



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI



Termodynamika

pro +EE1, PEE a EEN1

2022

doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
ELEKTROENERGETIKY

Literatura:

<http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/>

<https://home.zcu.cz/~nohac/EE1/EE1aPEEaktuality.html>

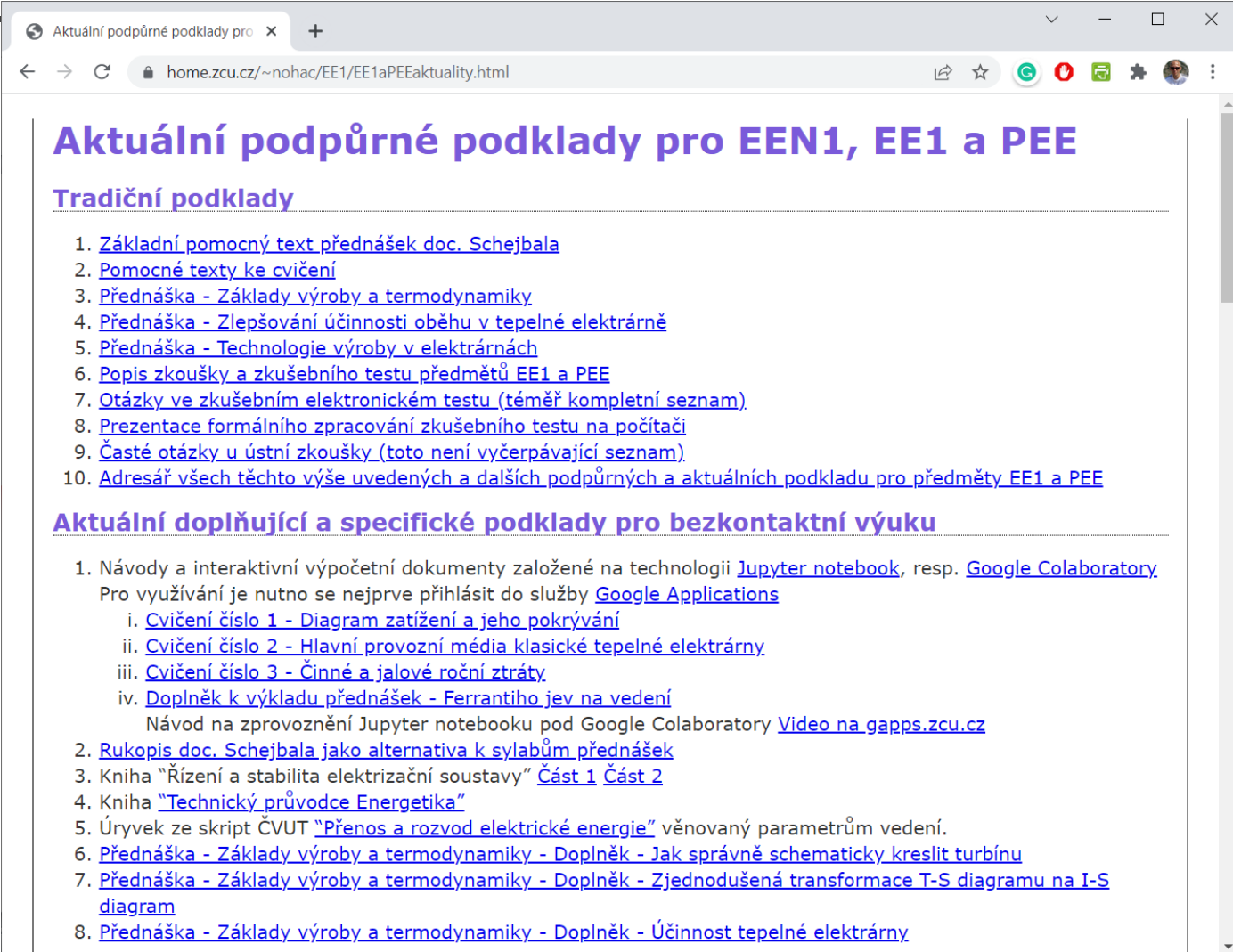
Tradiční podklady

- [Základní pomocný text přednášek doc. Schejbala](#)
- [Pomocné texty ke cvičení](#)
- [Přednáška - Základy výroby a termodynamiky](#)
- [Přednáška - Zlepšování účinnosti oběhu v tepelné elektrárně](#)
- [Přednáška - Technologie výroby v elektrárnách](#)
- [Popis zkoušky a zkušebního testu předmětů EE1 a PEE](#)
- [Otázky ve zkušebním elektronickém testu \(téměř kompletní seznam\)](#)
- [Prezentace formálního zpracování zkušebního testu na počítači](#)
- [Časté otázky u ústní zkoušky \(toto není vyčerpávající seznam\)](#)
- [Adresář všech těchto výše uvedených a dalších podpůrných a aktuálních podkladů pro předměty EE1 a PEE](#)

Literatura:

<http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/>

<https://home.zcu.cz/~nohac/EE1/EE1aPEEaktuality.html>



A screenshot of a web browser window displaying a page titled "Aktuální podpůrné podklady pro EEN1, EE1 a PEE". The browser's address bar shows the URL "home.zcu.cz/~nohac/EE1/EE1aPEEaktuality.html". The page content is organized into two main sections: "Tradiční podklady" and "Aktuální doplňující a specifické podklady pro bezkontaktní výuku".

Aktuální podpůrné podklady pro EEN1, EE1 a PEE

Tradiční podklady

1. [Základní pomocný text přednášek doc. Schejbala](#)
2. [Pomocné texty ke cvičení](#)
3. [Přednáška - Základy výroby a termodynamiky](#)
4. [Přednáška - Zlepšování účinnosti oběhu v tepelné elektrárně](#)
5. [Přednáška - Technologie výroby v elektrárnách](#)
6. [Popis zkoušky a zkušebního testu předmětů EE1 a PEE](#)
7. [Otázky ve zkušebním elektronickém testu \(téměř kompletní seznam\)](#)
8. [Prezentace formálního zpracování zkušebního testu na počítači](#)
9. [Časté otázky u ústní zkoušky \(toto není vyčerpávající seznam\)](#)
10. [Adresář všech těchto výše uvedených a dalších podpůrných a aktuálních podkladů pro předměty EE1 a PEE](#)

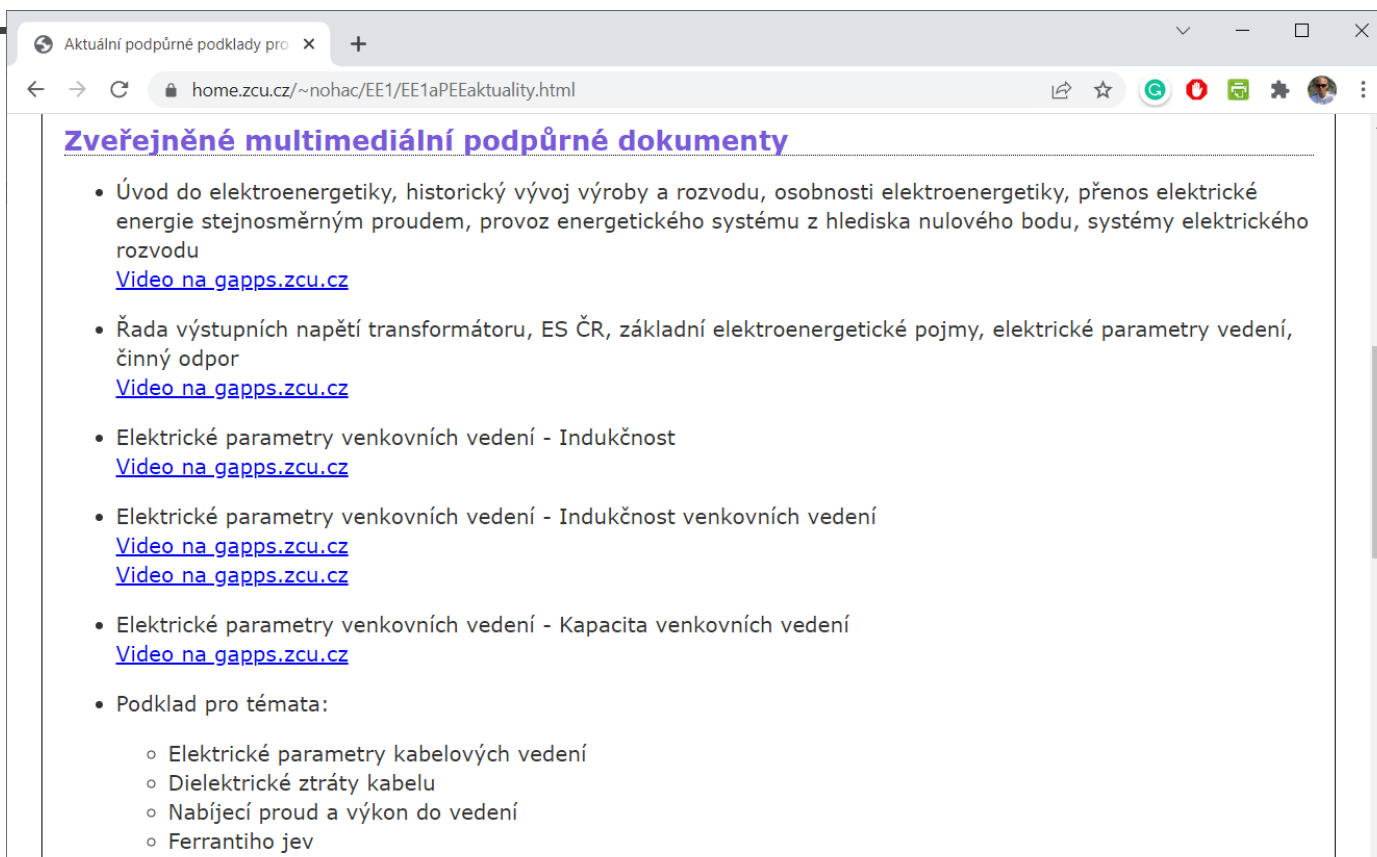
Aktuální doplňující a specifické podklady pro bezkontaktní výuku

1. Návod a interaktivní výpočetní dokumenty založené na technologii [Jupyter notebook](#), resp. [Google Colaboratory](#). Pro využívání je nutno se nejprve přihlásit do služby [Google Applications](#)
 - i. [Cvičení číslo 1 - Diagram zatížení a jeho pokrývání](#)
 - ii. [Cvičení číslo 2 - Hlavní provozní média klasické tepelné elektrárny](#)
 - iii. [Cvičení číslo 3 - Činné a jalové roční ztráty](#)
 - iv. [Doplněk k výkladu přednášek - Ferrantiho jev na vedení](#)Návod na zprovoznění Jupyter notebooku pod Google Colaboratory [Video na gapps.zcu.cz](#)
2. [Rukopis doc. Schejbala jako alternativa k sylabům přednášek](#)
3. Kniha "Řízení a stabilita elektrizační soustavy" [Část 1](#) [Část 2](#)
4. Kniha ["Technický průvodce Energetika"](#)
5. Úryvek ze skript ČVUT ["Přenos a rozvod elektrické energie"](#) věnovaný parametrům vedení.
6. [Přednáška - Základy výroby a termodynamiky - Doplněk - Jak správně schematicky kreslit turbínu](#)
7. [Přednáška - Základy výroby a termodynamiky - Doplněk - Zjednodušená transformace T-S diagramu na I-S diagram](#)
8. [Přednáška - Základy výroby a termodynamiky - Doplněk - Účinnost tepelné elektrárny](#)

Literatura:

<http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/>

<https://home.zcu.cz/~nohac/EE1/EE1aPEEaktuality.html>



A screenshot of a web browser window. The address bar shows the URL home.zcu.cz/~nohac/EE1/EE1aPEEaktuality.html. The page title is "Aktuální podpůrné podklady pro". The main content is titled "Zveřejněné multimediální podpůrné dokumenty" and contains a list of documents with links to videos on the website gapps.zcu.cz.

- Úvod do elektroenergetiky, historický vývoj výroby a rozvodu, osobnosti elektroenergetiky, přenos elektrické energie stejnosměrným proudem, provoz energetického systému z hlediska nulového bodu, systémy elektrického rozvodu
[Video na gapps.zcu.cz](http://gapps.zcu.cz)
- Řada výstupních napětí transformátoru, ES ČR, základní elektroenergetické pojmy, elektrické parametry vedení, činný odpor
[Video na gapps.zcu.cz](http://gapps.zcu.cz)
- Elektrické parametry venkovních vedení - Indukčnost
[Video na gapps.zcu.cz](http://gapps.zcu.cz)
- Elektrické parametry venkovních vedení - Indukčnost venkovních vedení
[Video na gapps.zcu.cz](http://gapps.zcu.cz)
- Elektrické parametry venkovních vedení - Kapacita venkovních vedení
[Video na gapps.zcu.cz](http://gapps.zcu.cz)
- Podklad pro témata:
 - Elektrické parametry kabelových vedení
 - Dielektrické ztráty kabelu
 - Nabíjecí proud a výkon do vedení
 - Ferrantiho jev

Některé podklady vyžadují prvotní přihlášení na

<http://gapps.zcu.cz/>



Možné způsoby výroby elektrické energie v současnosti:

- termodynamická přeměna energie jaderného paliva a spalování fosilních paliv v mechanickou energii a následně elektrickou - jaderné a klasické tepelné (tepelné na fosilní paliva) elektrárny
- přeměna mechanické polohové a kinetické energie vody v mechanickou energii a následně elektrickou - vodní elektrárny



Možné způsoby výroby elektrické energie v současnosti:

- přeměna slunečního záření na elektrickou energii (přímo nebo zprostředkovaně) - sluneční, větrné, ...
- geotermální
- Slapové
- chemické články
- ...

Možné způsoby výroby elektrické energie v současnosti:

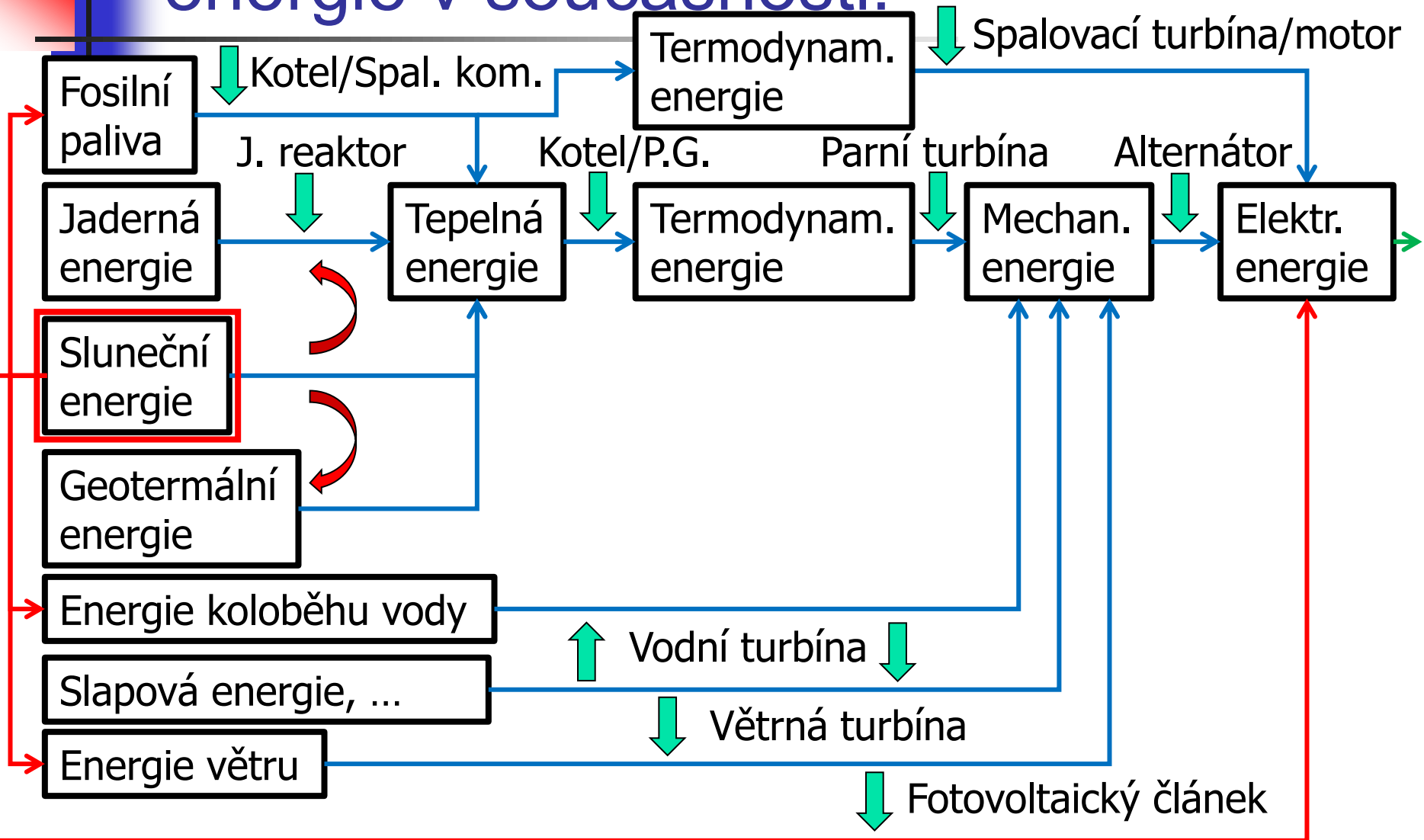
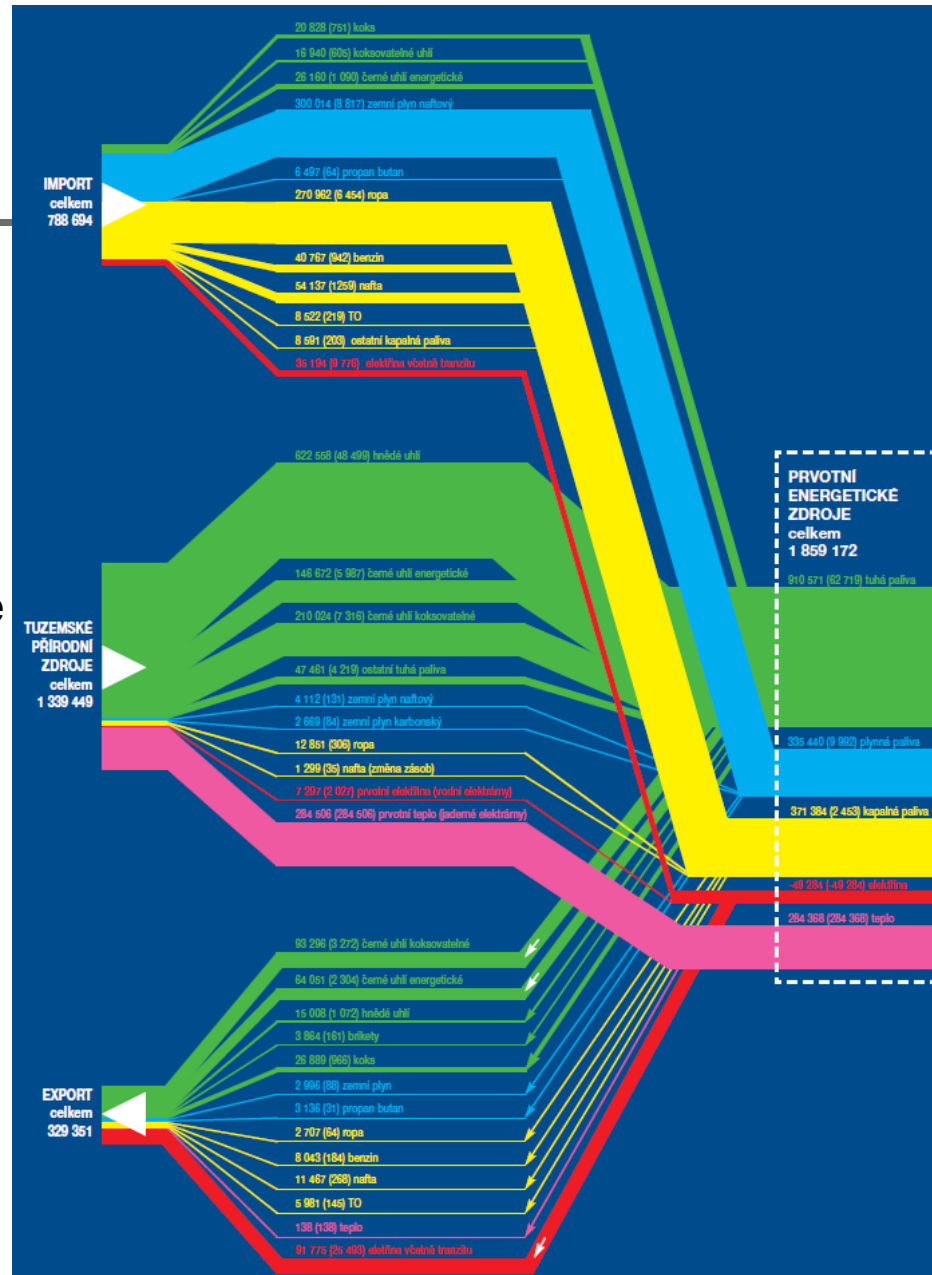


Diagram energetických toků v ČR:

Import

Tuzemské přírodní zdroje

Export



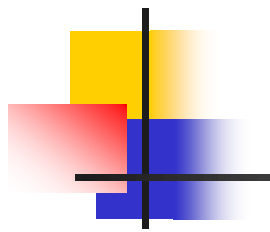
Tuhá paliva

Plynná paliva

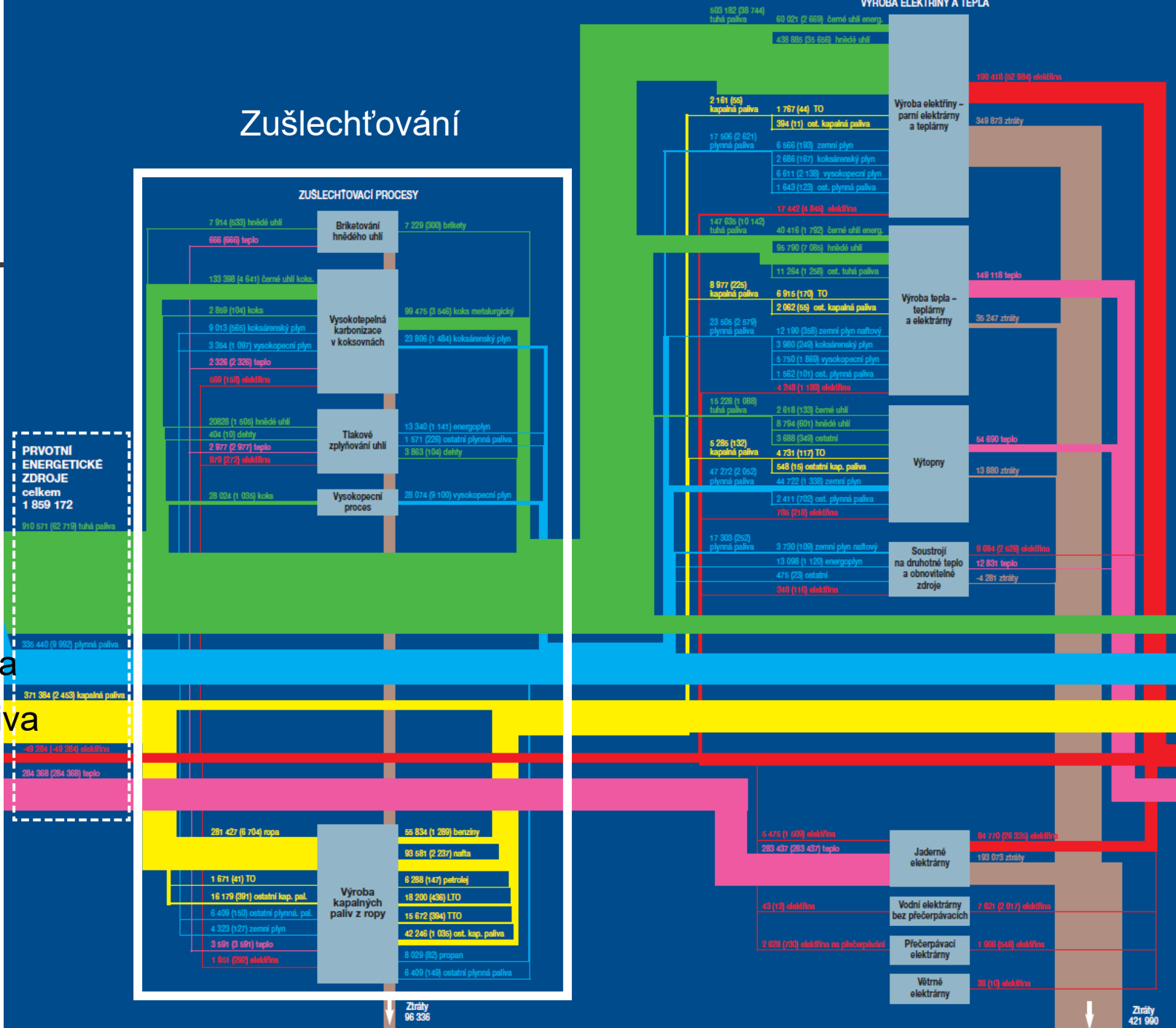
Kapalná paliva

Elektřina

Teplo (z JE)



