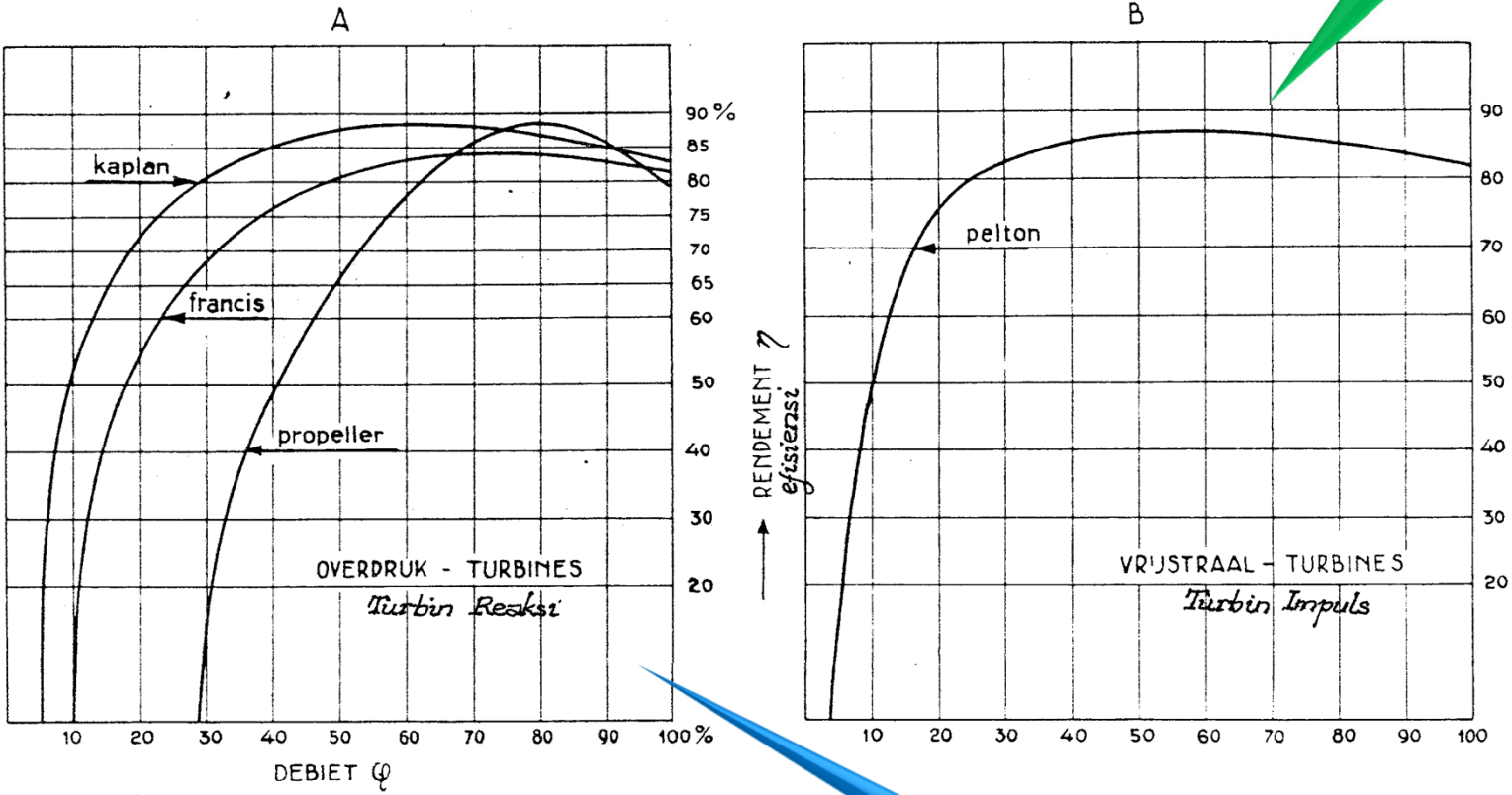
$\eta_G$  = " generator = 95%

$\eta_{Tru}$  = " trafo up = 98%

$\eta_L$  = " transmission lines = 95%

$\eta_{Trd}$  = " trafo down = 98%

# Efisiensi Turbin (2/5)



Turbin Impuls

Turbin Reaksi

RENDEMENTSKROMMEN VOOR :  
*Lengkung efisiensi untuk*  
 A OVERDRUK (REACTIE) - TURBINES { francis, propeller, kaplan }  
*Turbin Reaksi*  
 B VRUSTAAL - TURBINES { pelton }  
*Turbin Impuls*

Overgenomen uit „WASSERKRAFTMASCHINEN“ von dipl.-Ing. L. Quantz (10<sup>e</sup> Auflage 1954) pag. 117 en 212



# Efisiensi unsur BTA (3/5)

- *Overall plant/station efficiency*

$$\eta_{op} = \eta_{os} = \frac{\text{daya lepas generator}}{\text{daya masuk turbin}} \times 100\% = \eta_T \cdot \eta_G$$

- *Off station efficiency*

$$\eta_{off\ station} = \eta_{ls} = \text{daya lepas sentral} = \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tru}$$

- *Overall system efficiency*

$$\eta_{ov.system} = \frac{\text{daya lepas trafo down}}{\text{daya masuk turbin}} \times 100\% = \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tru} \cdot \eta_L \cdot \eta_{Trd}$$

# Efisiensi (4/5)

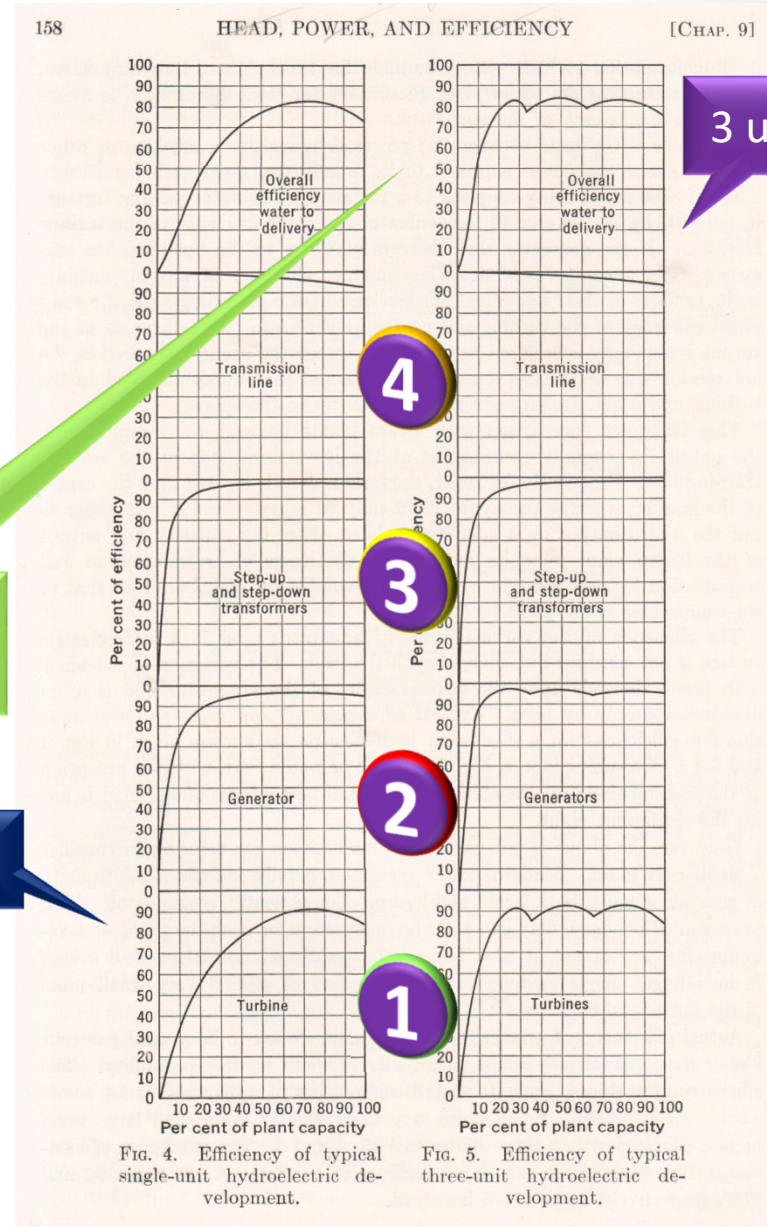
Perbandingan efisiensi antara 1 unit (gambar kiri) dengan 3 unit BTA (gambar kanan)

1. Turbin
2. Generator
3. Step Up-Down Transformer
4. Jaringan tegangan tinggi

Efisiensi seluruh sistem

1 unit

3 unit



# Efisiensi (5/5)

Perbandingan efisiensi sebagai fungsi jumlah unit yang dipasang

1. satu unit
2. dua unit
3. tiga unit
4. banyak unit

semakin banyak unit yang dipasang efisiensi semakin naik.

