

Sustainable Power Production and Transportation

Hydropower, CHP and nuclear

Ola Carlson

Chalmers University of Technology
Lecture 201209

Professor Stephen Lawrence

Leeds School of Business

University of Colorado

Boulder, CO

And some more from Ola Carlson, Chalmers

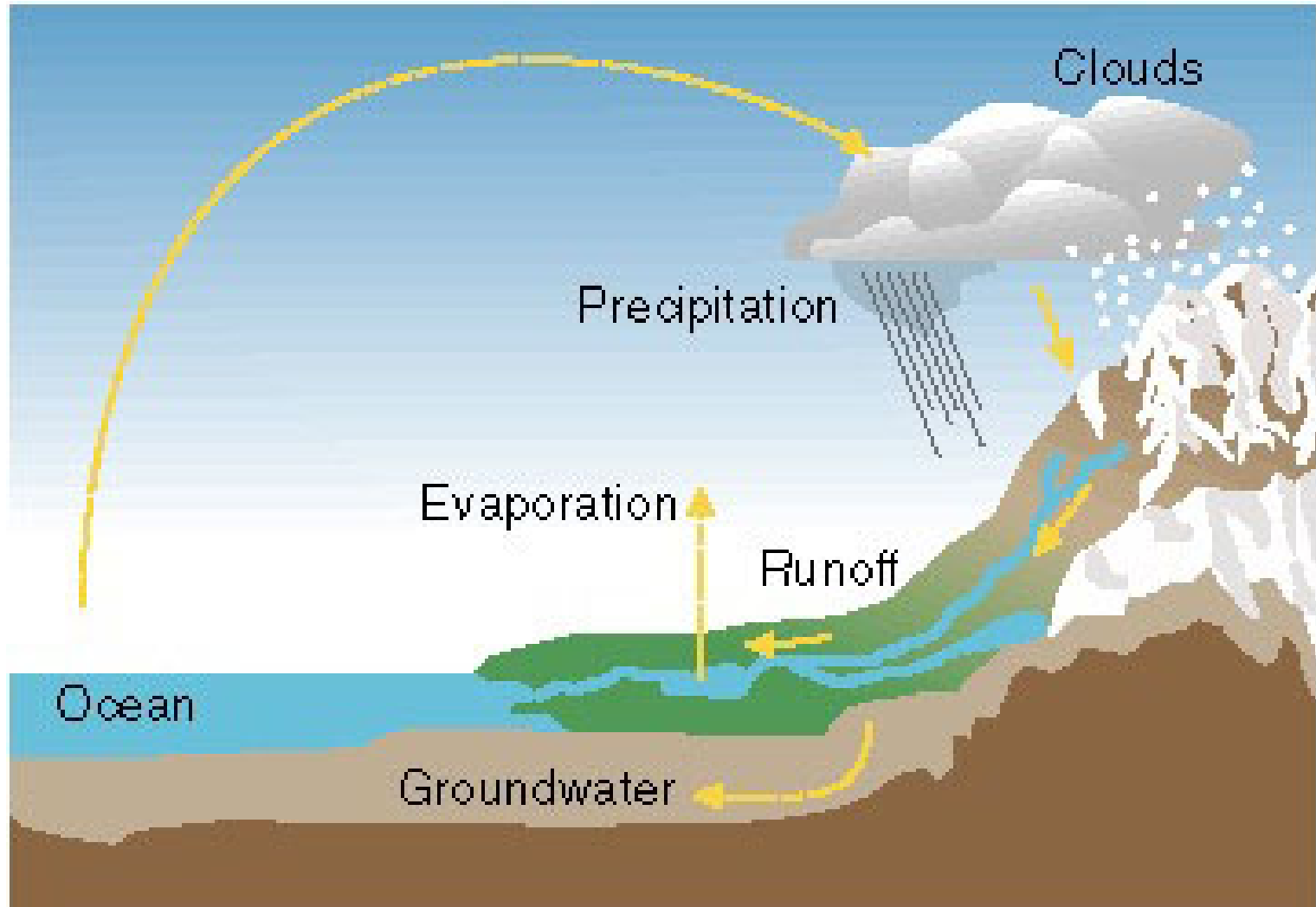


Hydropower

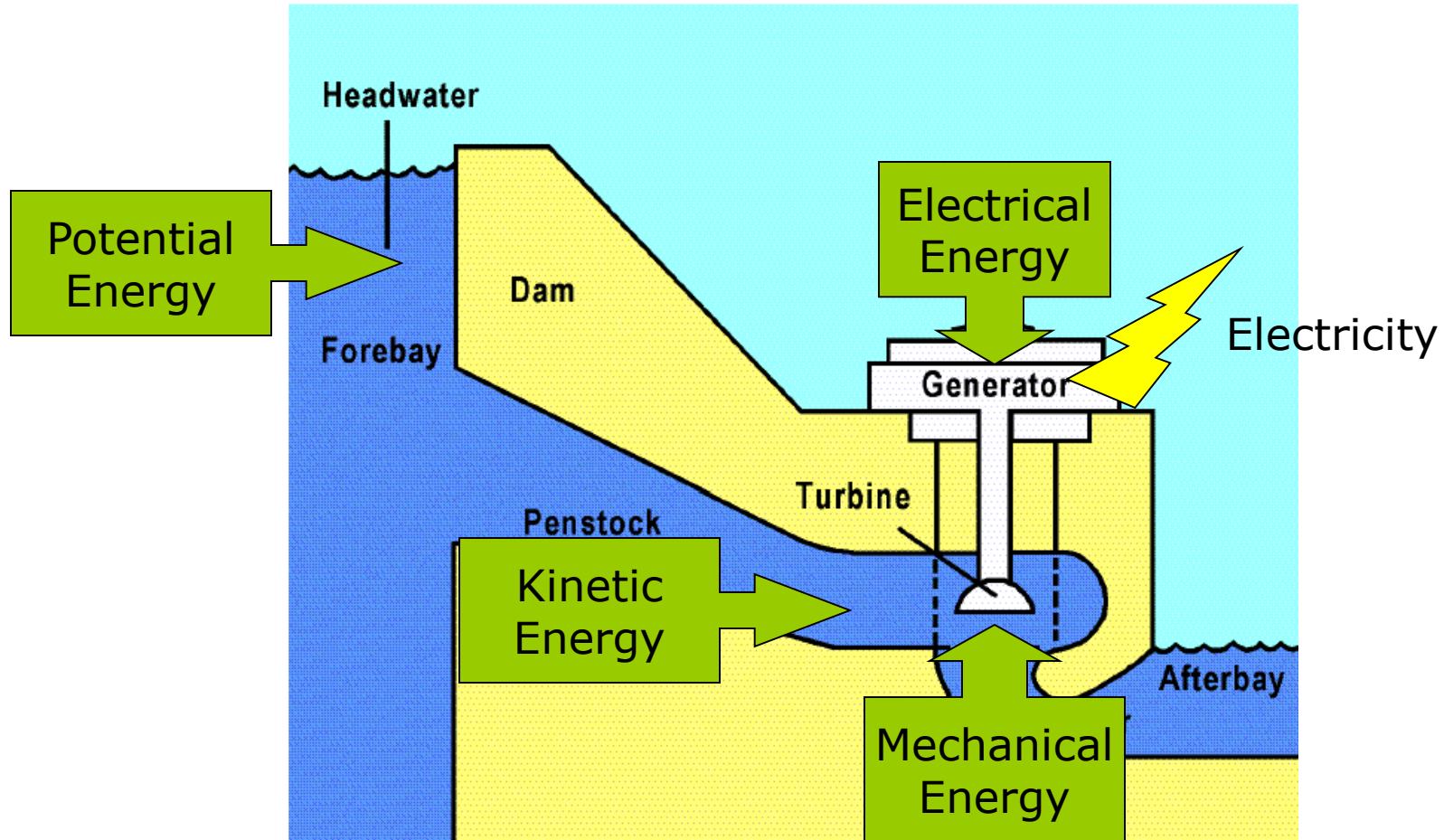
Learning outcomes:

1. describe the technical characteristics and performance of electric power generation by **hydro power**
2. make choices of solutions and justifications due to relevant criteria's of the problems and opportunities associated with the use of **power production**
3. get insight into the possibilities and limitations of technology, its role in society and the responsibility of humans for its use, including, social, economic as well as environmental and occupational health aspects

Hydrologic Cycle

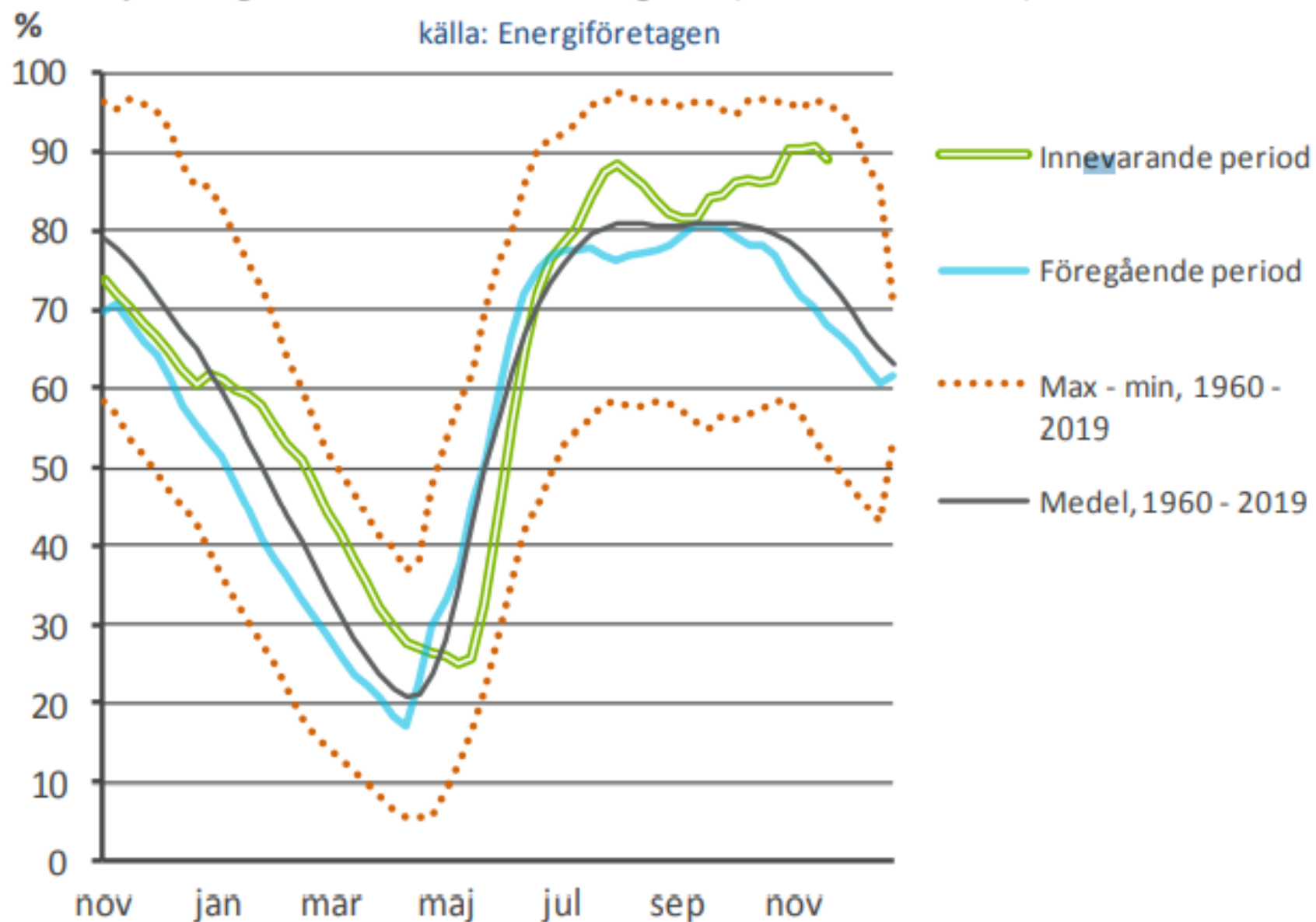


Hydropower to Electric Power



Fyllnadsgrad i svenska vattenmagasin (100%= 33,6 TWh)

källa: Energiföretagen

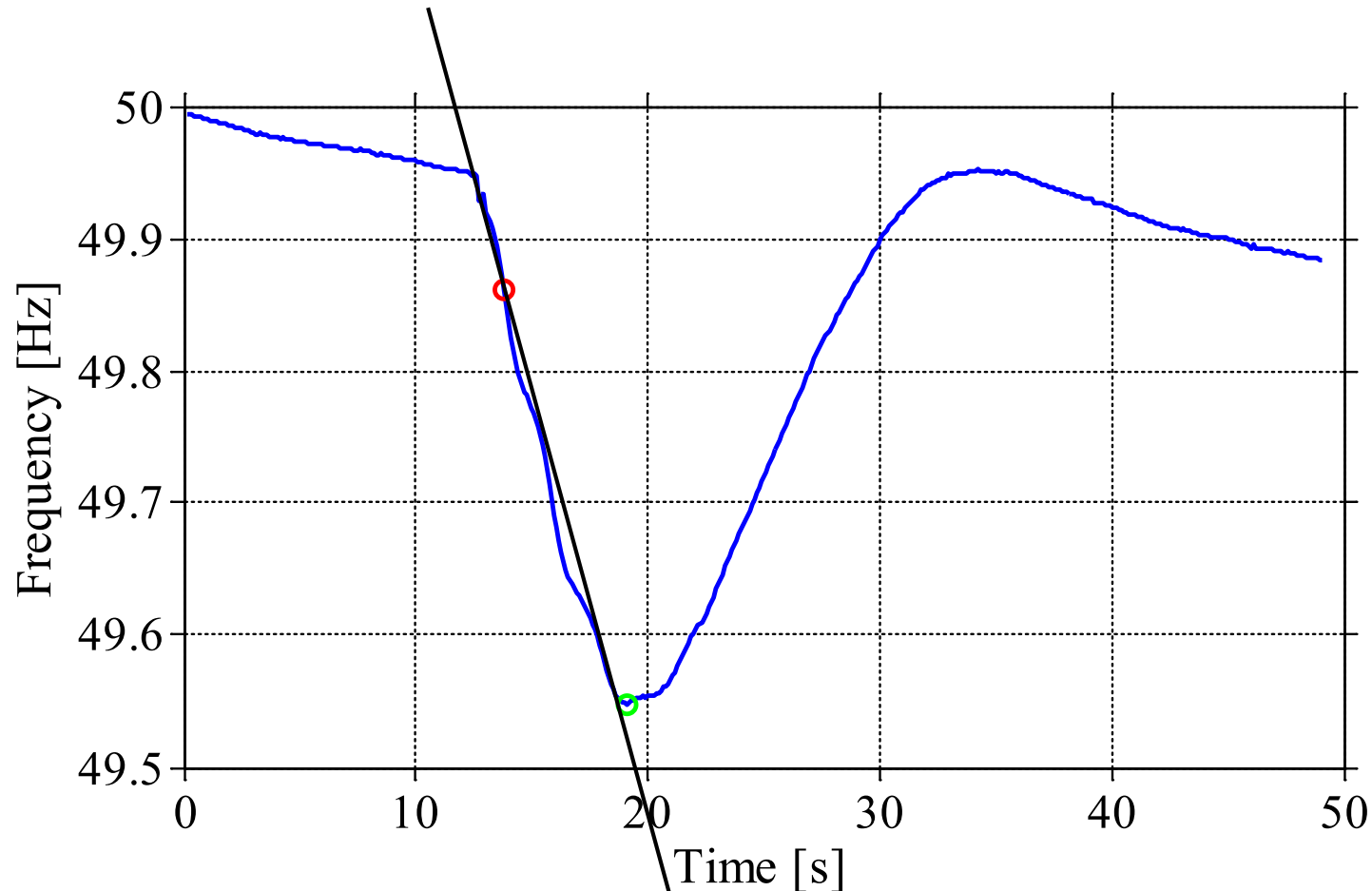


Meeting Peak Demands

□ Hydroelectric plants:

- Start easily and quickly and change power output rapidly
- Complement large thermal plants (coal and nuclear), which are most efficient in serving base power loads.
- Hyro is also base power in some countries like, Norway and Sweden
- Good to use together with renewables, wind and solar

Power system imbalance due to a emergency stop of 1000 MW power

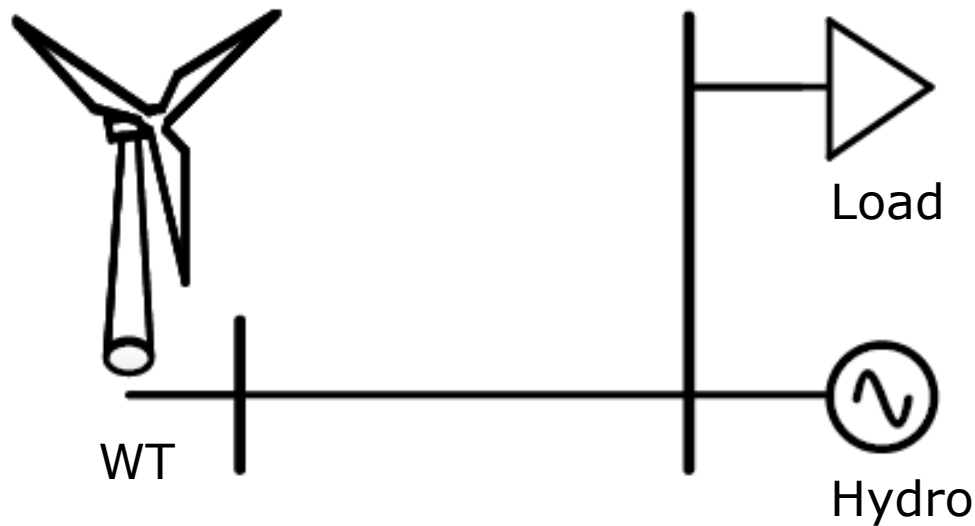


0.5 Hz during 7 seconds = 0.07 Hz/sec

Frequency Control

- $T_{mek} - T_{el} = J \cdot dw/dt$
- T_{mek} = mechanical torque of the turbine
- T_{el} = electrical braking torque from the generator
- J = Inertia of the rotation machines
- w = speed of the generator
= frequency of the electric voltage