Zušlechťování



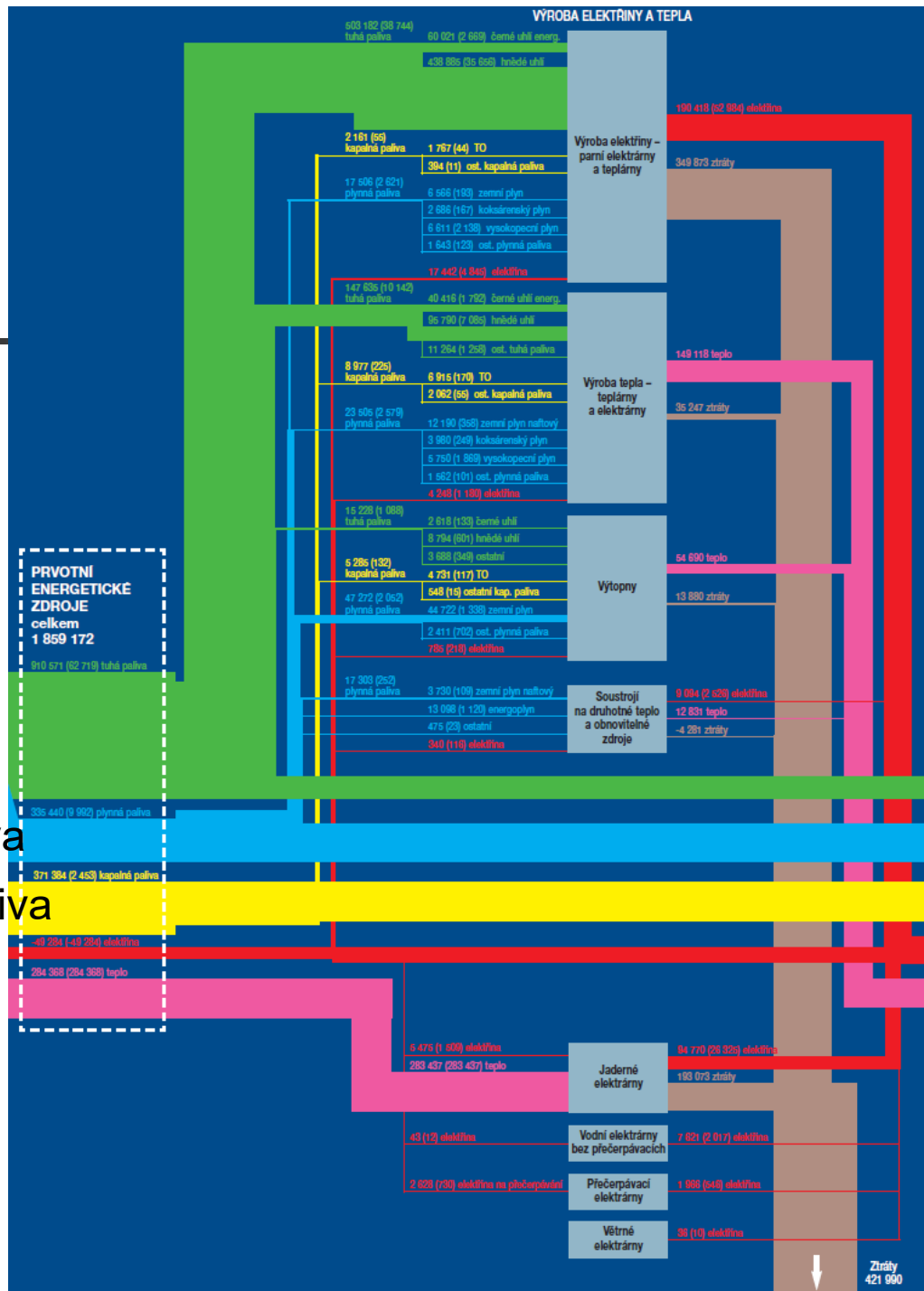
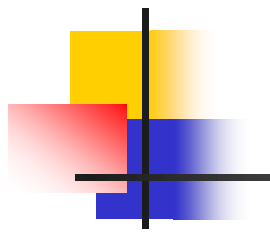
Tuhá paliva

Plynná paliva

Kapalná paliva

Elektřina

Teplo (z JE)



Tuhá paliva

Plynná paliva

Kapalná paliva

Elektřina

Teplo (z JE)

Tuhá paliva

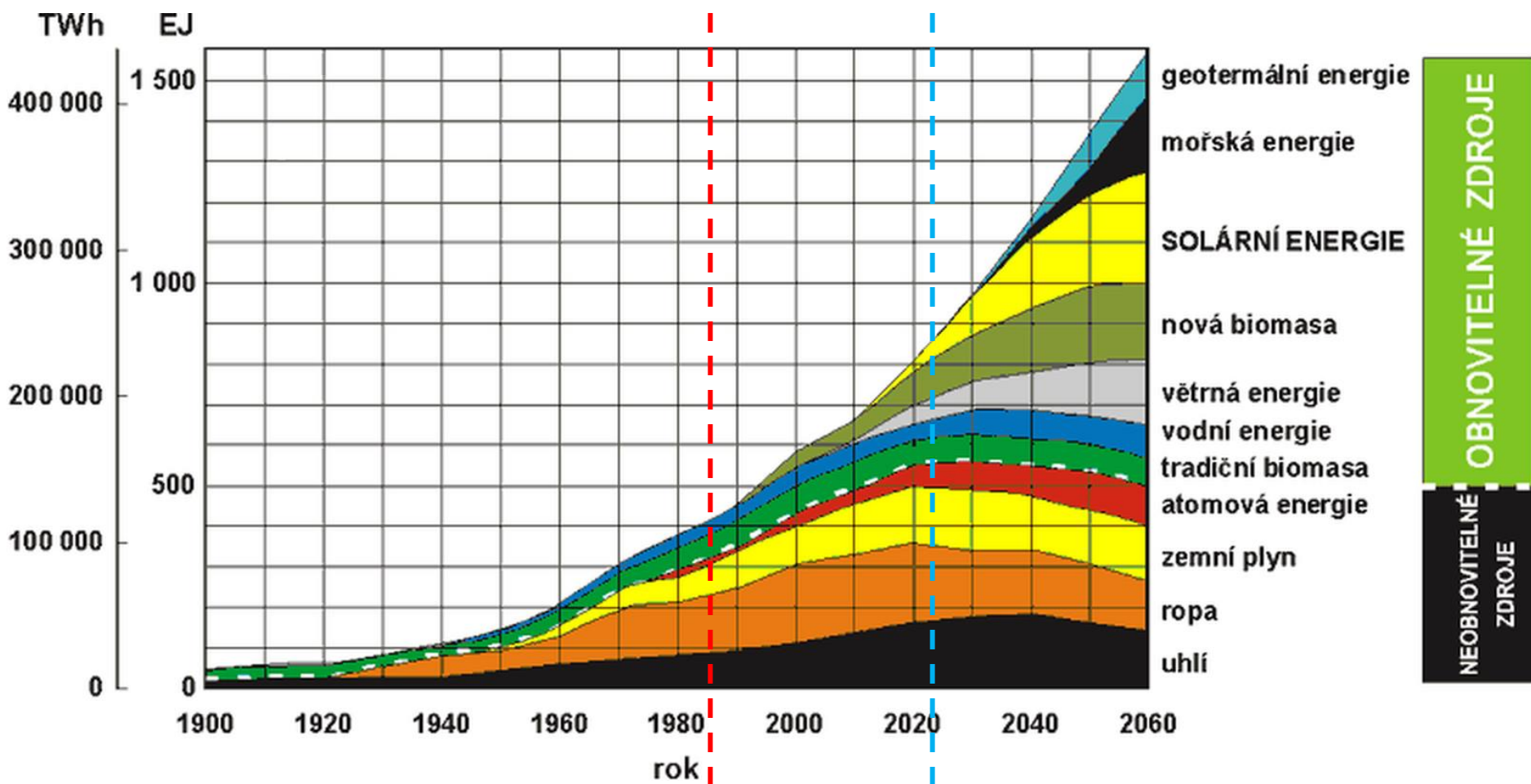
Plynná paliva

Kapalná paliva

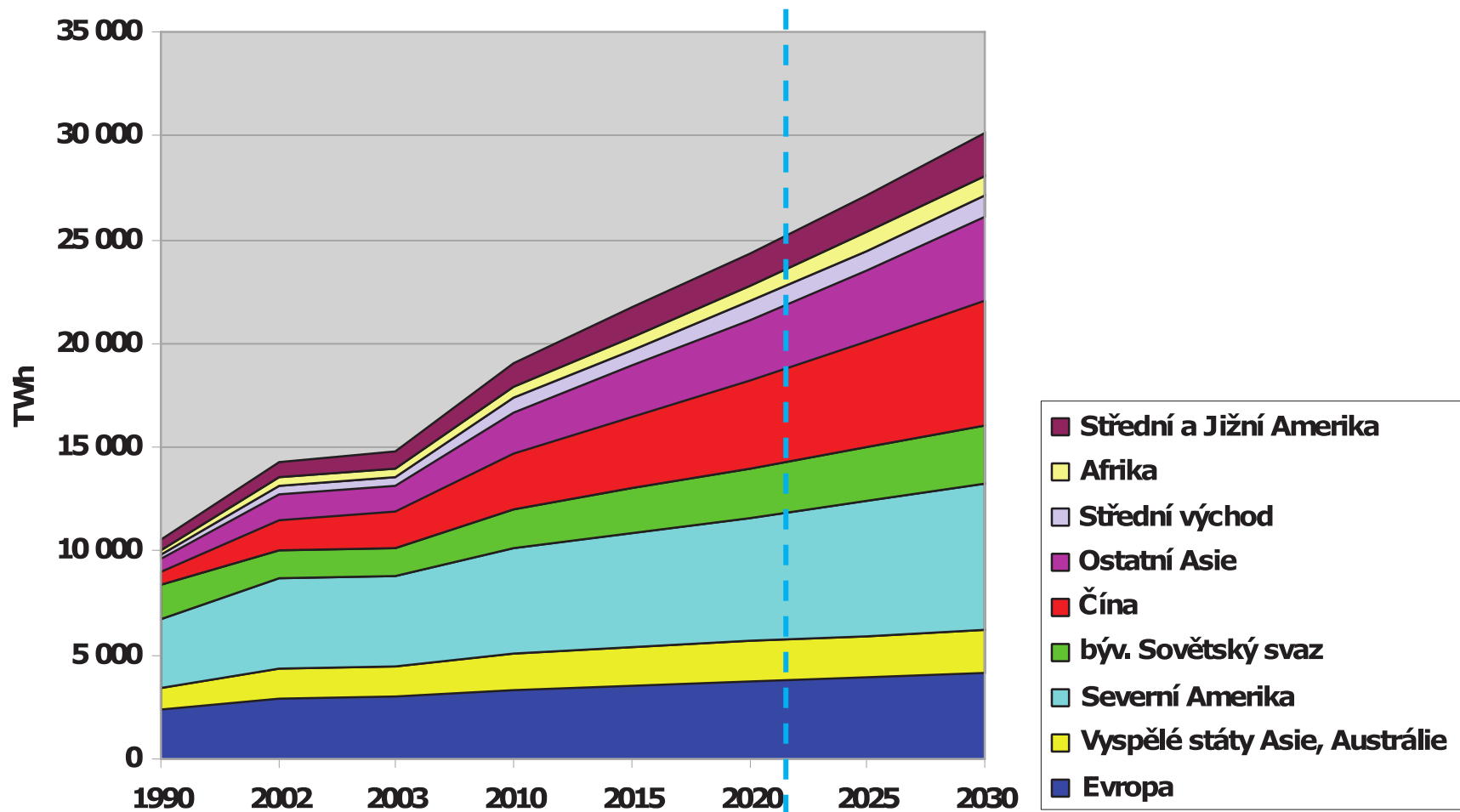
Elektřina

Teplo (ze všech zdrojů)

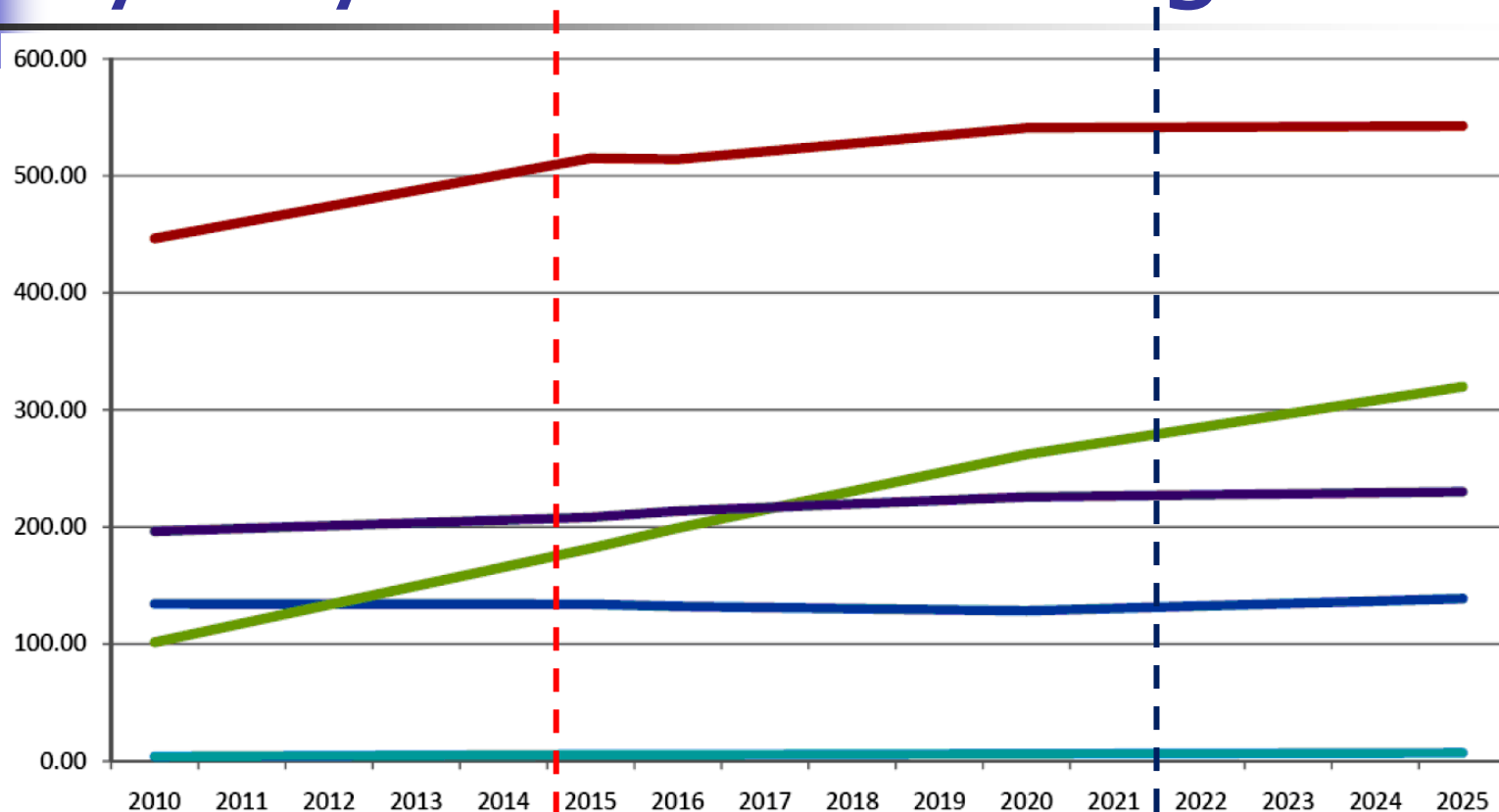
Předpoklad světového vývoje výroby elektrické energie:



Předpoklad světového vývoje výroby elektrické energie:

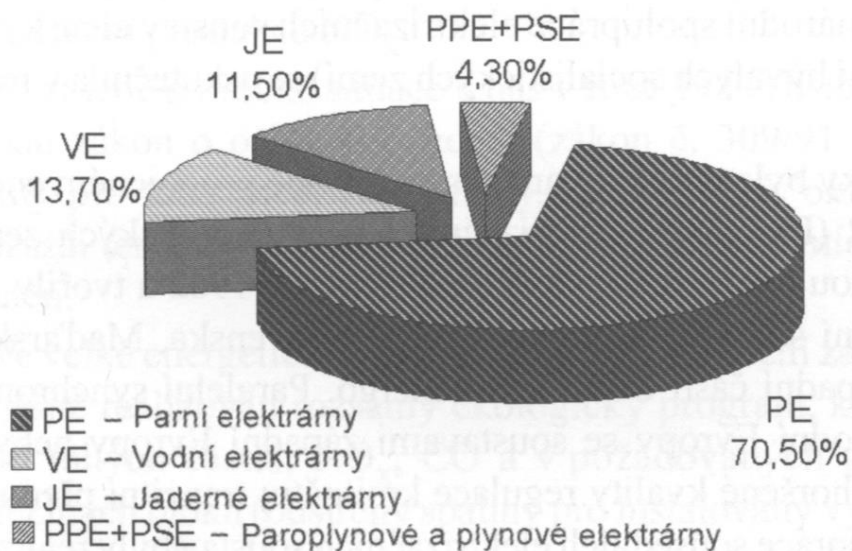


Předpoklad Evropského vývoje výroby elektrické energie:

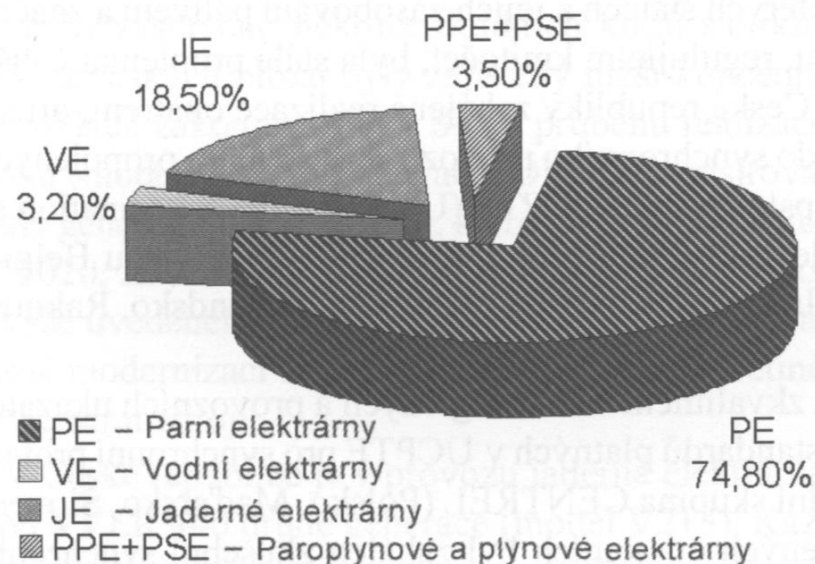


- Jaderné elektrárny
- Obnovitelné zdroje kromě vodních
- Ostatní zdroje
- Uhelné elektrárny
- Vodní elektrárny

Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:



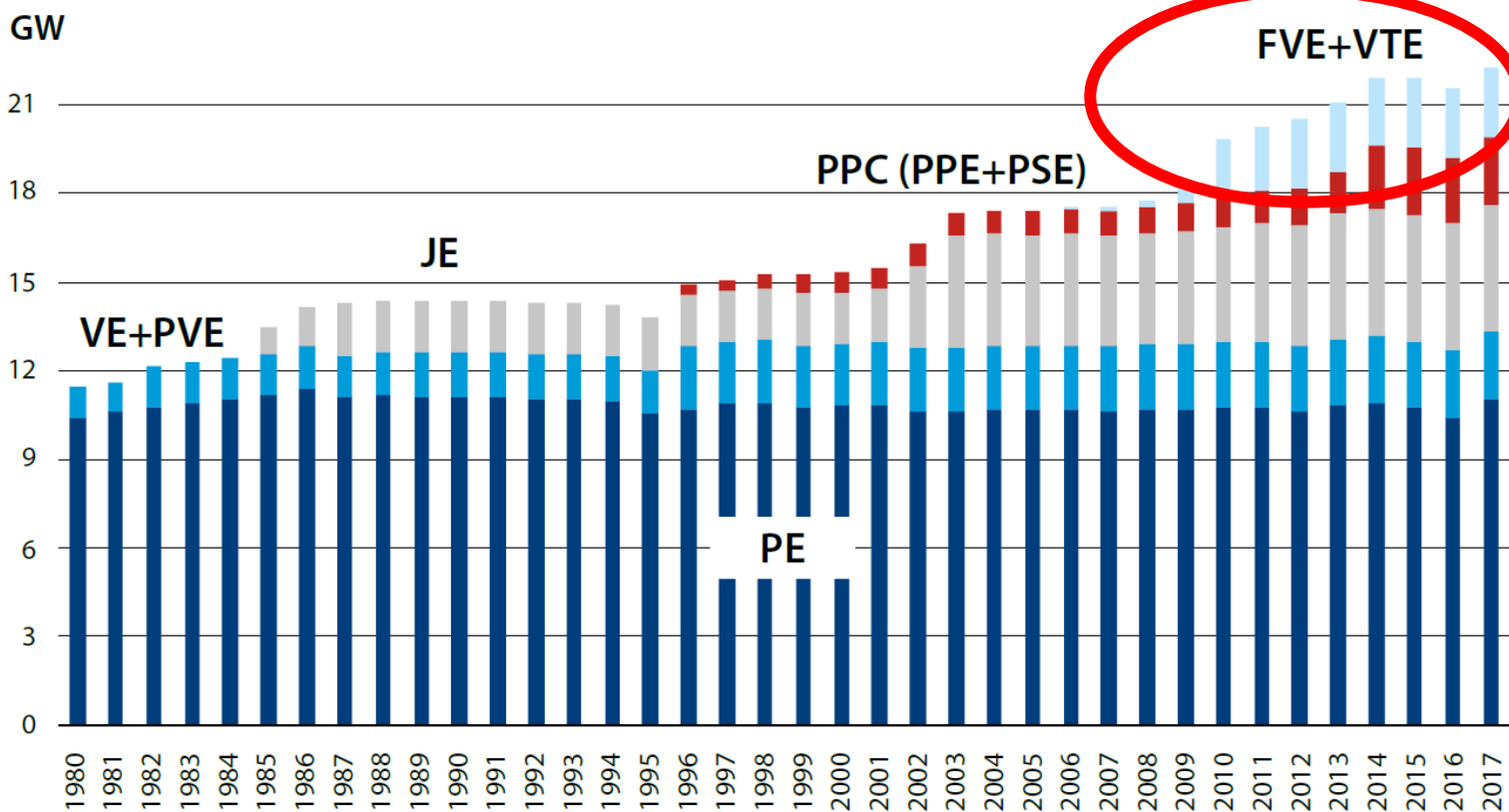
Instalovaný výkon



Vyrobená energie

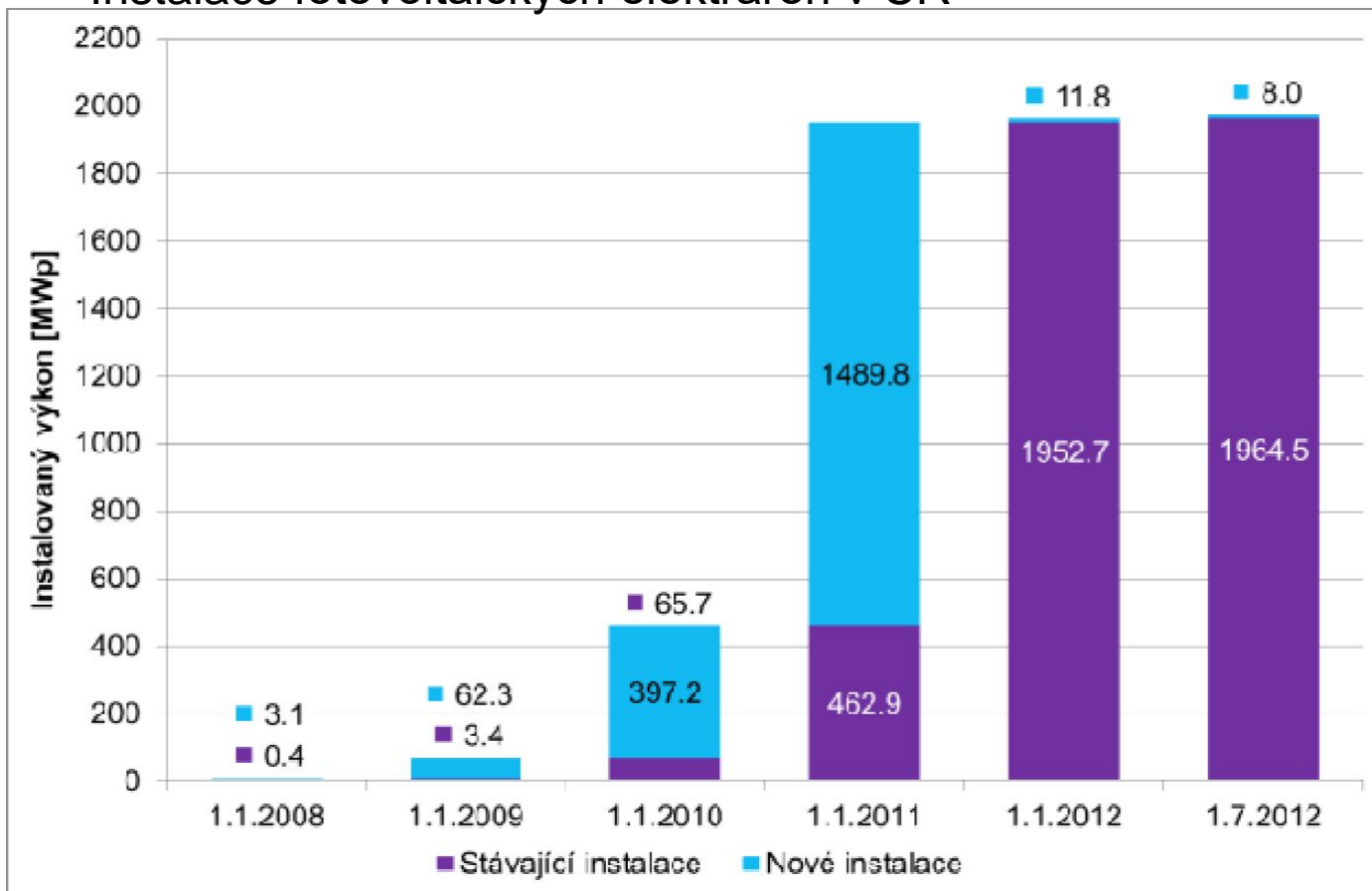
Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

VÝVOJ INSTALOVANÉHO VÝKONU OD ROKU 1980 (k 31. 12. 2017)

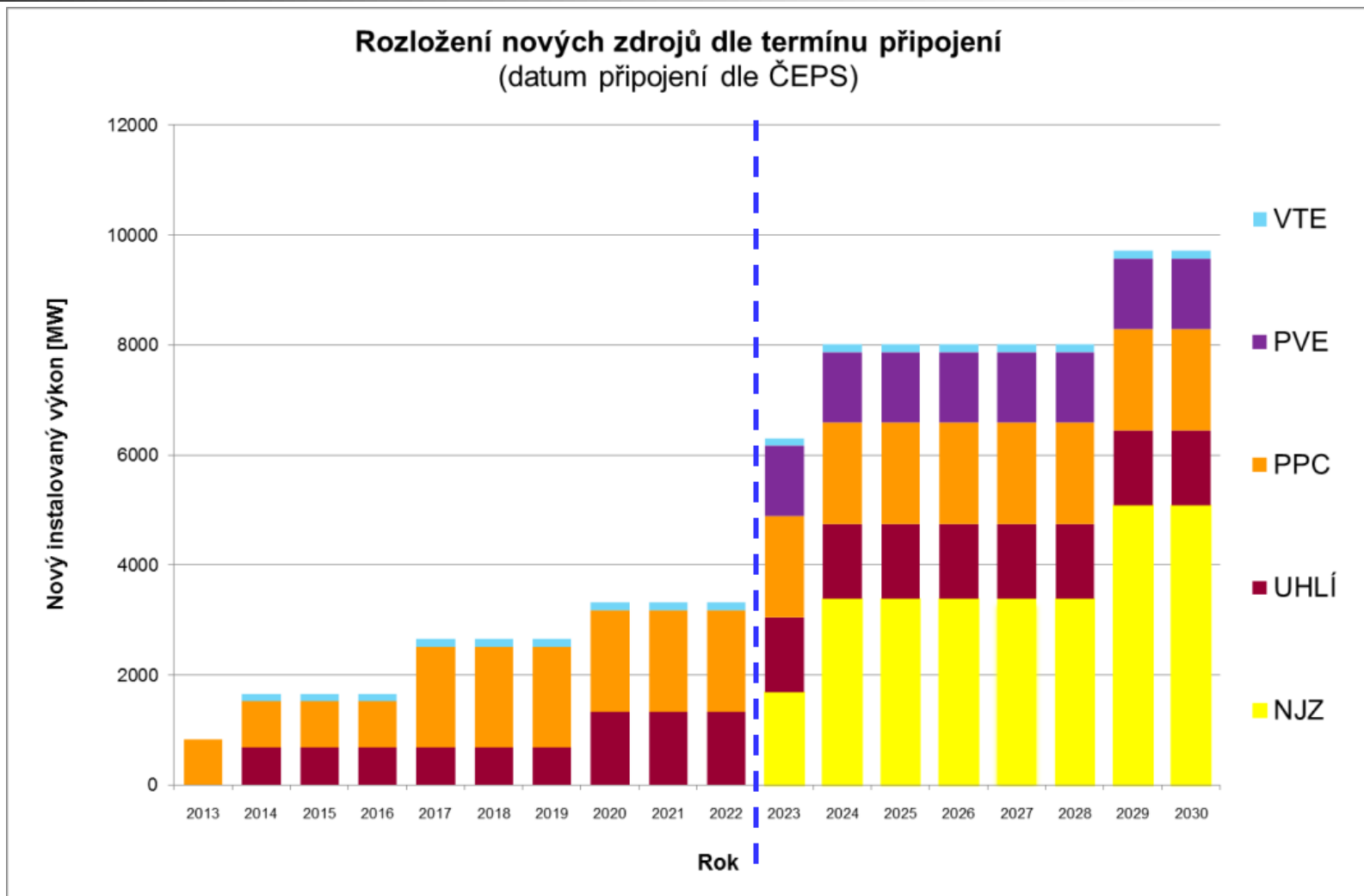


Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

Instalace fotovoltaických elektráren v ČR

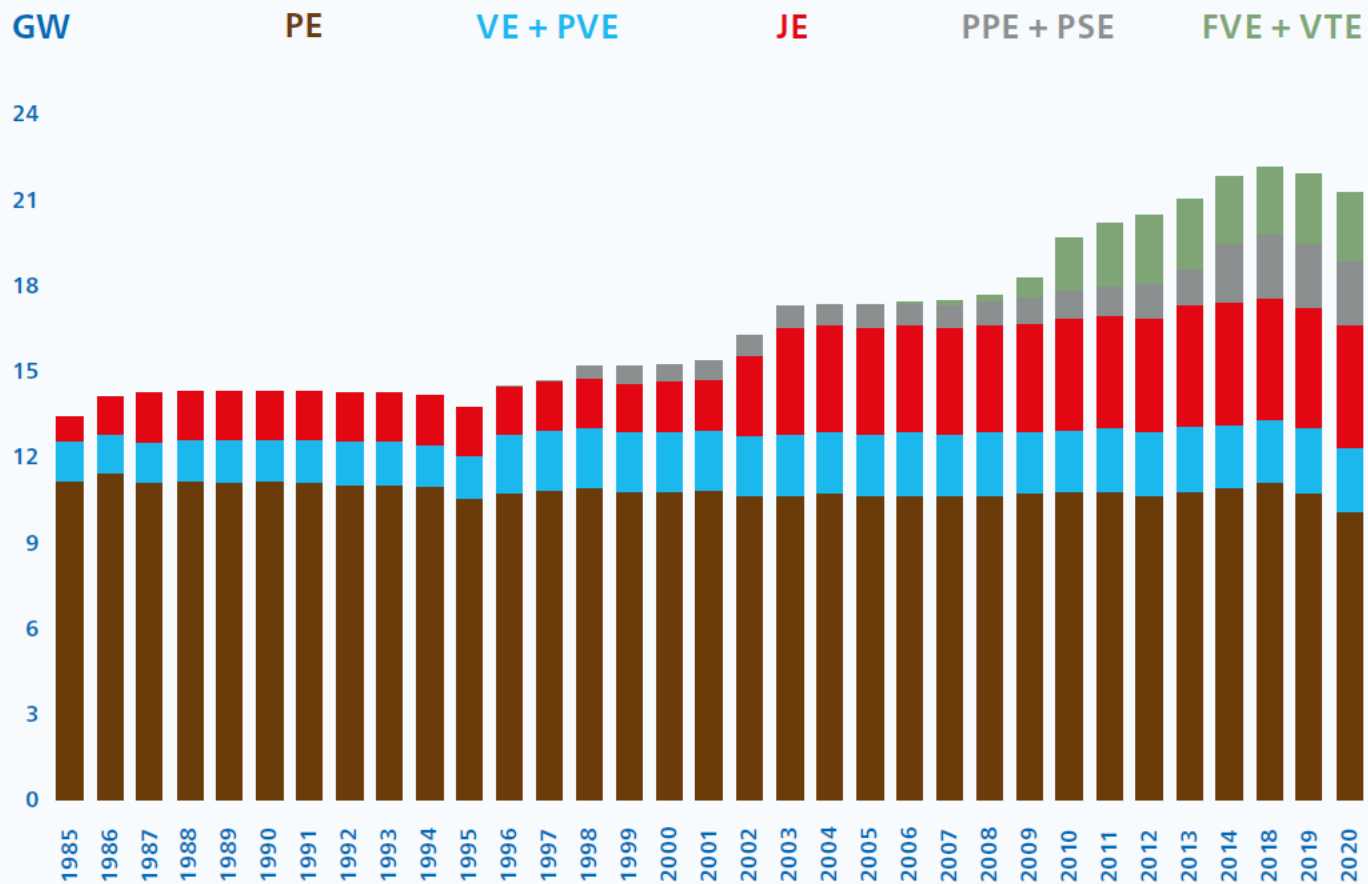


Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

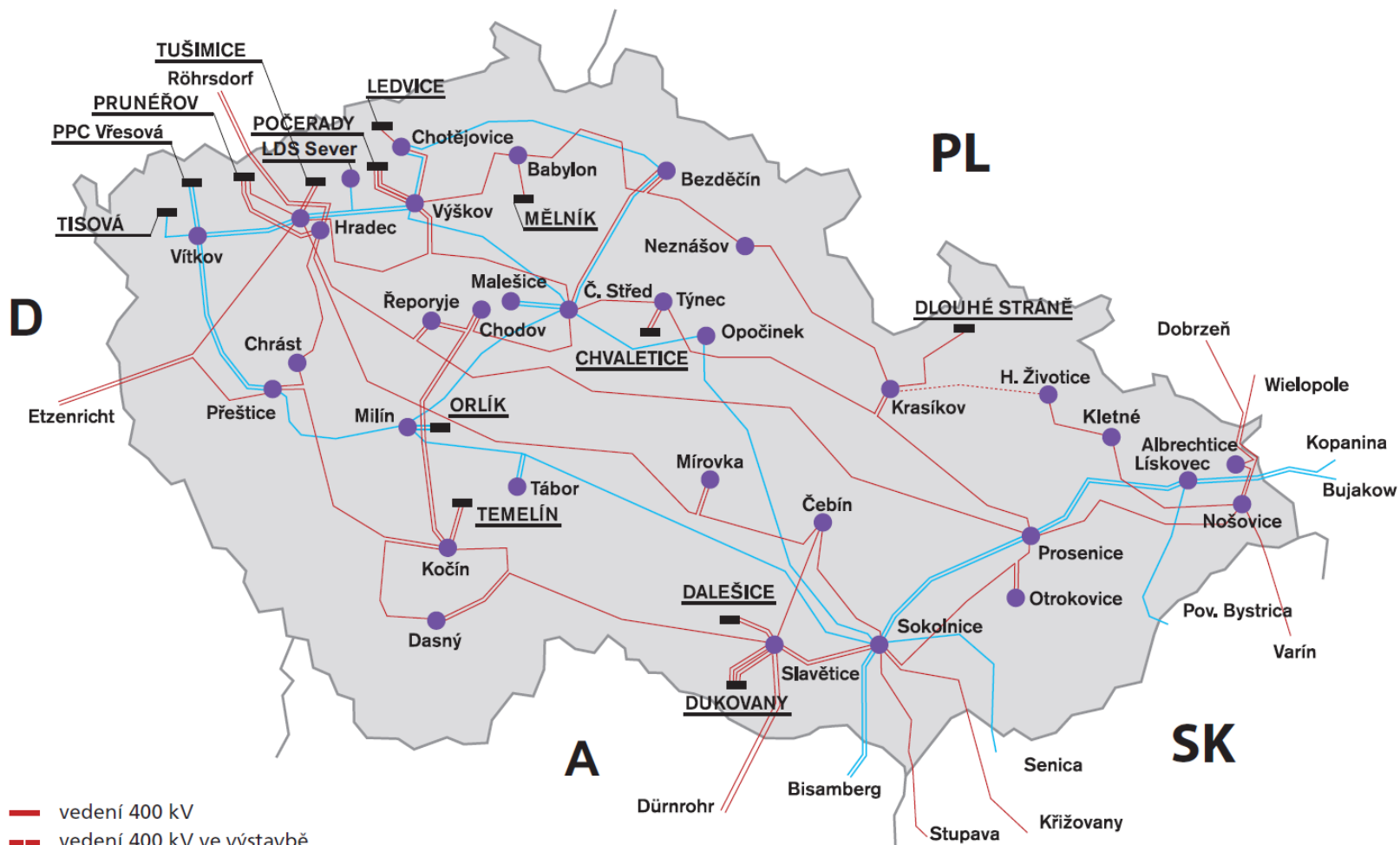


Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

VÝVOJ INSTALOVANÉHO VÝKONU OD ROKU 1985 (K 31. 12. 2020)



Struktura sítí v ČR:



- vedení 400 kV
- - - vedení 400 kV ve výstavbě
- vedení 220 kV
- elektrárna
- rozvodna

Struktura sítí v ČR:

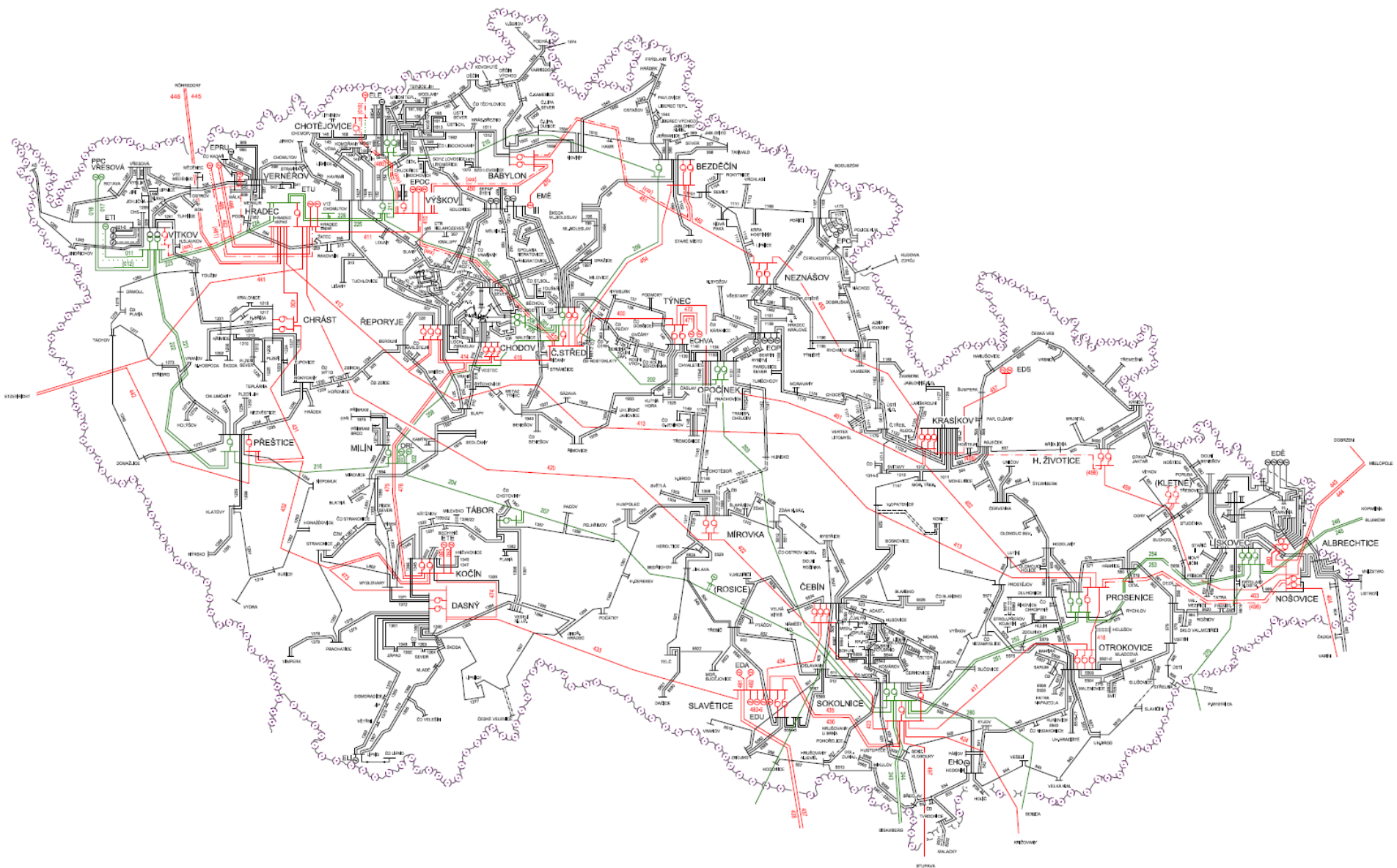
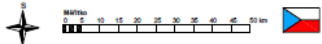
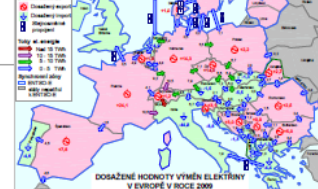


Schéma sítí ES ČR

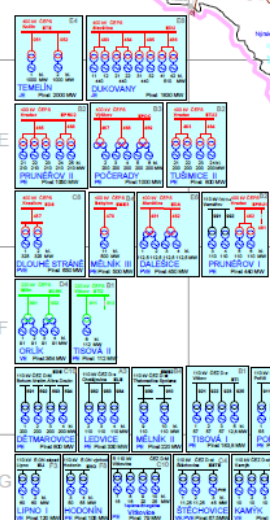
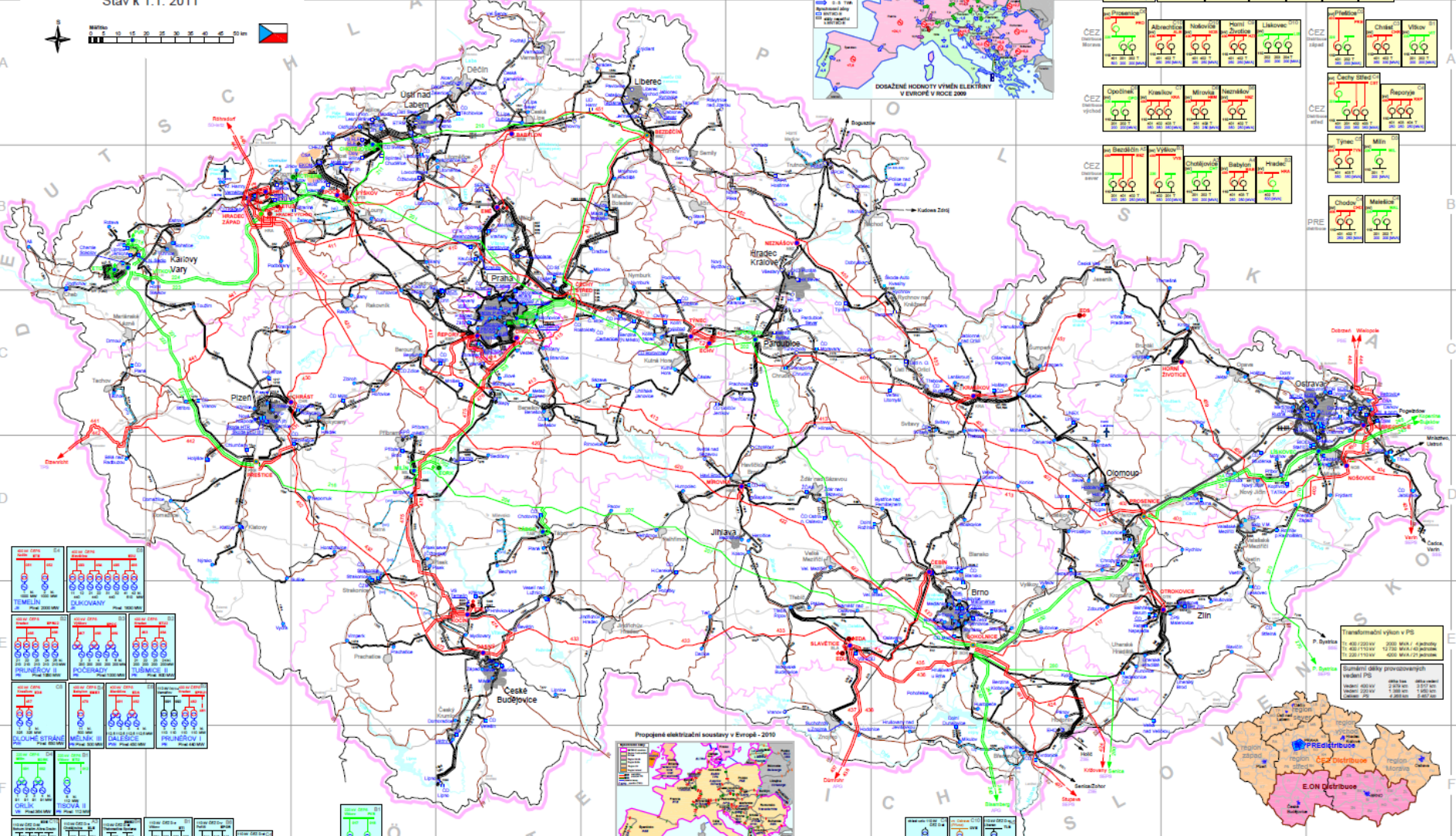
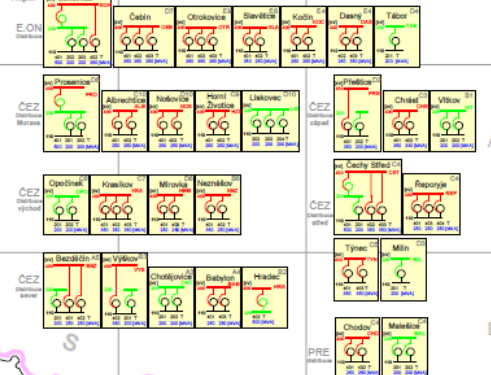
PS 400, 220 kV DS 110 kV
Stav k 1.1. 2011



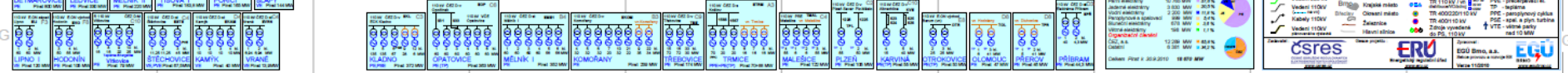
EXPORTY, IMPORTY A FYZIKÁLNÍ TOKY MEZI ES EVROPY



TRANSFORMACE 400/220, 400/110 a 220/110 kV (ČEPS, s. s.)