Efisiensi seluruh sistem

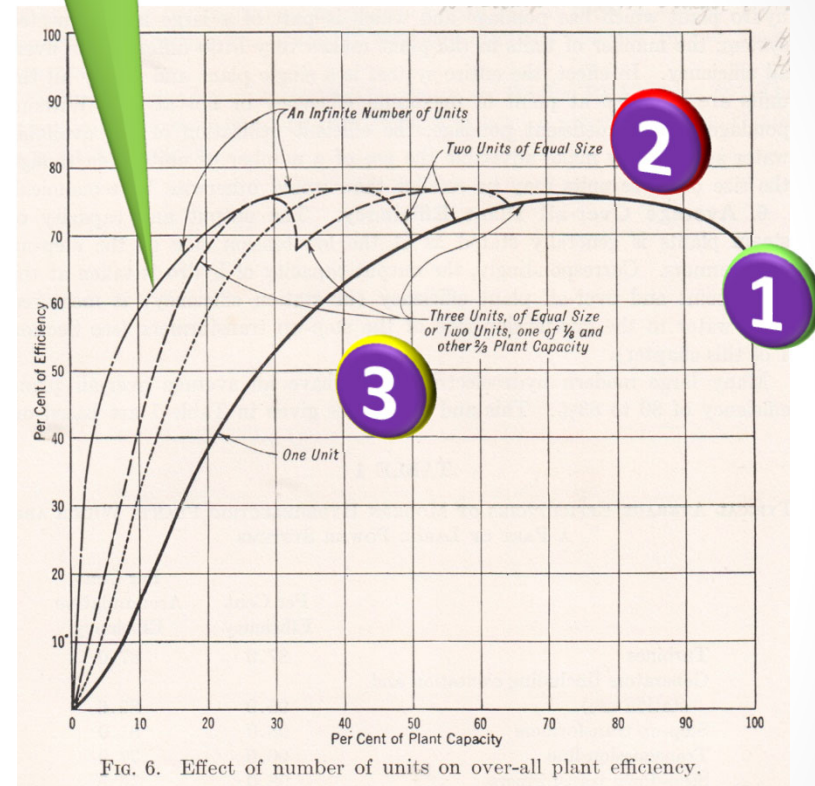


FIG. 6. Effect of number of units on over-all plant efficiency.

# Efisiensi Turbin dan Beban

Efisiensi turbin selalu tergantung kondisi beban, oleh karena itu setiap pernyataan efisiensi sebaiknya dikaitkan dengan kondisi beban pada turbin (Barrows, 1943) yaitu:

- 1. Kondisi Pintu Terbuka Penuh (*Full Gate Point*):** efisiensi pada kondisi pintu bukaan turbin terbuka maksimum ( $Q_{\max}$ ). Pada kondisi ini efisiensi turbin tidak mencapai maksimum ( $\eta_{\max}$ ).
- 2. Kondisi Beban Maksimum (*Full Load Point*):** efisien mencapai maksimum ( $\eta_{\max}$ ) pada saat beban maksimum.

# Hitungan Daya dan Terjun Neto

Semua efisiensi tersebut di atas bila digunakan untuk menghitung daya, harus dikaitkan dengan terjun neto (terjun bersih,  $H_{\text{neto}}$ )

$$\begin{aligned} \text{- Daya lepas turbin} &= 13.33 \eta_T Q H_n \text{ (DK)} \\ &= 9.8 \eta_T Q H_n \text{ (KW)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- Daya lepas sentral} &= 13.33 \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tru} Q H_n \text{ (DK)} \\ &= 9.8 \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tru} Q H_n \text{ (KW)} \end{aligned}$$

# Definisi Terjun ( $H$ , *Head*) (1/4)

Di dalam BTA dikenal berbagai istilah terjun ( $H$ )

- **Terjun Bruto** (*Gross head*,  $H_{br}$ )  
Terjun Bruto adalah selisih tinggi muka air di waduk depan turbin dengan tinggi muka air sesudah saluran pembuangan pada saat turbin tidak berputar (tidak ada aliran air, lihat Gambar [TA 24](#))

# Definisi Terjun ( $H$ , $Head$ ) 2/4

Di dalam BTA dikenal berbagai istilah terjun ( $H$ )

- **Terjun Neto** (*Net head*,  $H_n$ ) atau **Terjun Efektif** (*Effective head*,  $H_{eff}$ ).

Menurut ASME ([American Society of Mechanical Engineers](http://www.asme.org)) dibedakan menjadi 2 macam:

1. Pada Turbin Reaksi (lihat Gambar [TA 24](#)):
  - a) Terjun Neto adalah selisih antara tenaga/energi total (hukum Bernoulli) yang terkandung dalam air tiap satuan berat, sebelum masuk rumah turbin dan sesudah keluar dari pipa isap (*draft tube*).
  - b) Terjun Neto adalah selisih tenaga/energi total (hukum Bernoulli) sebelum masuk rumah turbin dan sesudah keluar dari pipa isap (*draft tube*).

# Definisi Terjun ( $H$ , *Head*) 3/4

Di dalam BTA dikenal berbagai istilah terjun ( $H$ )

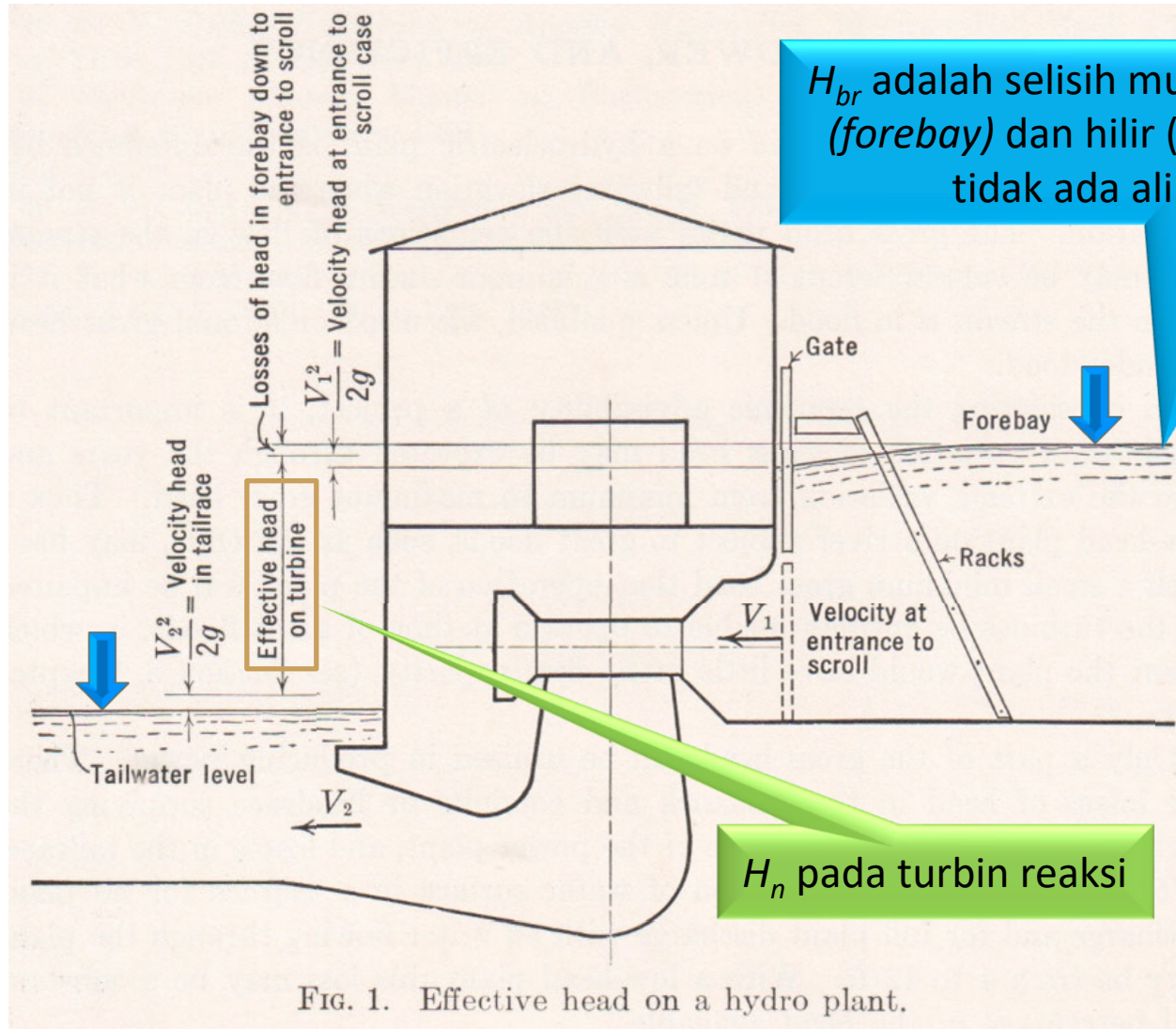
- **Terjun Neto** (*Net head*,  $H_n$ ) atau **Terjun Efektif** (*Effective head*,  $H_{\text{eff}}$ ).

Menurut ASME ([American Society of Mechanical Engineers](http://www.asme.org)) dibedakan menjadi 2 macam:

2. Pada Turbin Impuls (lihat Gambar [TA 24](#) dan [TA 36](#)):  
Terjun Neto adalah selisih antara tenaga/energi total (hukum Bernoulli) sebelum ujung curat (*nozzle*), dikurangi dengan tinggi titik terendah pada “*pitch circle*” dari sudu-sudu turbin. Yang terakhir ini, umumnya, sesuai dengan sumbu ujung curat.