WT Inertia support strategies



Simulation and data description

1. Load step: **0.1 pu**
2. Constant wind (7.5 m/s)
3. 50 % **WPR**

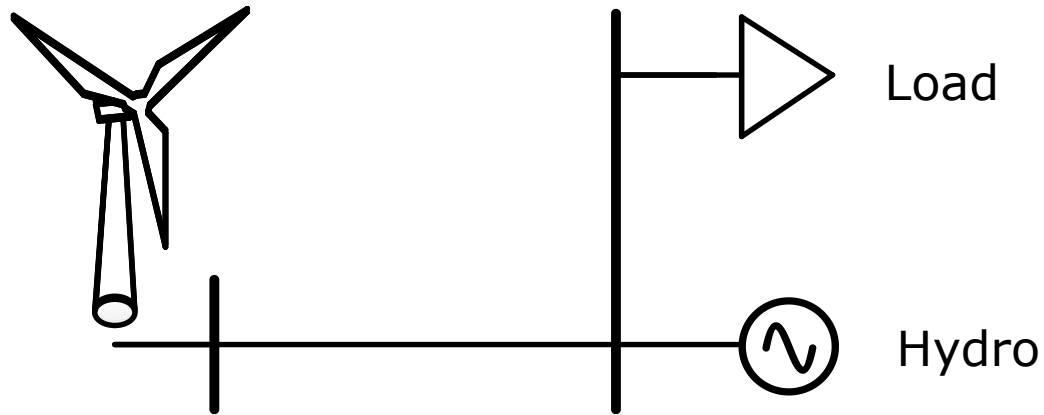
WPR=Wind Power Ration

Case 1: 100 % Hydro

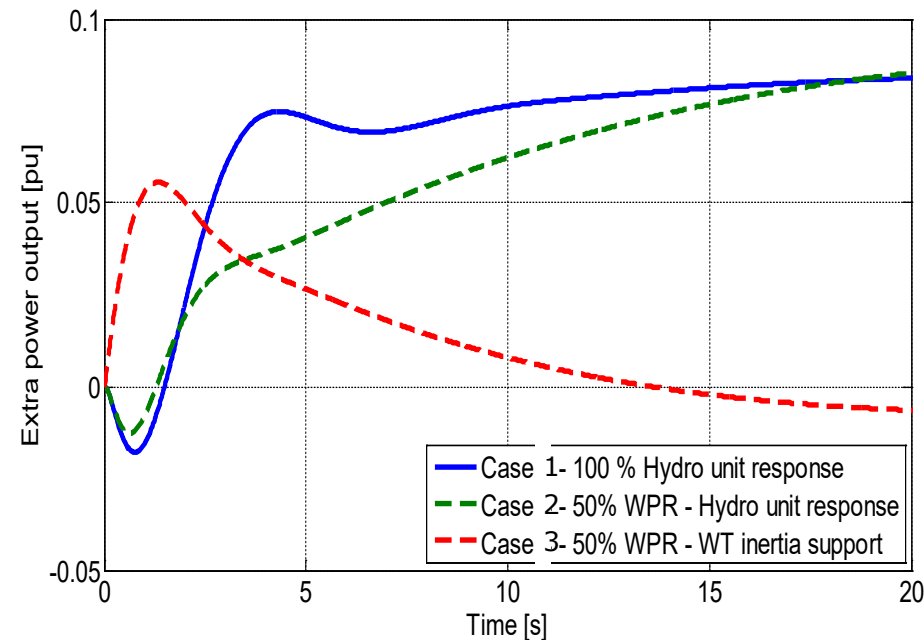
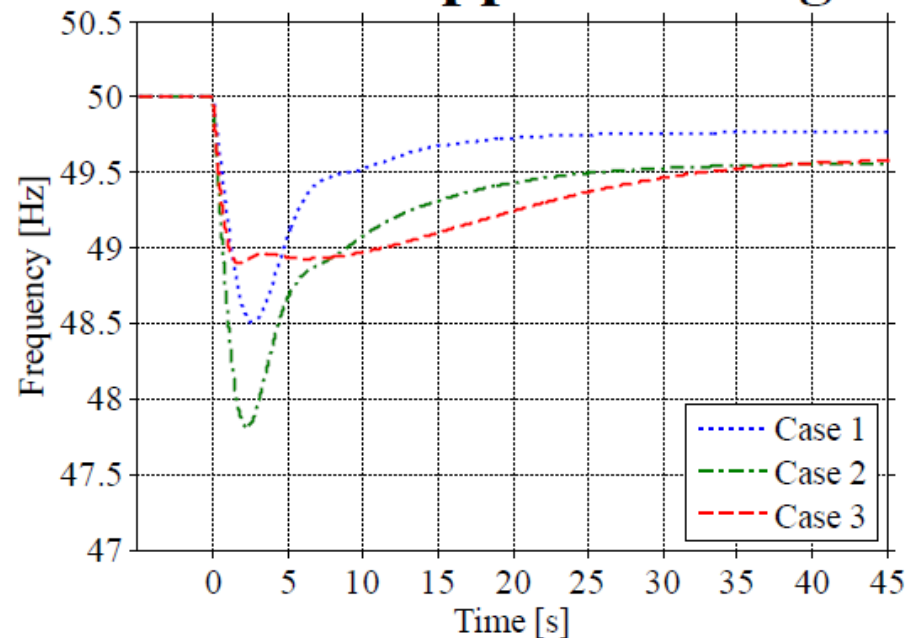
Case 2: 50 % WPR without frequency support

Case 3: 50 % WPR with Inertia Emulation support

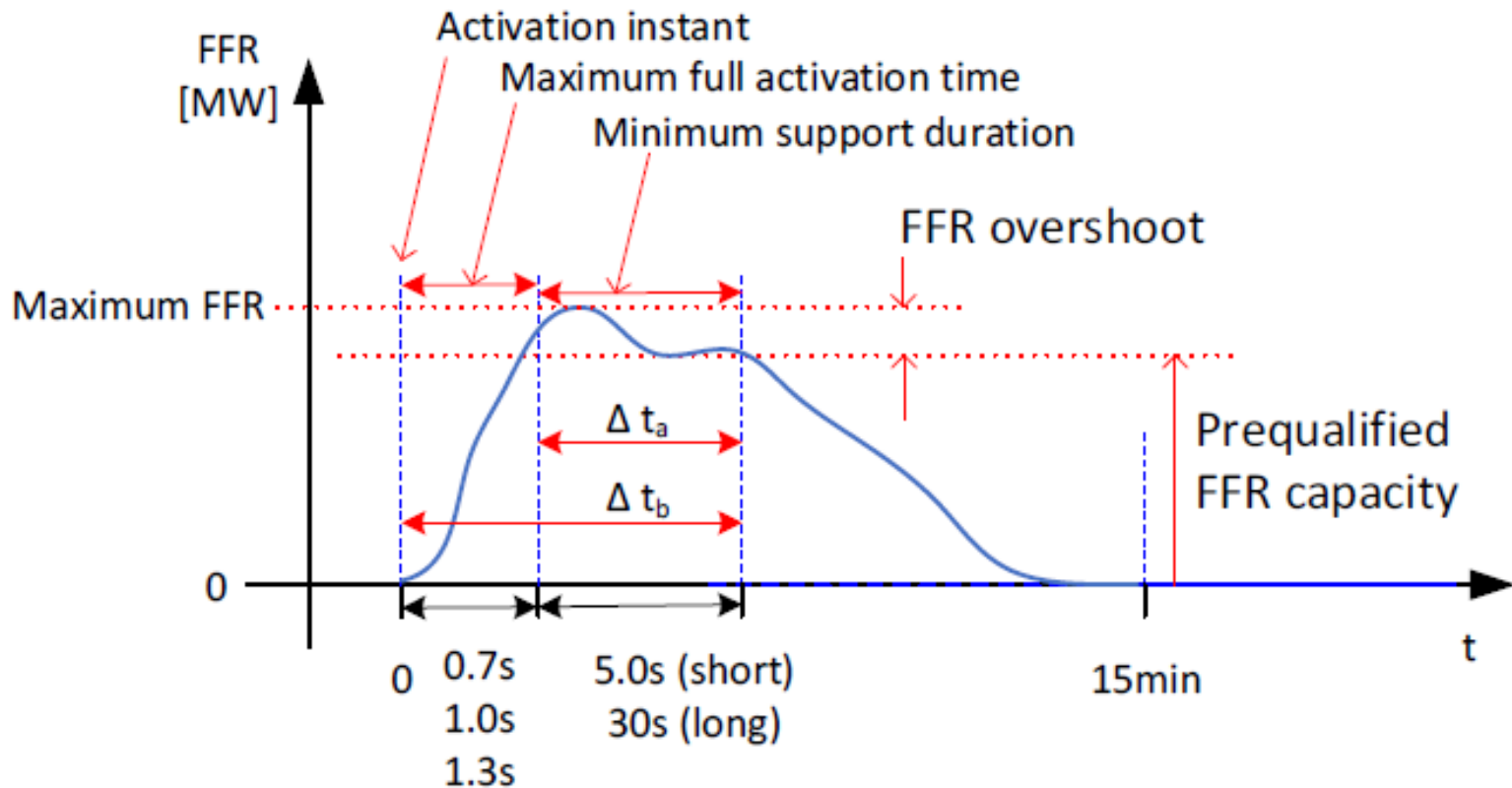
Frequency Response with and without Wind Power



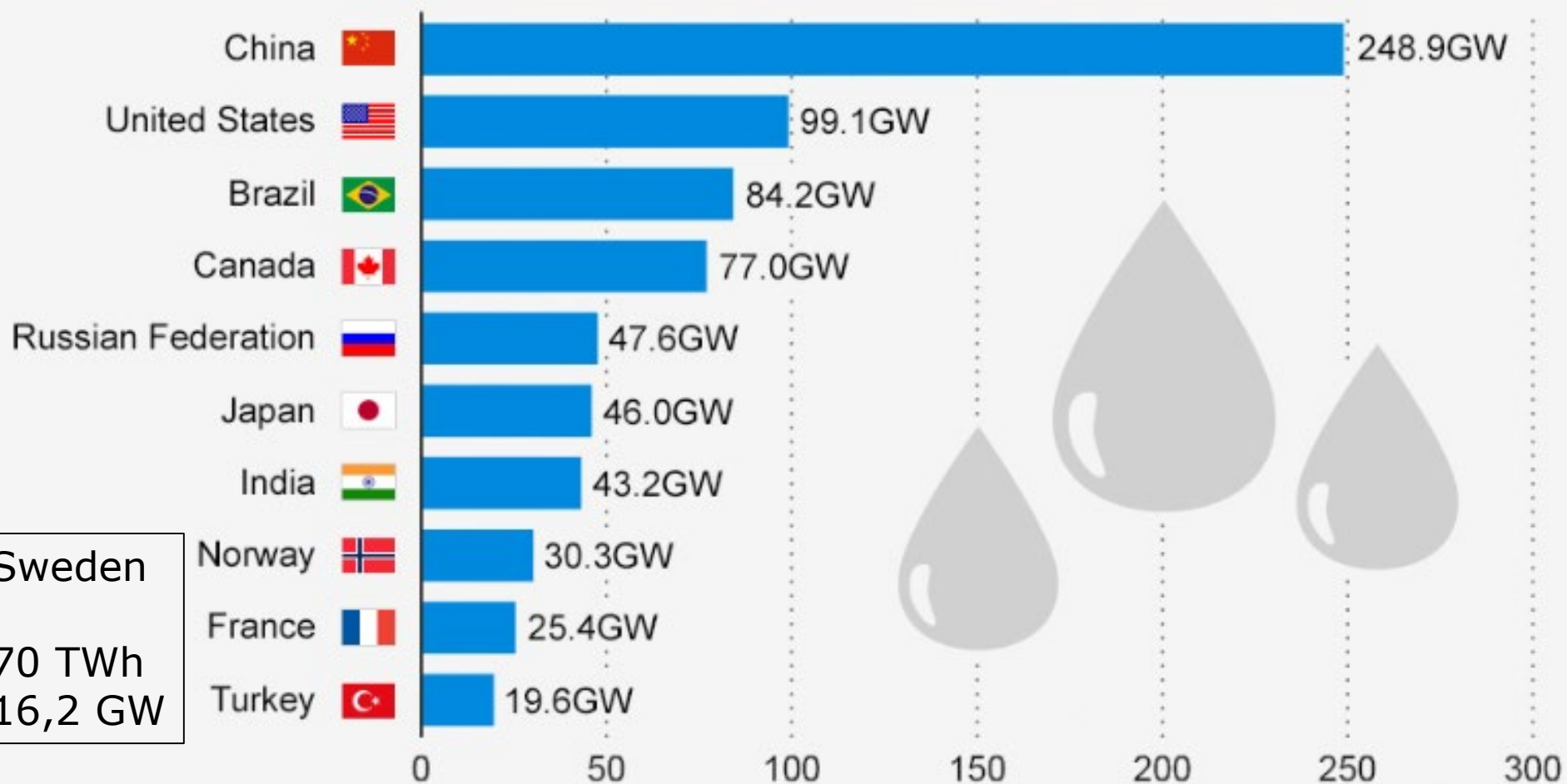
WT Inertia support strategies



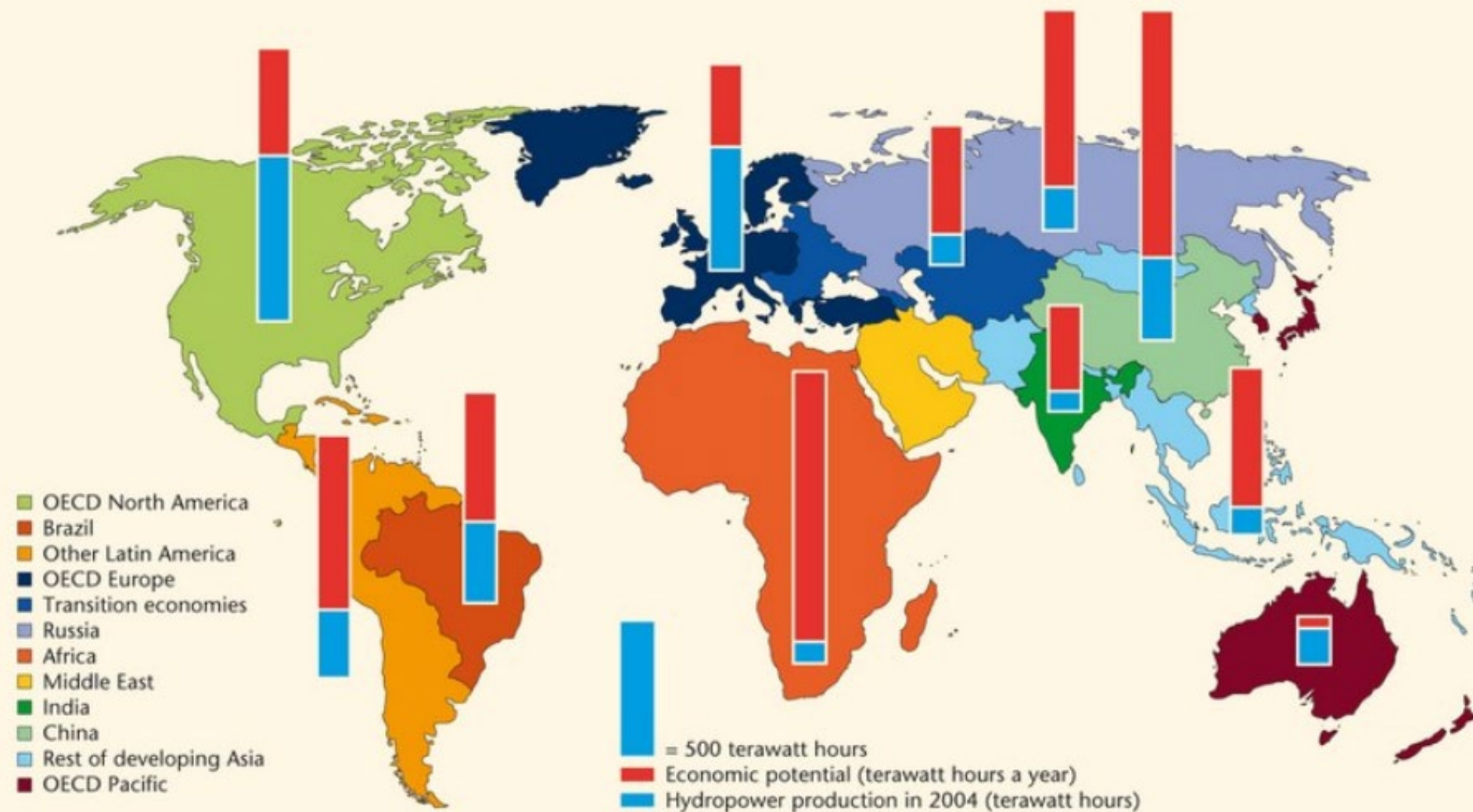
Fast Frequency Respons, FFR



Hydropower capacity worldwide (in gigawatts)



World potential and current hydropower production, 2004



World Water Assessment Programme. 2009. *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris: UNESCO, and London: Earthscan. Map 7.6, page 119.

Based on data from: IEA (International Energy Agency). 2006. *World Energy Outlook 2006*. Paris

World's Largest Dams

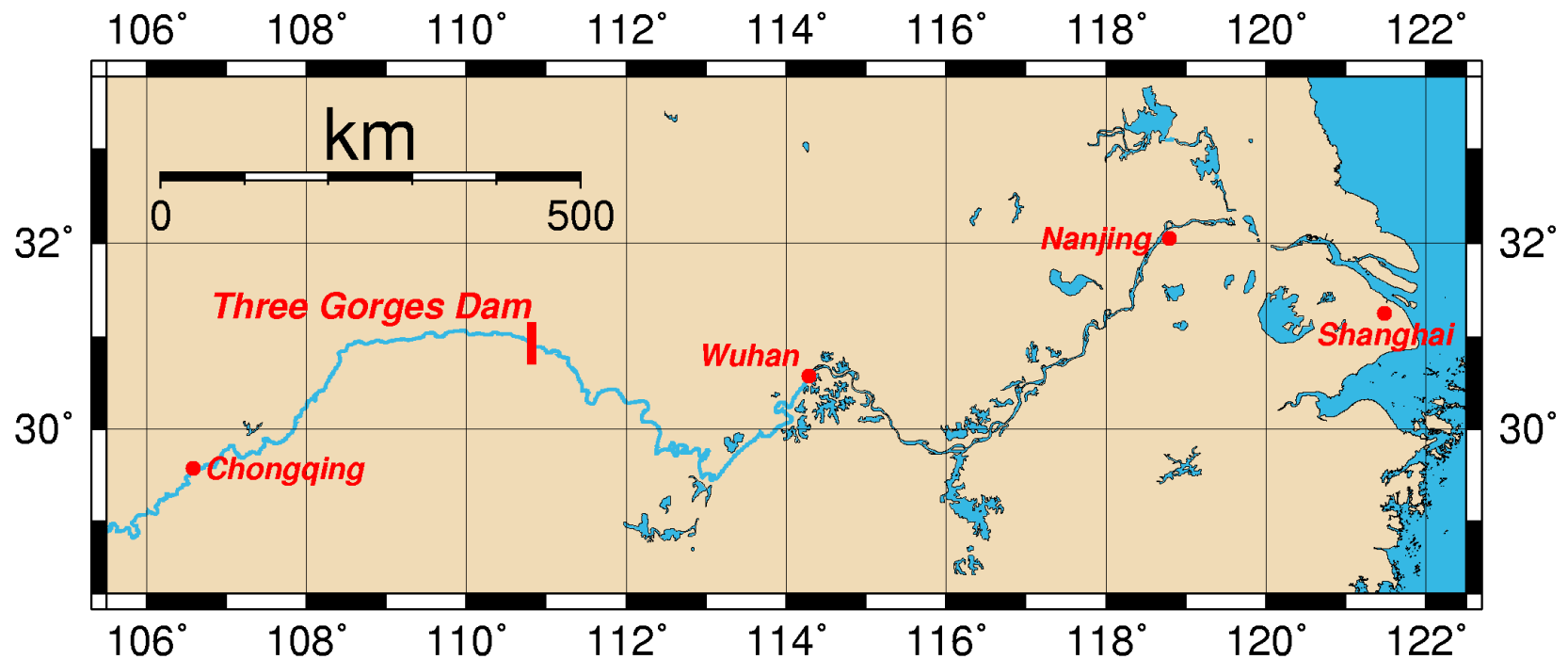
Name	Country	Year	Max Generation	Annual Production
Three Gorges	China	2009	22,500 MW	
Itaipú	Brazil/Paraguay	1983	14,000 MW	93.4 TW-hrs
Jinsha River	China	2013	13,860MW	
Guri	Venezuela	1978	10,200 MW	46 TW-hrs
Tucurui	Brazil	1984	8,370 MW	
Xiangjiaba	China	2012	6,400 MW	
Grand Coulee	United States	1942/80	6,809 MW	22.6 TW-hrs
Longtan	China	2007	6,426 MW	
krasnoyarsk	Russia	1972	6,000 MW	
Robert-Bourassa	Canada	1981	5,616 MW	
Churchill Falls	Canada	1971	5,429 MW	35 TW-hrs
Iron Gates	Romania/Serbia	1970	2,280 MW	11.3 TW-hrs

Ranked by maximum power.