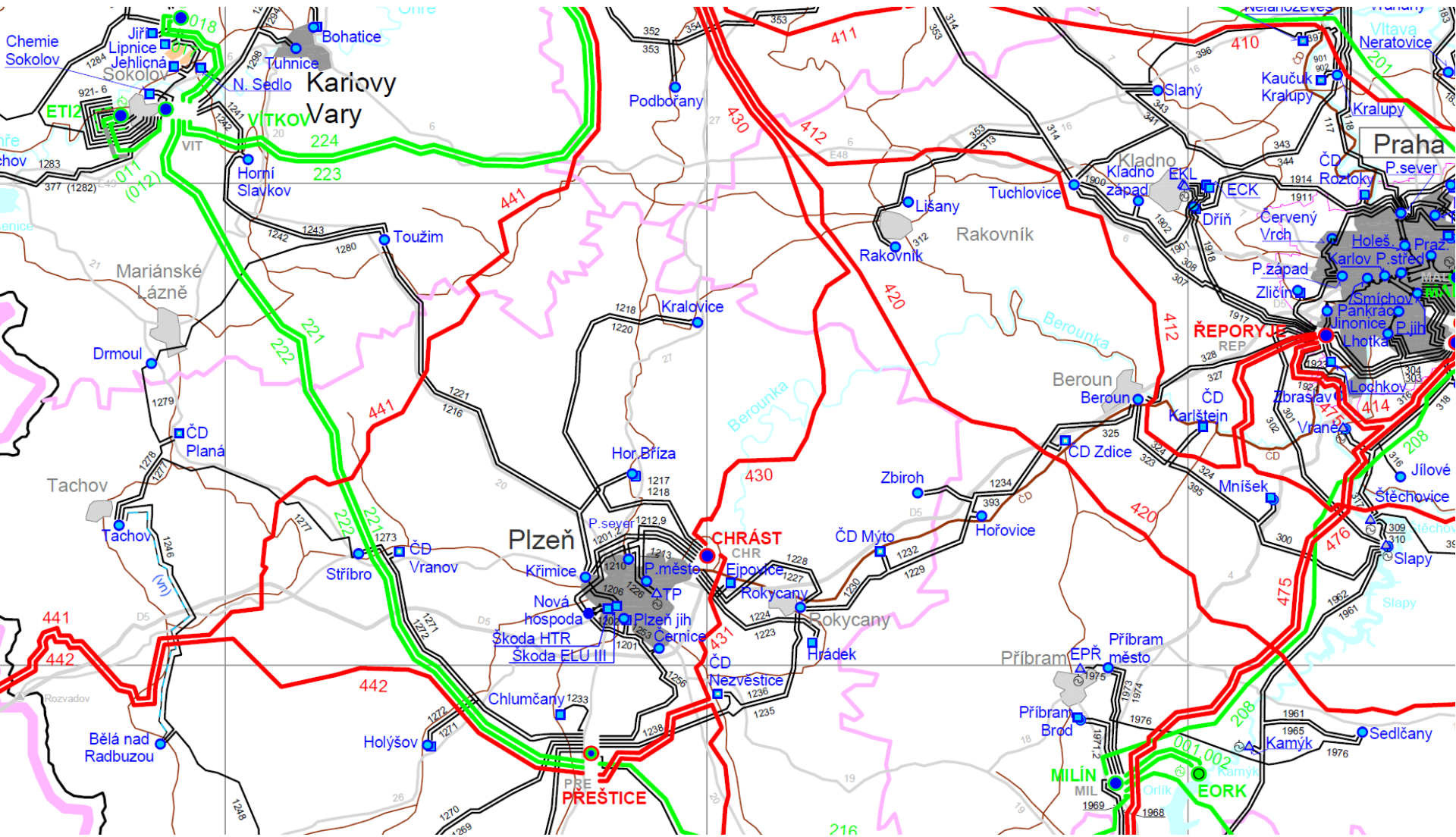


VYVEDENÍ, SKLADBA ZDROJŮ DO PS a 110 kV (BEZ ZAVOŇONICH ELEKTREARN DO 110 kV)



Detaily sítí v oblasti velkých měst a ústežních aglomerací - viz samostatná schéma

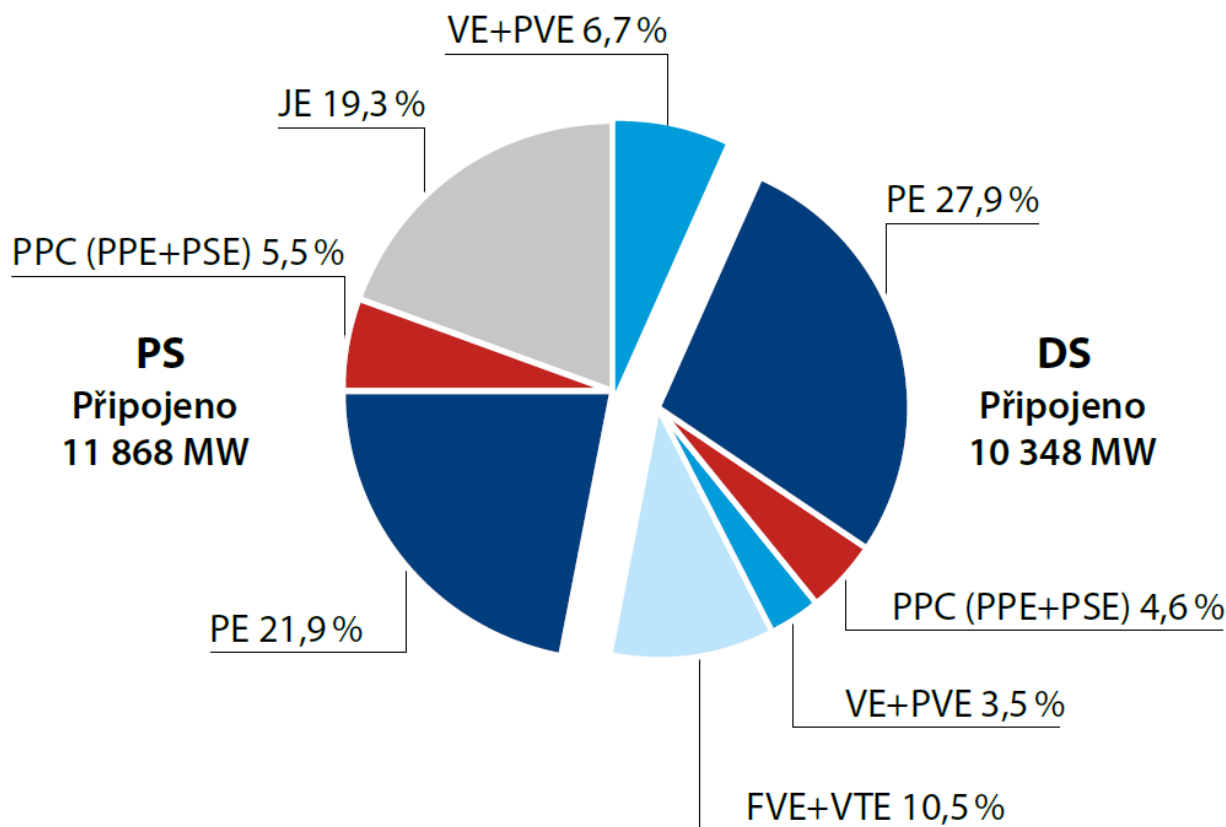
Struktura sítí v ČR:



Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

STRUKTURA INSTALOVANÉHO VÝKONU ELEKTRÁREN ČR

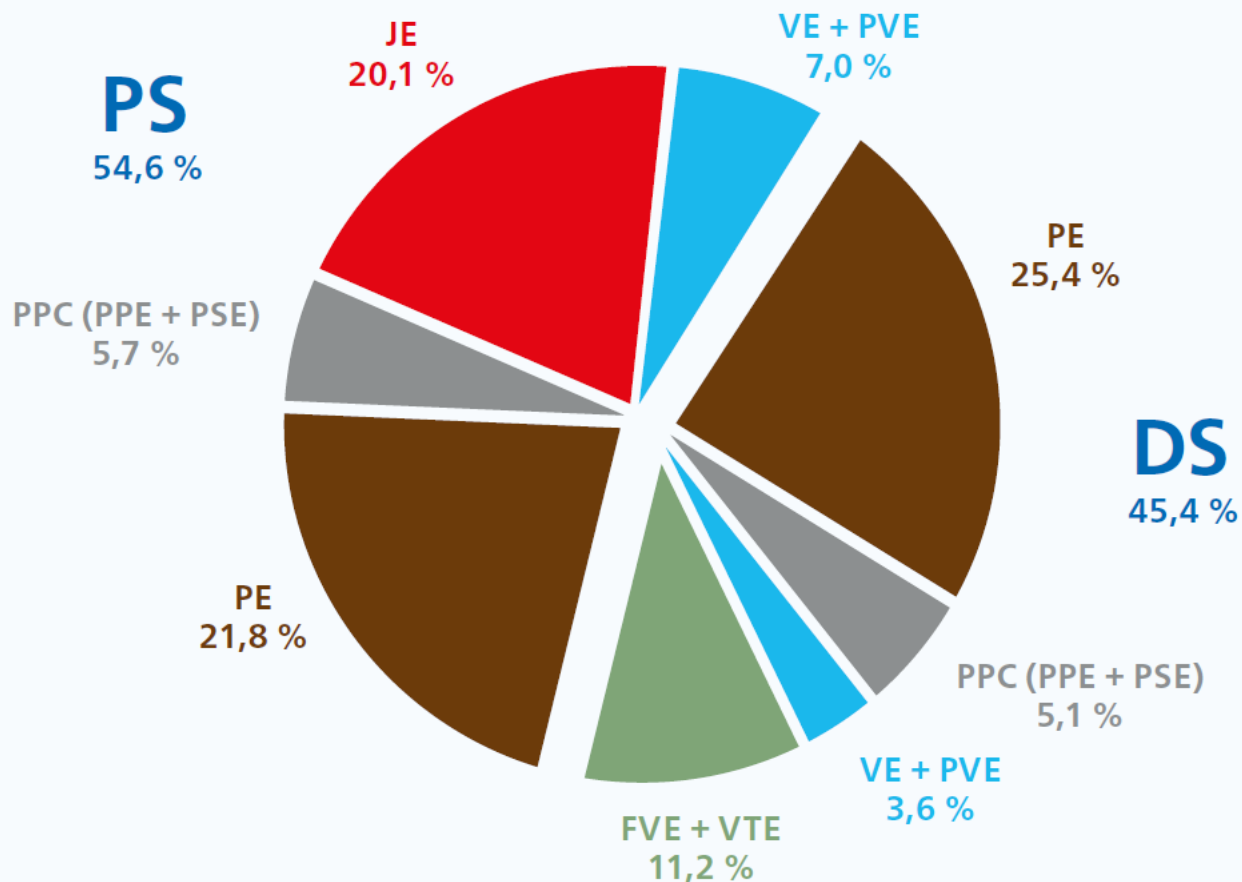
Celkový instalovaný výkon v ČR je 22 216 MW (brutto - k 31. 12. 2017)



Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

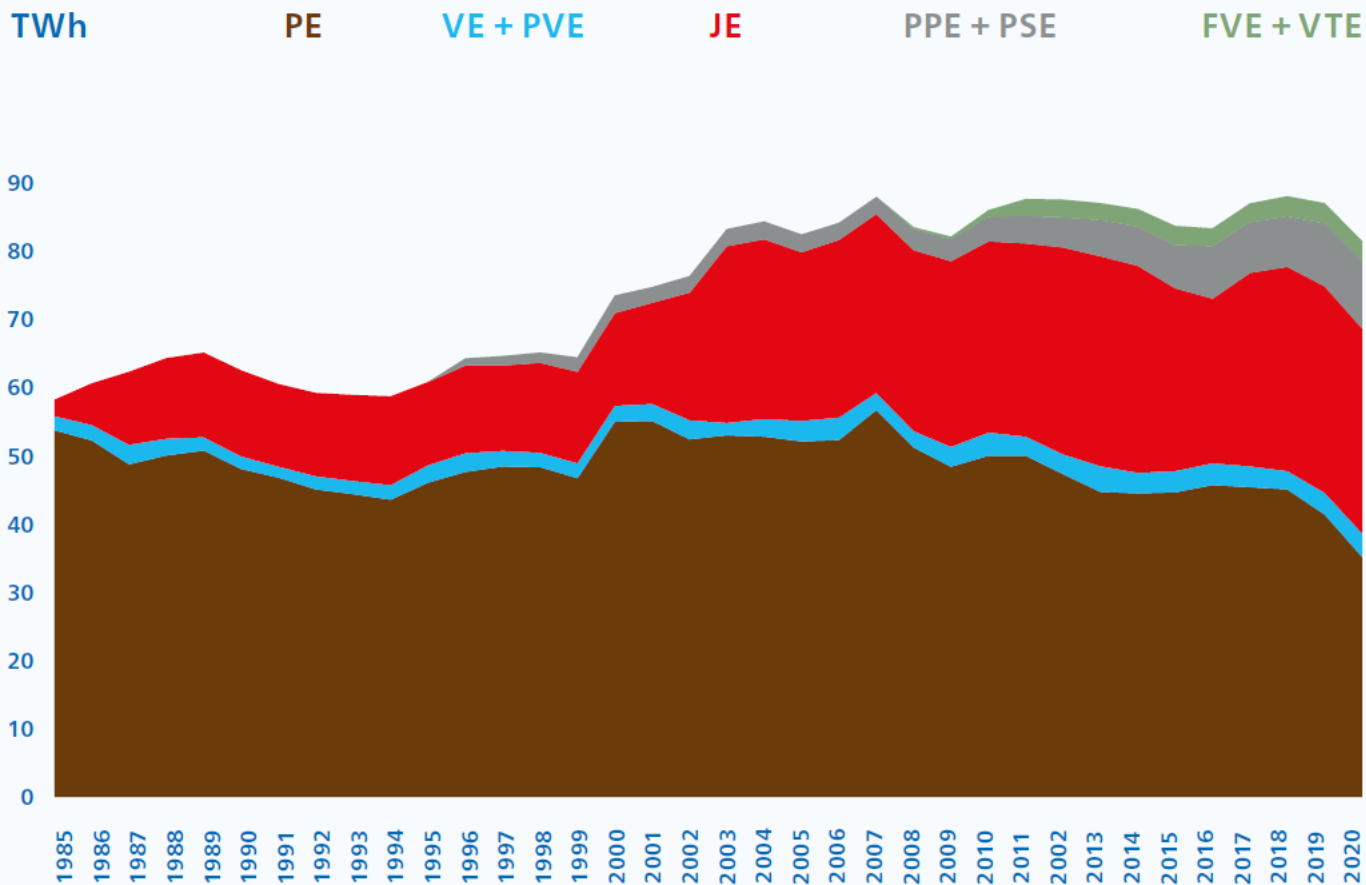
STRUKTURA INSTALOVANÉHO VÝKONU ELEKTRÁREN ČR

Celkový instalovaný výkon v ČR je 21 328 MW (brutto – k 31. 12. 2020)



Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

VÝVOJ TUZEMSKÉ BRUTTO VÝROBY OD ROKU 1985

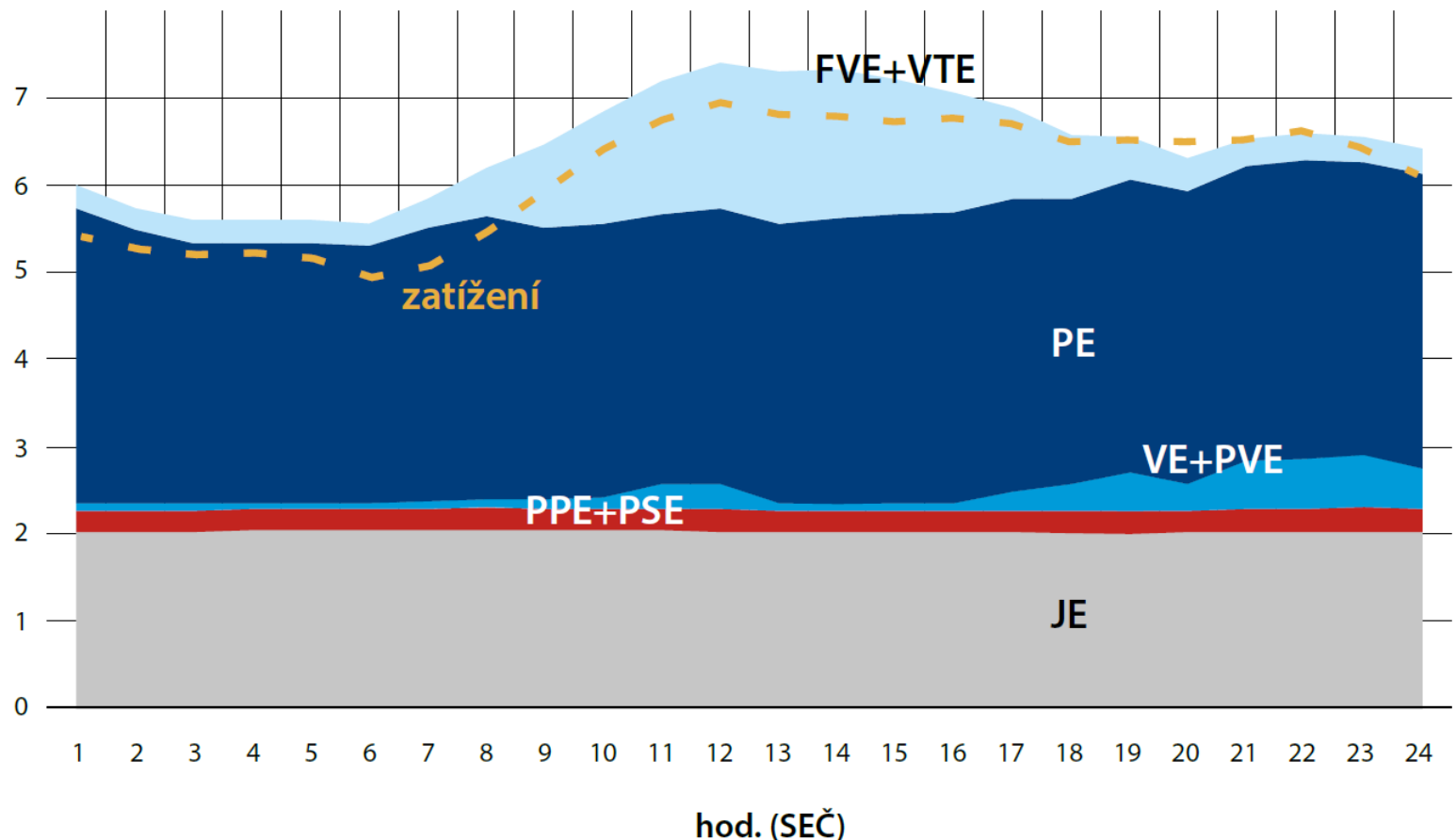


Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

BRUTTO VÝROBA A SPOTŘEBA V DEN ROČNÍHO MINIMA

Minimální zatížení 4 884 MW: 30. 7. 2017 v 6 hodin

GW

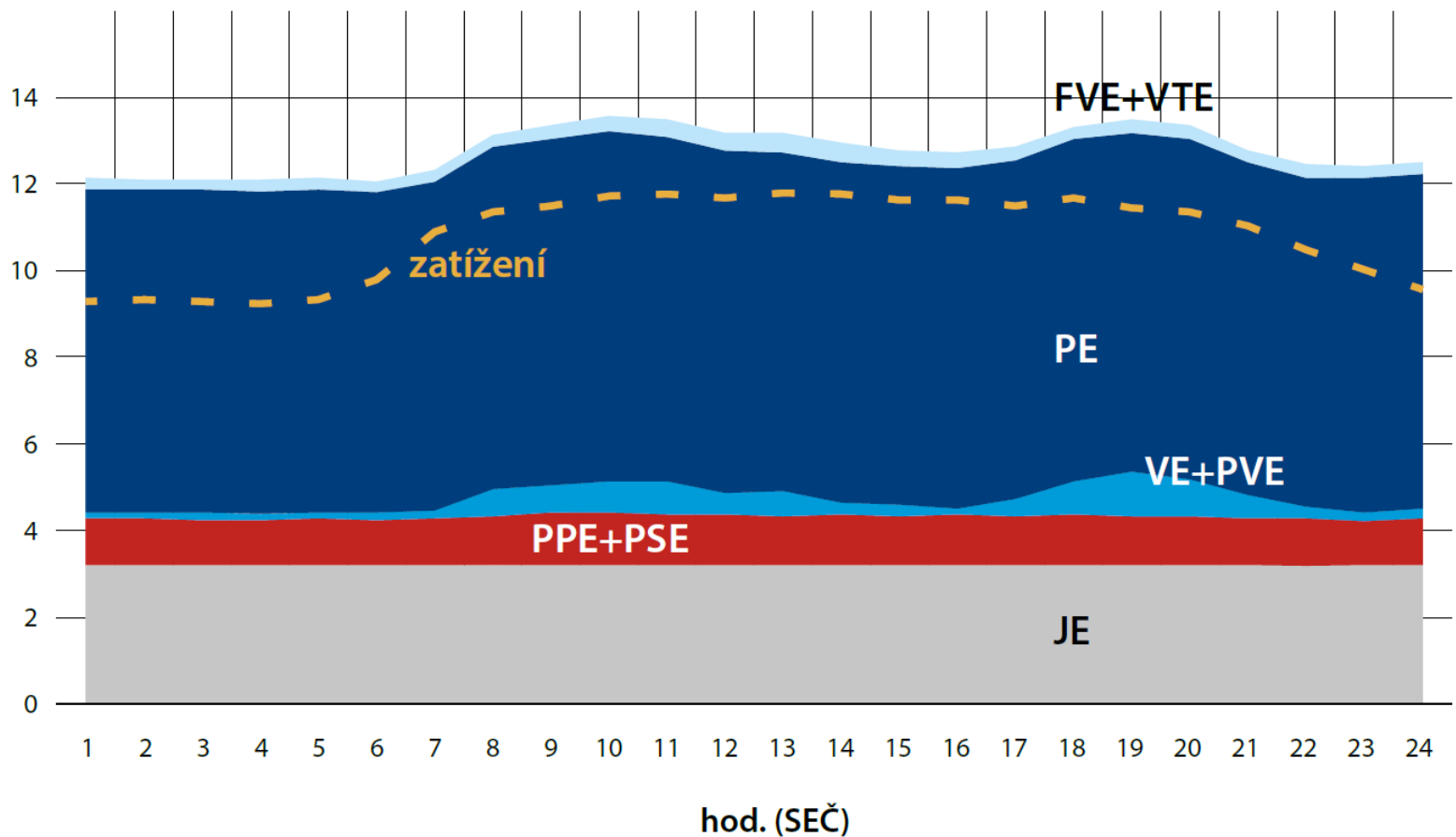


Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

BRUTTO VÝROBA A SPOTŘEBA V DEN ROČNÍHO MAXIMA

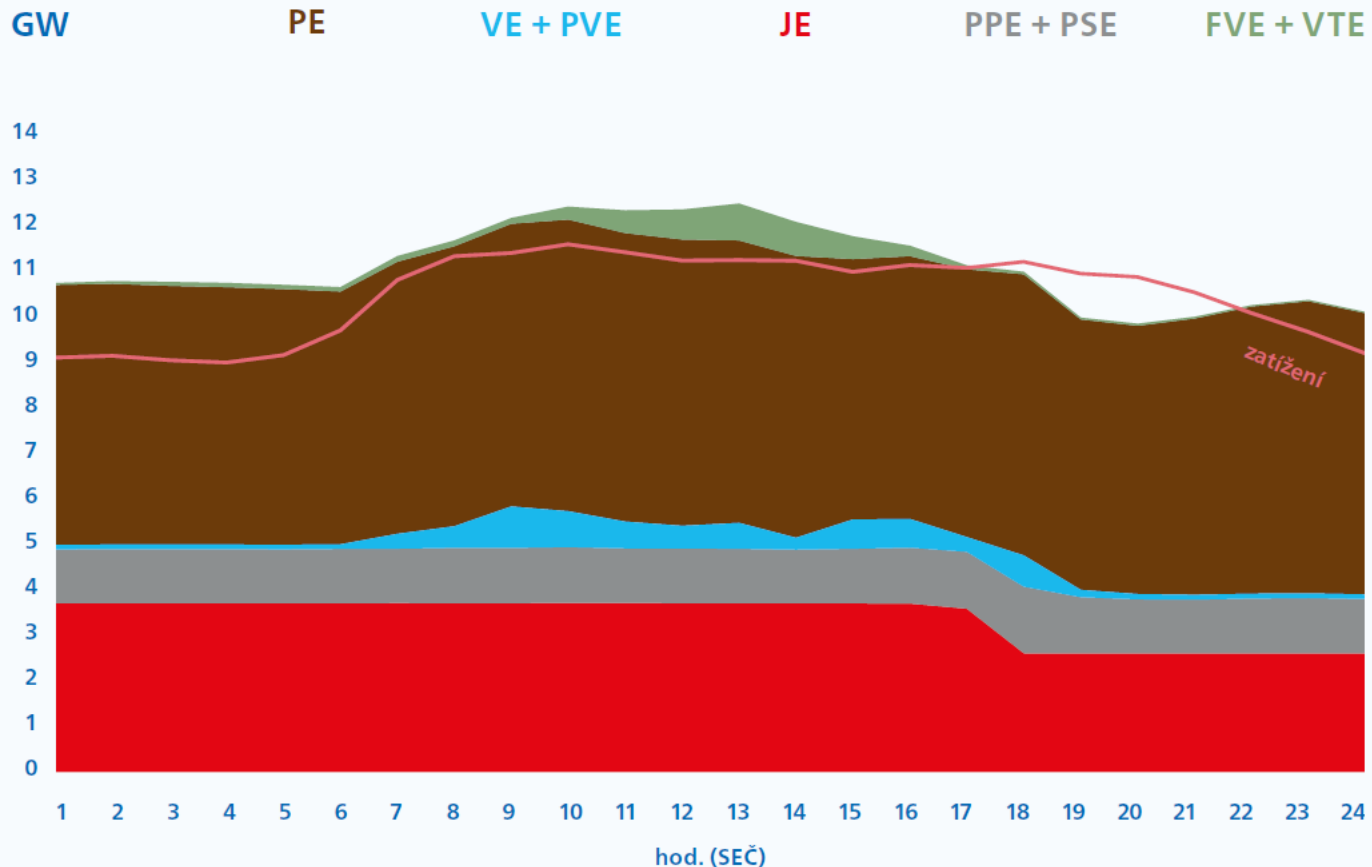
Maximální zatížení 11 769 MW: 24. 1. 2017 ve 12 hodin

GW



Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

BRUTTO VÝROBA A SPOTŘEBA V DEN ROČNÍHO MAXIMA
Maximální zatížení 11 649 MW: 22. 1. 2020 v 10 hodin





Závěr:

Výroba elektrické energie v České republice je v nejbližší budoucnosti možná především na základě termodynamických přeměn vodní páry.



Dělení energetických výroben:

Podle druhu vyráběné energie:

- (kondenzační) elektrárny
- teplárny
- výtopny (kotelny)

Podle druhu nasazení v denním digramu zatížení:

- základní (do P_{MIN})
- pološpičkové (do P_S)
- špičkové (do P_{MAX})

Základy termodynamiky

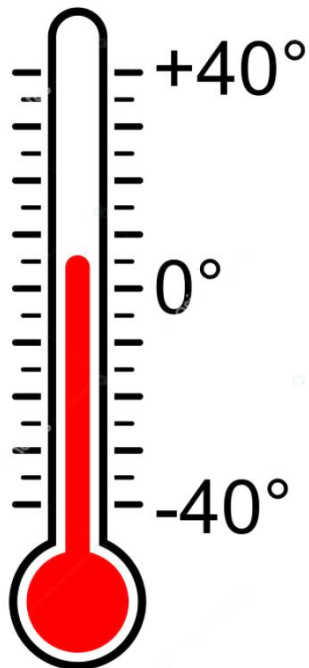
KFY/TFYE, ..., KEV/ZEIN

Termodynamika

1. Ideální plyn a stavová rovnice (základní zákony, zavedení absolutní teploty, stavová rovnice – různé tvary, látkové množství, molární hmotnost a objem)
2. Vnitřní energie ideálního plynu a teplota podle kinetické teorie (rychlosti molekul ideálního plynu, střední energie částice plynu, vnitřní energie, teplota, změna vnitřní energie látky při přechodu mezi dvěma stavy)
3. Teplo, práce a 1.věta termodynamiky (teplo, tepelná kapacita látky, celkové teplo při izobarickém, izochorickém a uzavřeném (kruhovém) ději, práce plynu při přechodu mezi dvěma stavy a při kruhovém ději, 1.věta termodynamiky – různé tvary a její interpretace)
4. Jednoduché vratné děje ideálního plynu (základní rovnice izo-dějů, jejich zobrazení v p-V diagramu, mechanická práce, dodané teplo a změna vnitřní energie při těchto dějích, Mayerův vztah, Poissonova rovnice – různé tvary)
5. Tepelné stroje a 2.věta termodynamiky (tepelný stroj, slovní formulace 2.věty termodynamické, vratný Carnotův cyklus, jeho energetická bilance a účinnost, Carnotova věta)

Základní termodynamické veličiny:

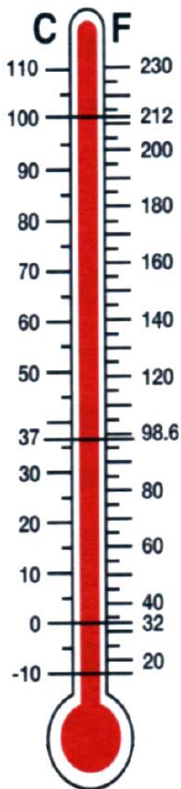
- **teplota** míra kinetické energie elementárních částic hmoty daná translačním, rotačním a vibračním charakterem



$$[^{\circ}\text{C}, \text{K}] \quad t_{abs0} = -273.15^{\circ}\text{C} = 0 \text{K}$$

$$\longrightarrow 0^{\circ}\text{C} = 273.15^{\circ}\text{K}$$

$$\longrightarrow -273.15^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{K}$$



Základní termodynamické veličiny:

$$M_m = \frac{M[\text{kg}] \cdot A[\text{mol}^{-1}]}{N[\text{částic}]} \quad A \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

- měrná tepelná kapacita

$$c = \frac{dq}{dT} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right], \quad Q = m \int_{T_1}^{T_2} c \cdot dt \approx m \cdot c \cdot \Delta T \quad [\text{J}]$$

$$c_P - c_V = r = \frac{R_m}{M_m} \text{ - Mayerova rovnice}$$

R_m – univerzální plynová konstanta 8,314 J/K.mol

M_m – molová hmotnost [kg / mol]

$$\frac{c_P}{c_V} = \kappa \text{ - Poissonova konstanta závislá na počtu atomů}$$

v molekule (1 atom - $\kappa = 1.66$, 2 - 1.4, 3 - 1,3)

$$c_V = \frac{r}{\kappa - 1} \quad c_P = \frac{\kappa \cdot r}{\kappa - 1}$$



Základní termodynamické veličiny:

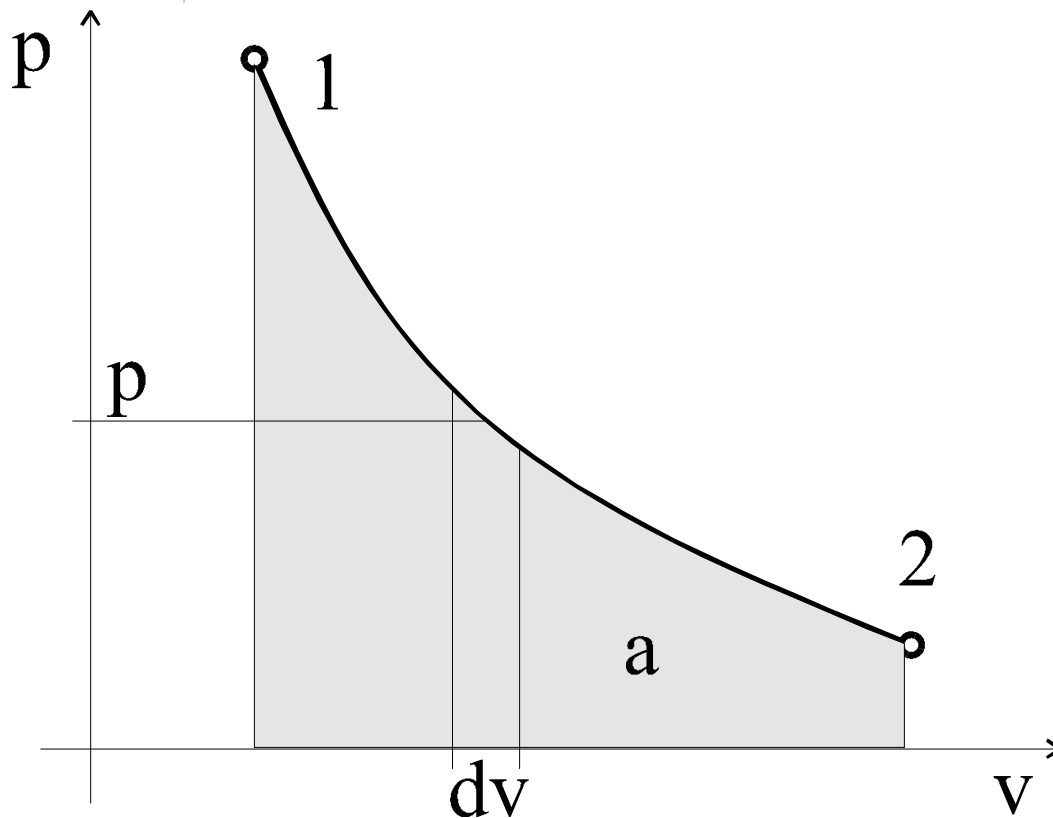
- **měrná tepelná
kapacita**

<https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FP1/tabulky.pdf>

voda při 20°C má $4,1818 \text{ kJ/kg/K} \approx 4,18 \text{ kJ/kg/K} = 1 \text{ kcal/kg/K}$

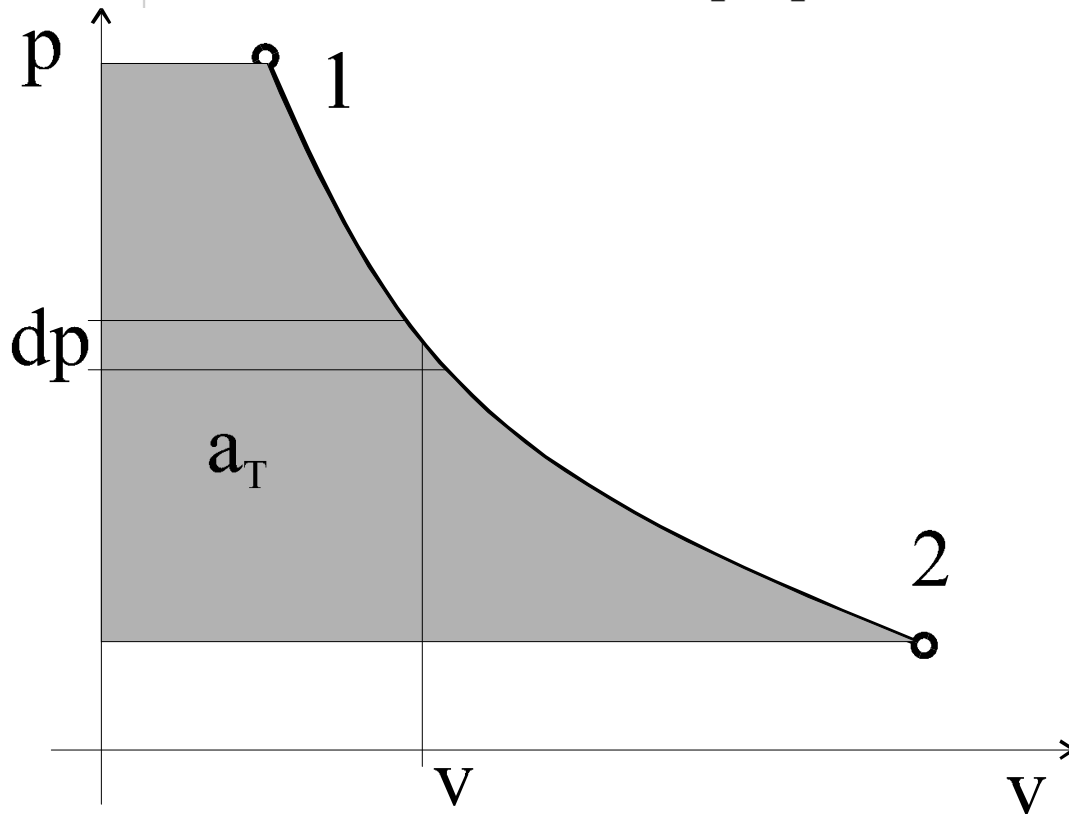
Základní termodynamické veličiny:

- **absolutní práce** | práce vykonaná plynem jednorázově
 $da = dl = p \cdot dv \quad [kJ]$



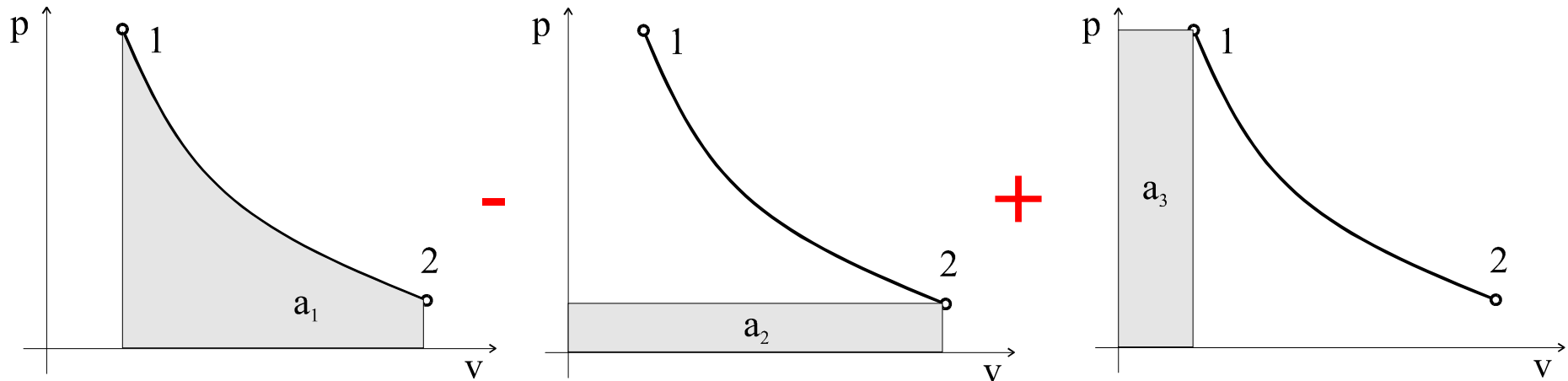
Základní termodynamické veličiny:

- **technická práce** | práce vykonaná plynem v pracovním cyklu
 $da_T = dl_T = -v \cdot dp \quad [kJ]$



Základní termodynamické veličiny:

- **technická práce** | práce vykonaná plynem v pracovním cyklu
 $da_T = dl_T = -v \cdot dp \quad [kJ]$

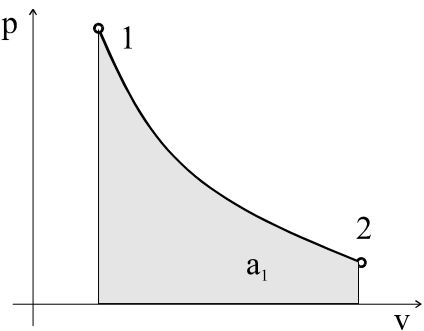


Základní termodynamické veličiny:

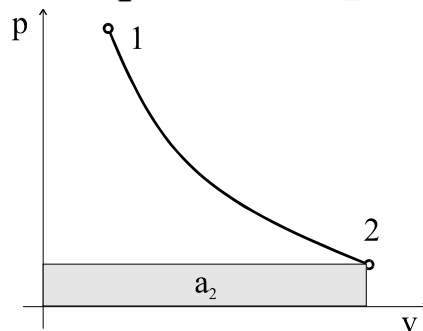
- technická práce**

práce vykonaná plynem v pracovním cyklu

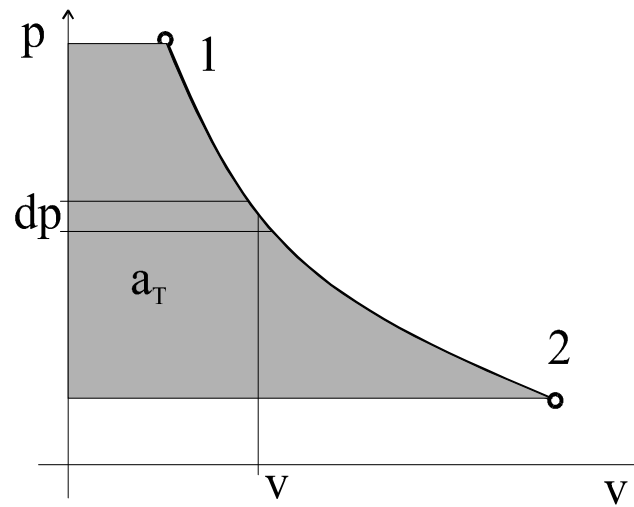
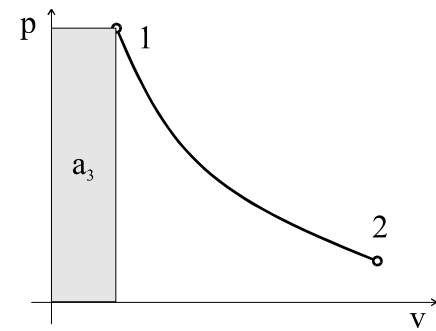
$$da_T = dl_T = -v \cdot dp \quad [kJ]$$