# Definisi Terjun ( $H$ , Head) 4/4



$H_{br}$  adalah selisih muka air hulu (forebay) dan hilir (tailwater) tidak ada aliran

$H_n$  pada turbin reaksi

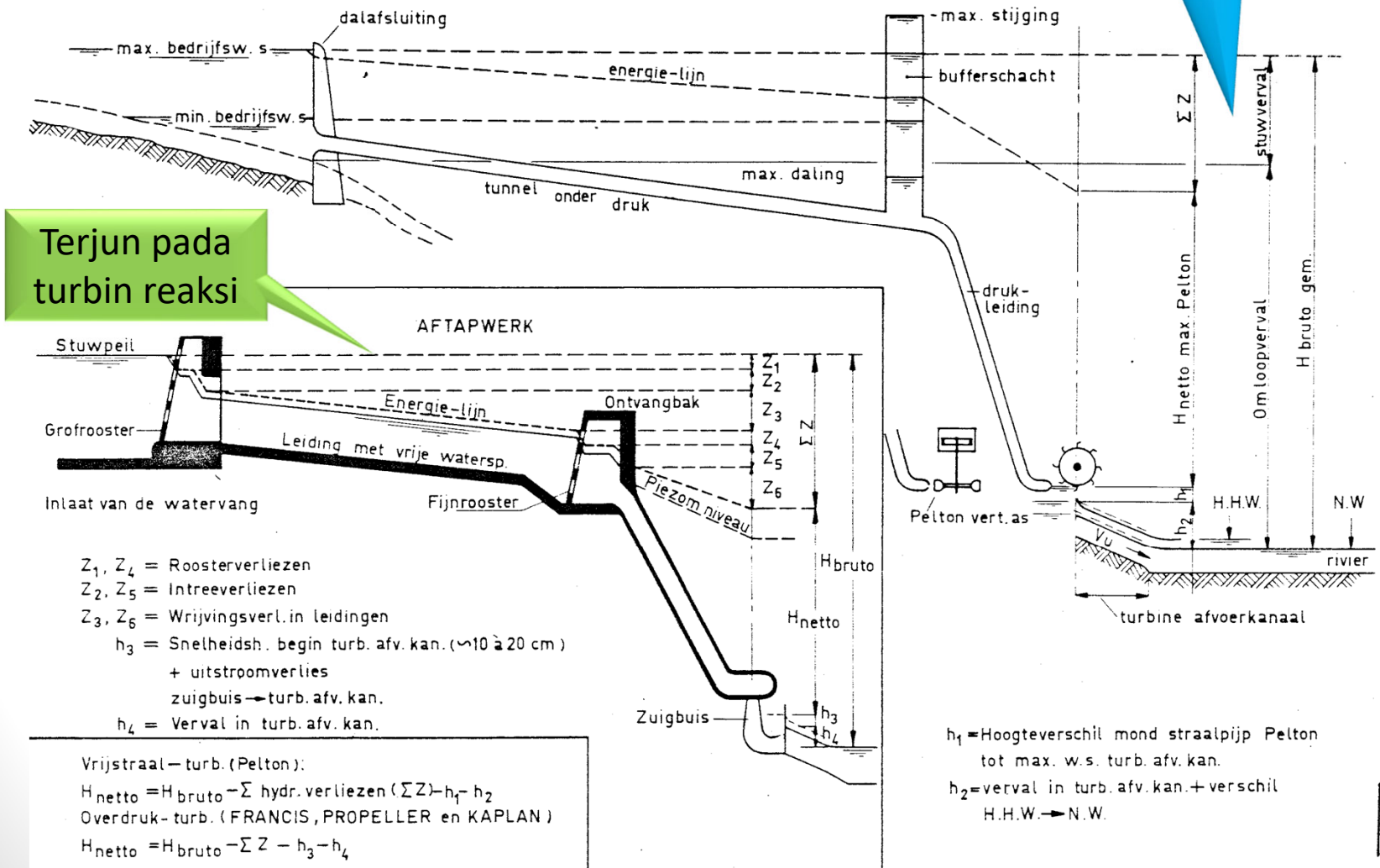
FIG. 1. Effective head on a hydro plant.

William P. Creager, Joel D. Justin, Hydroelectric Handbook, Second Edition, 1950, John Wiley & Sons, Inc., New York.

# TA 24: Tinggi Terjun Bruto dan Neto

## BEPALING VAN DE NETTO DRUKHOOGTE VAN EEN RESERVOIRWERK

Terjun pada turbin impuls



# Definisi Terjun ( $H$ , *Head*)

Di dalam BTA dikenal berbagai istilah terjun ( $H$ )

- **Terjun Rancangan** (*Design head*,  $H_d$ )

Terjun Rancangan adalah terjun neto untuk perancangan turbin oleh pabrik dengan efisiensi terbaik. Umumnya terjun rancangan dipilih sedemikian rupa, sehingga pembangkitan energi listrik rerata setahunnya dengan terjun diatas dan dibawah terjun rancangan adalah sama.

# Definisi Terjun ( $H$ , *Head*)

Di dalam BTA dikenal berbagai istilah terjun ( $H$ )

- **Terjun Terukur** (*Rated head,  $H_r$* ), ada 2 definisi:
  - a) Terjun Terukur adalah terjun neto pada keadaan daya turbin yang dijamin (digaransi) oleh pabrik (dalam DK).
  - b) Terjun Terukur adalah terjun neto pada keadaan daya turbin dengan pintu-pintu terbuka penuh (*full gate point*) memberikan kapasitas terukur ("*rated capacity*") generator dalam KW.

# Contoh hitungan awal BTA (1/2)

CONTOH HITUNGAN PADA PLTA SIGURAGURA (ASAHAN).

$$H_{br} = 219 \text{ m} \quad \text{Diperkirakan } H_n = 216 \text{ m}$$
$$Q_{rL} = 80 \text{ m}^3/\text{det} \quad Q_{min} = 60 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\text{Efisiensi lepas sentral} = \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tru} = 86\%$$

$$\text{Maka daya lepas sentral} = \eta \cdot 9.8 Q H_n \text{ kw}$$
$$= 0.86(9.8)(80)(216) = 145.000 \text{ Kw}$$

Volum danau Toba ditaksir =  $3 \times 10^9 \text{ m}^3$  (tiap tahun terisi)  
jika terjun total antara danau Toba dan Selat Malaka  
yang dapat dimanfaatkan = 800 m  
dan efisiensi overall system semua PLTA pada proyek  
Asahan ditaksir = 61%, maka jumlah tenaga air yang  
dapat diproduksi

$$E_{1th} = \frac{\eta V H}{367} = \frac{0.61(3 \times 10^9)(800)}{367} = 4.10^9 \text{ Kwj.}$$

# Contoh hitungan awal BTA (2/2)

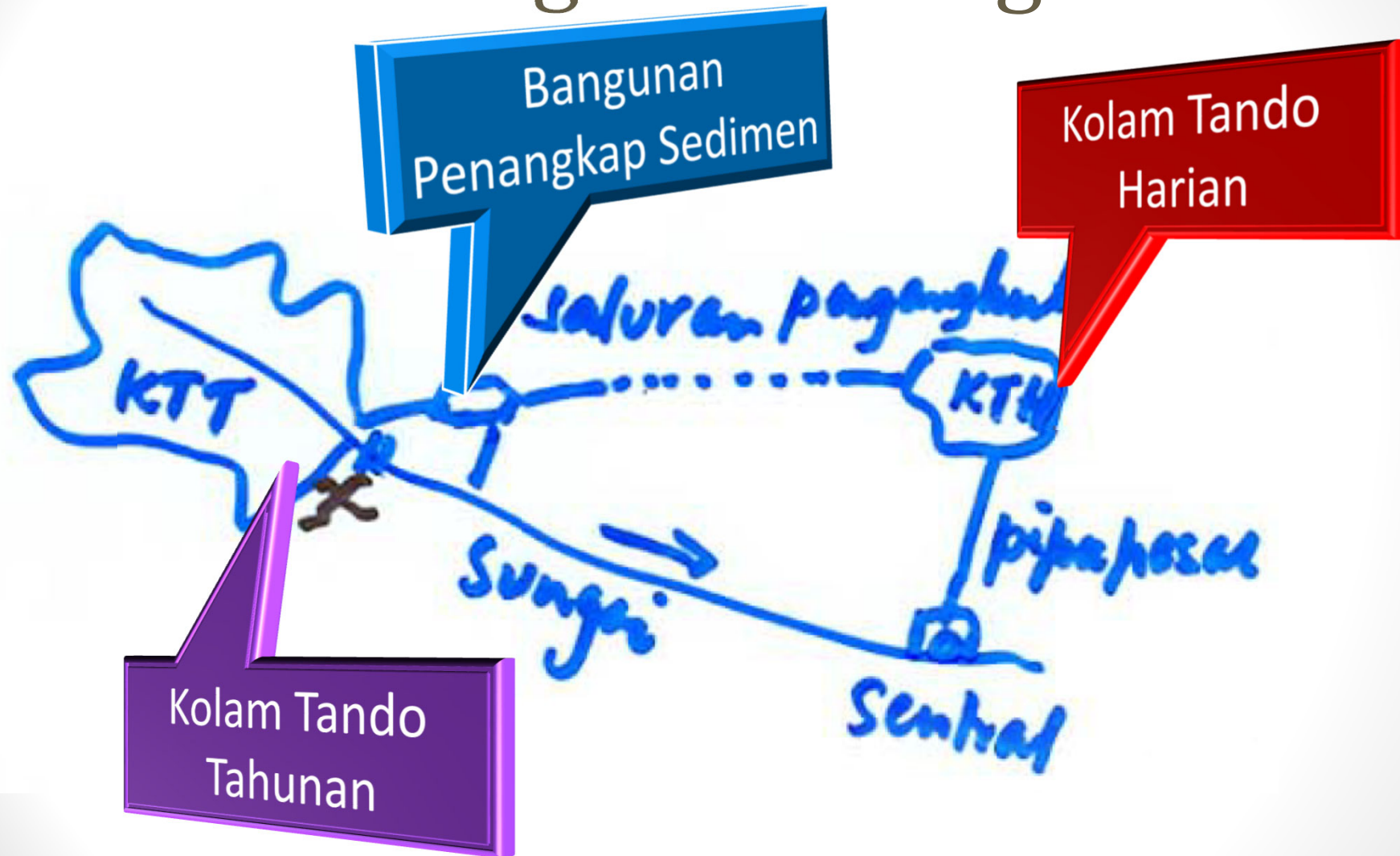
Jika harga penjualan tenaga listrik = Rp 65/kwh,  
maka hasilnya tiap tahun adalah:

$4 \cdot 10^9 \times \text{Rp } 65,- = \text{Rp } 260 \text{ milyar.}$  (Hasil jika seluruh  
proyek Asahan telah  
selesai)

Perlu diingat bahwa PLTA bersifat "self regenerative"  
Keuntungan PLTA →

- airnya "cost less"
- tidak seberapa di-  
pengaruhi gerakan  
buruh.