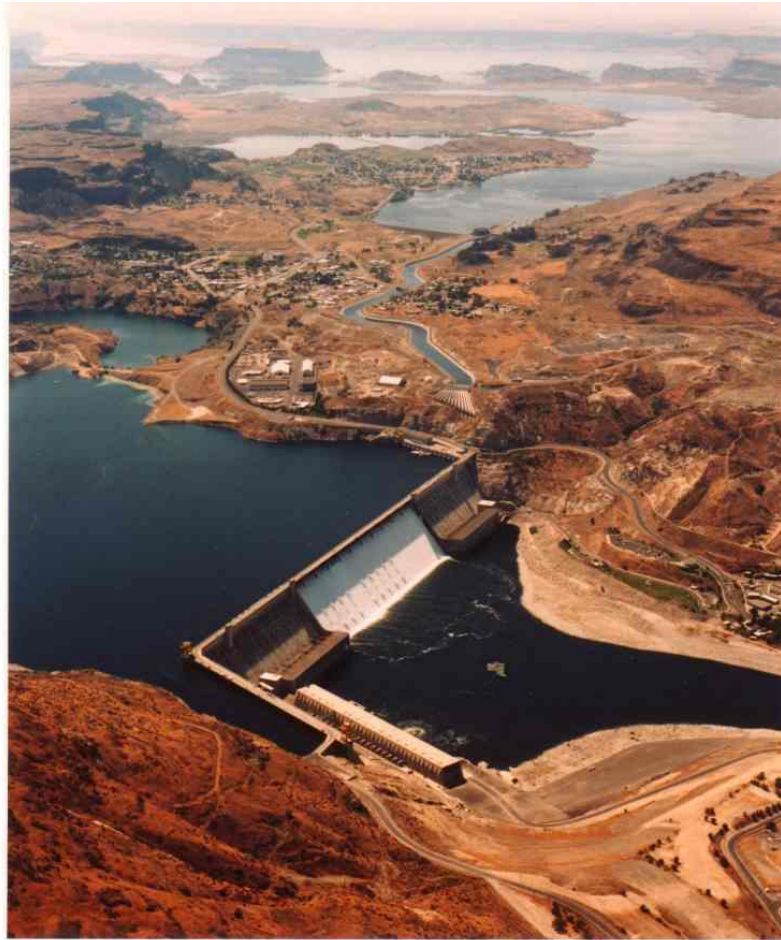
Three Gorges Dam (China)



Three Gorges Dam Location Map



Grand Coulee Dam (US)



Grand Coulee Dam Statistics

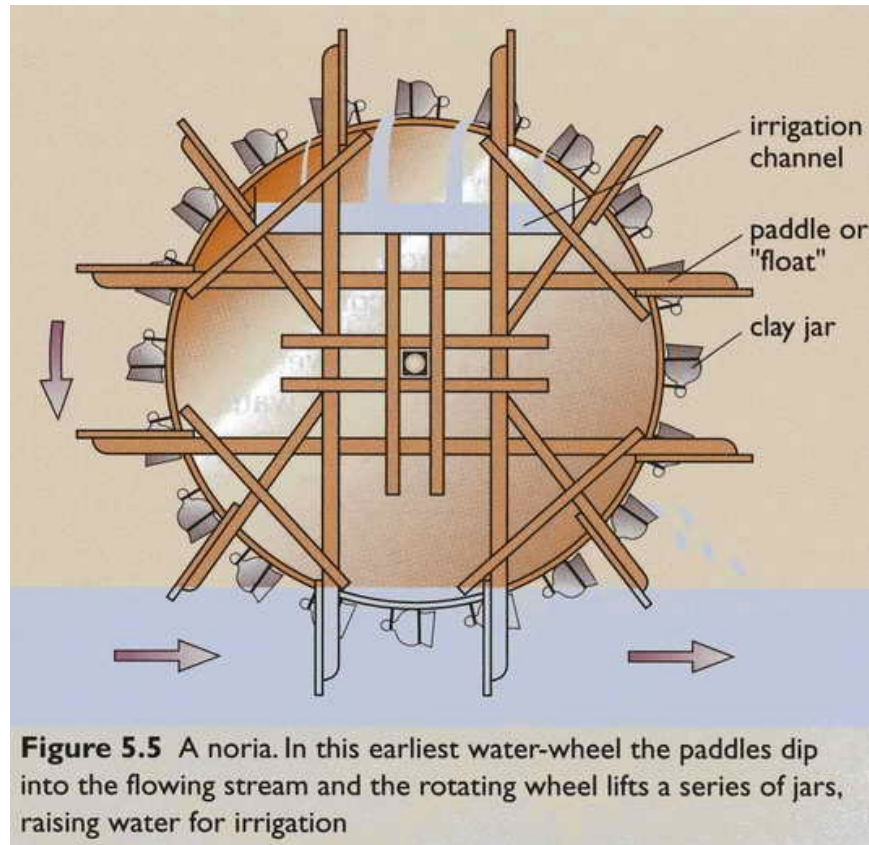
Generators at Grand Coulee Dam

Location	Description	Number	Capacity (MW)	Total (MW)
Pumping Plant	Pump/Generator	6	50	300
Left Powerhouse	Station Service Generator	3	10	30
	Main Generator	9	125	1125
Right Powerhouse	Main Generator	9	125	1125
Third Powerhouse	Main Generator	3	600	1800
	Main Generator	3	700	2100
Totals		33		6480

History of Hydro Power



Early Irrigation Waterwheel



Early Roman Water Mill

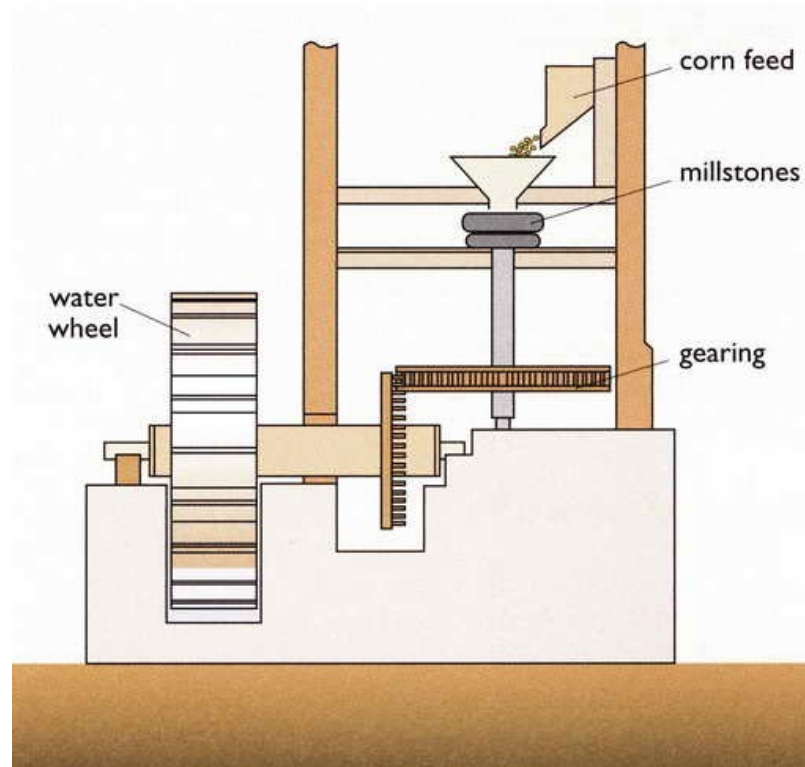


Figure 5.7 A Roman mill. This corn mill with its horizontal-axis wheel was described by Vitruvius in the first century BC. Note the use of gears

Early Norse Water Mill

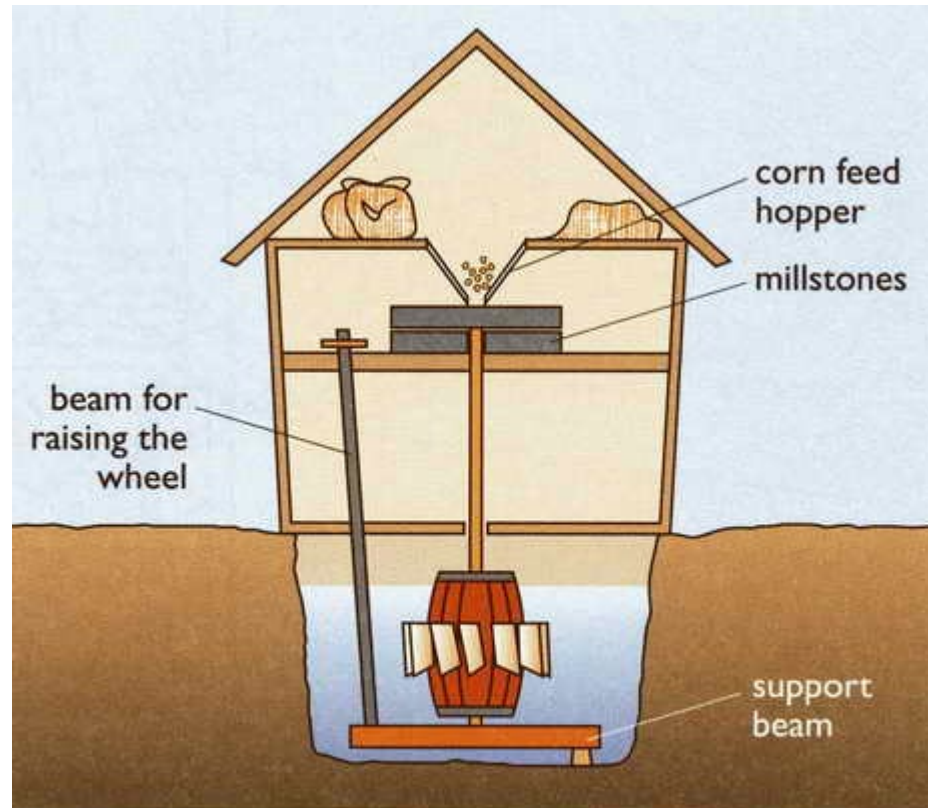


Figure 5.6 A Norse mill. Mills of this early vertical-axis type are still in use for mechanical power in remote mountainous regions

Hydropower Design



Terminology (Jargon)

□ Head

- Water must fall from a higher elevation to a lower one to release its stored energy.
- The difference between these elevations (the water levels in the forebay and the tailbay) is called **head**

□ Dams: three categories

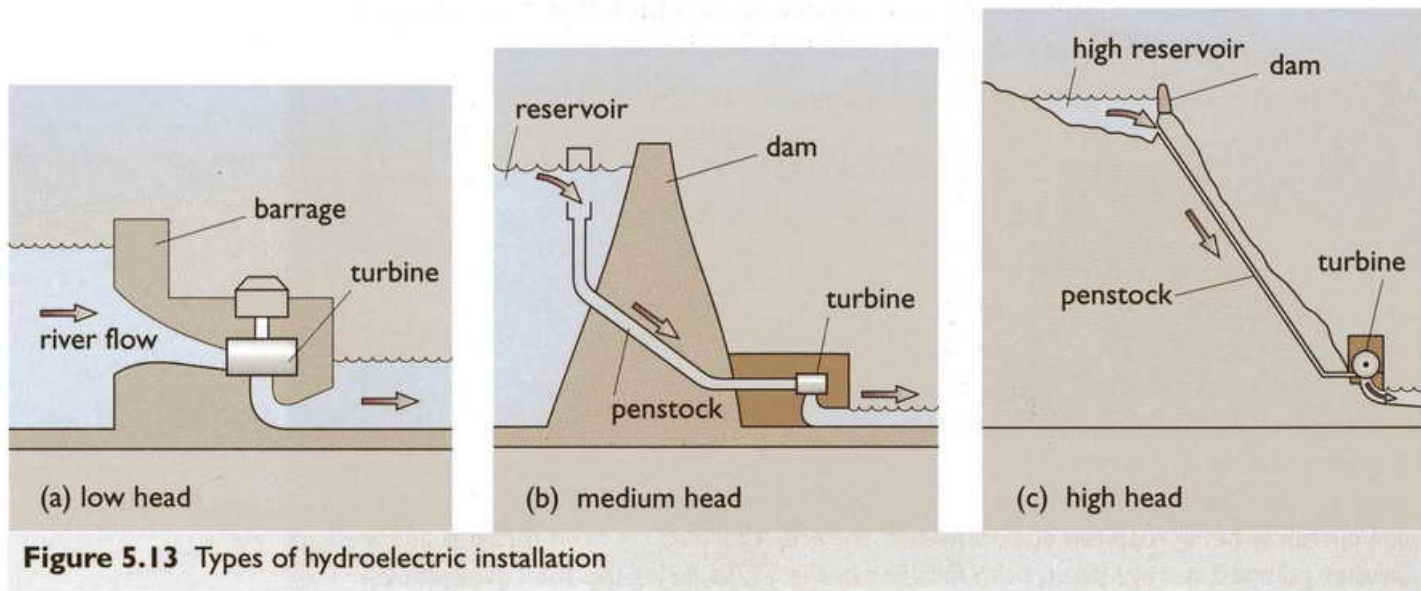
- **high-head** (800 or more feet)
- **medium-head** (100 to 800 feet)
- **low-head** (less than 100 feet)

□ **Power** is proportional to the product of ***head x flow***

Scale of Hydropower Projects

- ❑ Large-hydro
 - More than 100 MW feeding into a large electricity grid
- ❑ Medium-hydro
 - 15 - 100 MW usually feeding a grid
- ❑ Small-hydro
 - 1 - 15 MW - usually feeding into a grid
- ❑ Mini-hydro
 - Above 100 kW, but below 1 MW
 - Either stand alone schemes or more often feeding into the grid
- ❑ Micro-hydro
 - From 5kW up to 100 kW
 - Usually provided power for a small community or rural industry in remote areas away from the grid.
- ❑ Pico-hydro
 - From a few hundred watts up to 5kW
 - Remote areas away from the grid.

Types of Hydroelectric Installation



Types of Systems

□ Impoundment

- Hoover Dam, Grand Coulee

□ Diversion or run-of-river systems

- Niagara Falls
- Most significantly smaller

□ Pumped Storage

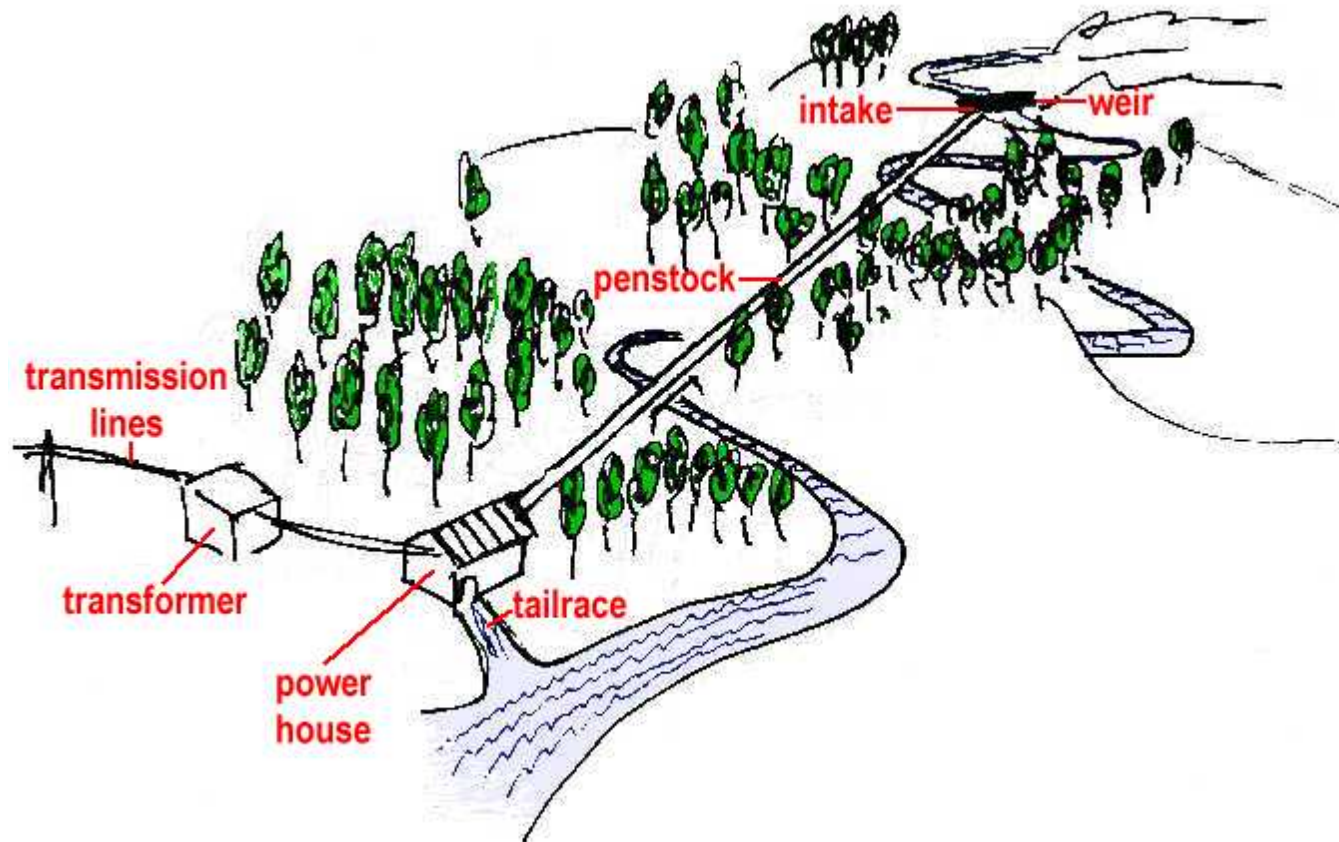
- Two way flow
- Pumped up to a storage reservoir and returned to a lower elevation for power generation
 - A mechanism for energy storage, not net energy production

Example

Hoover Dam (US)



Diversion (Run-of-River) Hydropower



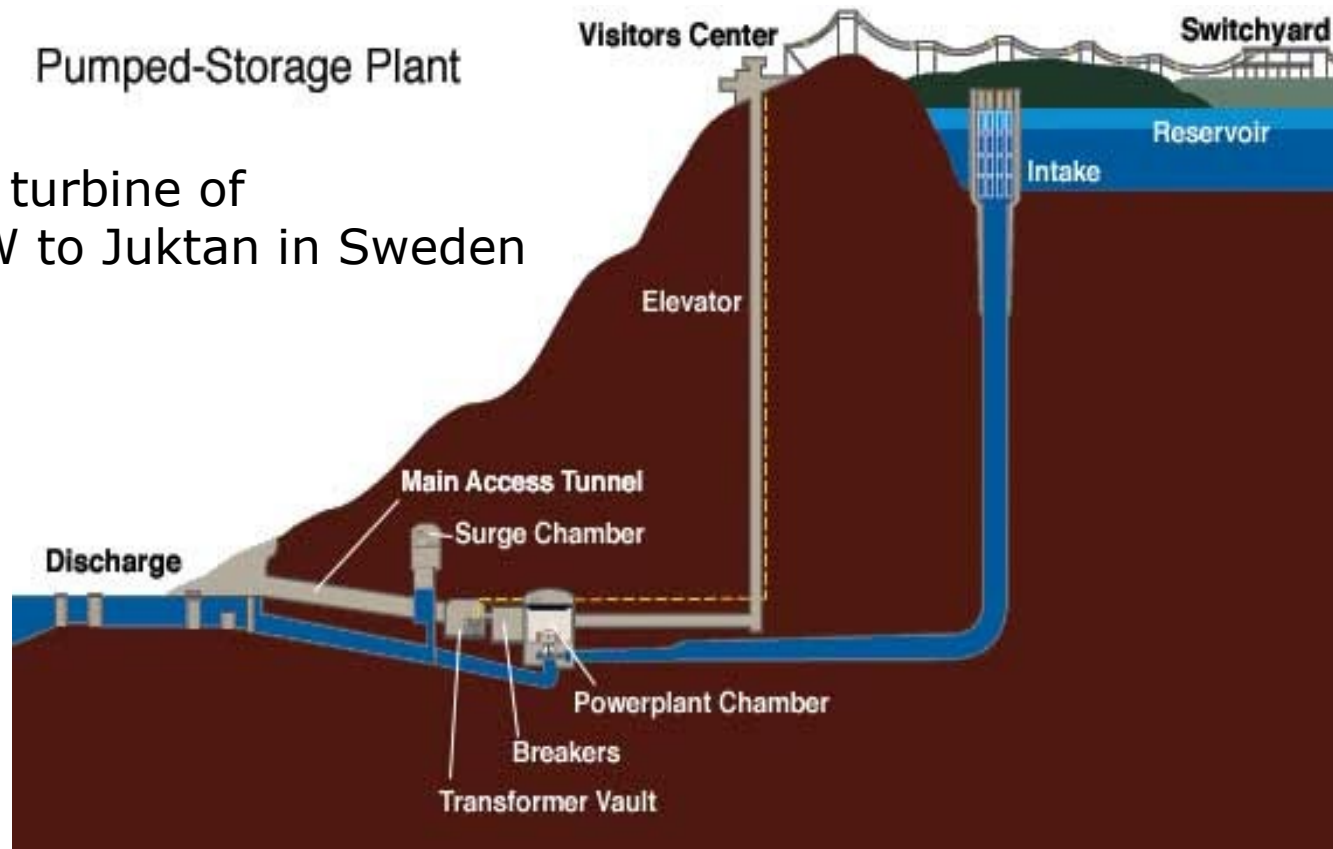
Example

Diversion Hydropower (Tazimina, Alaska)