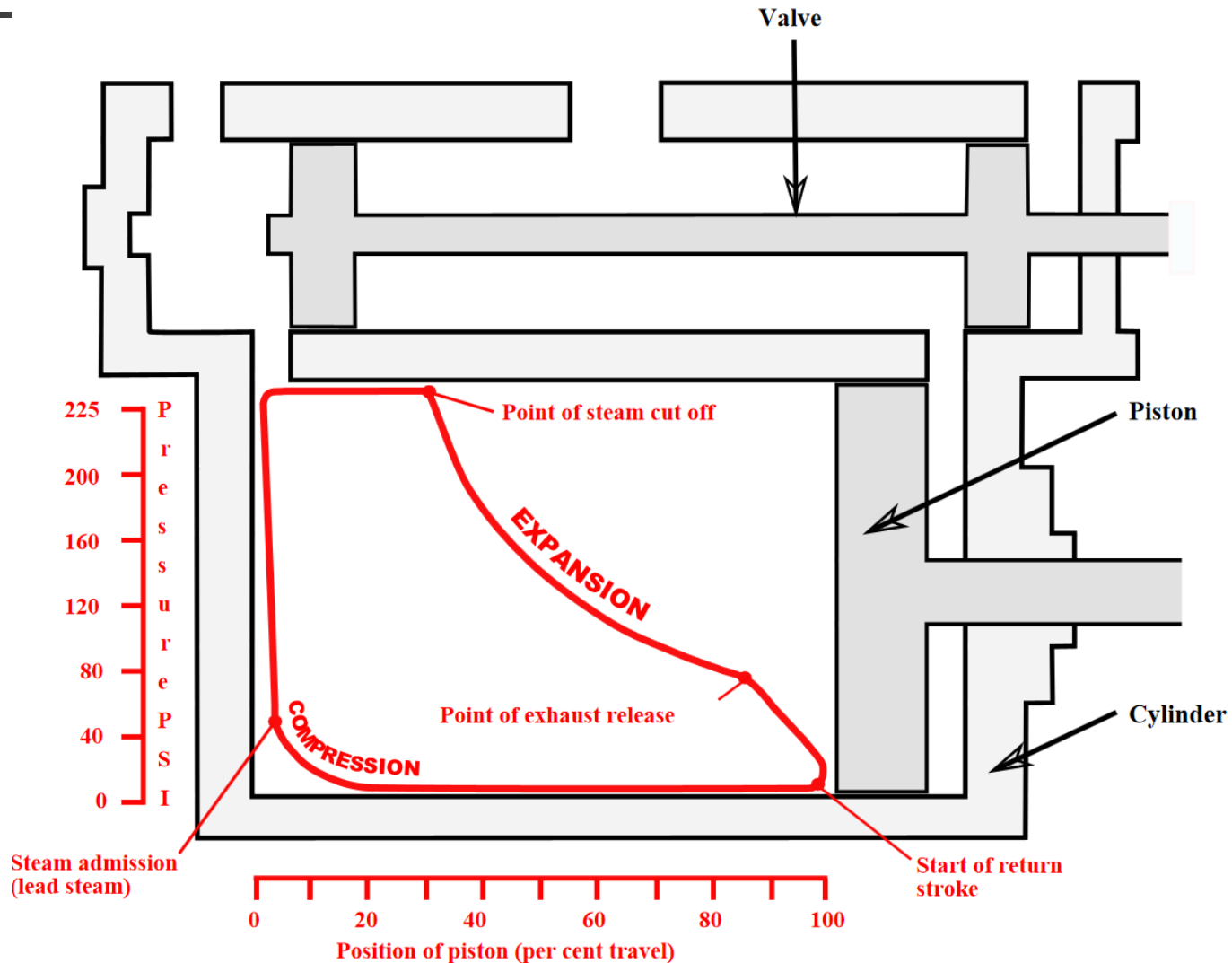
-



+



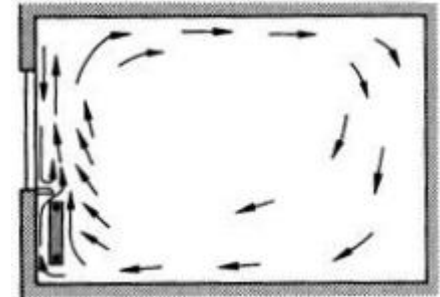
Základní termodynamické veličiny:



Základní termodynamické veličiny:

- **teplo**

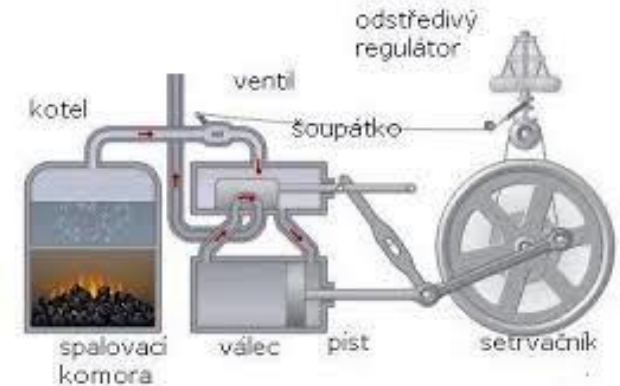
úhrnná tepelná energie při výměně v termodynamickém systému
 $dq = du + da = c_V dT + p \cdot dv$ [kJ][kWh][kcal]



- **vnitřní energie**

$du = c_V dT$ [kJ] - daná čistě vnitřním stavem, je stavovou veličinou nezávislou na historii, vyjadřuje 1. termodynamický zákon

Základní termodynamické veličiny:



- entalpie**

součet vnitřní tepelné energie a mechanické vtačovací práce

$$di = du + \underline{d(p \cdot v)} = \underline{dq} - \underline{dl_T} \quad [kJ]$$

$$di = \underbrace{du + p \cdot dv}_{dq} + \underbrace{v \cdot dp}_{dq} = \underbrace{du + da}_{dq} + \underbrace{v \cdot dp}_{-dl_T = -da_T}$$

dq

dq

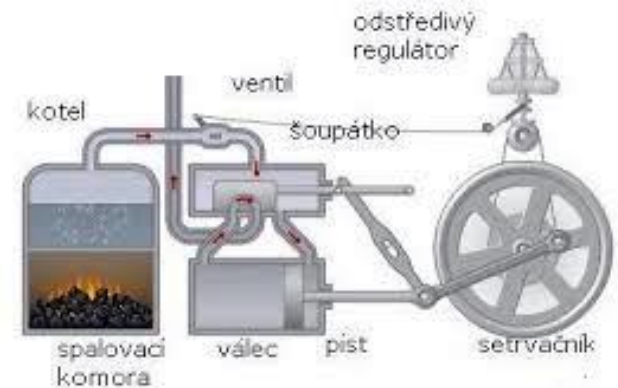
$-dl_T = -da_T$

- entropie**

charakterizuje změny tepla vzhledem k teplotě a vyjadřuje 2. termodynamický zákon



Základní termodynamické veličiny:



- **entalpie**

součet vnitřní tepelné energie a mechanické vtačovací práce
 $di = du + d(p \cdot v) = dq - dl_T \quad [kJ]$

- **entropie**

charakterizuje změny tepla vzhledem k teplotě a vyjadřuje 2. termodynamický zákon

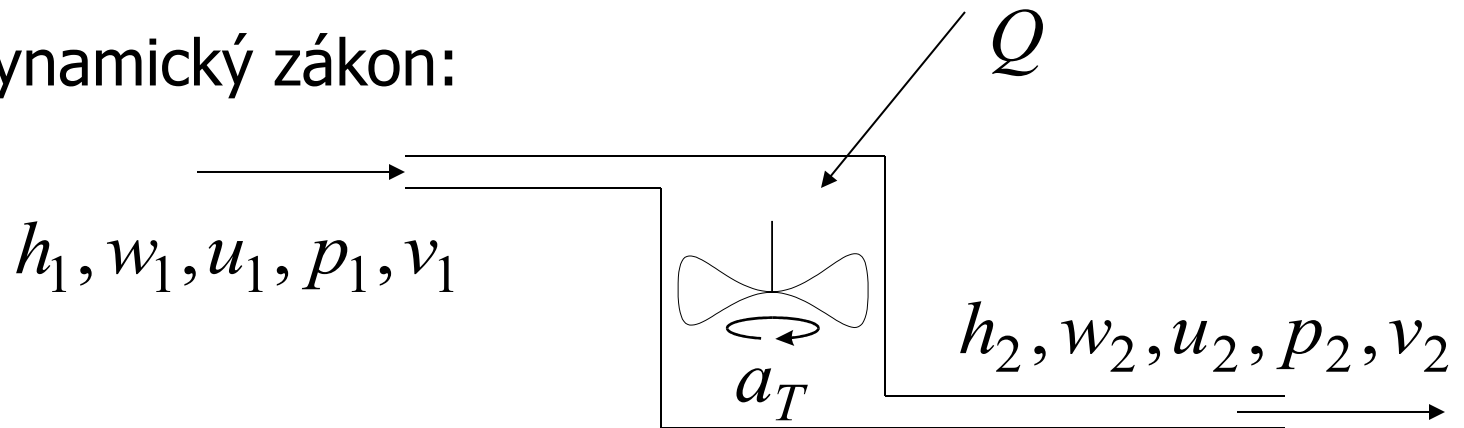
$$ds = \frac{dq}{T} \quad s = \int \frac{1}{T} dq \approx \int \frac{1}{T} du = \int \frac{c_V}{T} dT = c_V \cdot \ln \frac{T}{T_0} + s_0$$

$$t_0 = 0^\circ C \quad T_0 = 273.15^\circ K \quad s_0 = 0 \text{ kJ} / \text{kg} K$$

Základní termodynamické axiomy:

Stavová rovnice plynu: $p \cdot V = m \cdot r \cdot T$

1. Termodynamický zákon:



$$g \cdot h_1 + \frac{w_1^2}{2} + u_1 + p_1 v_1 + q = g \cdot h_2 + \frac{w_2^2}{2} + u_2 + p_2 v_2 + a_T$$

Základní termodynamické axiomy:

Stavová rovnice plynu: $p \cdot V = m \cdot r \cdot T$

1. Termodynamický zákon:

Pro vodní turbíny:

$$i_1 - i_2 \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad a_T \approx g(h_1 - h_2) + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

Pro parní turbíny:

$$h_1 - h_2 \rightarrow 0 \quad w_1 - w_2 \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad a_T \approx i_1 - i_2$$

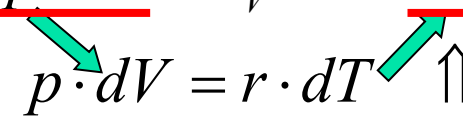
Základní termodynamické děje:

Zákon Gay-Lussacův-děj izobarický:


$$p = konst. \Rightarrow \frac{V}{T} = konst.$$

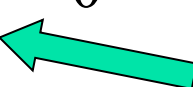
Ze stavové rovnice plynu
 $p \cdot V = m \cdot r \cdot T$



$$dq = du + da = c_V \cdot dT + \underline{p \cdot dV} = c_V \cdot dT + \underline{r \cdot dT} = c_P \cdot dT = di - v \cdot dp = di$$


$$d(p \cdot V) = d(r \cdot T) \Rightarrow \underline{p \cdot dV} = r \cdot dT \quad \uparrow \uparrow$$

$$a_{12} = p(V_2 - V_1) \quad \leftarrow \quad a_{12} = \int_1^2 da = \int_1^2 p \cdot dV = p \int_1^2 dV$$


$$a_{T12} = 0 \quad \leftarrow \quad a_{T12} = \int_1^2 da_T = \int_1^2 -V \cdot dp$$




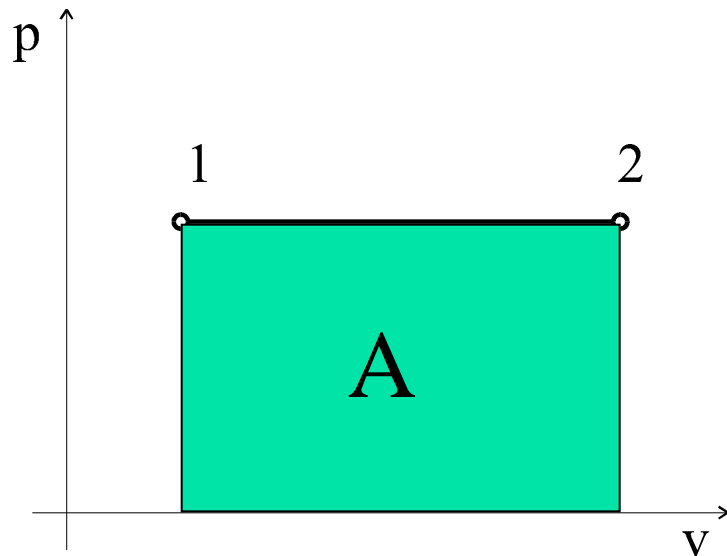
Základní termodynamické děje:

Zákon Gay-Lussacův-děj izobarický:

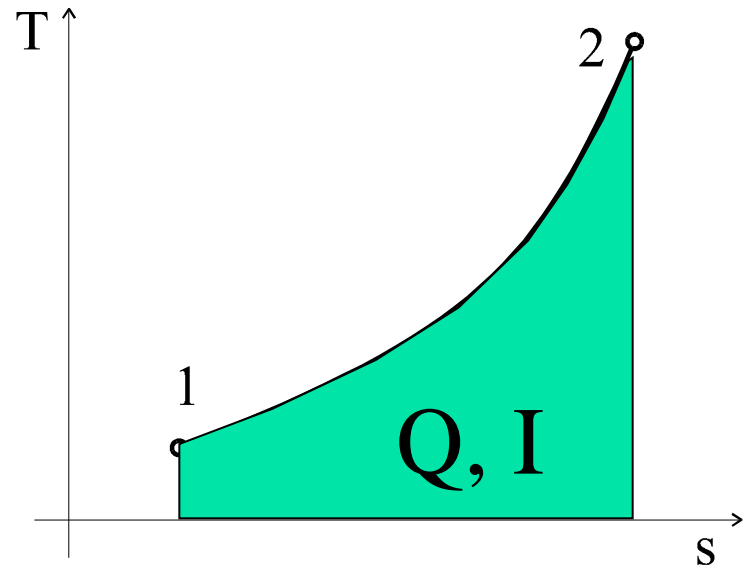
$$S_{12} = \int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{c_P \cdot dT}{T} = c_P \int_1^2 \frac{dT}{T} = c_P \ln \frac{T_2}{T_1} = c_P \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Základní termodynamické děje:

Zákon Gay-Lussacův-děj izobarický:



$$A_{12} = p(V_2 - V_1)$$



$$Q_{12} = I_2 - I_1$$

$$S_{12} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Základní termodynamické děje:

Zákon Charlesův - děj izochorický:

$$V = konst. \Rightarrow \frac{p}{T} = konst. \quad \text{Ze stavové rovnice plynu}$$

$$dq = du + da = c_V \cdot dT + p \cdot dV = c_V \cdot dT = du$$

$$a_{12} = 0 \quad \leftarrow \quad a_{12} = \int_1^2 p \cdot dV$$

$$a_{T12} = \int_1^2 -V \cdot dp = -V(p_2 - p_1) = V(p_1 - p_2)$$



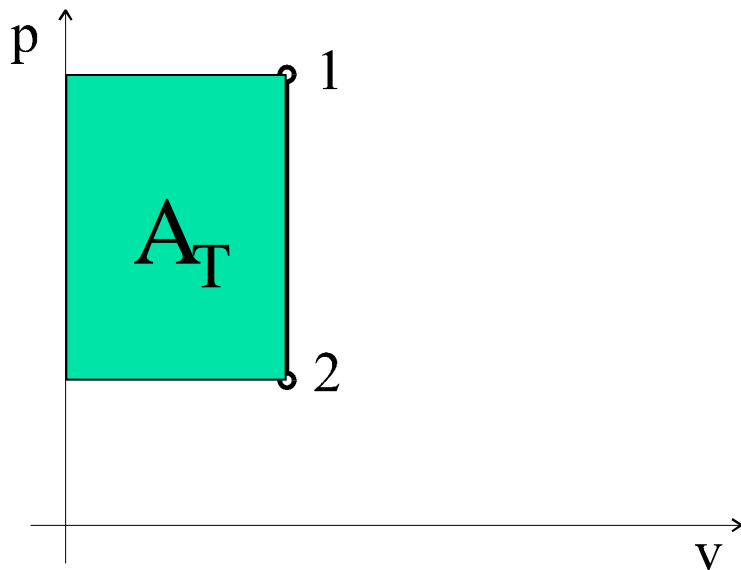
Základní termodynamické děje:

Zákon Charlesův - děj izochorický:

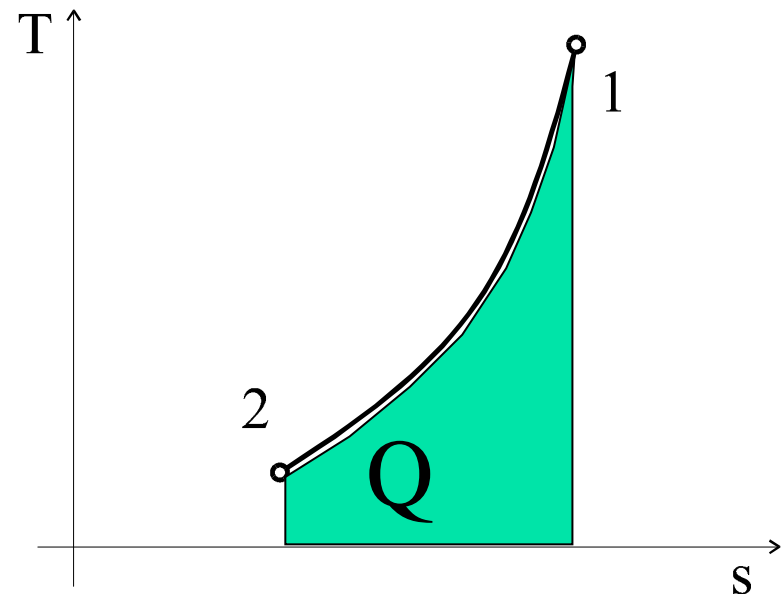
$$S_{12} = \int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{c_v \cdot dT}{T} = c_v \int_1^2 \frac{dT}{T} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Základní termodynamické děje:

Zákon Charlesův - děj izochorický:



$$A_{T12} = V(p_1 - p_2)$$



$$Q_{12} = U_2 - U_1$$

$$S_{12} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Základní termodynamické děje:

Zákon Boyle-Mariotův-děj izotermický:

$$T = konst. \Rightarrow p \cdot V = konst. \quad \text{Ze stavové rovnice plynu}$$

$$p \cdot V = konst. \Rightarrow d(p \cdot V) = 0 \Rightarrow V \cdot dp + p \cdot dV = a - a_T = 0 \Rightarrow$$

$$dq = du + da = c_V \cdot dT + da = da = da_T$$

$$a_{12} = \int_1^2 p \cdot dv = \int_1^2 \frac{p_1 \cdot V_1}{V} \cdot dV = p \cdot V \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = r \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = r \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

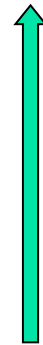
$$\underline{p_1 \cdot V_1} = p_2 \cdot V_2 = \underline{p \cdot V} = r \cdot T \quad \uparrow \uparrow$$

Základní termodynamické děje:

Zákon Boyle-Mariotův-děj izotermický:

$$S_{12} = \int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 dq = \frac{1}{T} \int_1^2 da = \frac{A_{12}}{T} = \frac{rT}{T} \ln \frac{V_2}{V_1} =$$

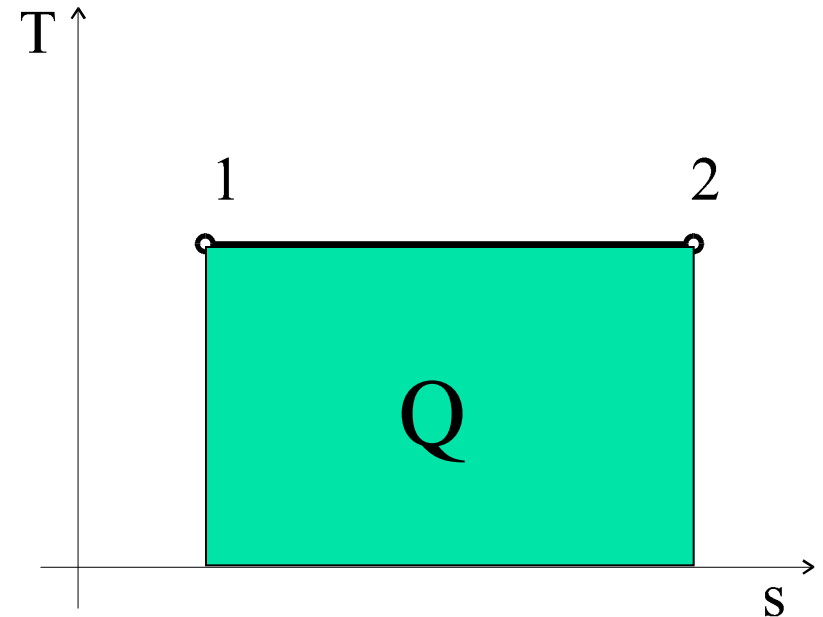
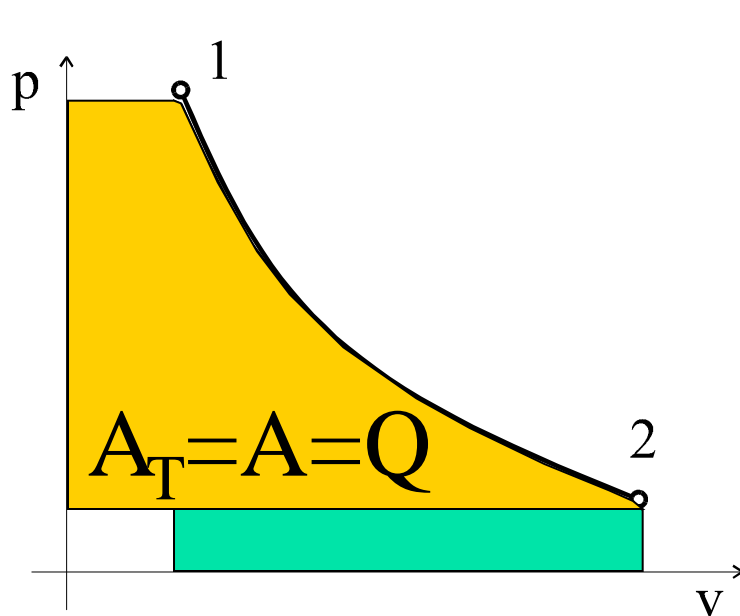
$$= r \ln \frac{V_2}{V_1} = r \ln \frac{p_1}{p_2}$$



$T = konst.$

Základní termodynamické děje:

Zákon Boyle-Mariotův-děj izotermický:



$$A_{12} = A_{T12} = r \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = r \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$Q_{12} = A_{12} = A_{T12}$$

$$S_{12} = r \ln \frac{V_2}{V_1} = r \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Základní termodynamické děje:

Děj adiabatický:

$$s, q = konst. \Rightarrow p \cdot V^\kappa = konst.$$

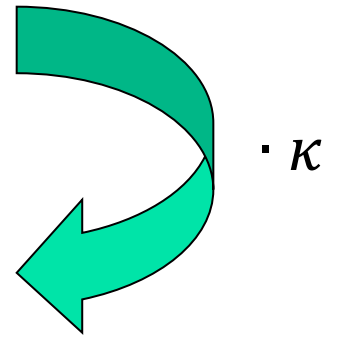
$$dq = 0 \Rightarrow du + da = c_V \cdot dT + p \cdot dV = 0 \quad \Downarrow$$

$$dq = 0 \Rightarrow di + da_T = \underline{c_P} \cdot dT - \underline{V} \cdot dp = 0 \quad \Downarrow$$

$$c_P = \kappa \cdot c_V \Rightarrow \underline{\kappa \cdot c_V \cdot dT} + \underline{\kappa \cdot p \cdot dV} = 0$$

$$\kappa \cdot p \cdot dV = -V \cdot dp \Rightarrow \kappa \int \frac{dV}{V} + \int \frac{dp}{p} = 0$$

$$\kappa \ln V + \ln p = 0 \Rightarrow \ln(V^\kappa p) = 0 \Rightarrow p \cdot V^\kappa = konst.$$



Základní termodynamické děje:

Děj adiabatický:

Dosazením za tlak ze stavové rovnice plynu:

$$p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa \Rightarrow \frac{r \cdot T_1}{V_1} V_1^\kappa = \frac{r \cdot T_2}{V_2} V_2^\kappa \Rightarrow$$

$$T_1 \cdot V_1^{\kappa-1} = T_2 \cdot V_2^{\kappa-1} \Rightarrow \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Podobně dosazením za objem opět ze stavové rovnice plynu:

$$p_1 \left(\frac{r \cdot T_1}{p_1} \right)^\kappa = p_2 \left(\frac{r \cdot T_2}{p_2} \right)^\kappa \Rightarrow \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

Základní termodynamické děje:

Děj adiabatický:

$$dq = 0 \quad da = -du \quad a_{12} = -c_V \cdot (T_2 - T_1) = \frac{r}{\kappa - 1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{\kappa - 1} (\underline{r \cdot T_1} - r \cdot T_2)$$