# Skema Bangunan Tenaga Air



# Jenis Turbin Air

- Turbin Air yaitu mesin yang mengubah energi air (aliran) menjadi energi putar, kemudian menjadi energi listrik.
- **Turbin Impuls** yaitu turbin air yang mengubah energi potensial dan energi tekanan hidrostatis menjadi energi kecepatan aliran. Contoh: Turbin Pelton.
- **Turbin Reaksi** yaitu turbin air yang menggunakan energi total (potensial + tekanan hidrostatis + kecepatan aliran). Contoh: Turbin Francis, Turbin Kaplan, Turbin Bulb.



# Turbin Impuls & Reaksi

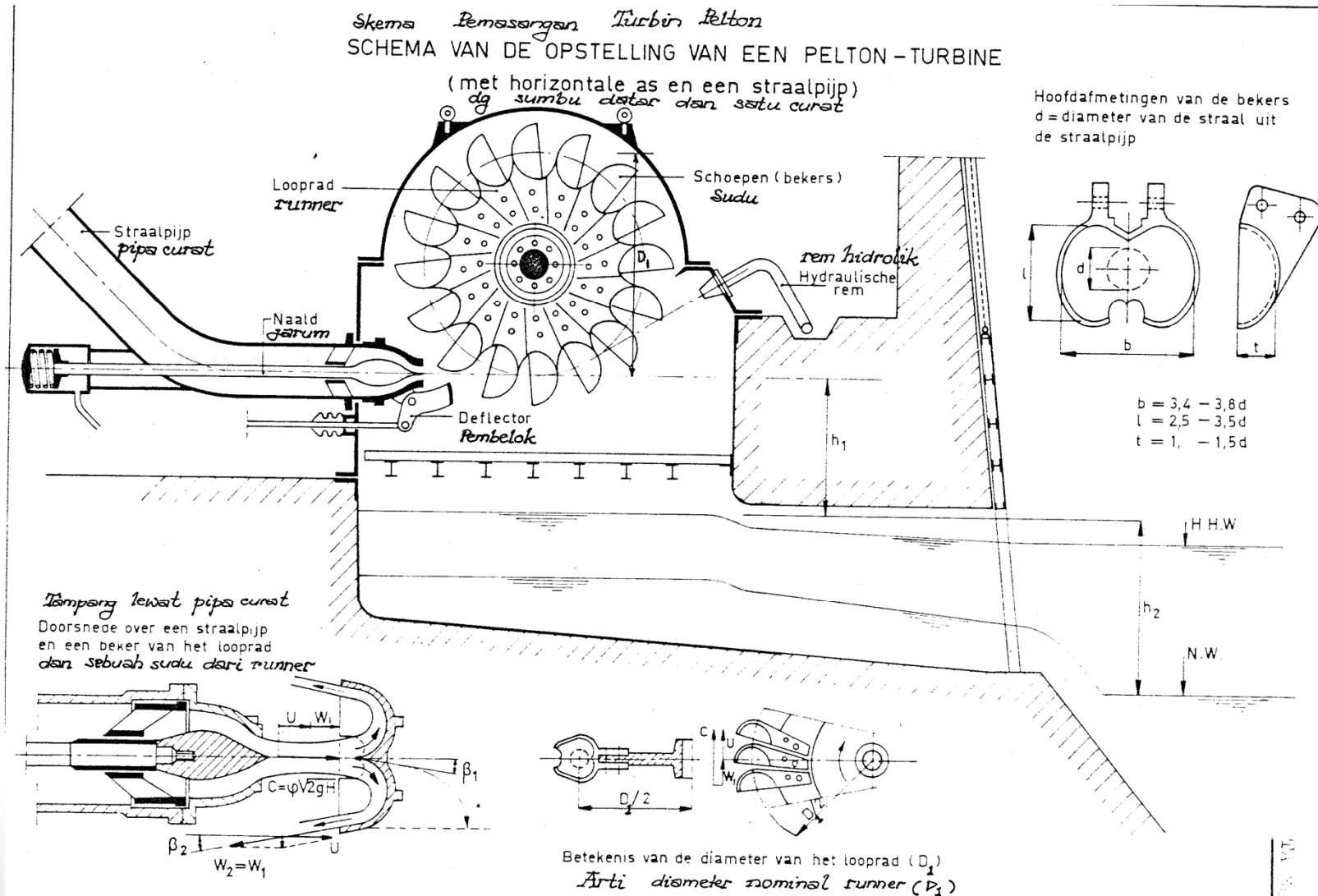
- Energi air dinyatakan dalam rumus Bernoulli:

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

dengan  $E$  adalah energi air total,  $z$  adalah energi potensial (tinggi elevasi),  $\frac{p}{\gamma}$  adalah energi tekanan hidrostatika (tinggi tekanan),  $\frac{V^2}{2g}$  adalah energi kecepatan air (tinggi kecepatan),  $\alpha$  adalah koefisien koreksi energi.

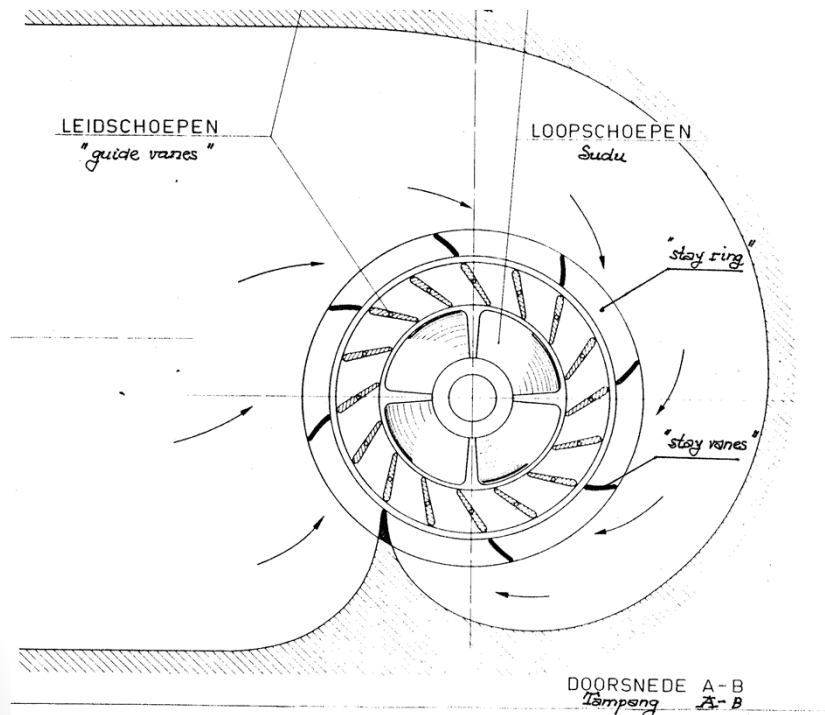
1. Turbin impuls mengubah energi potensial dan tekanan menjadi energi kecepatan untuk memutar turbin.
2. Turbin reaksi menggunakan energi total untuk memutar turbin.