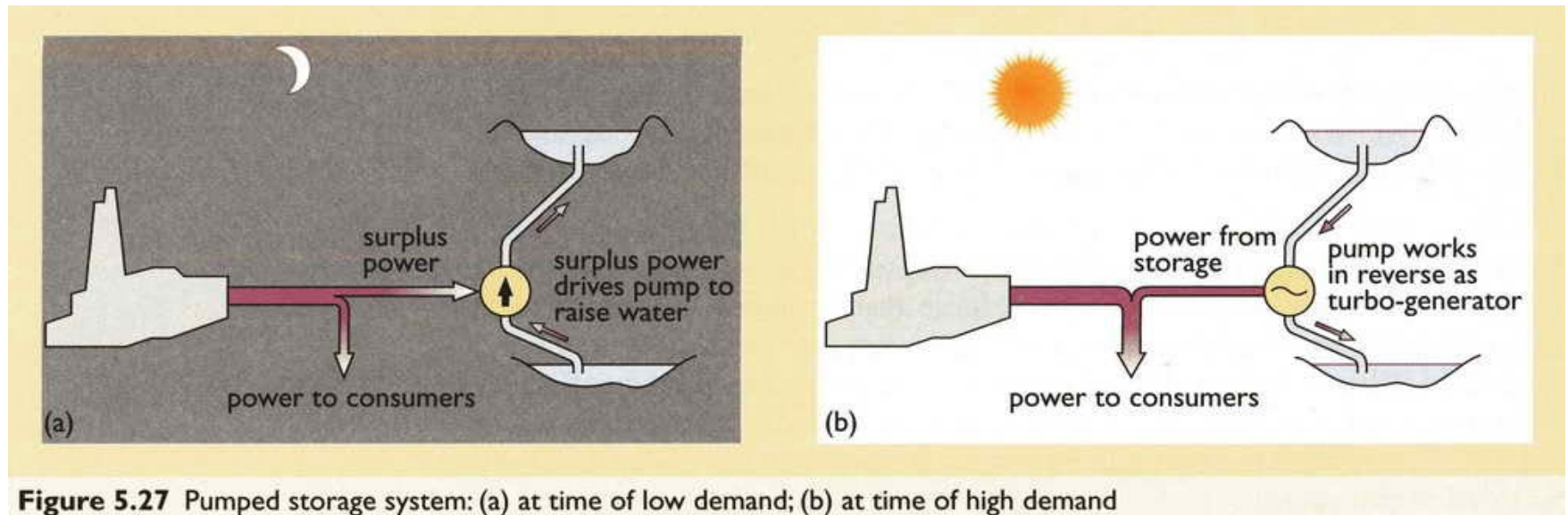


Pumped Storage Schematic

Francis turbine of
334 MW to Juktan in Sweden



Pumped Storage System



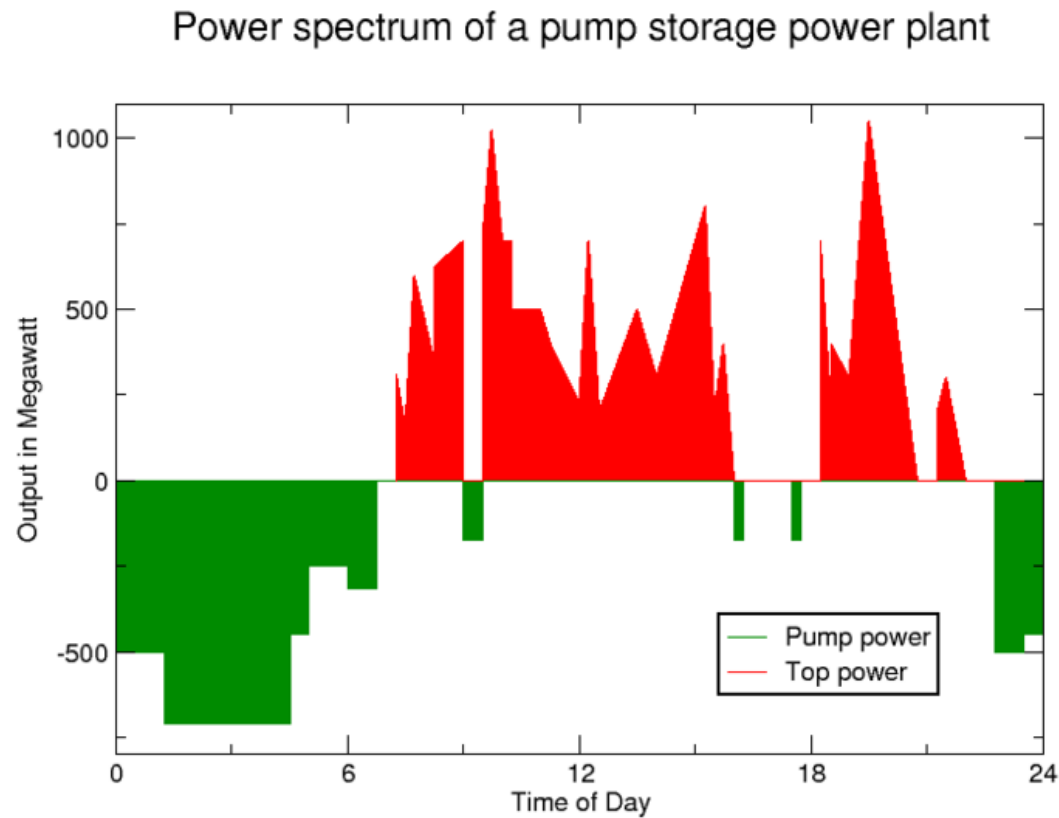
Example

Cabin Creek Pumped Hydro (Colorado)

- ❑ Completed 1967
- ❑ Capacity – 324 MW
 - Two 162 MW units
- ❑ Purpose – energy storage
 - Water pumped uphill at night
 - ❑ Low usage – excess base load capacity
 - Water flows downhill during day/peak periods
 - Helps Xcel to meet surge demand
 - ❑ E.g., air conditioning demand on hot summer days
- ❑ Typical efficiency of 70 – 85%
- ❑ Also used in Norway to work together with Danish wind power



Pumped Storage Power Spectrum

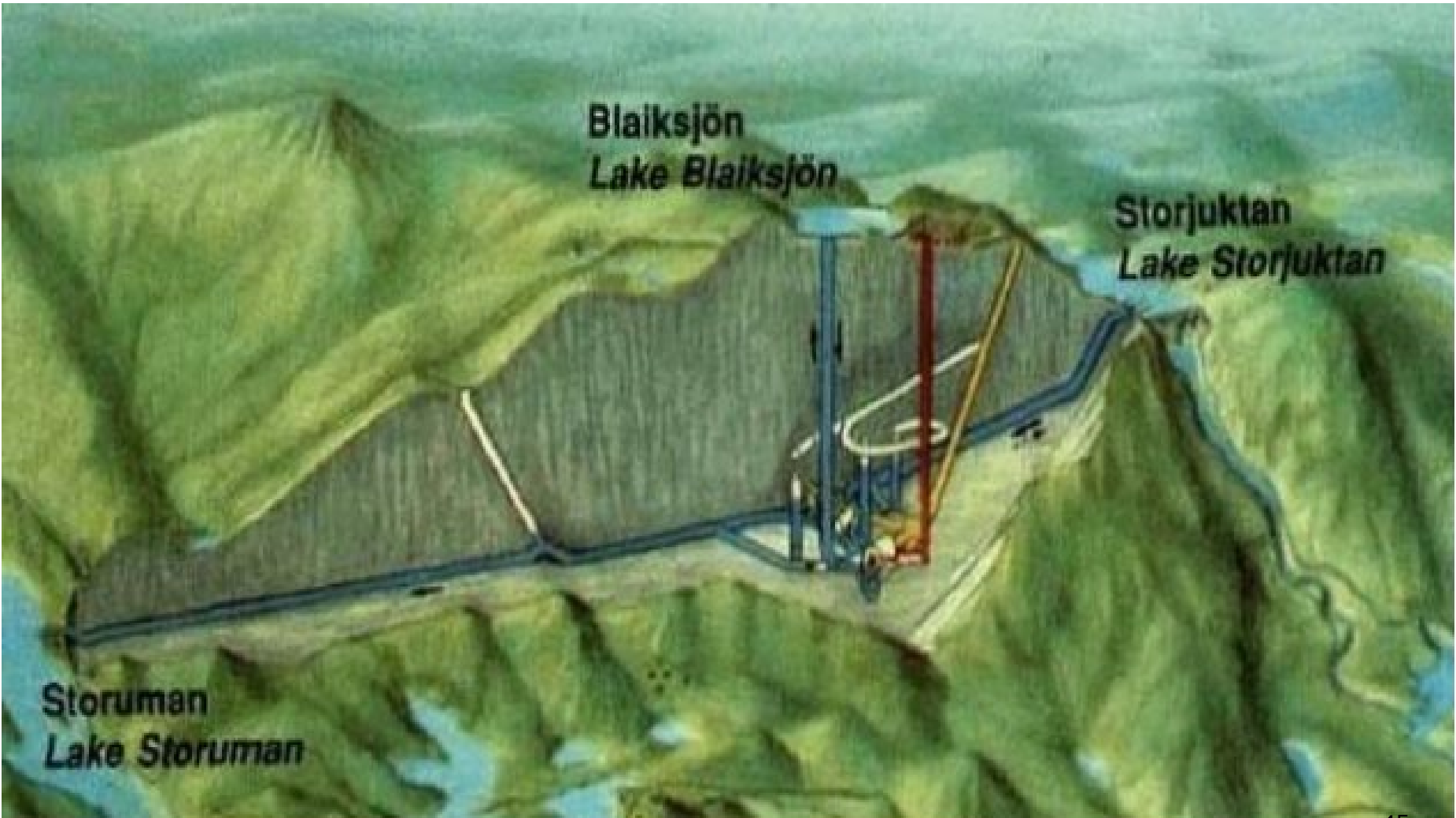


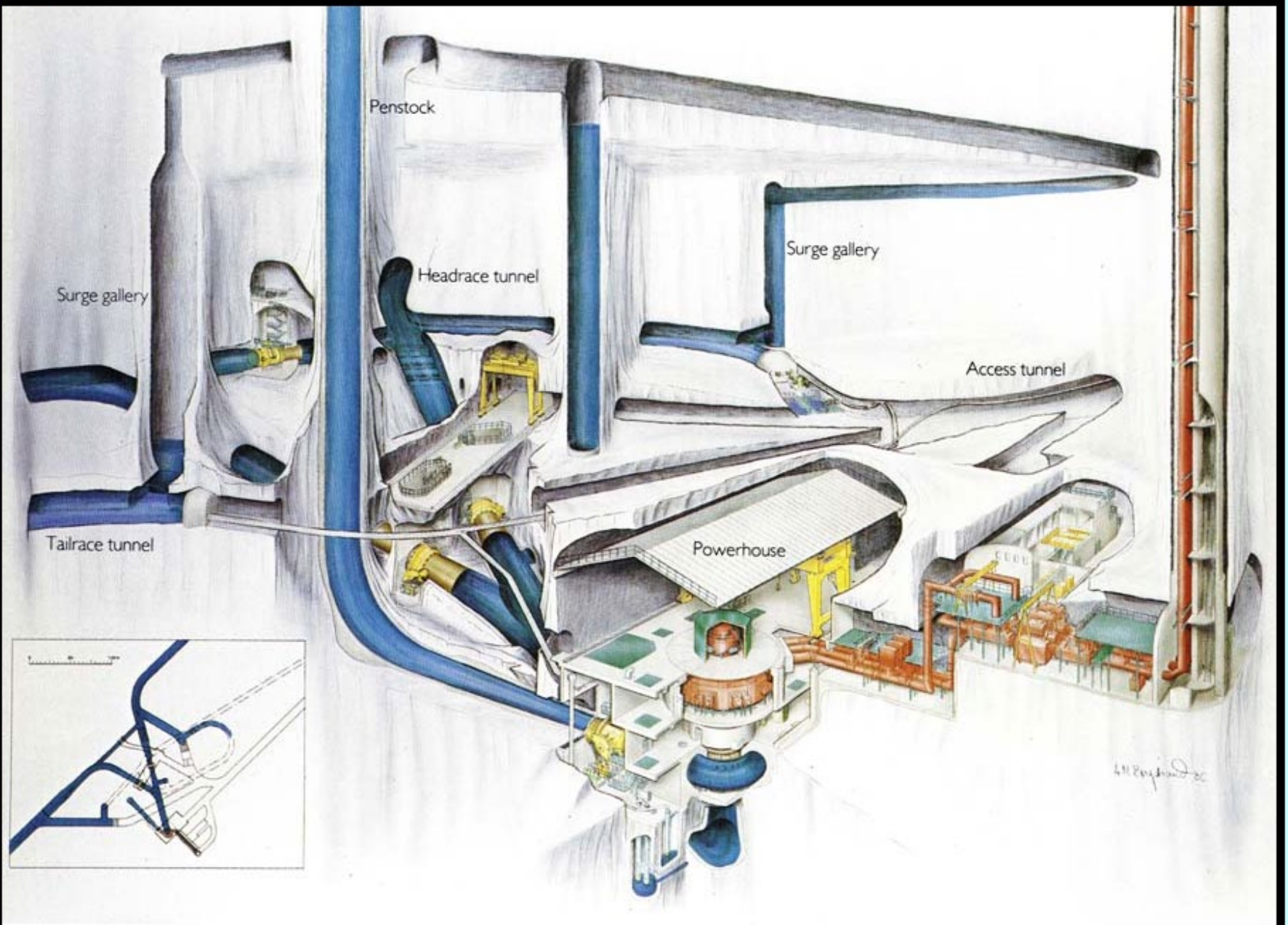
Historically...

- ❑ Pumped hydro was first used in Italy and Switzerland in the 1890's.
- ❑ By 1933 reversible pump-turbines with motor-generators were available
- ❑ Adjustable speed machines now used to improve efficiency
 - Pumped hydro is available at almost any scale with discharge times ranging from several hours to a few days.
 - Efficiency = 70 – 85%



Juktans kraftstation, 335 MW, 1979 pumpkraftverk fram till 1996



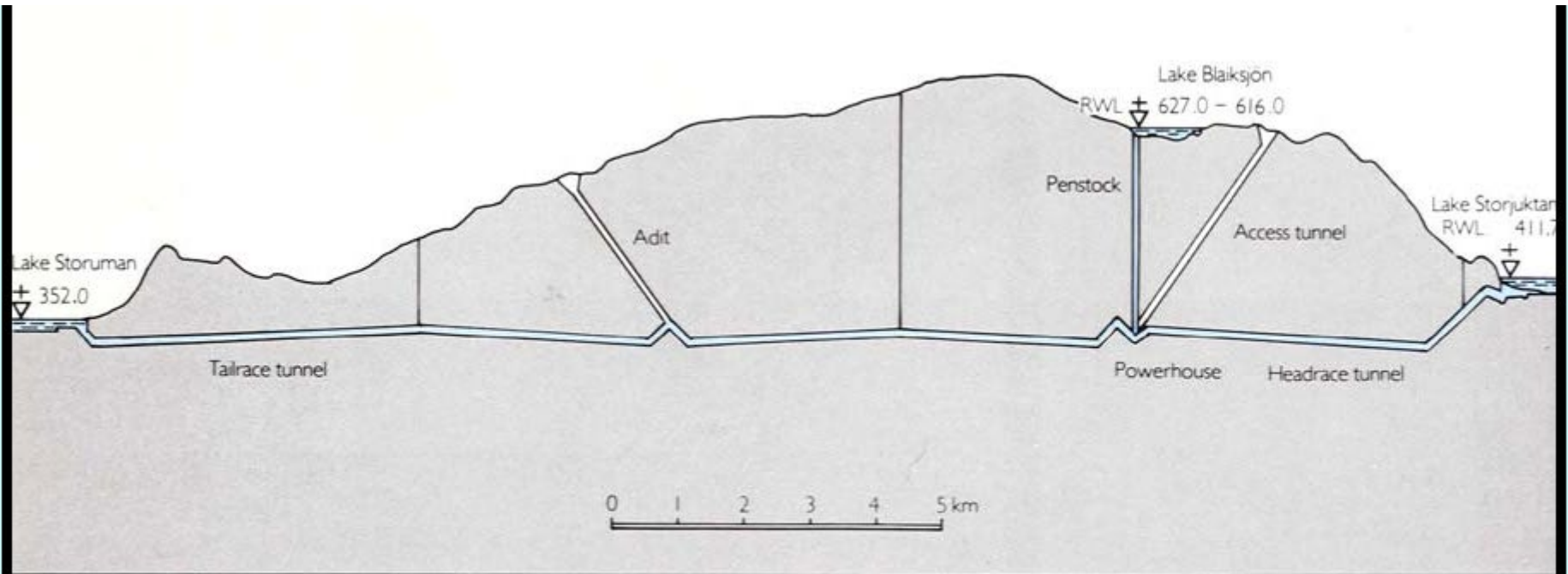


Här är en sprängskiss som visar hur Juktans kraftverk är tänkt att fungera. Generatoren har en kapacitet på hela 335 MW och är en av de allra största i sitt slag.



Denna bild är tagen i ett tidigare skede av byggandet. Jämför föregående bild!