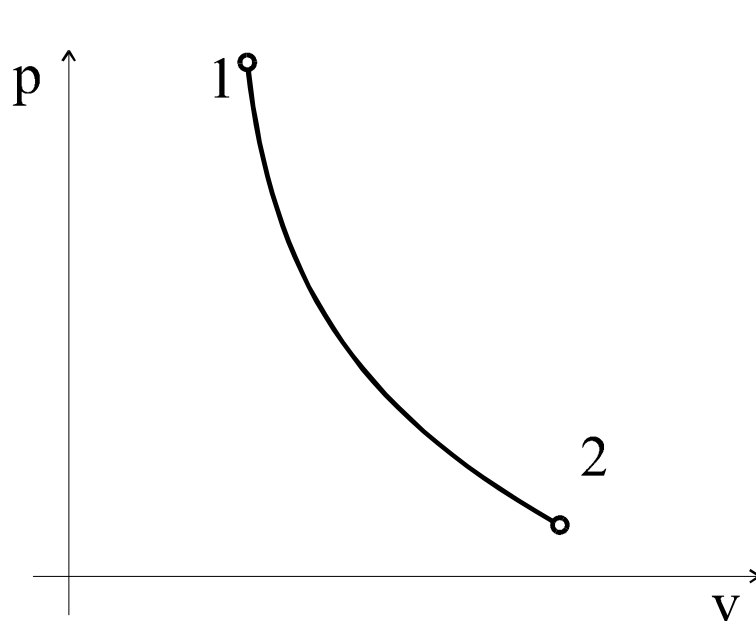
$$p_1 \cdot V_1 \cdot V_1^{\kappa-1} = p_2 \cdot V_2 \cdot V_2^{\kappa-1} \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \underline{p_1 \cdot V_1} = p_2 \cdot V_2$$

Dosazením za $p_2 \cdot V_2$:

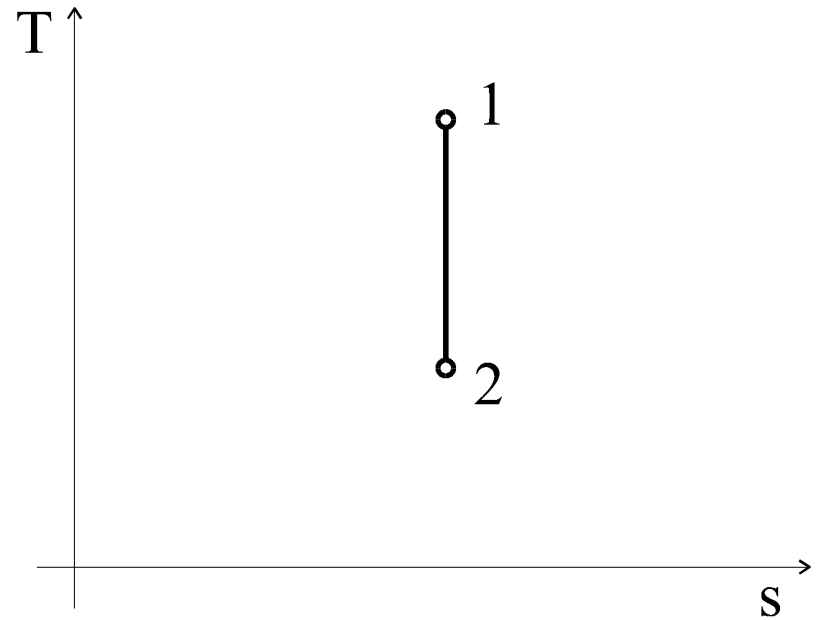
$$a_{12} = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \right]$$

Základní termodynamické děje:

Děj adiabatický:



$$A_{12} = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa - 1} \right]$$



$$Q_{12} = 0$$
$$S_{12} = 0$$

Základní termodynamické děje:

$p = konst.$	$T = konst.$	$q, s = konst.$
$V/T = konst.$	$p \cdot V = konst$	$p \cdot V^\kappa = konst$
$dq \rightarrow di = c_p \cdot dT$	$dq \rightarrow da, da_T$	$dq \rightarrow 0$
$a_{12} = p \cdot (V_2 - V_1)$	$a_{12} = r \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$ $= a_{T12} = q_{12}$	$a_{12} = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa - 1} \right]$ $= \frac{r}{\kappa - 1} (T_1 - T_2) = u_{12}$



Ideální termodynamické cykly:

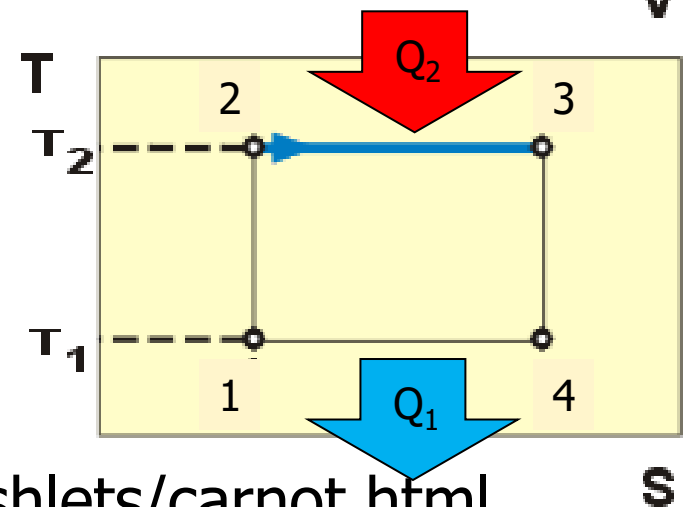
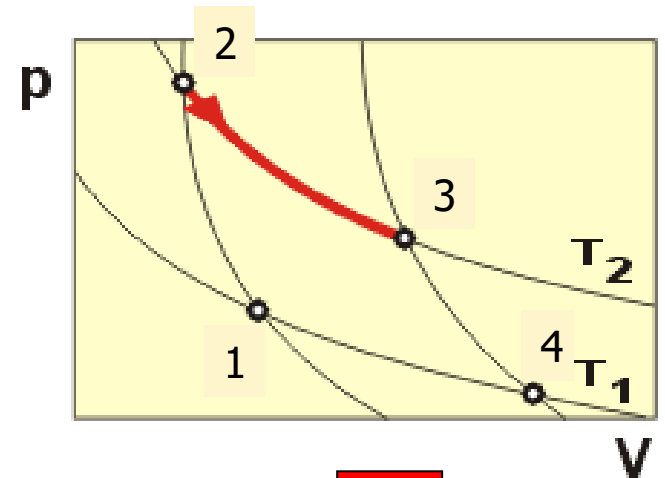
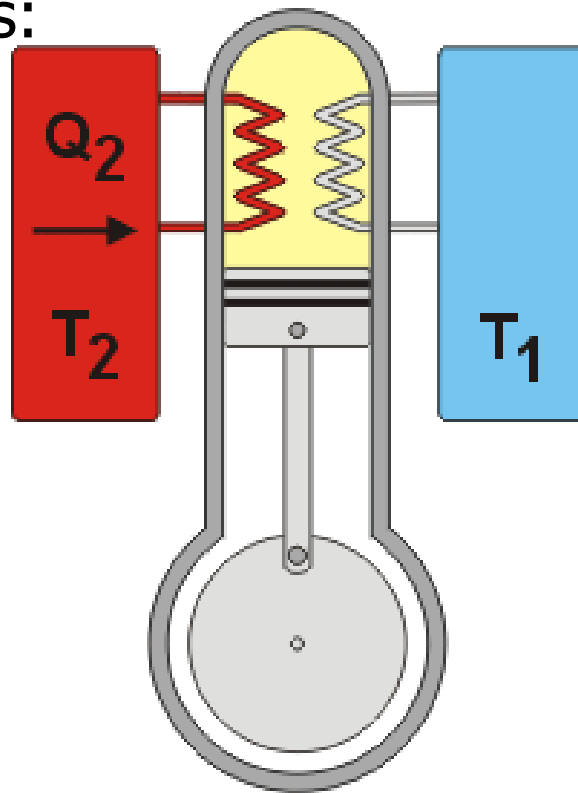
Obecný ideální termodynamický cyklus:

$$dq = du + da \quad \rightarrow \quad du = dq - da = c_V \cdot dT$$

$$\oint du = \Delta U = 0 = \oint dq - da \quad \Rightarrow \quad A = L = Q_P - Q_0$$

Ideální termodynamické cykly:

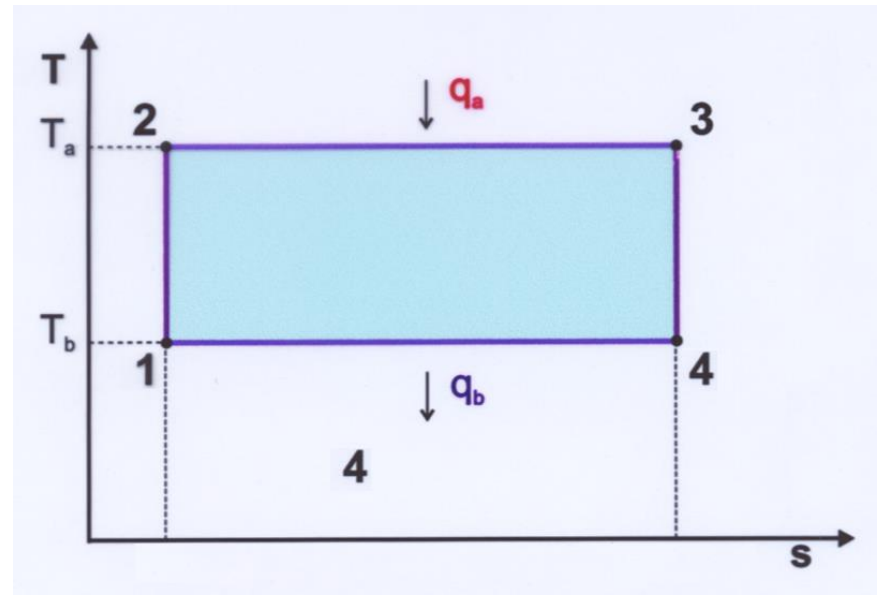
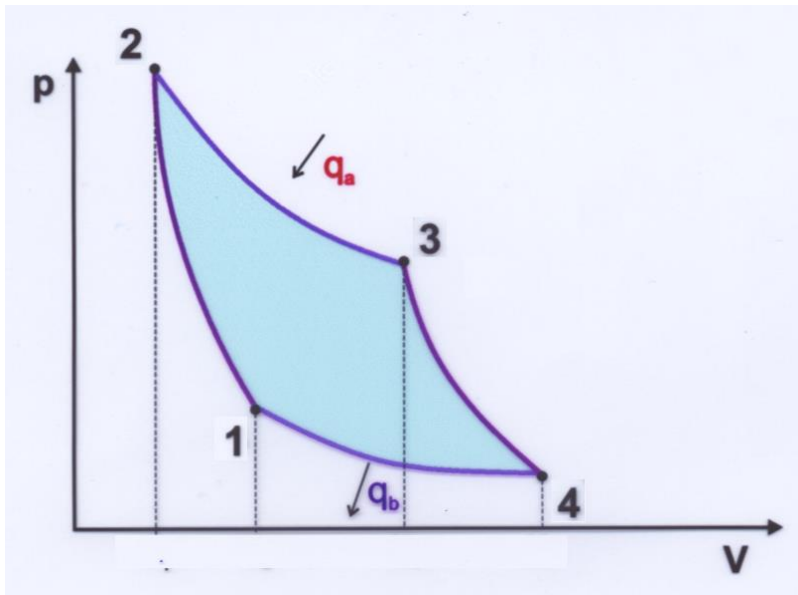
Carnotův cyklus:



Ideální termodynamické cykly:

Carnotův cyklus:

- sestává ze dvou izoterm a dvou adiabat



$$\eta = \frac{Q_P - Q_O}{Q_P} = \frac{T_2(S_3 - S_2) - T_1(S_4 - S_1)}{T_2(S_3 - S_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Ideální termodynamické cykly:

Carnotův cyklus:

$$\eta = 1 - \frac{Q_O}{Q_P} = 1 - \frac{r \cdot T_1 \ln \frac{V_4}{V_1}}{r \cdot T_2 \ln \frac{V_3}{V_2}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \quad \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{\kappa-1} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_4}{V_1} = \frac{V_3}{V_2} \quad \uparrow\uparrow$$

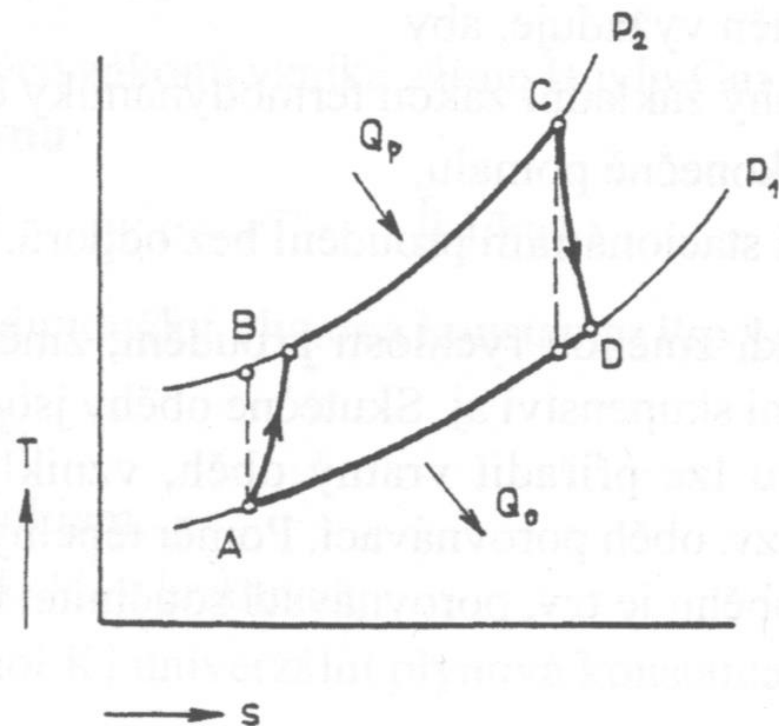
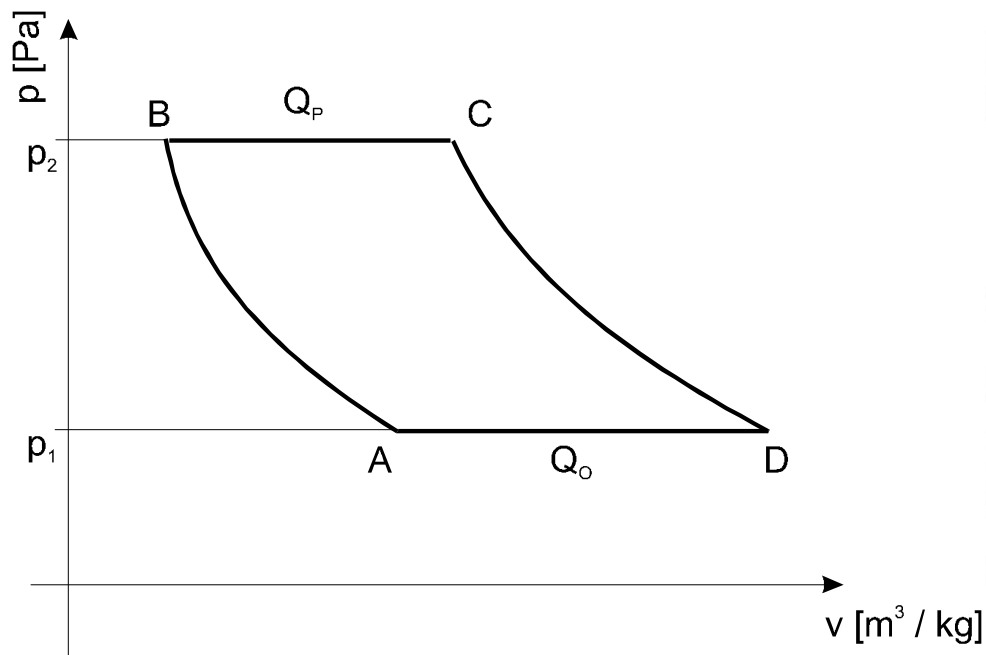
První adiabata

Druhá adiabata

Ideální termodynamické cykly:

Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

- sestává ze dvou izobar a dvou adiabat



Ideální termodynamické cykly:

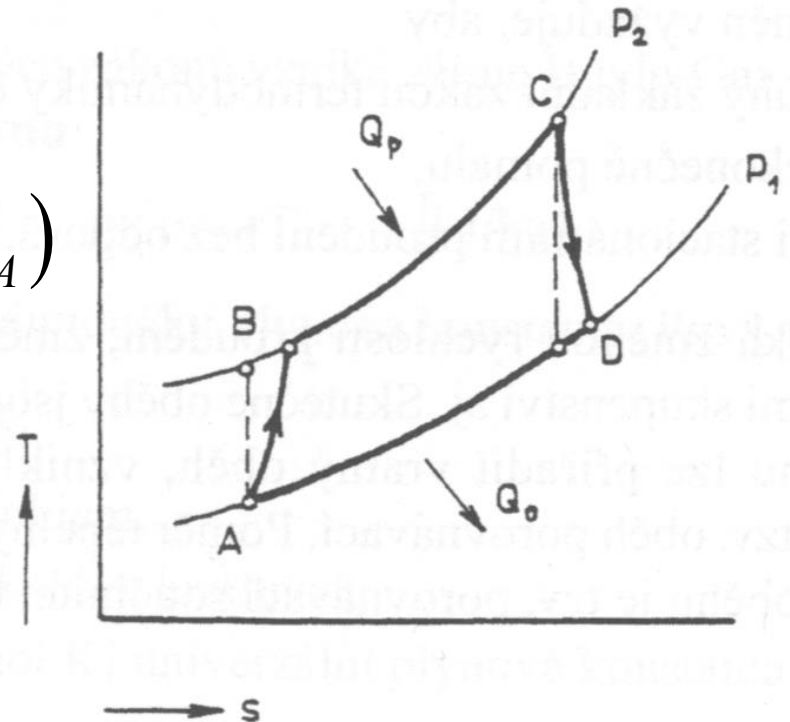
Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

- sestává ze dvou izobar a dvou adiabat

$$l = q_P - q_O = (i_C - i_B) - (i_D - i_A)$$

$$l = a_{zisk} - a_{dod} = (i_C - i_D) - (i_B - i_A)$$

$$\eta = \frac{l}{i_C - i_B} \approx 1 - \frac{T_D}{T_C} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$





Ideální termodynamické cykly:

Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

$$\eta = 1 - \frac{Q_O}{Q_P} = 1 - \frac{i_D - i_A}{i_C - i_B} = 1 - \frac{c_P(T_D - T_A)}{c_P(T_C - T_B)}$$

Zavedením:

$$\varepsilon = \frac{V_A}{V_B} \quad \text{- kompresní poměr}$$

$$\Psi = \frac{V_C}{V_B} \quad \text{- izobarický součinitel}$$

$$\text{A} \rightarrow \text{B} \text{ adiabata} \quad \frac{T_B}{T_A} = \left(\frac{V_A}{V_B} \right)^{\kappa-1} = \varepsilon^{\kappa-1} \quad \Rightarrow T_B = T_A \cdot \varepsilon^{\kappa-1}$$



Ideální termodynamické cykly:

Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

B->C izobara

$$\frac{T_C}{T_B} = \frac{V_C}{V_B} \Rightarrow T_C = \Psi \cdot T_B = \Psi \cdot T_A \cdot \varepsilon^{\kappa-1}$$



Ideální termodynamické cykly:

Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

adiabaty A→B a C→D mají stejné mezní tlaky:

$$p_B = p_C \quad p_A = p_D \quad p \cdot V^\kappa = \textit{konst.}$$

$$\frac{p_A}{p_B} = \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^\kappa \quad \frac{p_C}{p_D} = \left(\frac{V_D}{V_C} \right)^\kappa \Rightarrow \frac{V_A}{V_B} = \frac{V_D}{V_C} \Rightarrow$$

$$\frac{T_D}{T_C} = \left(\frac{V_C}{V_D} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{\kappa-1} = \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \Rightarrow$$

$$T_D = T_C \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = \Psi \cdot T_A \cdot \varepsilon^{\kappa-1} \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = \Psi \cdot T_A$$