# Turbin Impuls – TA 36

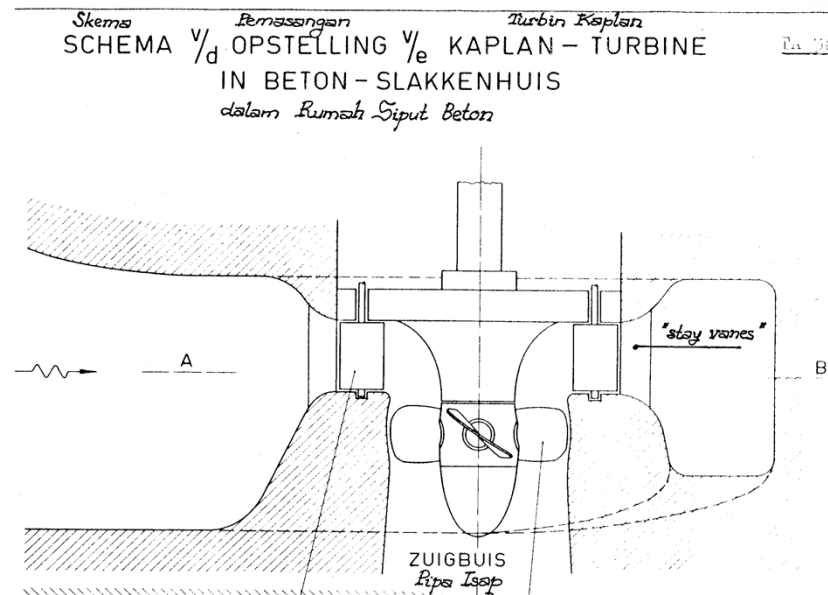


# Turbin Reaksi

## Tampak Atas

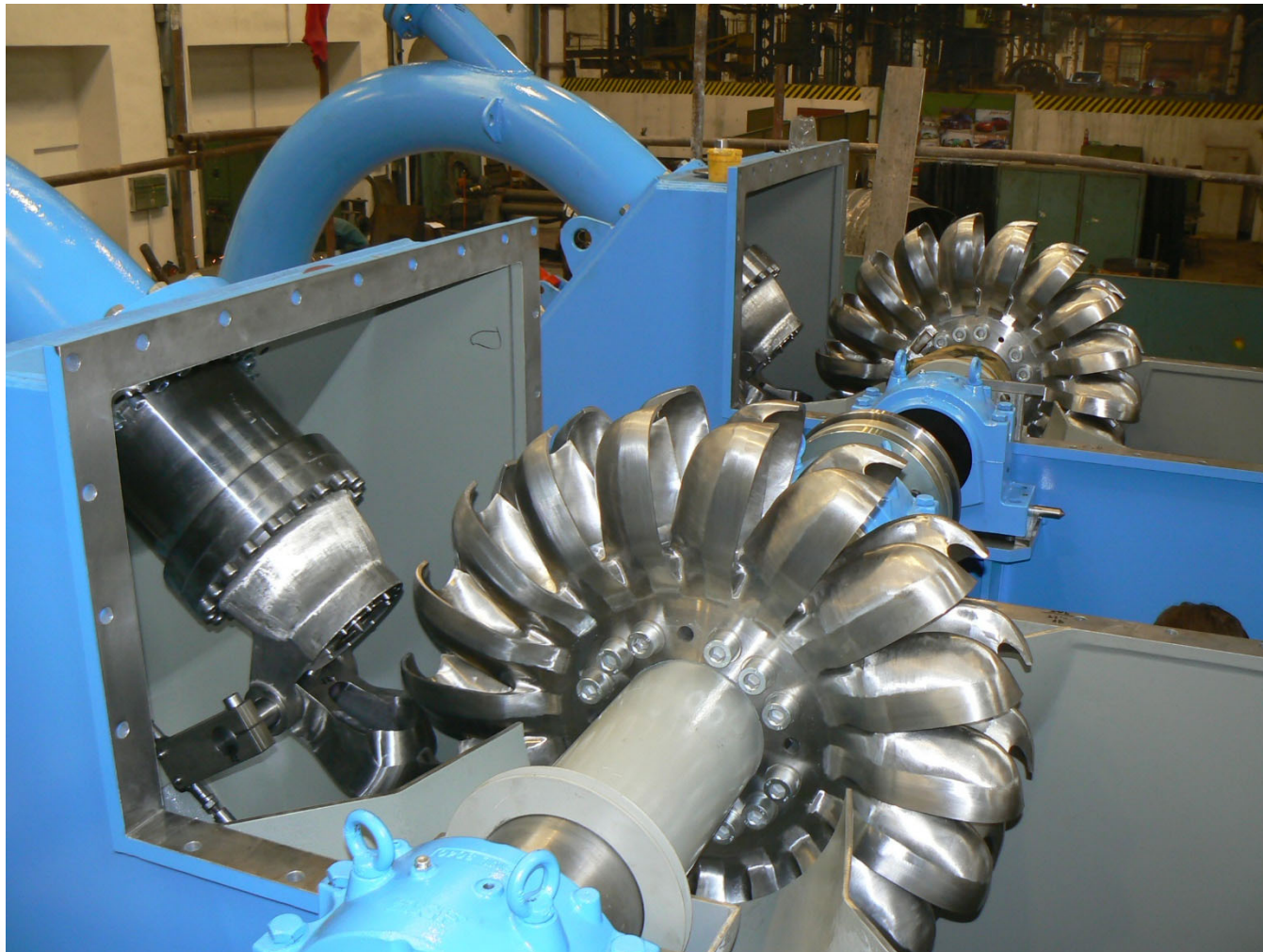


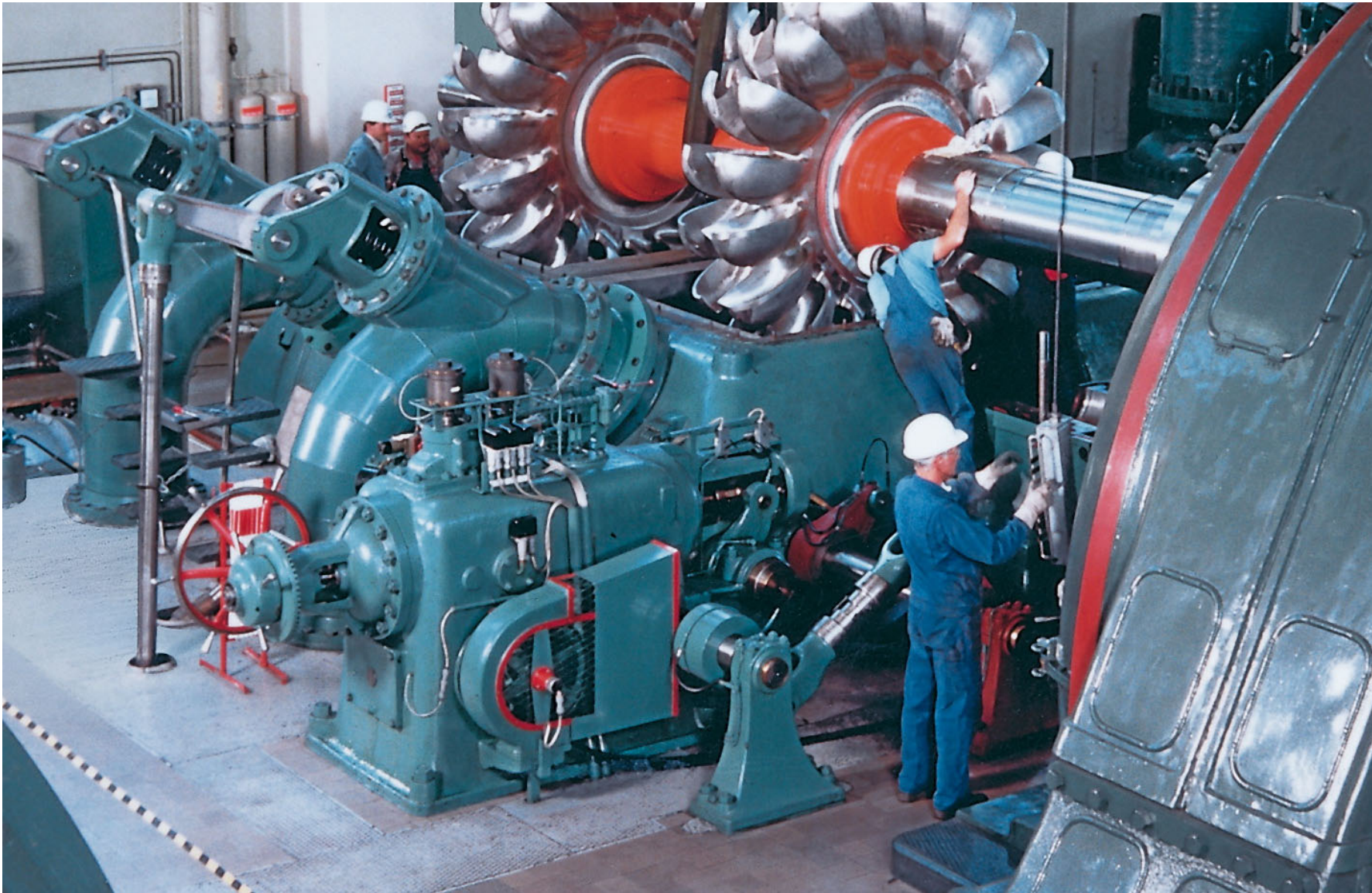
## Potongan



# Turbin Pelton

- Pencipta: Lester Allan Pelton



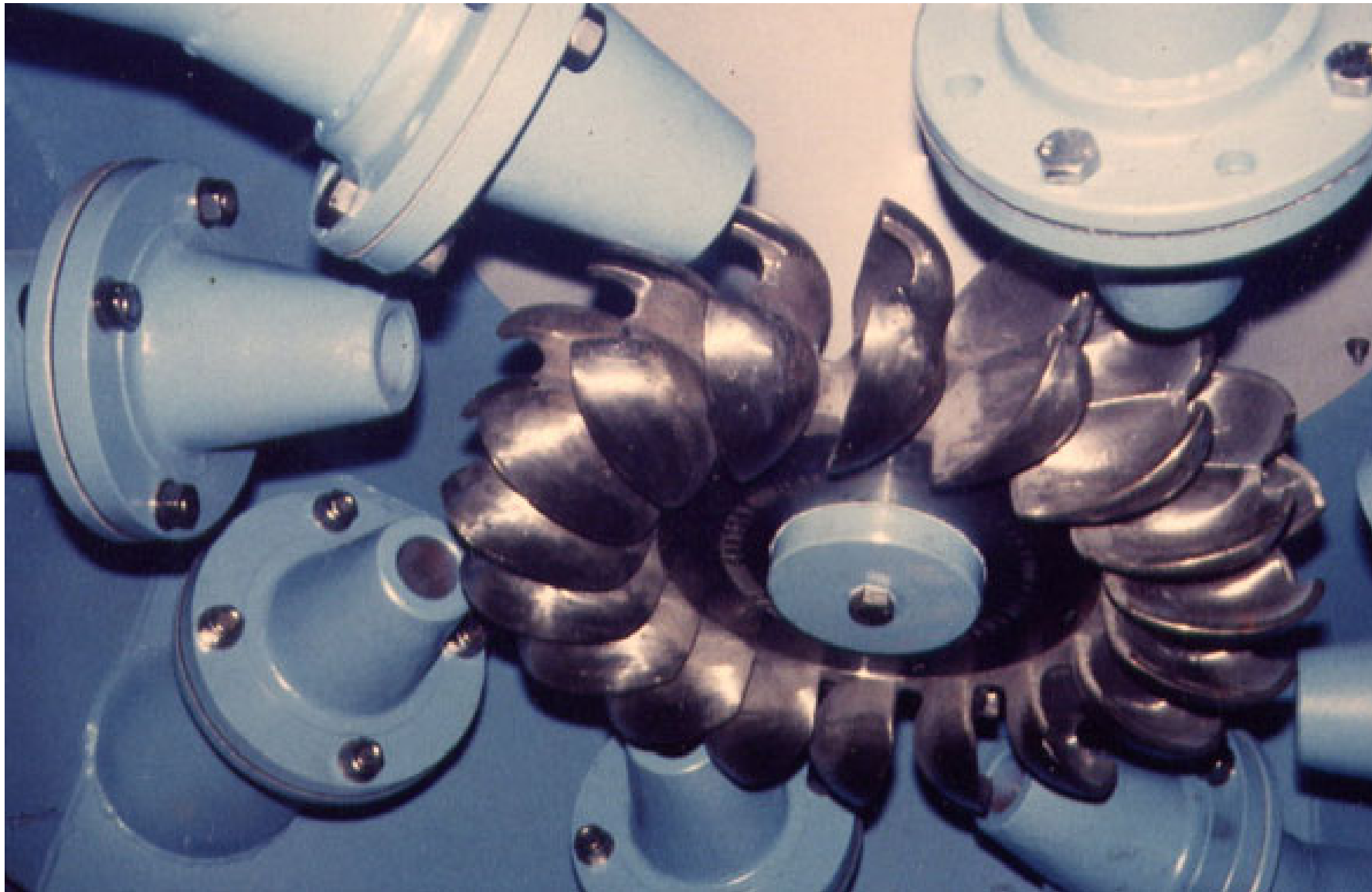


<http://luk.staff.ugm.ac.id/bta> Saturday, June 26, 2021