Juktan Blaiken Hydro Power (storumansajten.se)



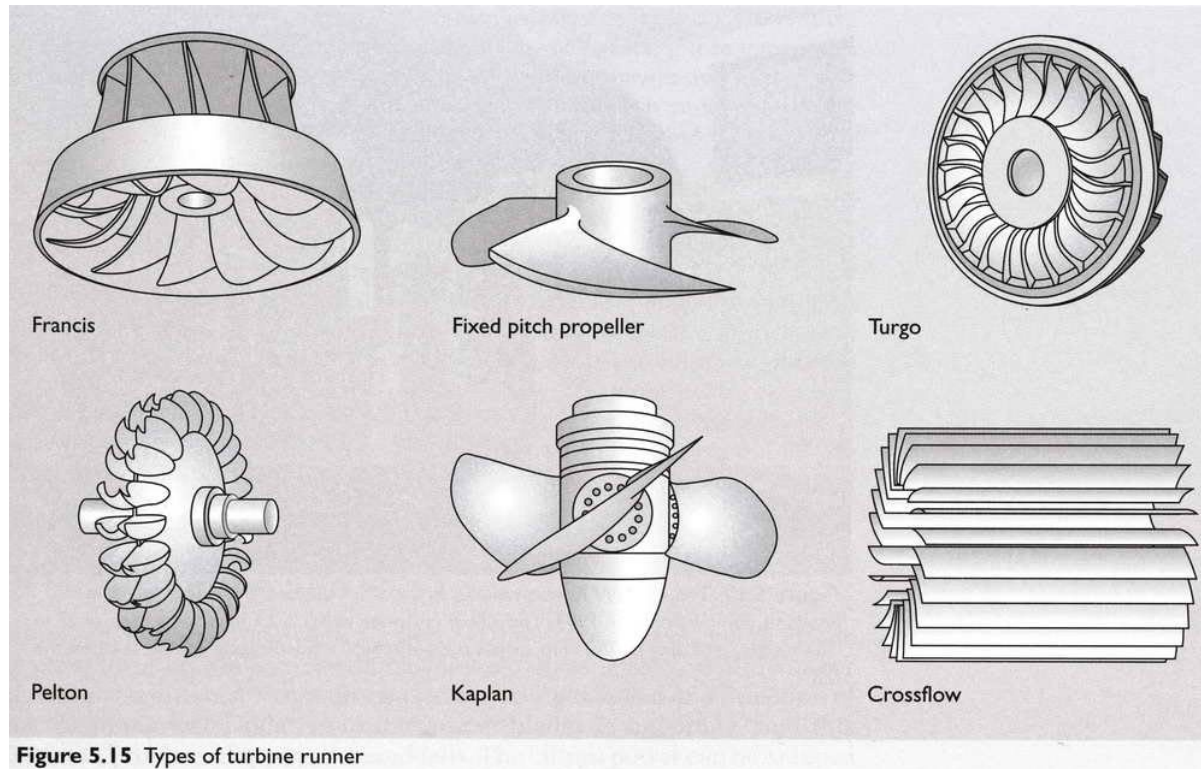
Denna sprängskiss visar nivåskillnaderna mellan Storjuktan, Blaiksjön och Storumansjön. Som synes är det ca 20 km mellan de två vattendragen. Det som på bilden kallas Powerhouse är själva generatoranläggningen som ligger direkt under Blaiksjön där övre dämningssgränsen är 627,0 meter över havet. Nivåskillnaden mellan Storjuktan och Storumansjön är i runda tal 60 meter.

Turbine Design



Francis Turbine
Kaplan Turbine
Pelton Turbine
Turgo Turbine
New Designs

Types of Hydropower Turbines



Classification of Hydro Turbines

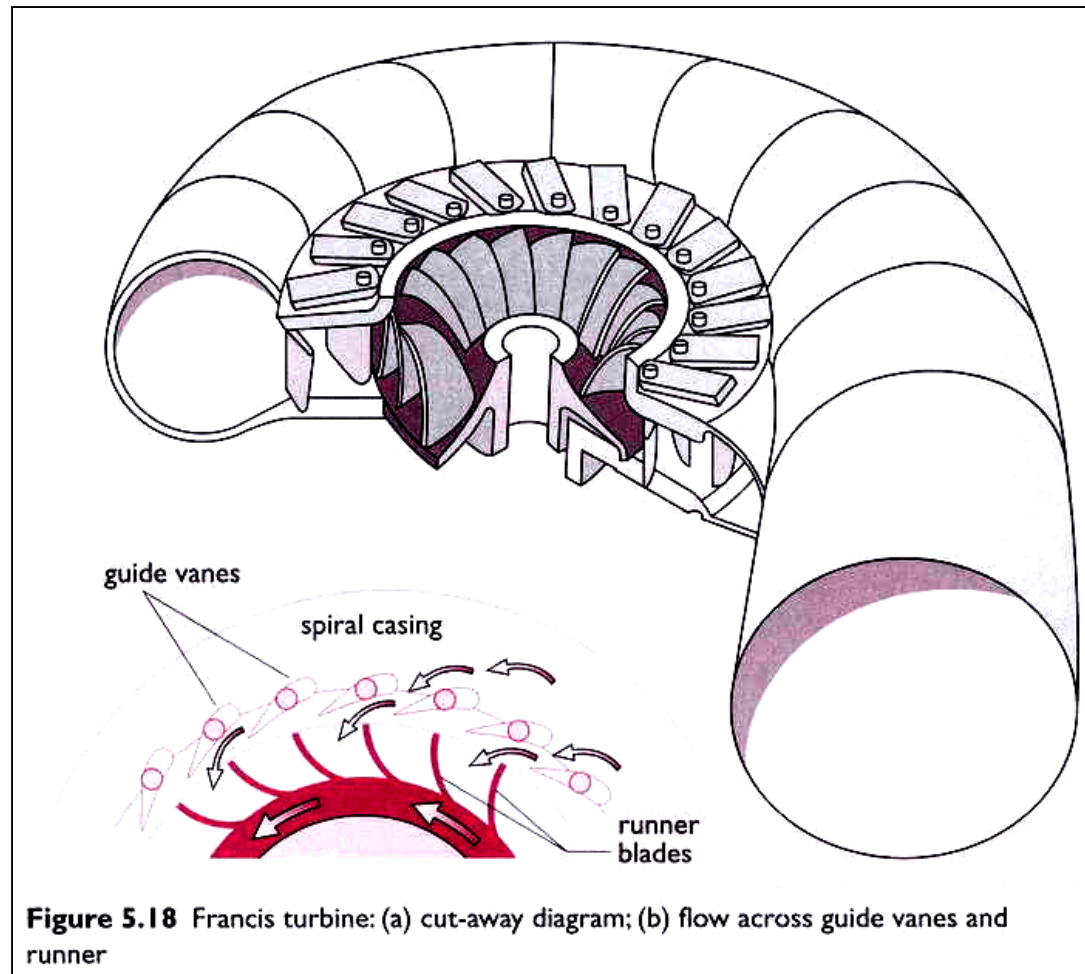
□ Reaction Turbines

- Derive power from pressure drop across turbine
- Totally immersed in water
- Angular & linear motion converted to shaft power
- Propeller, Francis, and Kaplan turbines

□ Impulse Turbines

- Convert kinetic energy of water jet hitting buckets
- No pressure drop across turbines
- Pelton, Turgo, and crossflow turbines