## **Turbin Pelton sedang diperbaiki**

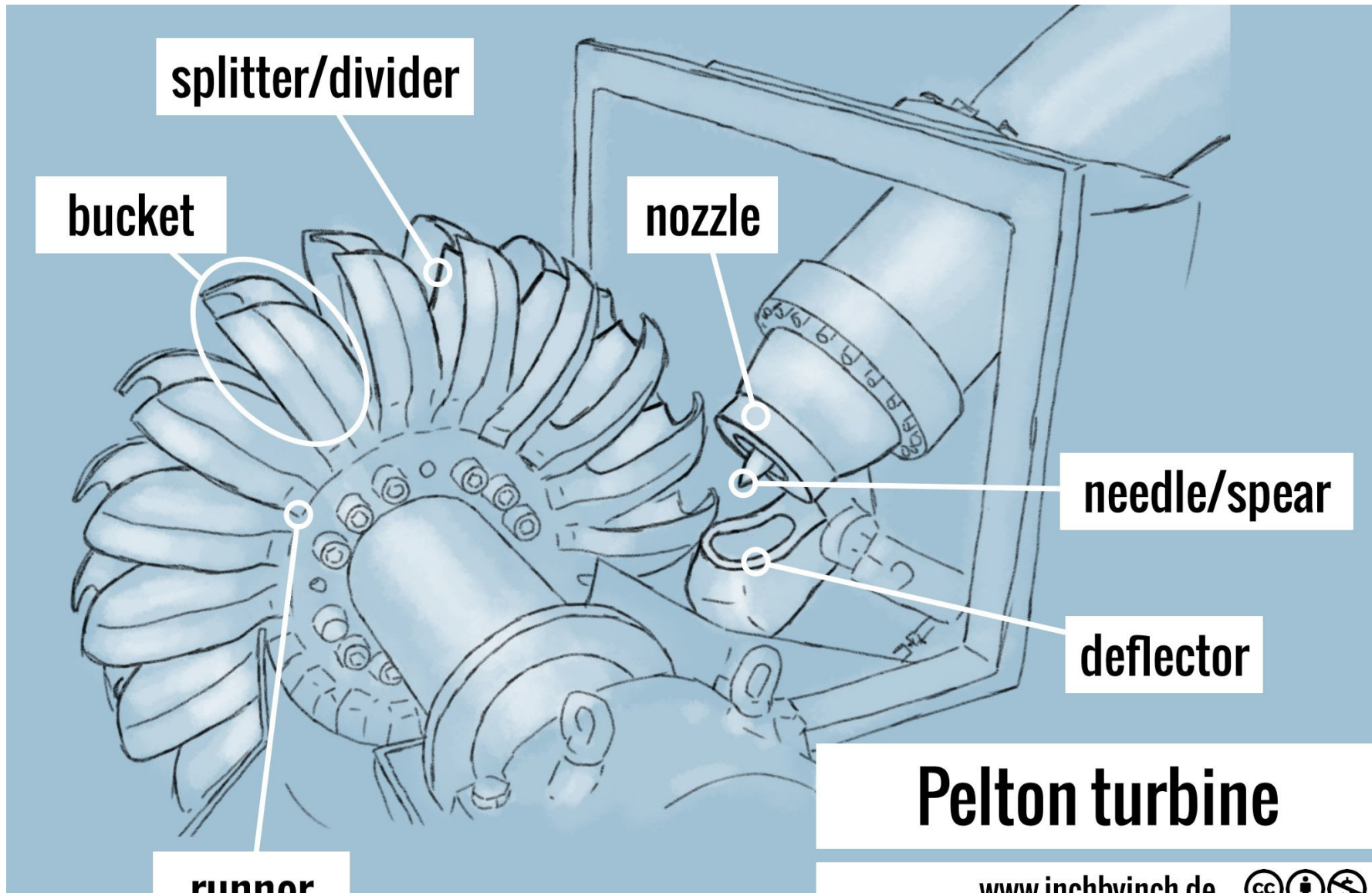
[https://en.wikipedia.org/wiki/Pelton\\_wheel](https://en.wikipedia.org/wiki/Pelton_wheel)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Walchensee\\_Hydroelectric\\_Power\\_Station](https://en.wikipedia.org/wiki/Walchensee_Hydroelectric_Power_Station)



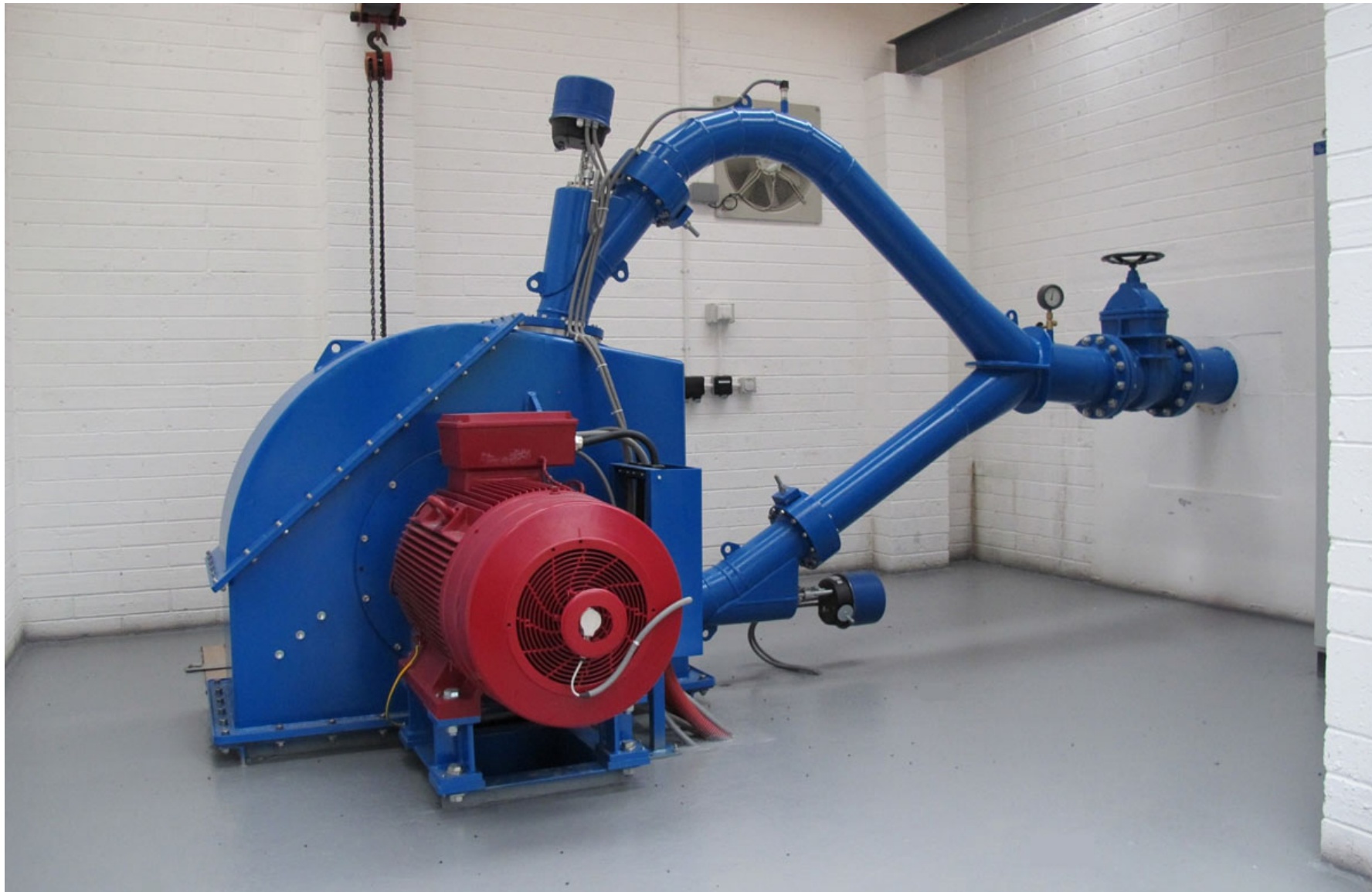
## **Turbin Pelton dengan poros vertikal**