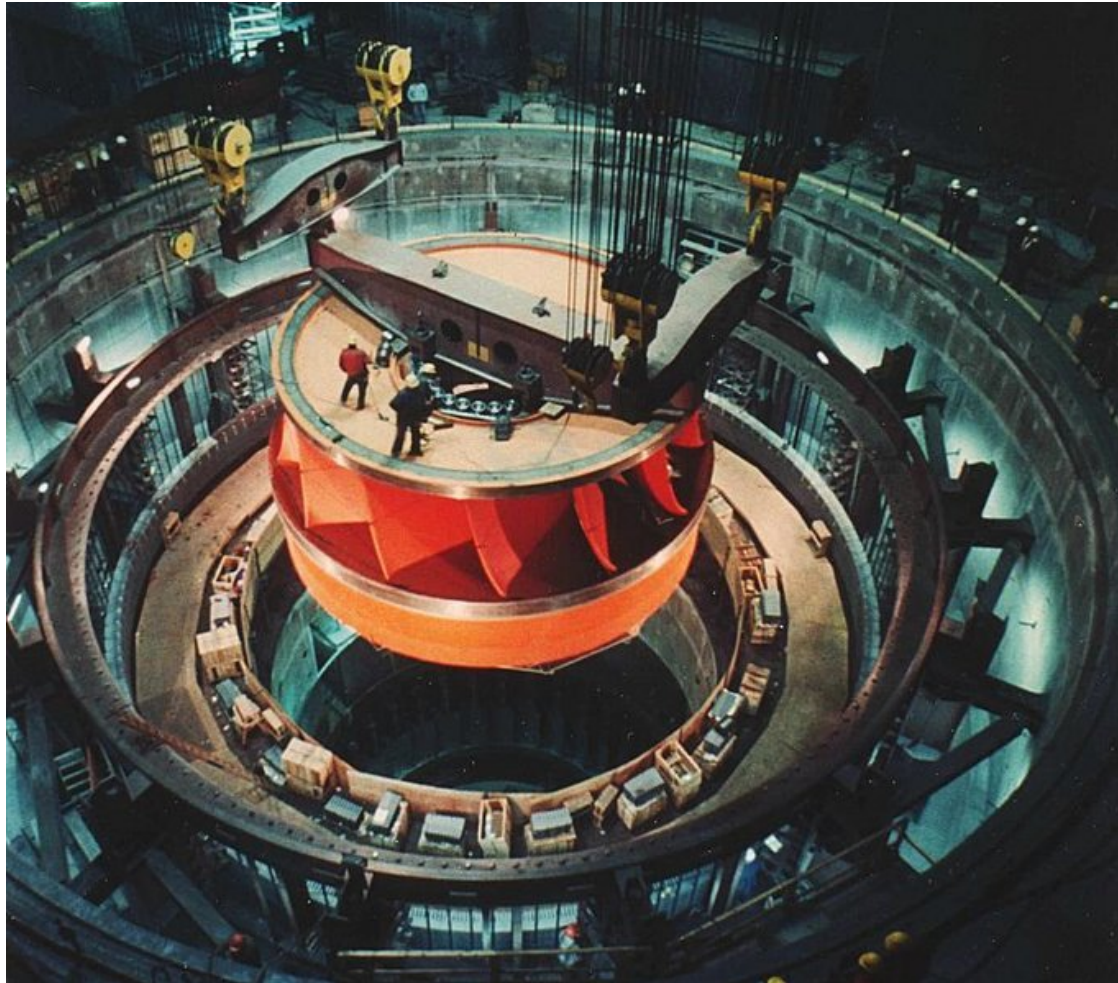
Schematic of Francis Turbine

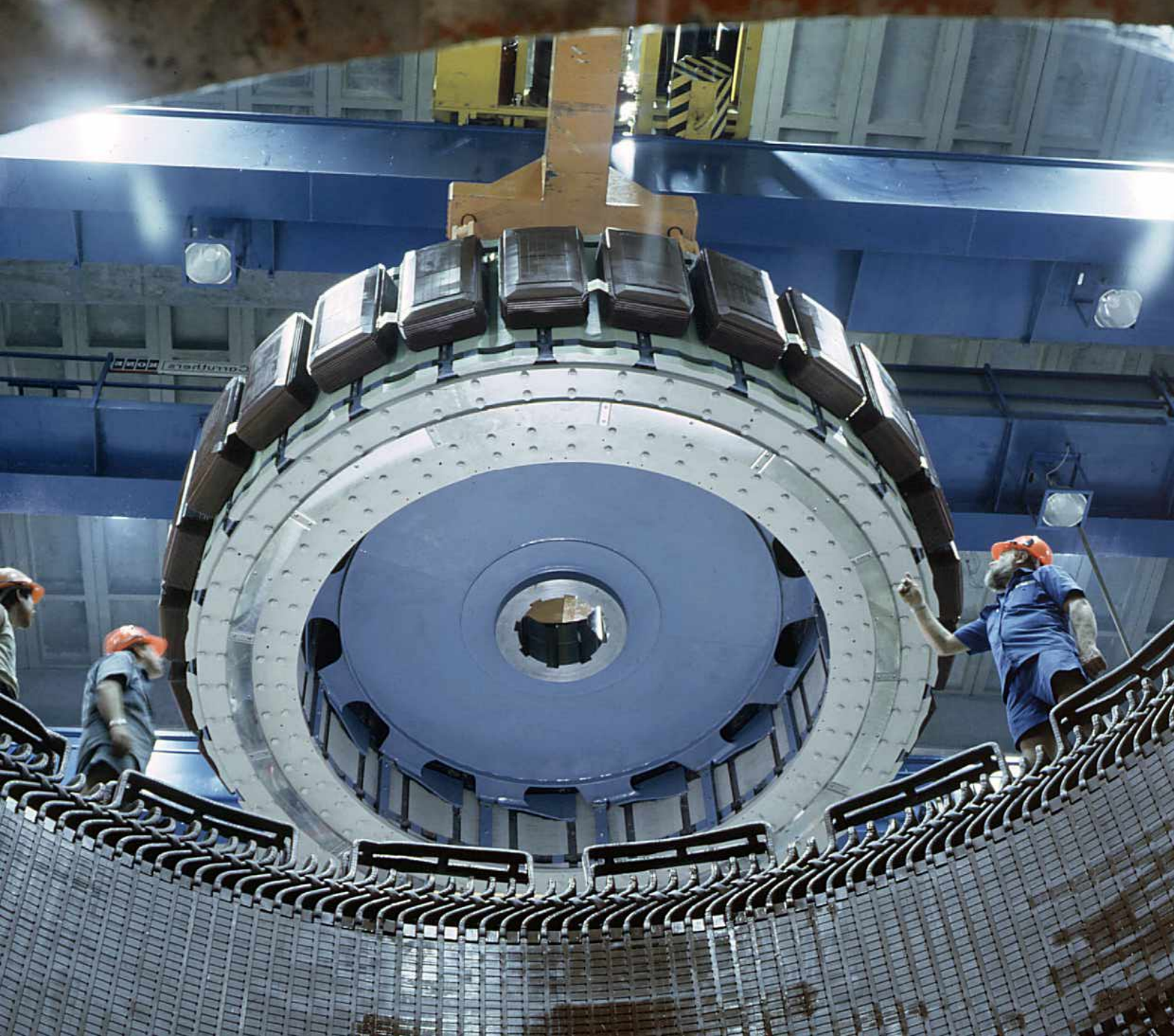


Small Francis Turbine & Generator



Francis Turbine – Grand Coulee Dam



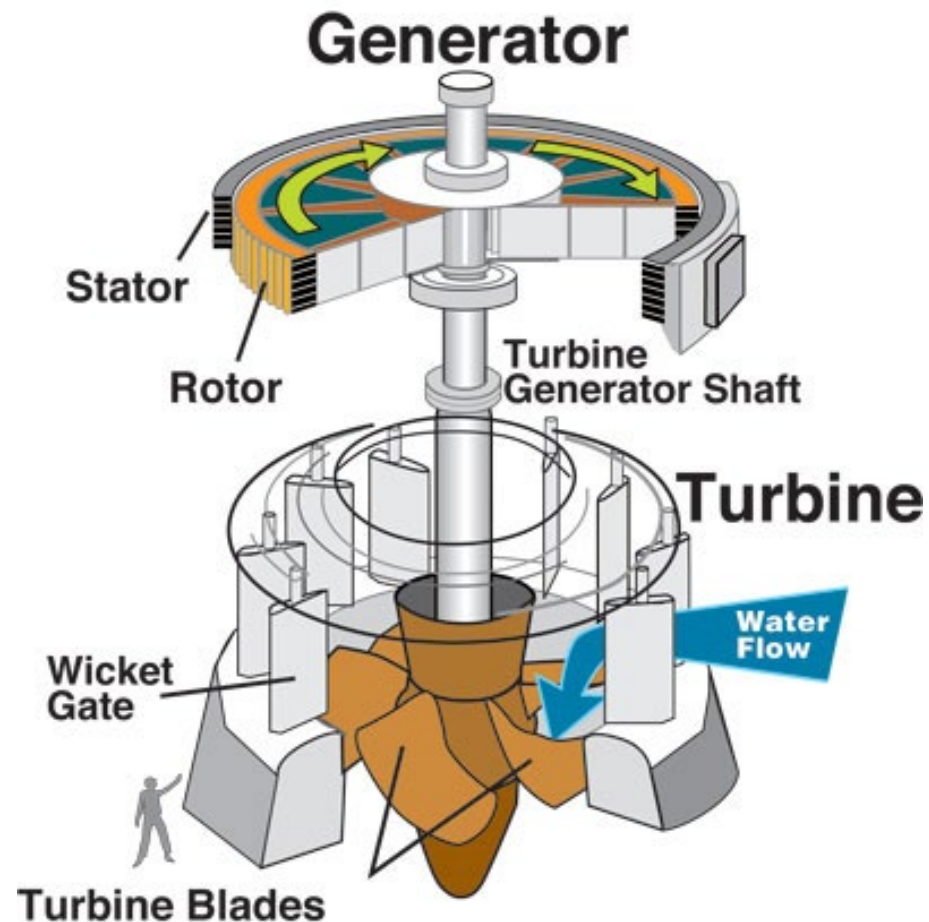


Synchronous generator

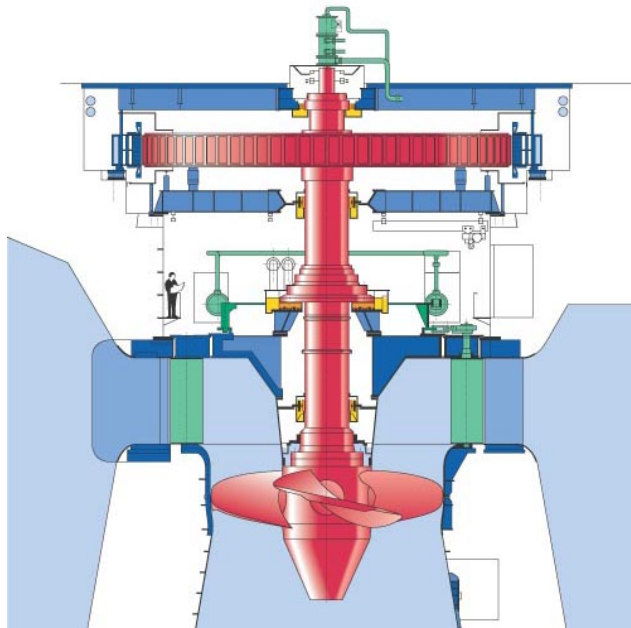
Fixed-Pitch Propeller Turbine



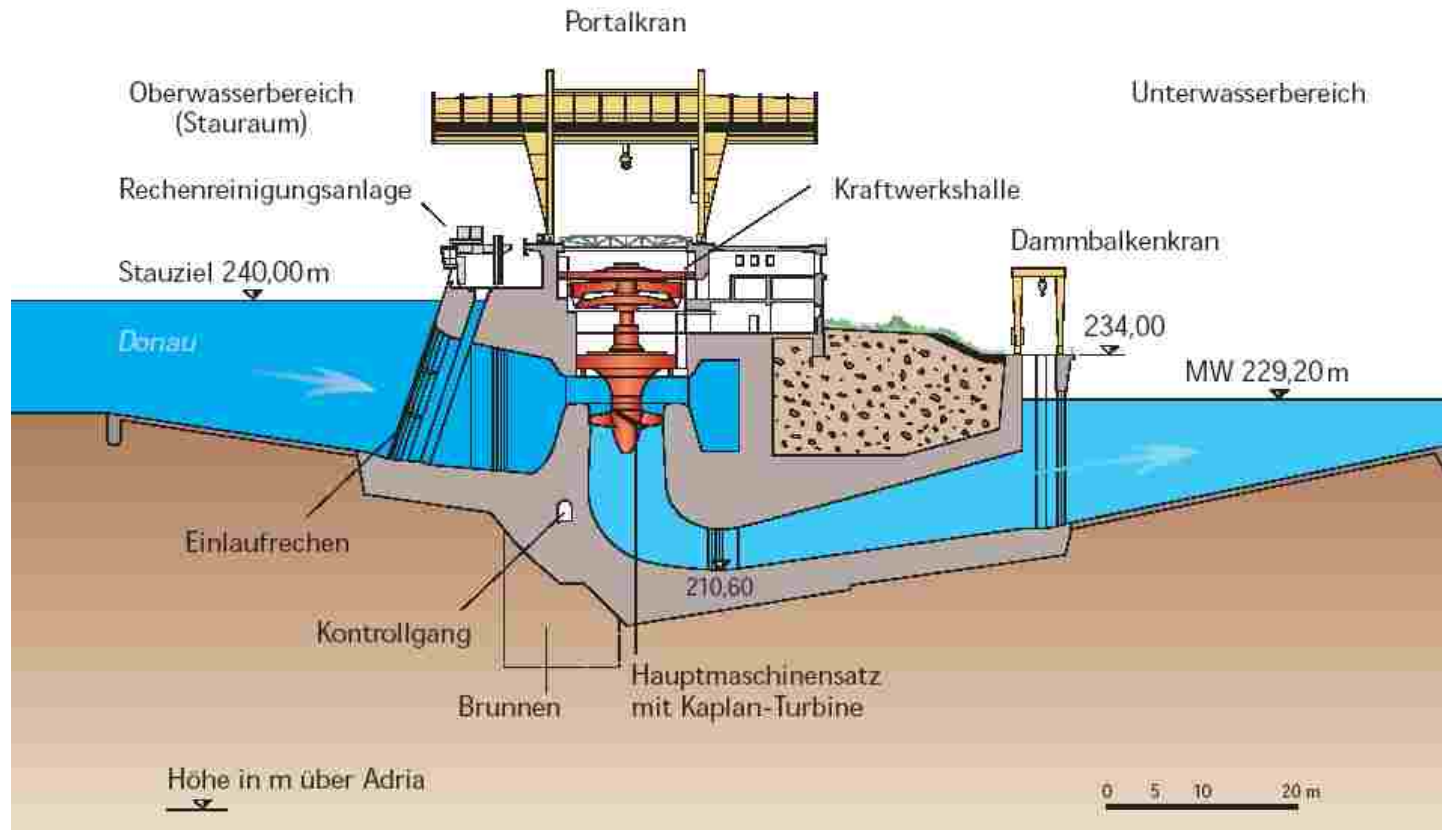
Kaplan Turbine Schematic



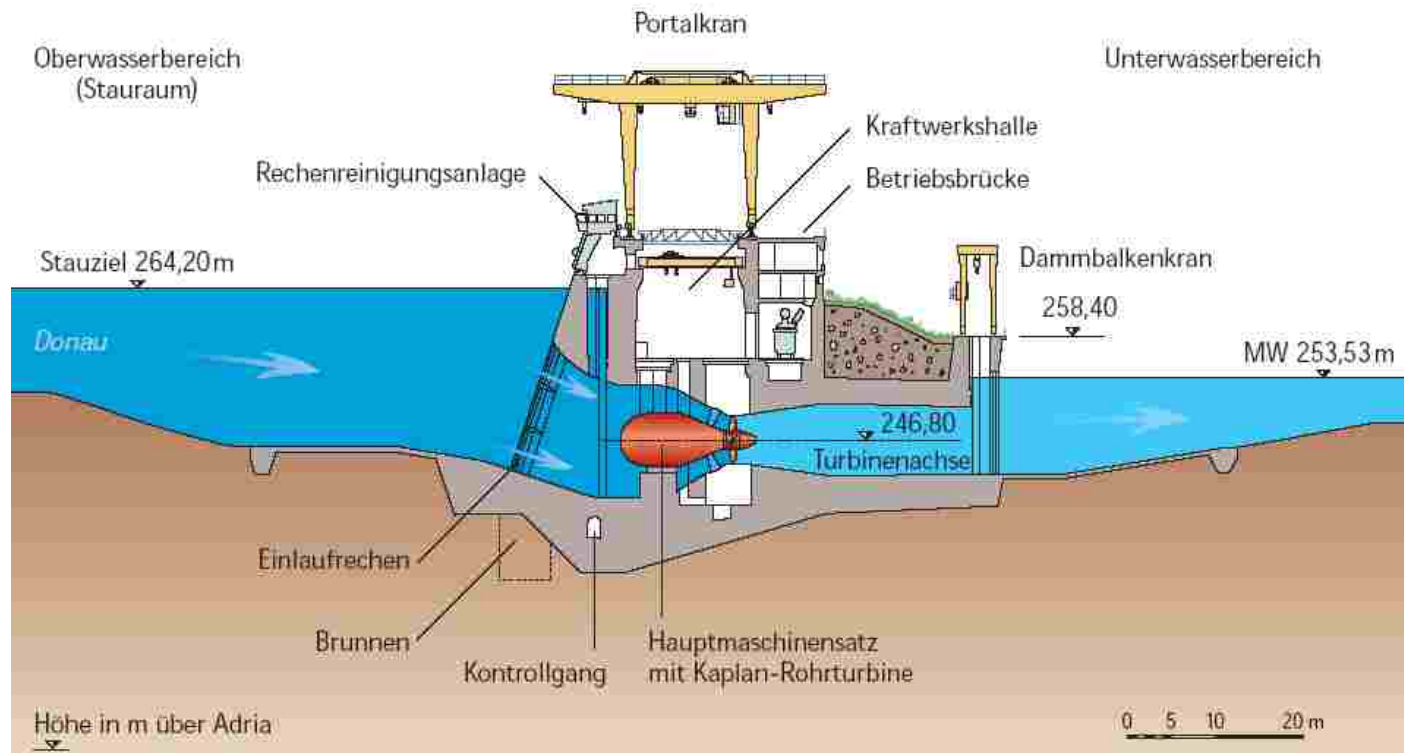
Kaplan Turbine Cross Section



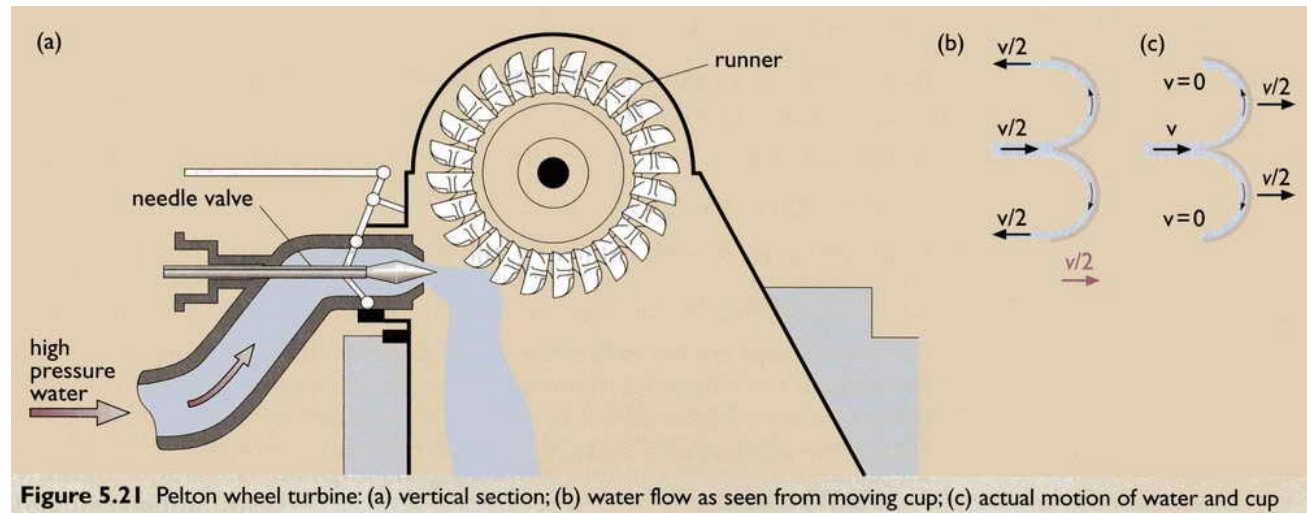
Vertical Kaplan Turbine Setup

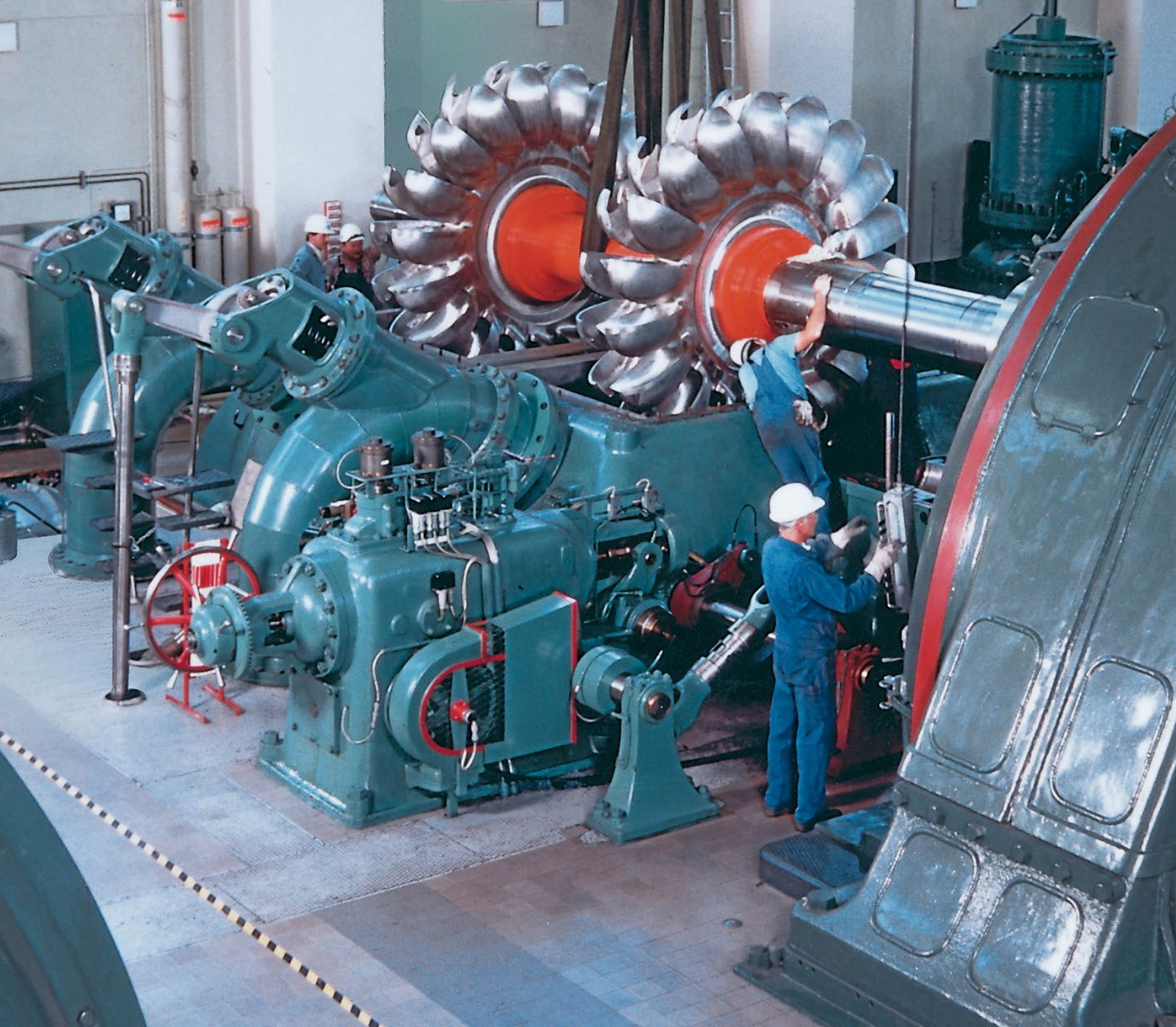


Horizontal Kaplan Turbine



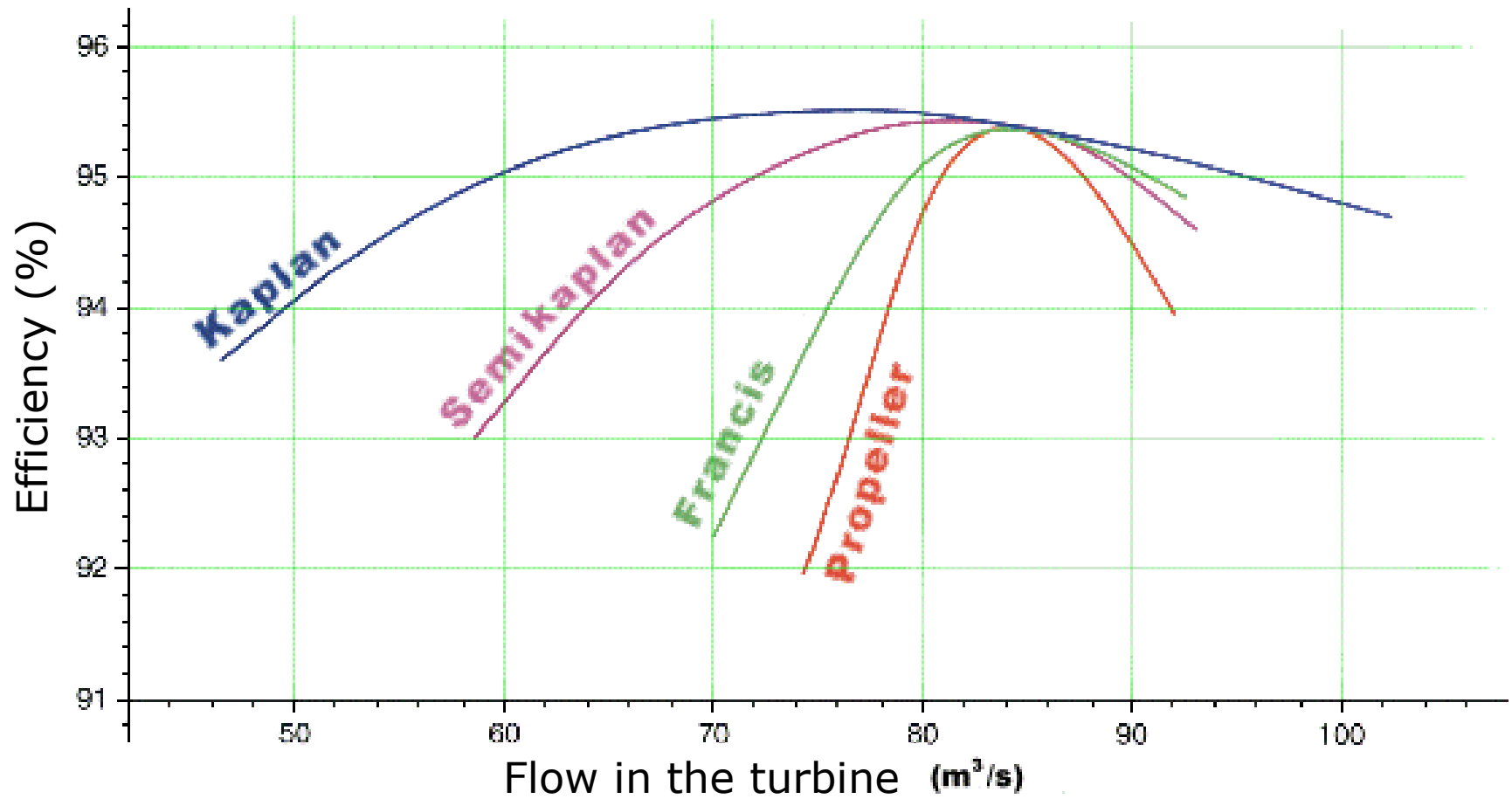
Pelton Wheel Turbine



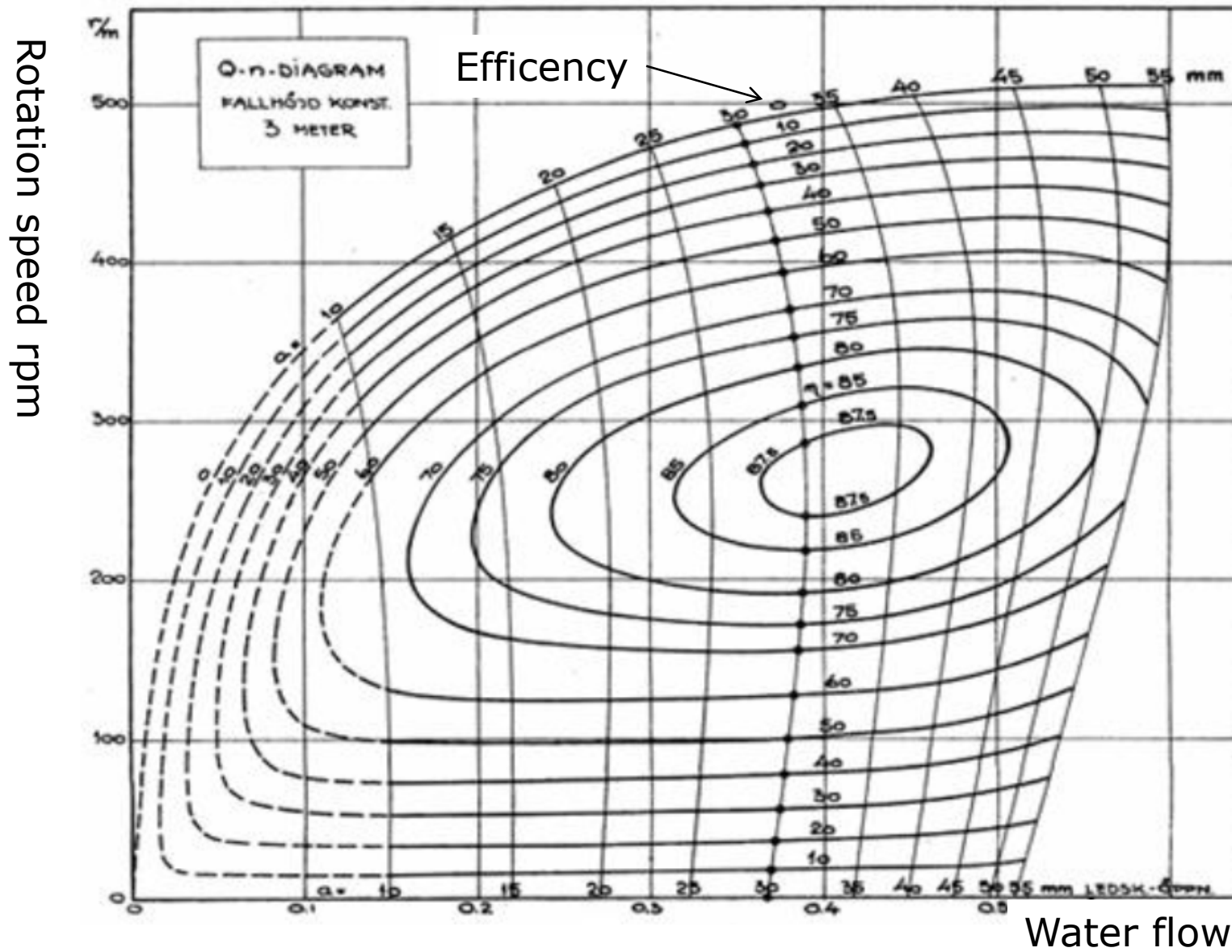


Pelton turbine

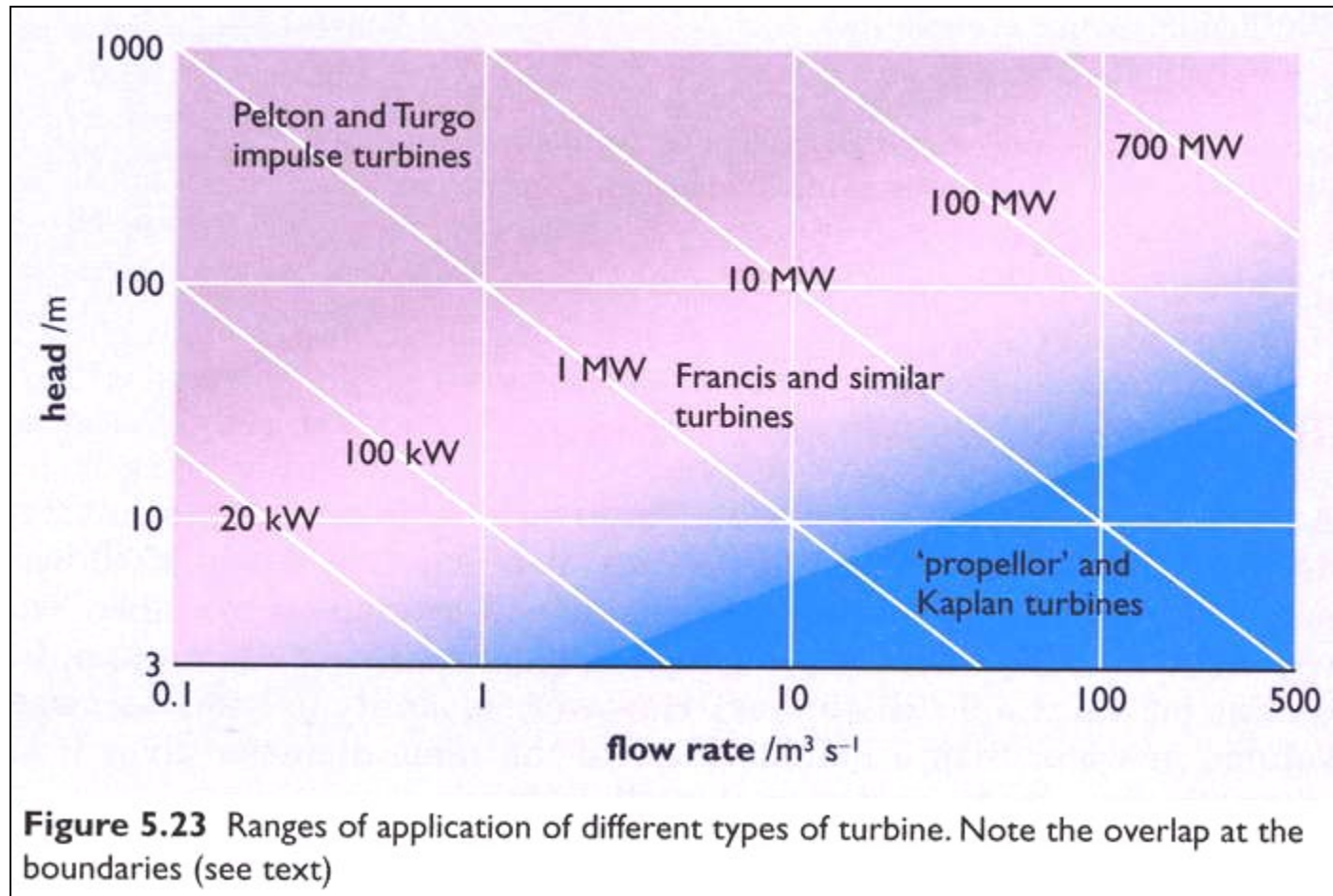
Efficiency



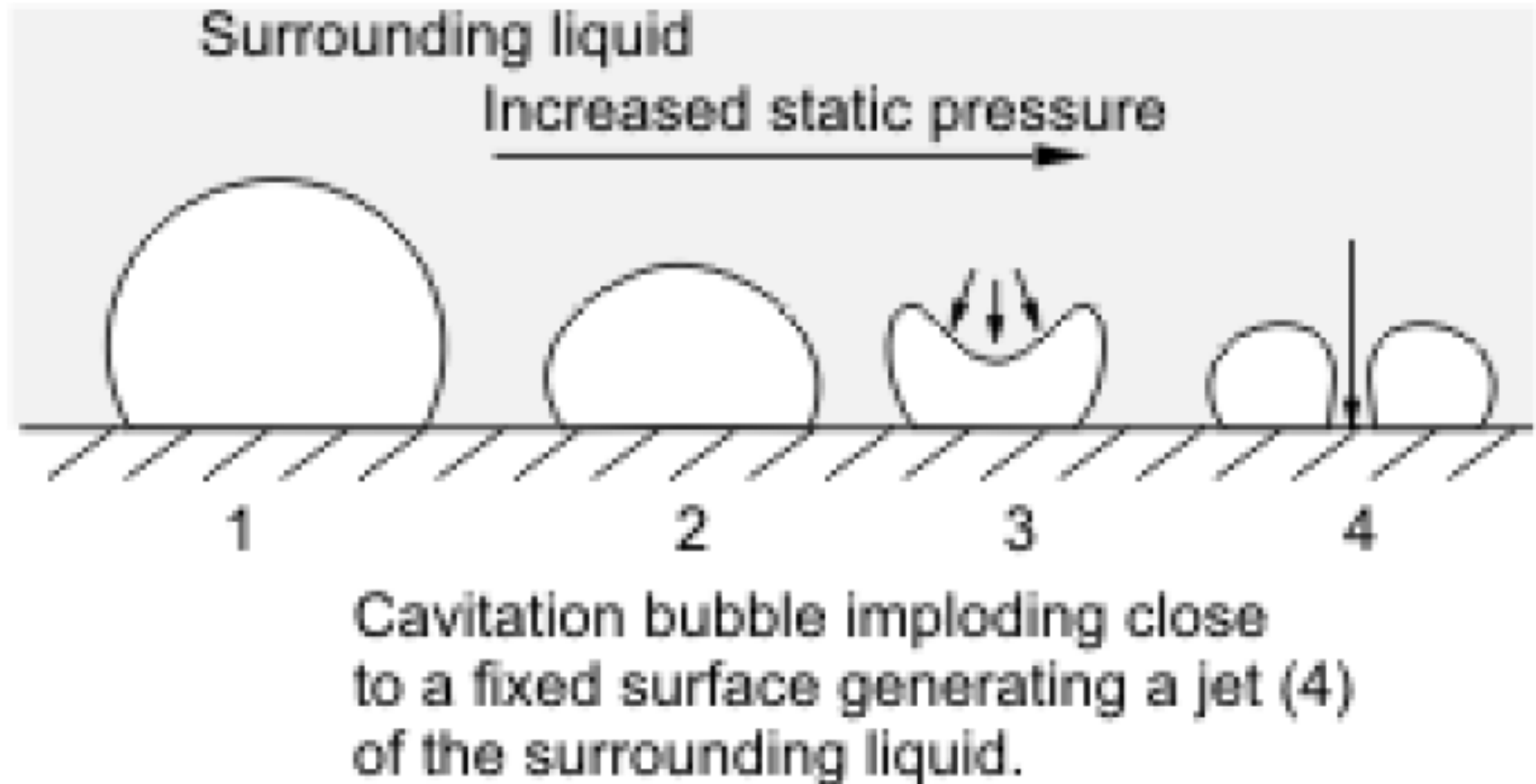
Musseldiagram of Kaplan turbine



Turbine Ranges of Application



Cavitation makes erosion



Fast pressure change can create bubbles

Hydro Power Calculations



Efficiency of Hydropower Plants

- Hydropower is very efficient
 - Efficiency = (electrical power delivered to the “busbar”) ÷ (potential energy of head water)
- Typical losses are due to
 - Frictional drag and turbulence of flow
 - Friction, load and magnetic losses in turbine & generator
- Overall efficiency ranges from 75-95%

Hydropower Calculations

$$P = g \times \eta \times Q \times H$$

$$P \cong 10 \times \eta \times Q \times H$$

- ▣ P = power in kilowatts (kW)
- ▣ g = gravitational acceleration (9.81 m/s^2)
- ▣ η = turbo-generator efficiency ($0 < \eta < 1$)
- ▣ Q = quantity of water flowing (m^3/sec)
- ▣ H = effective head (m)

Example 1a

Consider a mountain stream with an effective head of 25 meters (m) and a flow rate of 600 liters (ℓ) per minute. How much power could a hydro plant generate? Assume plant efficiency (η) of 83%.

□ $H = 25 \text{ m}$

□ $Q = 600 \text{ ℓ/min} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ ℓ} \times 1 \text{ min}/60\text{sec}$
 $= 0.01 \text{ m}^3/\text{sec}$

□ $\eta = 0.83$

□ $P \cong 10\eta QH = 10(0.83)(0.01)(25) = 2.075$
 $\cong 2.1 \text{ kW}$

Example 1b

How much energy (E) will the hydro plant generate each year?

- ▣ $E = P \times t$
= 2.1 kW $\times$ 24 hrs/day $\times$ 365 days/yr
= 18,396 kWh annually

About how many people will this energy support (assume approximately 3,000 kWh / person)?

- ▣ People = $E \div 3000 = 18396 / 3000 = 6.13$
- ▣ About 6 people

Example 2

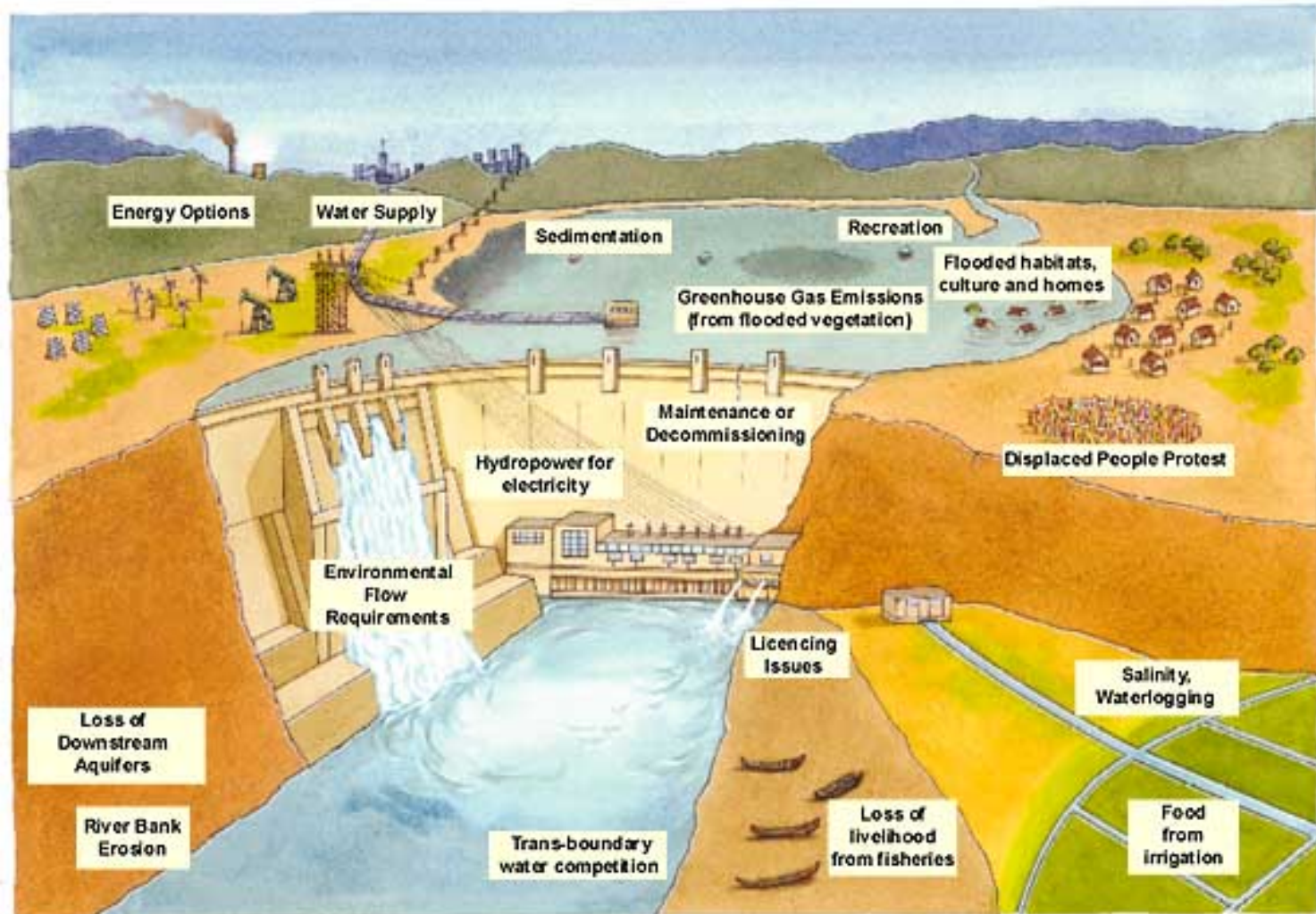
Consider a second site with an effective head of 100 m and a flow rate of 6,000 cubic meters per second (about that of Niagara Falls). Answer the same questions.

- $P \cong 10\eta QH = 10(0.83)(6000)(100)$
 $\cong 4.98 \text{ million kW} = 4.98 \text{ GW (gigawatts)}$
- $E = P \times t = 4.98 \text{ GW} \times 24 \text{ hrs/day} \times 365 \text{ days/yr}$
 $= 43,625 \text{ GWh} = 43.6 \text{ TWh (terrawatt hours)}$
- $\text{People} = E \div 3000 = 43.6 \text{ TWh} / 3,000 \text{ kWh}$
 $= 1.45 \text{ million people}$
- (This assumes maximum power production 24x7)

Environmental Impacts



Impacts of Hydroelectric Dams



Ecological Impacts

- ❑ Loss of forests, wildlife habitat, species
- ❑ Degradation of upstream catchment areas due to inundation of reservoir area
- ❑ Rotting vegetation also emits greenhouse gases
- ❑ Loss of aquatic biodiversity, fisheries, other downstream services
- ❑ Cumulative impacts on water quality, natural flooding
- ❑ Disrupt transfer of energy, sediment, nutrients
- ❑ Sedimentation reduces reservoir life, erodes turbines
 - Creation of new wetland habitat
 - Fishing and recreational opportunities provided by new reservoirs



Environmental and Social Issues

- ❑ Land use – inundation and displacement of people
- ❑ Impacts on natural hydrology
 - Increase evaporative losses
 - Altering river flows and natural flooding cycles
 - Sedimentation/silting
- ❑ Impacts on biodiversity
 - Aquatic ecology, fish, plants, mammals
- ❑ Water chemistry changes
 - Mercury, nitrates, oxygen
 - Bacterial and viral infections
- ❑ Seismic Risks
- ❑ Structural dam failure risks



Öring hona fångad 2002 och 2003 i Karlshammars fisktrappa på dess väg uppför Emån för att leka. Foto: Linda Çalles

Salmon ladder with 23 m³/sec is the waterflow



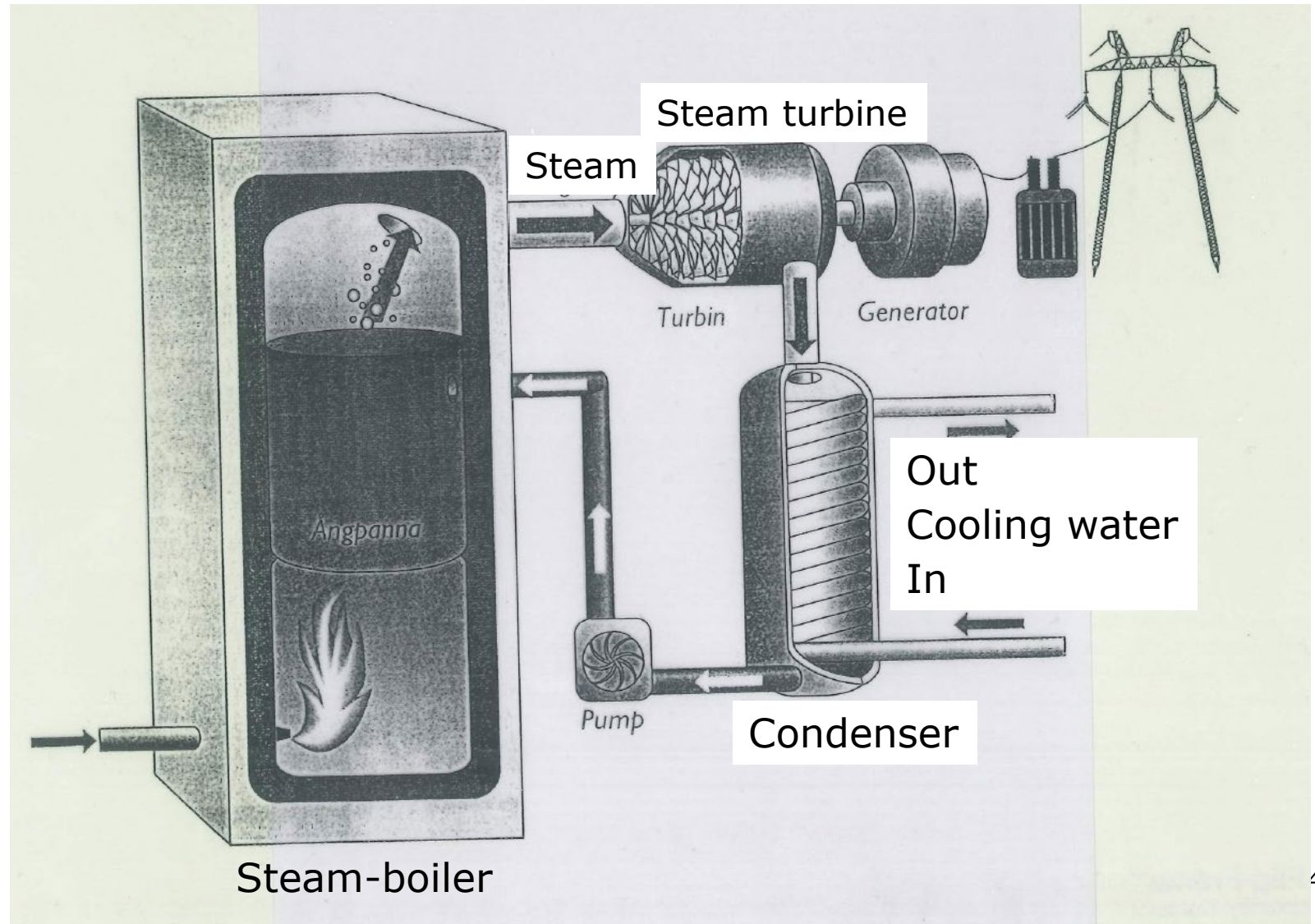
Fisktrappan i Stornorrfors är med sina 65 steg landets längsta. Foto: Vattenfall.