[http://evans-engineering.co.uk/bespoke\\_turbines.cfm](http://evans-engineering.co.uk/bespoke_turbines.cfm)



## Sketsa Turbin Pelton

<http://inchbyinch.de/inch06/>



<http://luk.staff.ugm.ac.id/bta> Saturday, June 26, 2021

## Turbin Pelton dan Generatornya

<http://www.hydrohrom.cz/EN/pelton-turbine-photos.php?album=Glencrosh>



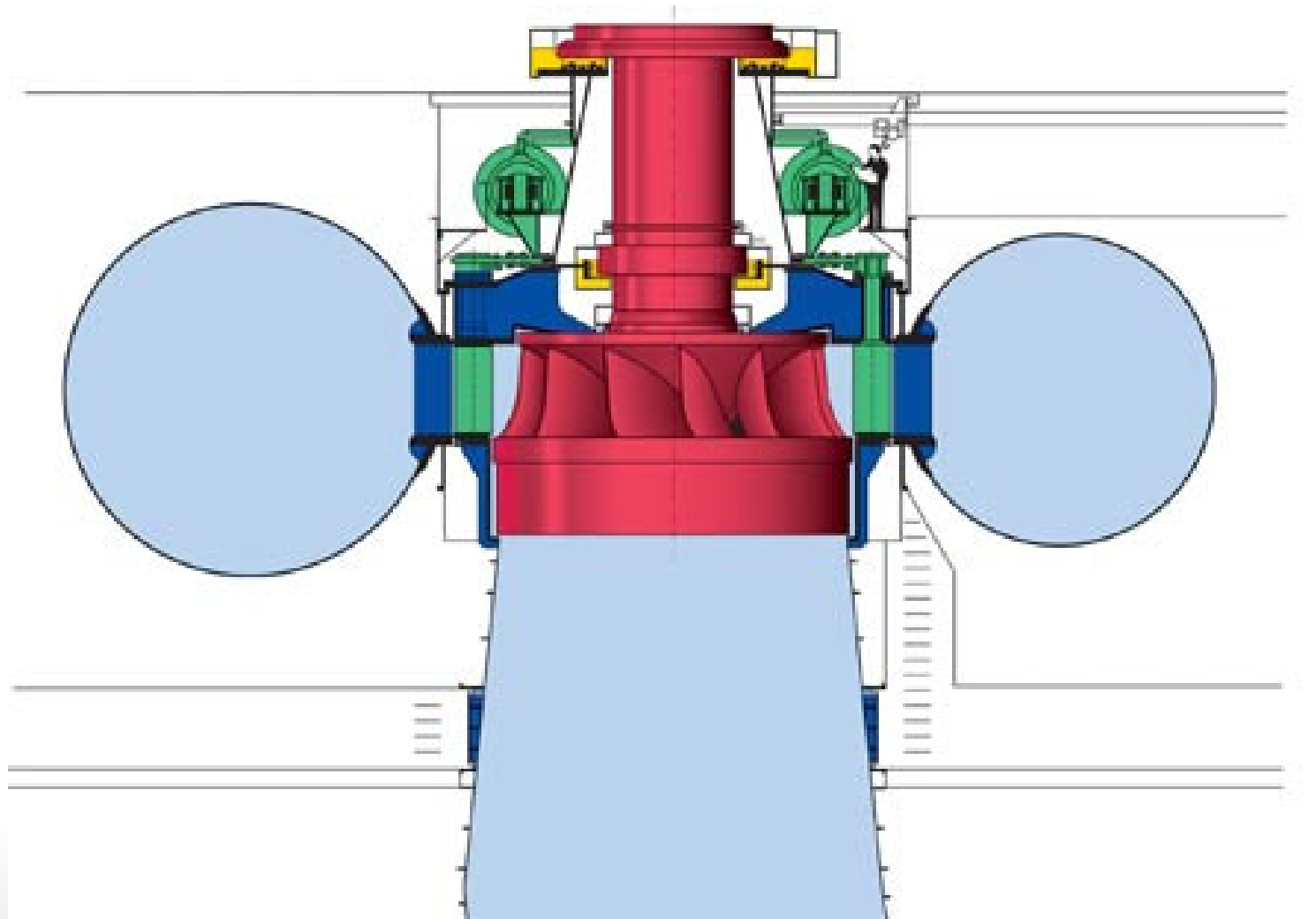
# Andritz Hydro: Turbin Pelton



Sumber: [https://youtu.be/Qwh6N\\_PSZ\\_Q](https://youtu.be/Qwh6N_PSZ_Q)

# Turbin Francis

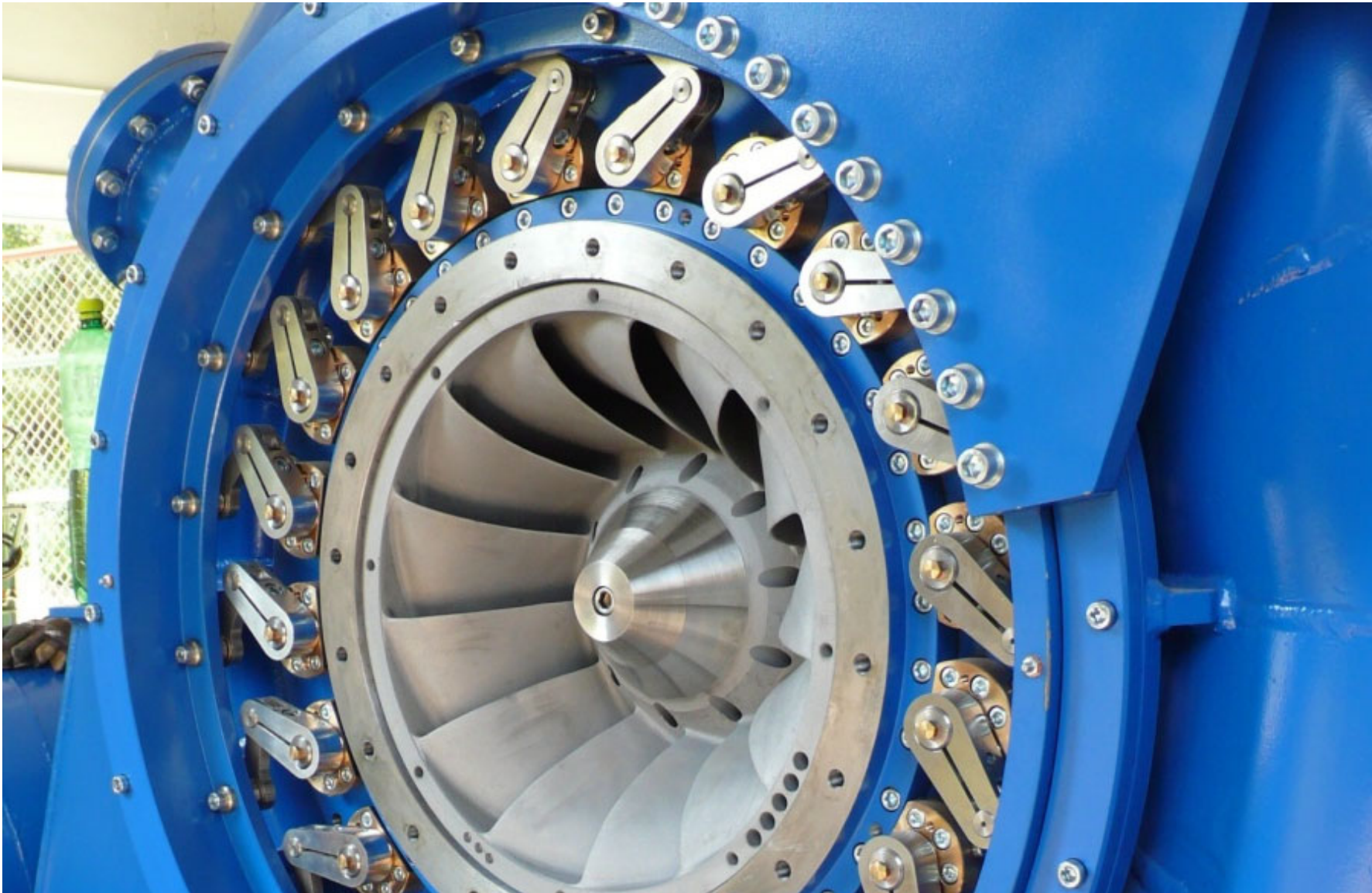
- Pencipta: [James Bicheno Francis](#)