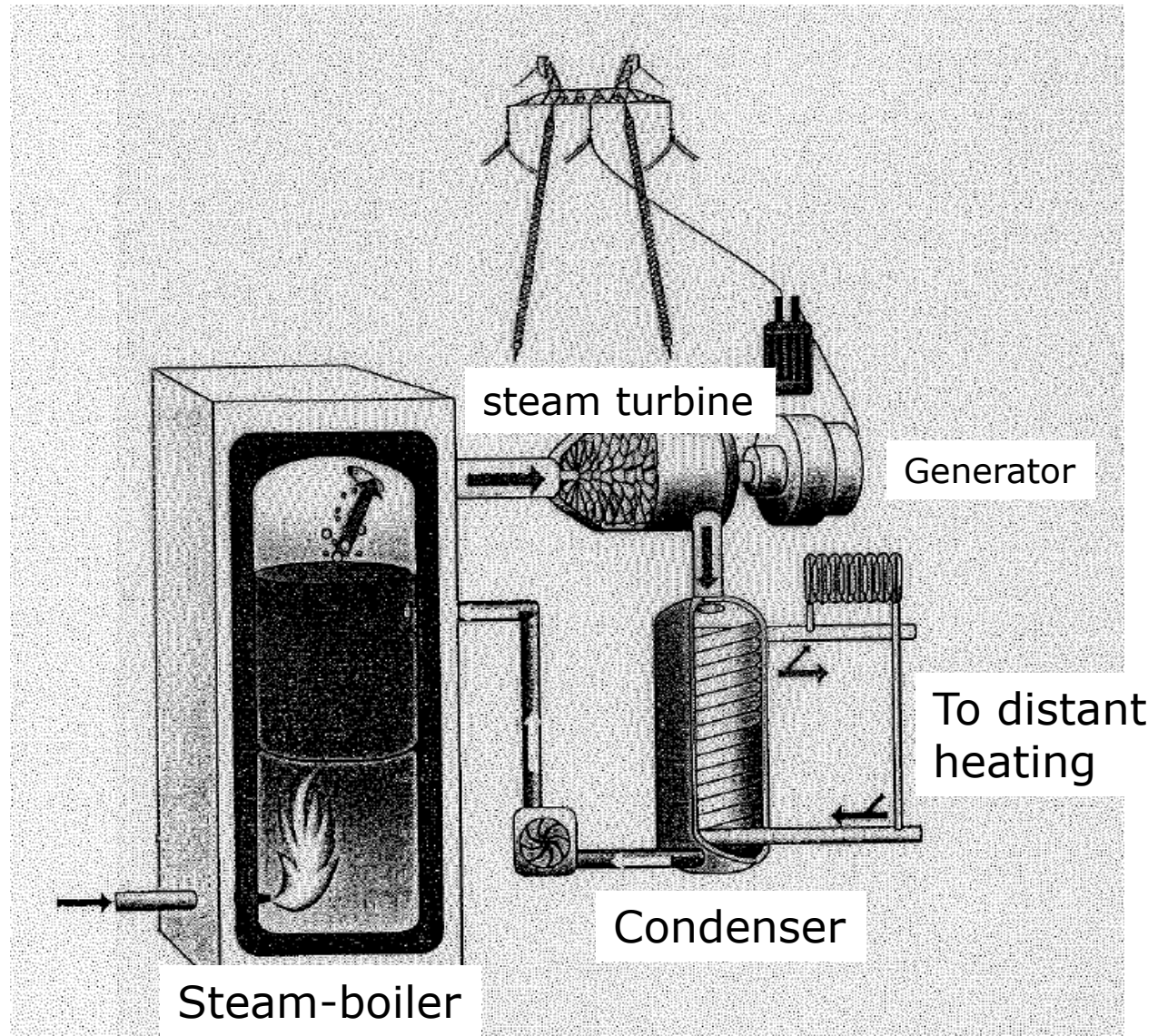
Hydropower – Pros and Cons

Positive	Negative
Emissions-free, with virtually no CO ₂ , NO _X , SO _X , hydrocarbons, or particulates	Frequently involves impoundment of large amounts of water with loss of habitat due to land inundation
Renewable resource with high conversion efficiency to electricity (80+%)	Variable output – dependent on rainfall and snowfall
Dispatchable with storage capacity	Impacts on river flows and aquatic ecology, including fish migration and oxygen depletion
Usable for base load, peaking and pumped storage applications	Social impacts of displacing indigenous people
Scalable from 10 kW to 20,000 MW	Health impacts in developing countries
Low operating and maintenance costs	High initial capital costs
Long lifetimes	Long lead time in construction of large projects

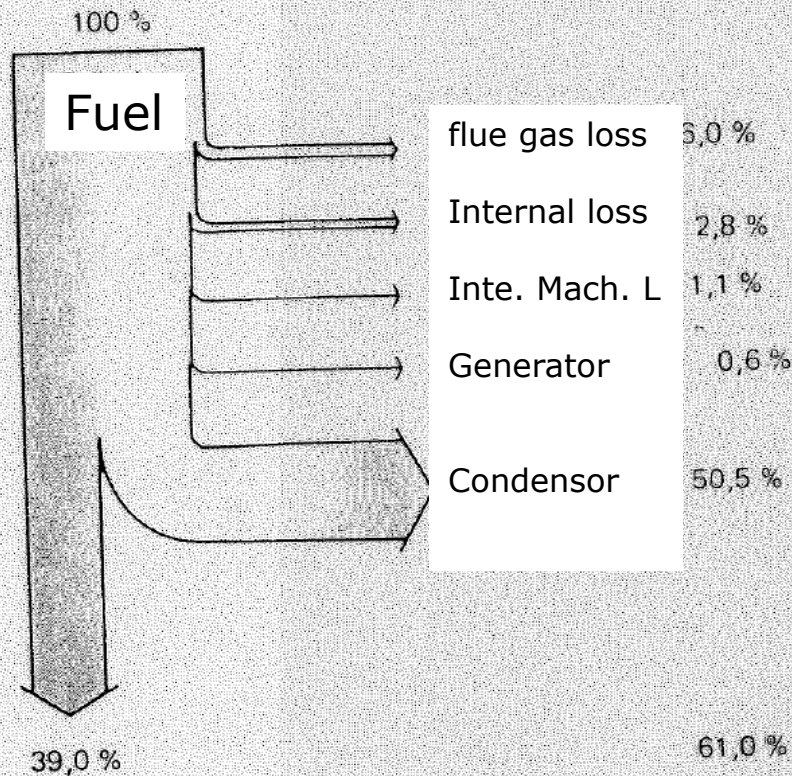
Power Generation by Steam



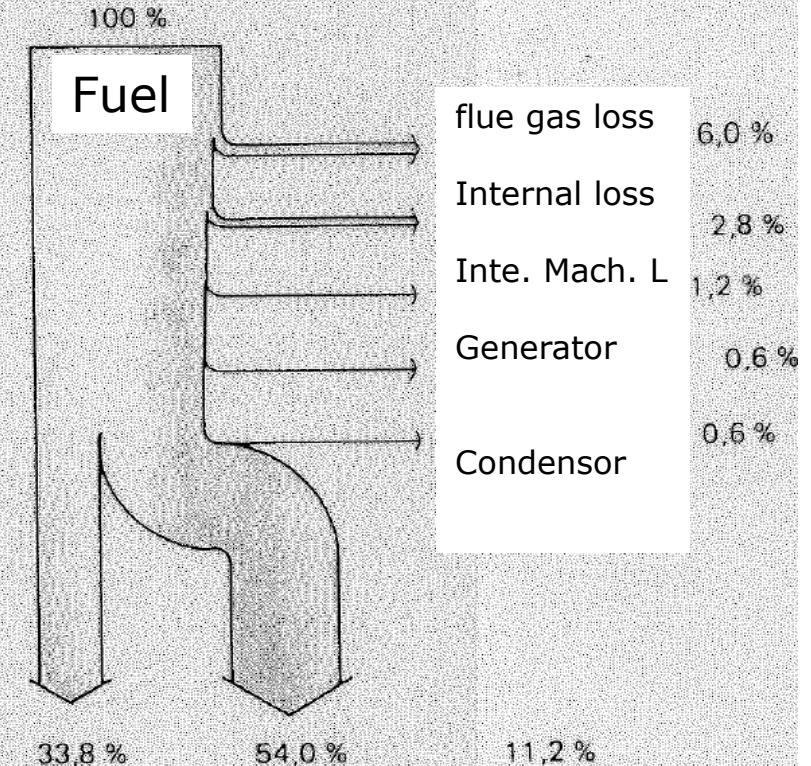
Combined Heat and Power Generation, CHP



Efficiency - losses

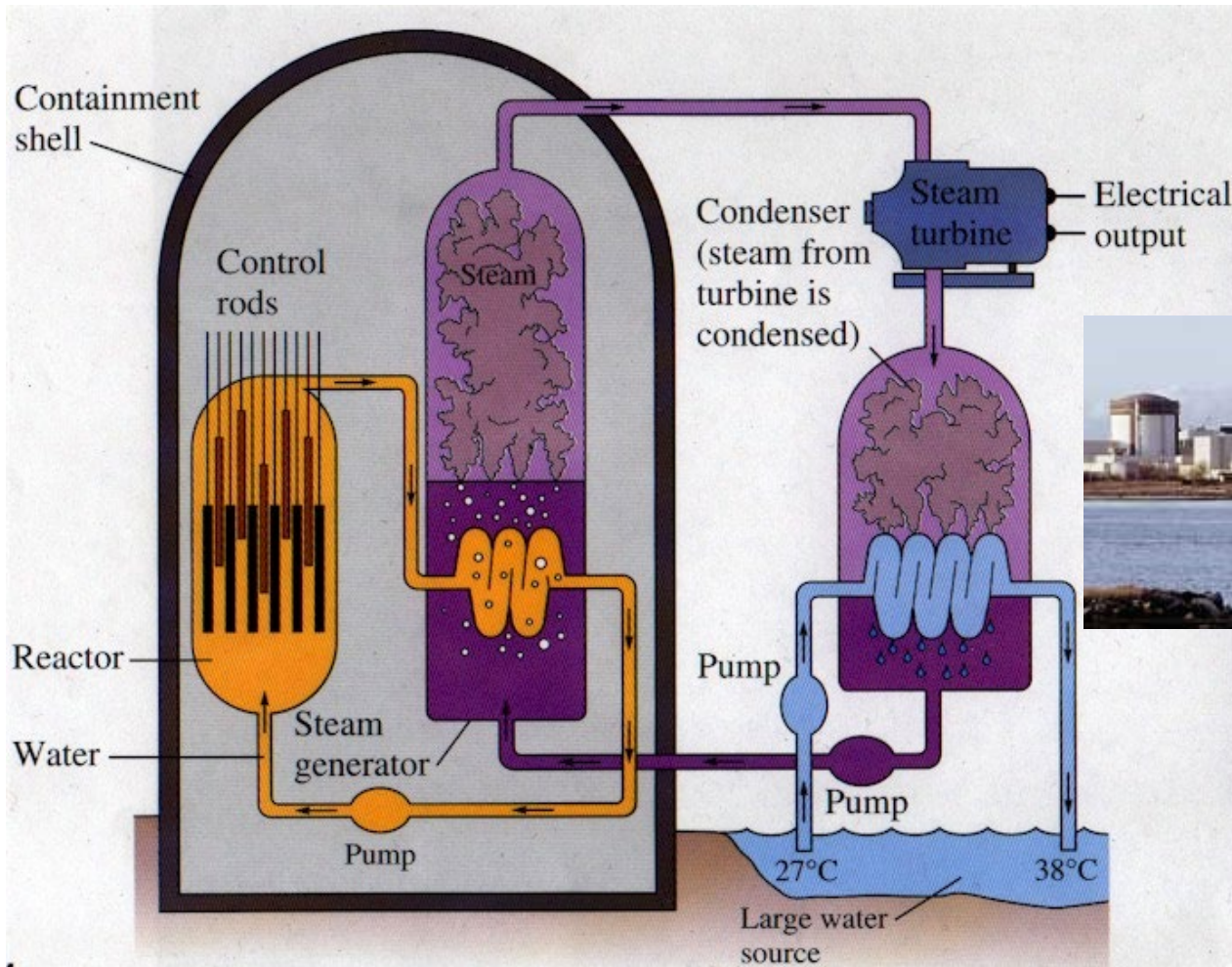


Steam Power



Combined Heat and Power Generation

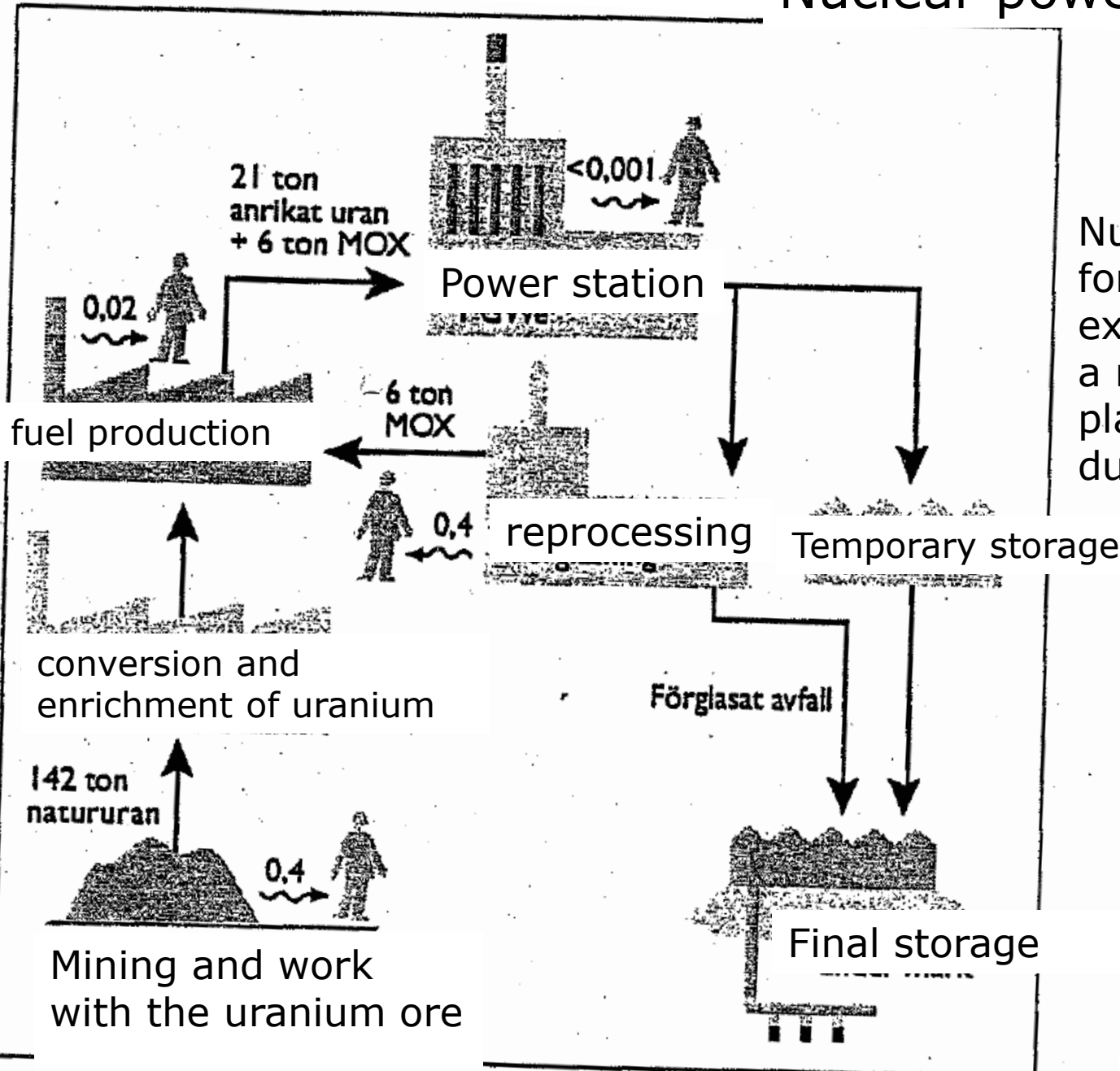
Nuclear Power



In Sweden

- Ringhals
- Forsmark
- Oskarshamn

Nuclear power process



Numbers in mSv
for the most
exposed person in
a nuclear power
plant of 1 GW
during 1 tear

Är kärnkraft nödvändigt för ett fossilfritt Sverige?"

Kärnkraftens roll i den framtida svenska elförsörjningen har fått stor uppmärksamhet. Flera partiföreträdare har hävdat att "kärnkraft behövs i det svenska energisystemet" bland annat för att klara klimatomställningen, för konkurrenskraften och för att trygga elförsörjningen.

Som forskare inom energiområdet vill vi bidra till en faktabaserad debatt, och därför publicerar vi i dag en rapport där vi granskar vanliga påståenden.

Lennart Söder, Professor, KTH
Tomas Kåberger, Affilierad professor, Chalmers
Lars J Nilsson, Professor, LTH
Filip Johnsson, Professor, Chalmers
Ola Carlson, Biträdande professor, Chalmers
Christian Azar, Professor, Chalmers
Staffan Laestadius, Professor emeritus, KTH
Lisa Göransson, Forskare, Chalmers

Behövs kärnkraften för att elektrifiera industrin och transporterna? Även om elanvändningen väntas öka kraftigt till 2040 och all kärnkraft försvinner, finns det mer än tillräcklig potential att bygga ut de förnybara kraftslagen. Naturvårdsverket och Energimyndigheten arbetar nu med en [strategi för 100 TWh vindkraft](#) till 2040 och vindkraftens produktion kan bli ännu större. Tillsammans med en stor potential för solenergi och bioenergi samt dagens vattenkraft finns en stor möjlighet att producera den efterfrågade elen, och även att kunna fortsätta exportera el till grannländerna.

Behövs kärnkraften för att klara klimatmålen? En ökad elproduktion är ett mycket effektivt sätt för Sverige att minska klimatpåverkan, både genom att elektrifiera transporterna och industrin i Sverige och genom att exportera el till Europa. Den kvarvarande kärnkraften kan bidra med klimatnytta så länge den kan drivas vidare med lönsamhet och på ett säkert sätt. Men för att klara klimatmålen behöver elproduktionen byggas ut, och den förnybara elen kan byggas ut snabbt och den tekniken är inte förenad med de långa ledtider som kärnkraften kännetecknas av.

Behövs kärnkraften för leveranssäkerheten så att vi alltid kan få el? Detta har analyserats i Svenska Kraftnätets "[Långsiktig marknadsanalys 2018](#)" där de studerat ett scenario utan kärnkraft, men där istället vindkraft, solkraft, biokraft och dagens vattenkraft står för elproduktionen och elanvändningen antas vara cirka 30 procent högre än i dag. Resultatet är att det finns risk för att elen inte räcker till alla under i genomsnitt 42 minuter per år, och att den saknade elen motsvarar årsförbrukningen i 25 villor. Vår bedömning är att detta kan undvikas till låg kostnad, bland annat genom flexibilitet i elbilar, biokraft, elvärme, batterier eller vätgaslager.

Behövs kärnkraften för att ansluta nya elförbrukare i storstadsområdena? Det senaste året har det uppmärksammats att det ibland inte går att ansluta större elförbrukare till elnätet i storstadsområdena. Ofta missuppfattas detta som att det skulle bero på att det inte finns tillräckligt med elproduktion. Så är det inte, Sverige hade ett rekordstort elöverskott under 2019 och [Energimyndighetens prognos](#) är att detta överskott kommer bli än större 2022. Men däremot har utbyggnaden av elnäten inte hängt med när elförbrukningen ökat i vissa regioner. Detta behöver åtgärdas snabbt, framför allt genom att bygga ut och stärka elnäten, främja lokala ellager och införa incitament för konsumenter att använda el när den är billig. Mer eller mindre kärnkraftsproduktion har dock ingen betydelse för detta, såvida inte nya kärnkraftverk placeras inne i storstäderna. Detta är knappast ett rimligt alternativ.

Behövs kärnkraften för att ge stödtjänster till elsystemet? I ett elsystem måste det varje sekund vara balans mellan produktion och konsumtion, även vid snabba eller oväntade störningar. Detta hanteras genom stödtjänster som Svenska Kraftnät handlar upp på olika marknader. Det är främst vattenkraften som levererar dessa tjänster och kärnkraften bidrar inte till dessa. Vidare finns det en stark teknisk utveckling av olika typer av tjänster som kan bidra till balanseringen, som nya typer av energilager och smart styrning av olika processer och elbilars batterier.

Behövs kärnkraften för att få tillräckligt med rotationsenergi? När ett stort kraftverk oförutsett snabbstoppas eller en stor elledning slutar fungera krävs att annan energi omedelbart och automatiskt tillförs elnätet för att undvika avbrott. Det kan ske genom att det finns lagrad rotationsenergi i tunga, roterande turbiner och generatorer (svängmassa). I ett framtida elsystem kan detta klaras med andra typer av snabba reserver (batterier, efterfrågefleksibilitet och syntetisk svängmassa i vindkraft). [Svenska Kraftnät](#) och deras nordiska kollegor [tar nu fram en marknadsbaserad lösning för detta](#), med målet att upphandla sådana reserver redan detta år.

Den slutsats vi drar från detta, och baserat på mer underlag i rapporten, är att kärnkraften inte är nödvändig för att vi ska kunna få ett stabilt, säkert och fossilfritt elsystem i Sverige i framtiden. Ett elsystem med stor mängd sol- och vindkraft ser dock annorlunda ut än ett med stor mängd kärnkraft. Frågan är då om detta system blir dyrare. Ingen vet vad olika kraftslag kommer att kosta år 2045, men under senare år har det skett en kraftig minskning av kostnaderna för sol- och vindkraft. Samtidigt har kärnkraftens kostnader istället ökat kraftigt. Den är nu betydligt dyrare än ny vindkraft.

Med stora mängder sol- och vindkraft kommer det att behövas andra investeringar i elsystemet, inklusive i elnät och smart styrning. Vår bedömning är att totalkostnaden för dessa extra investeringar under de närmaste decennierna kommer vara betydligt lägre än den merkostnad som kärnkraftsalternativet innebär.