# Andritz Hydro: Turbin Francis



Sumber: <https://youtu.be/S3MQJSDoTuw>



## **Turbin Francis bagian dalam**

<http://www.hydrohrom.cz/EN/Francis-Turbines.html>



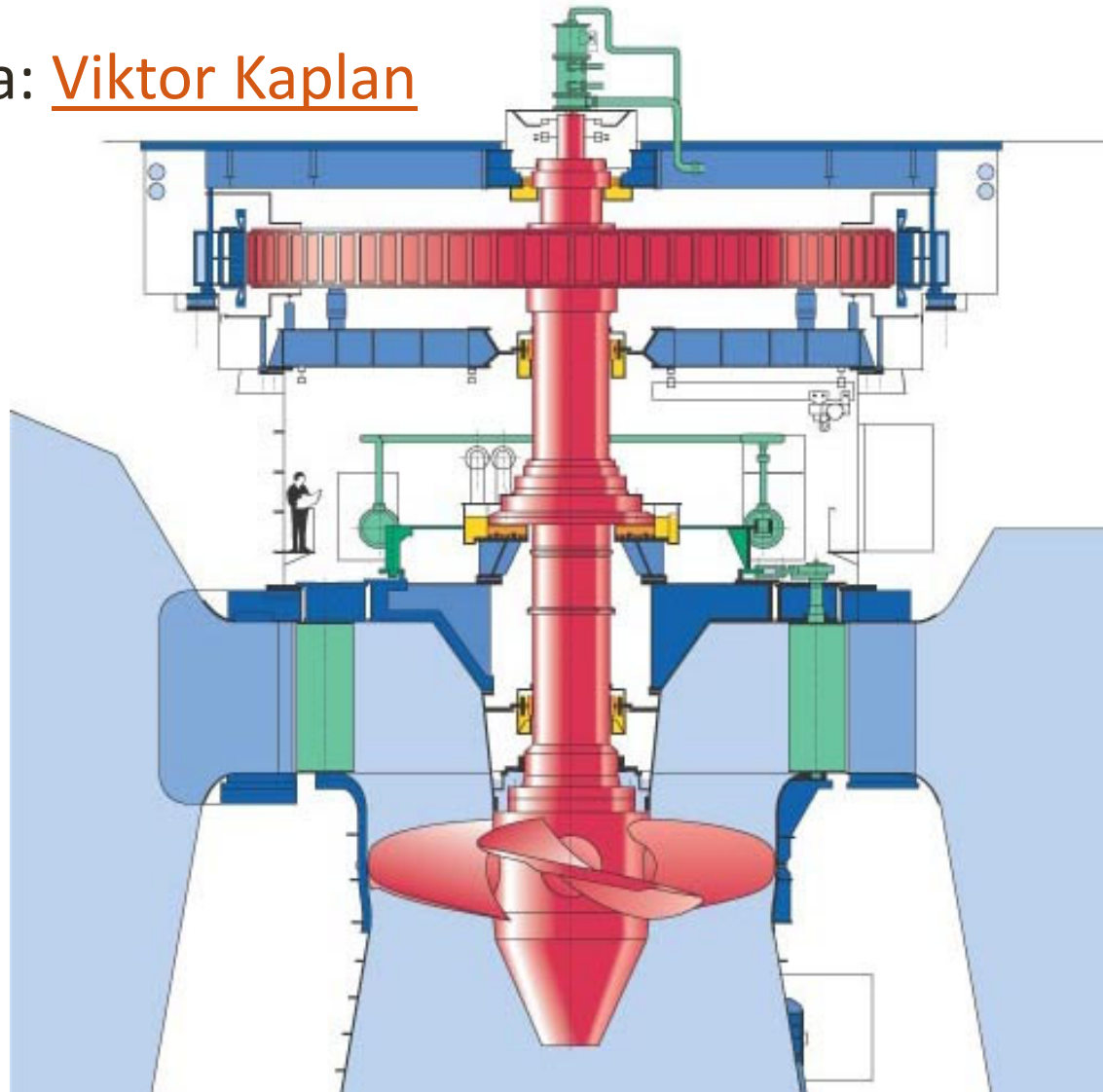
<http://luk.staff.ugm.ac.id/bta> Saturday, June 26, 2021

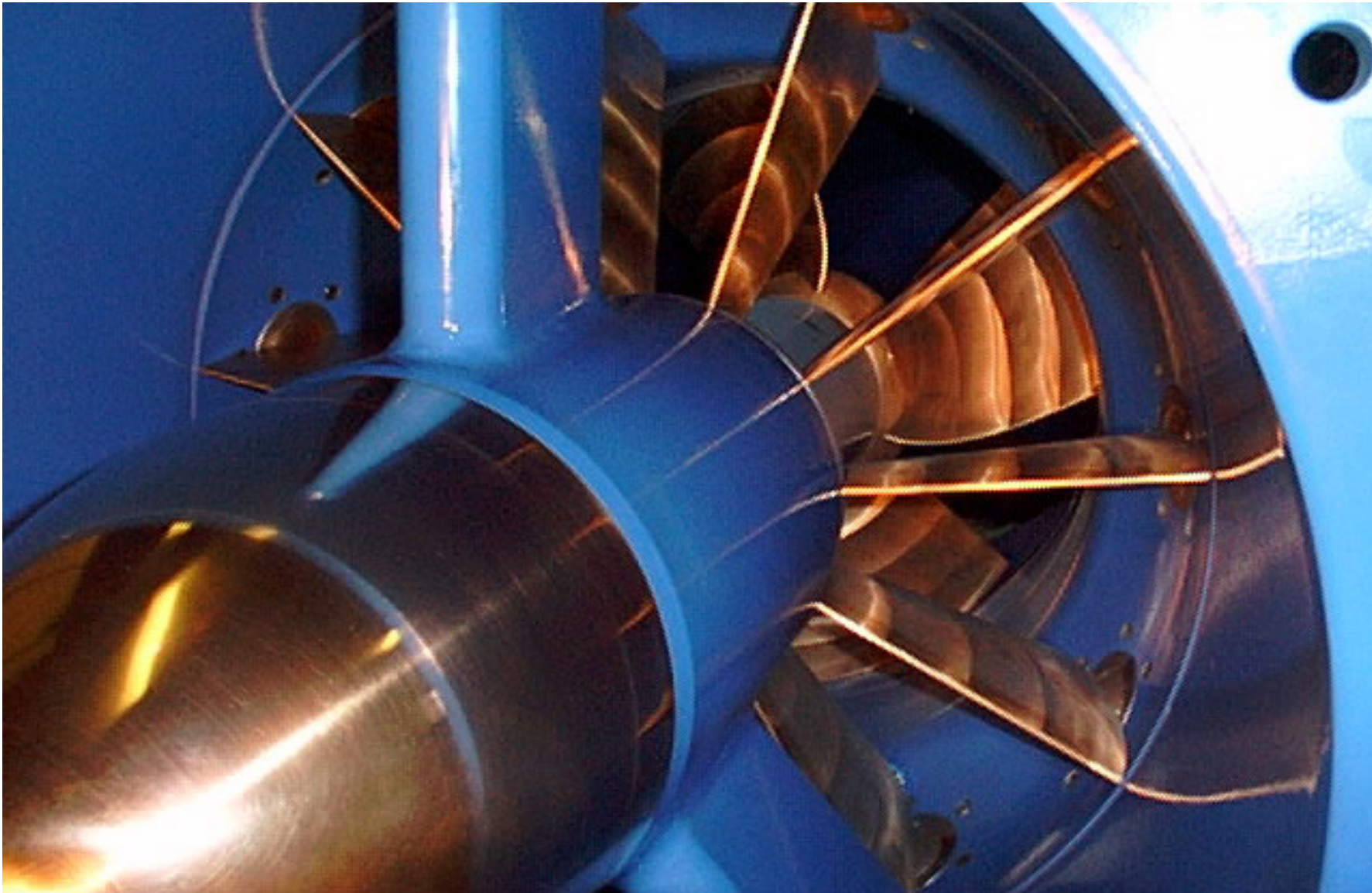
## Turbin Francis untuk mikrohidro

<http://www.hydrohrom.cz/EN/Francis-Turbines.html>

# Turbin Kaplan

- Pencipta: Viktor Kaplan





## Turbin Kaplan

<http://www.hydrohrom.cz/EN/sk-type-s-shape-double-regulated-horizontal-kaplan-turbine.html>

# Turbin Kaplan



Turbin Kaplan

<http://www.hydrohrom.cz/EN/sk-type-s-shape-double-regulated-horizontal-kaplan-turbine.html>



# VOITH: Turbin Kaplan

**VOITH**  
Kaplan turbine

Sumber: <https://youtu.be/g1uY50rbbGI>

# Acuan untuk pengayaan

- **BTA Sederhana:** BTA tidak harus selalu berteknologi tinggi, tetapi juga dapat berupa teknologi tepat guna yang dapat diaplikasikan pada daerah pedesaan. Contoh: [Zimbabwe](#), [Nepal](#), [Laos](#), Bolivia: [Water Motor](#), [Detailed Drawing](#), [Australia](#)
- **BTA: Baterai Waduk Pompa.** Jenis BTA waduk-pompa sekarang naik daun setelah tenaga bayu dan surya membanyak. Karena sifatnya yang sangat tergantung kondisi angin dan sinar matahari, maka perlu baterai penyimpan tenaga saat berlebihan dan menyalurkan saat kekurangan. Contoh: [Practical Engineering](#), [saVRee 3D](#), [www.energy.gov](#), [Wikipedia](#), [Australia](#), [Limmern \(9 yrs construction\)](#), [Statkraft ABB GE](#), [Gordon Butte](#), [Switzerland](#), [Australia Snowy 2.0](#).

... kuliah sebelumnya sampai di sini ...

# BANGUNAN TENAGA AIR