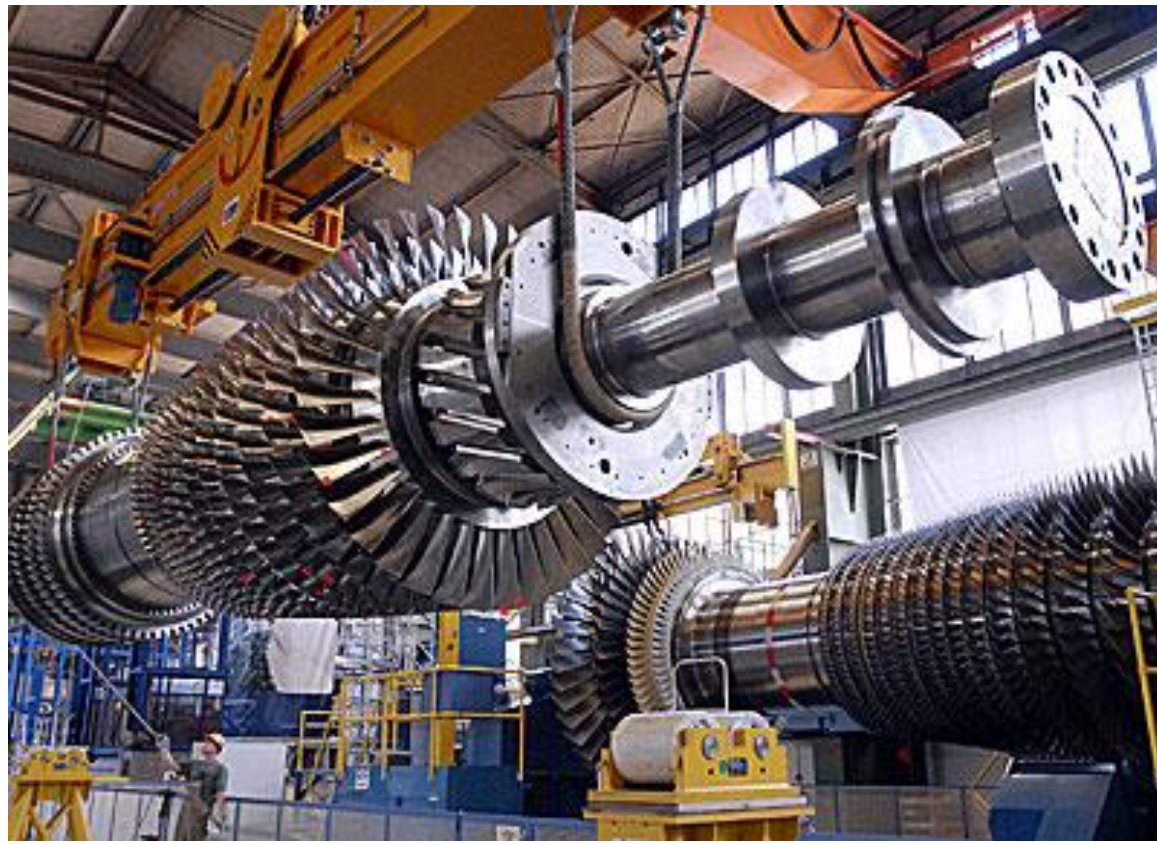
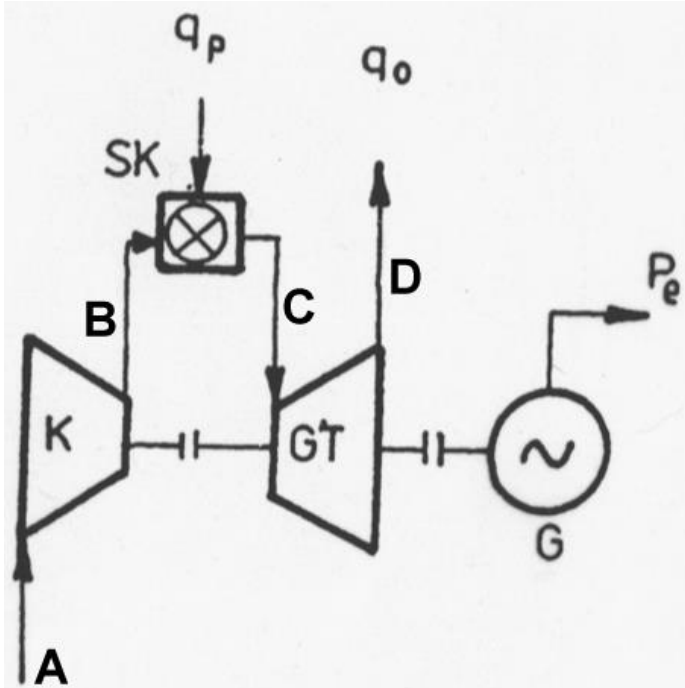
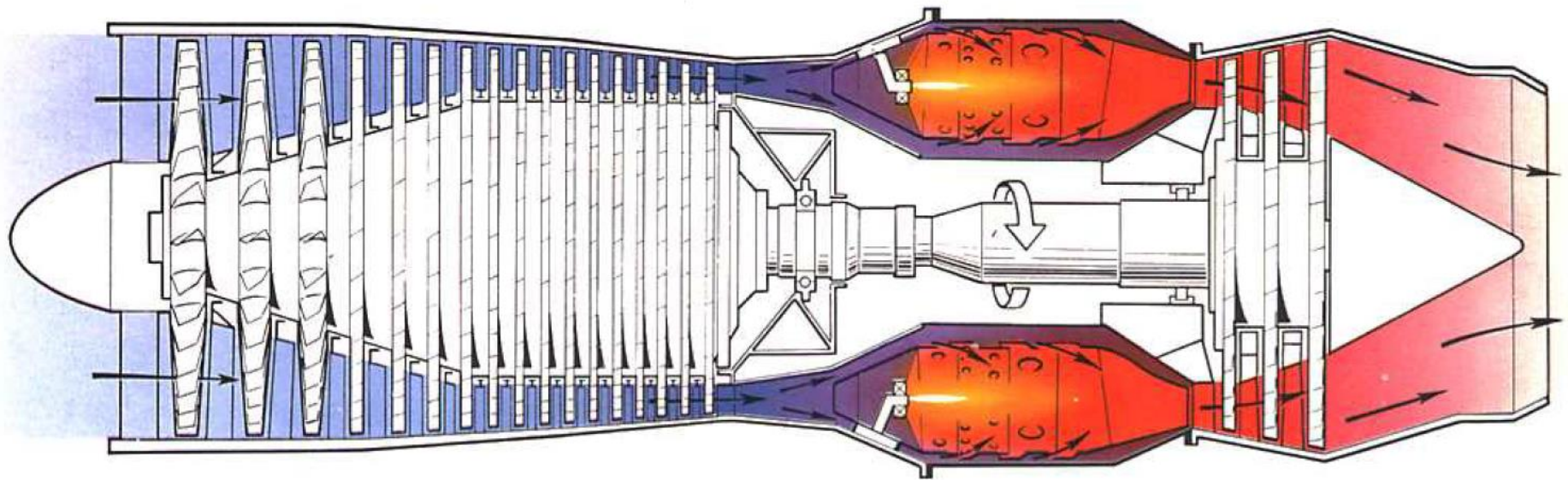
Ideální termodynamické cykly:

Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

$$\eta = 1 - \frac{Q_O}{Q_P} = 1 - \frac{i_D - i_A}{i_C - i_B} = 1 - \frac{c_P(T_D - T_A)}{c_P(T_C - T_B)}$$

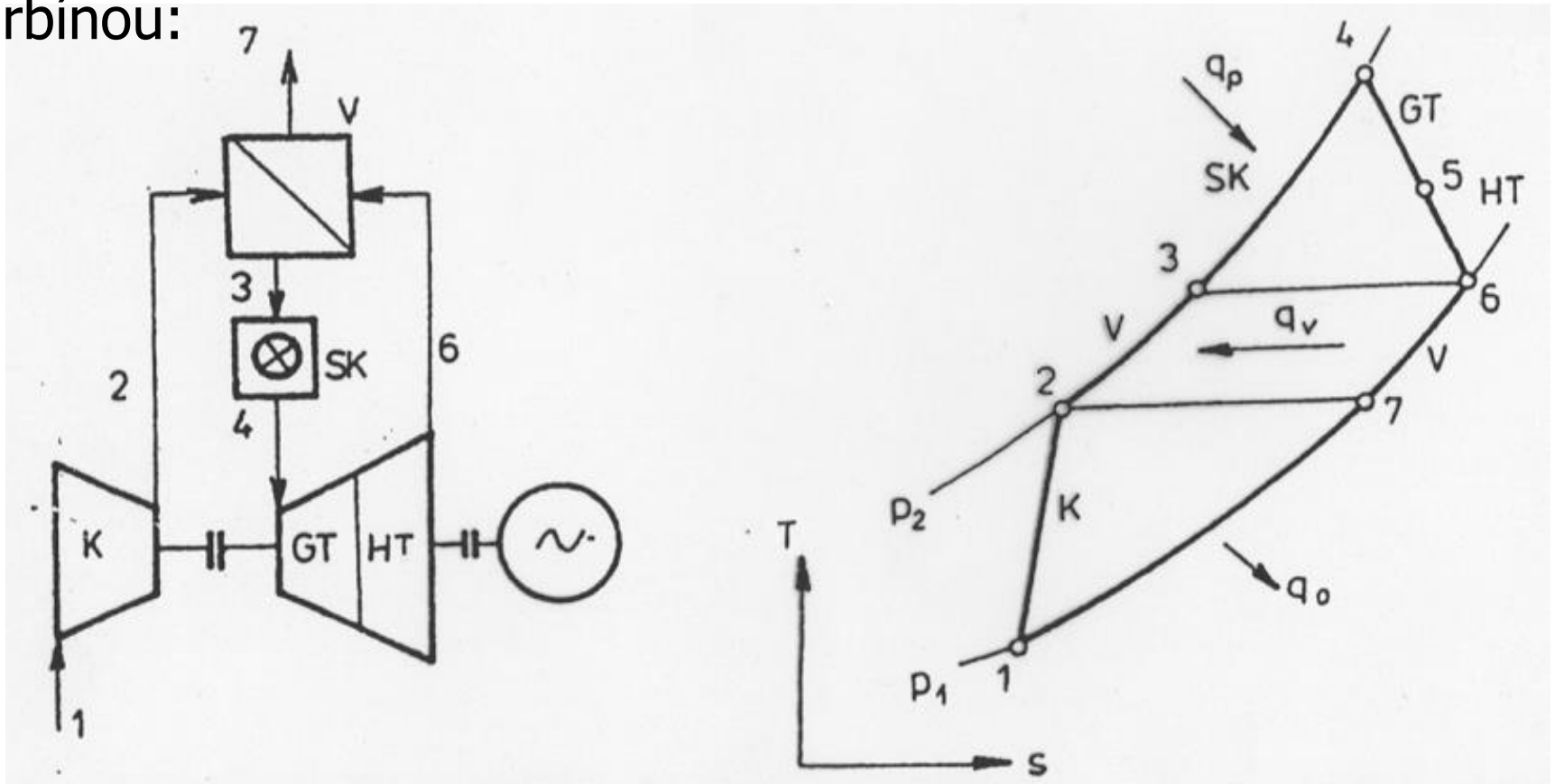
$$\eta = 1 - \frac{T_A \Psi - T_A}{\Psi \varepsilon^{\kappa-1} T_A - T_A \varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{\Psi - 1}{\Psi \varepsilon^{\kappa-1} - \varepsilon^{\kappa-1}} =$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{T_D}{T_C} = 1 - \left(\frac{p_D}{p_C} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$



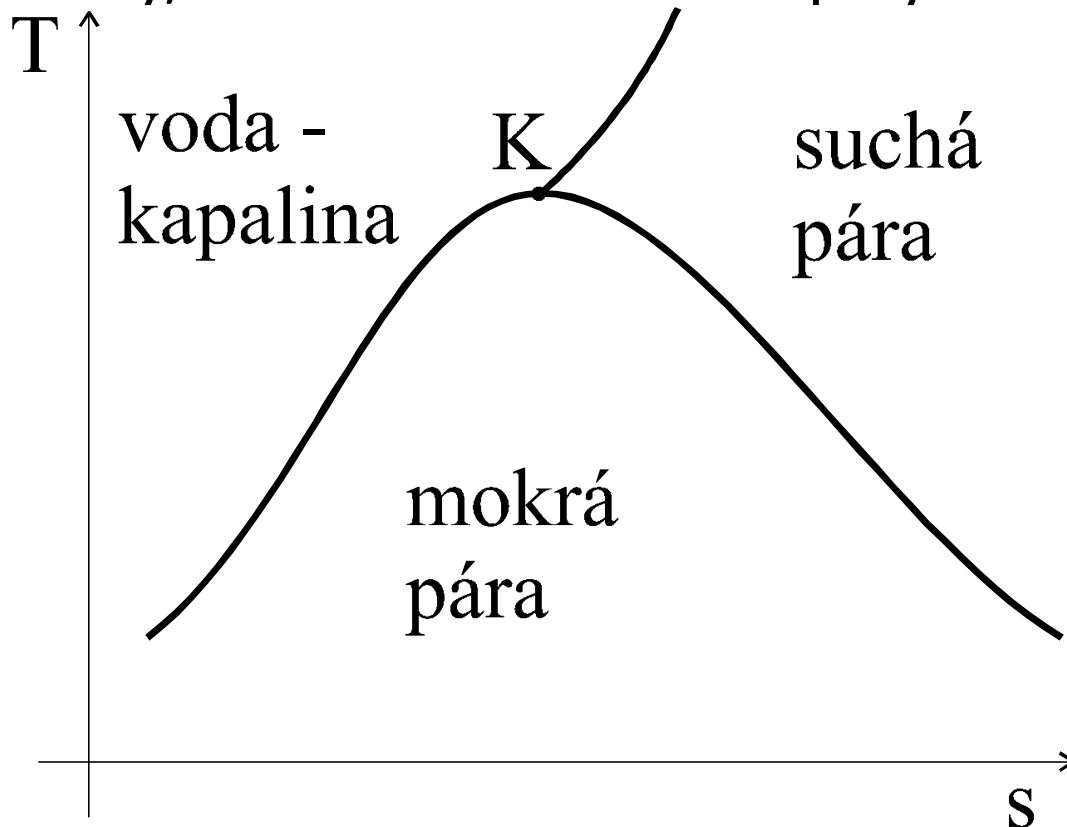
Cyklus s plynovou turbínou:

Praktická realizace s výměníkem tepla a rozdělenou turbínou:



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

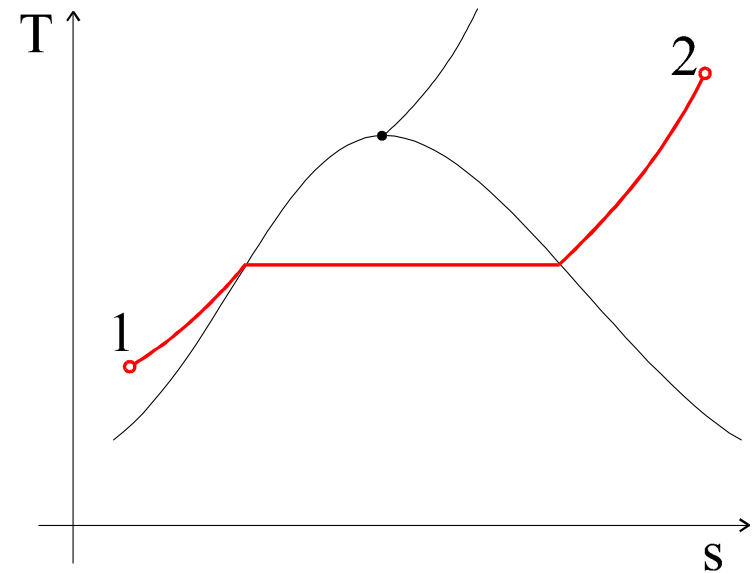
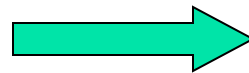
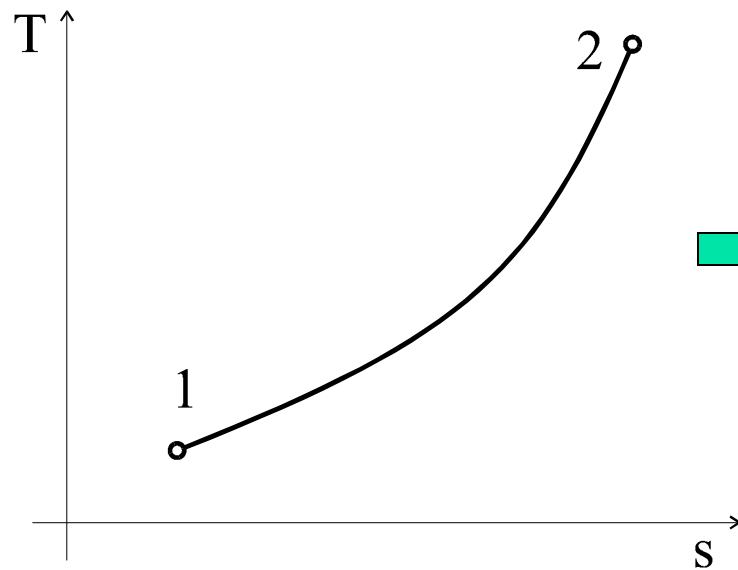
Cyklus sestává ze dvou izobar a dvou adiabat v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:



$$T_K = 647,30^\circ \text{ K} = 374.15^\circ \text{ C}$$
$$p_K = 22.13 \text{ MPa}$$

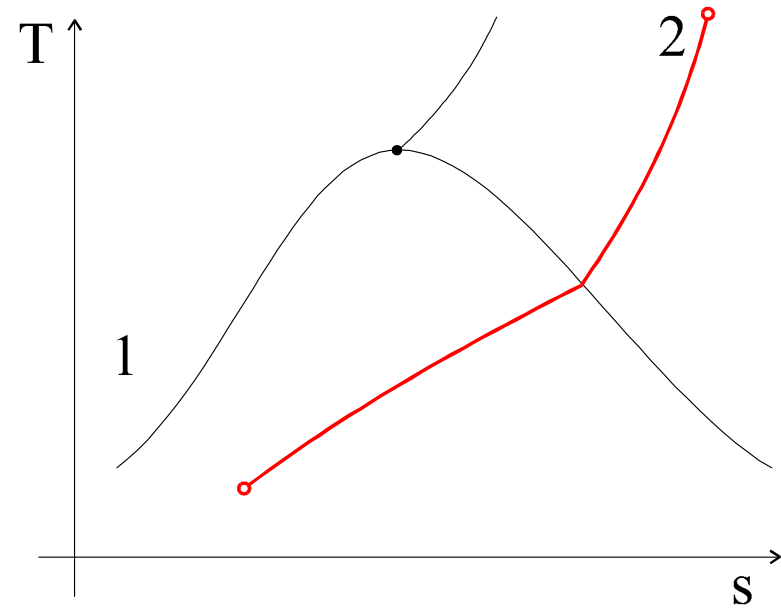
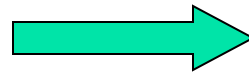
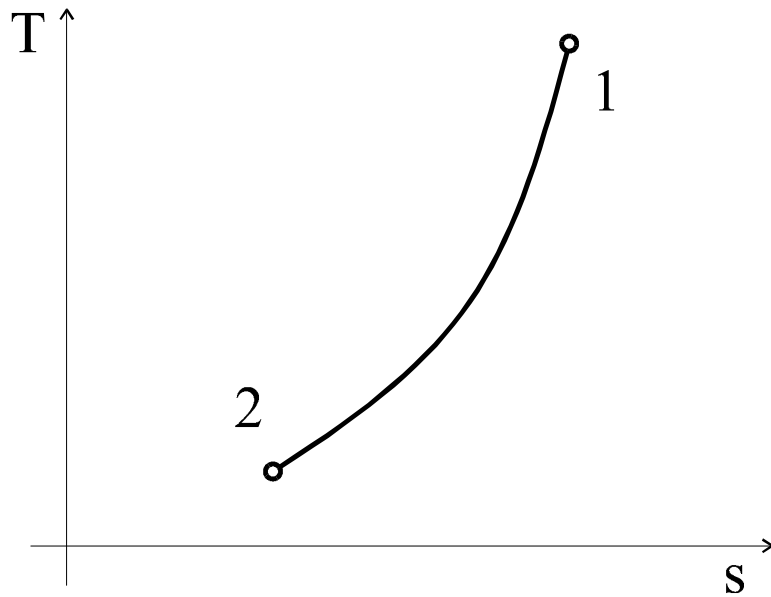
Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Izobara v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:



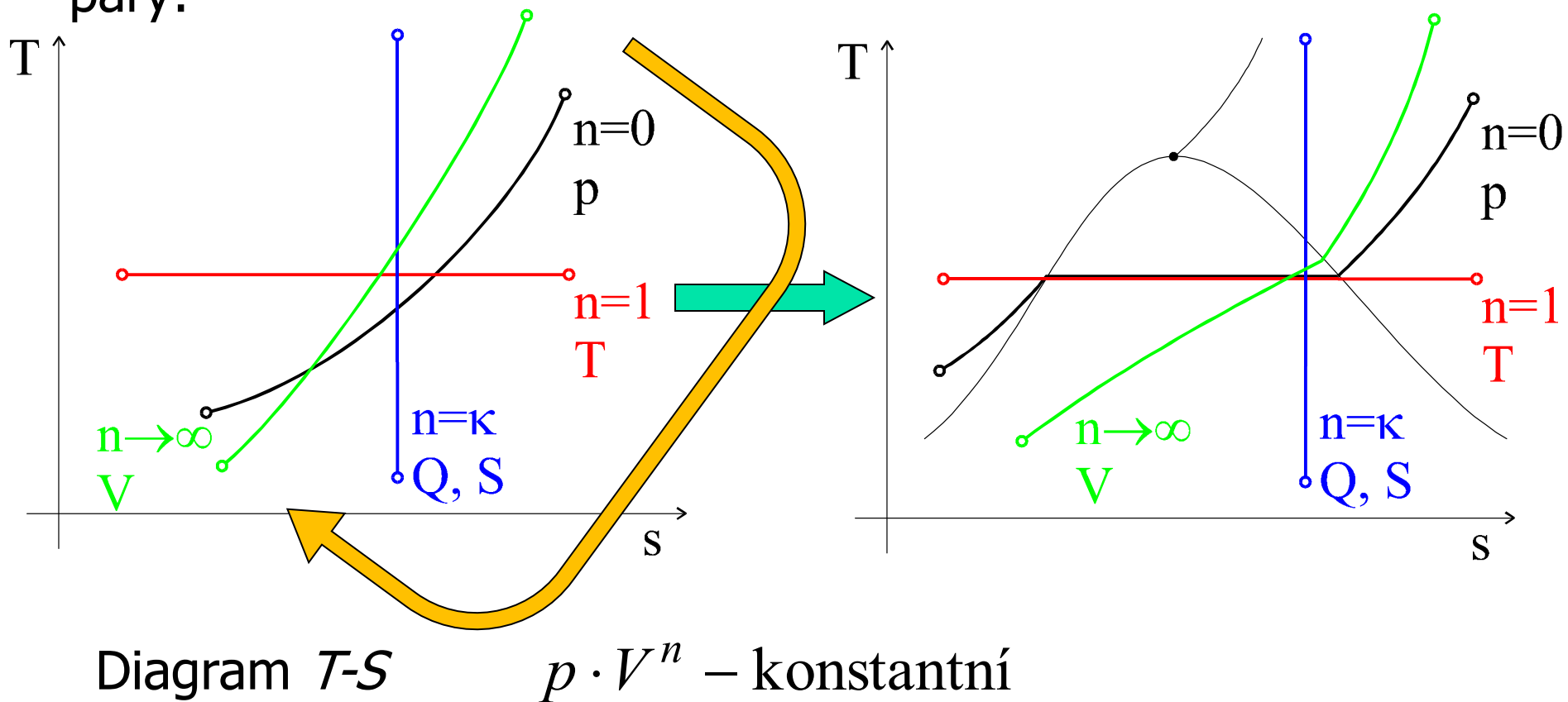
Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Izochora v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Termodynamické děje v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Termodynamické děje v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:

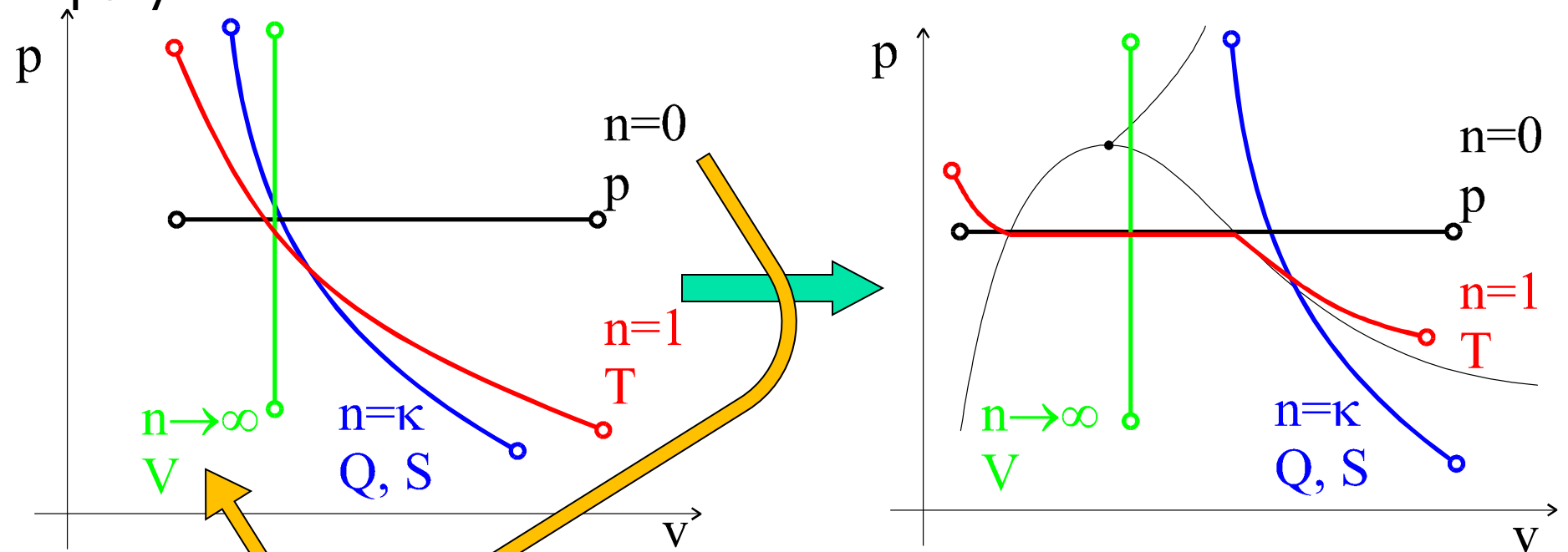


Diagram p - V

$p \cdot V^n$ – konstantní

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Termodynamické děje v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:

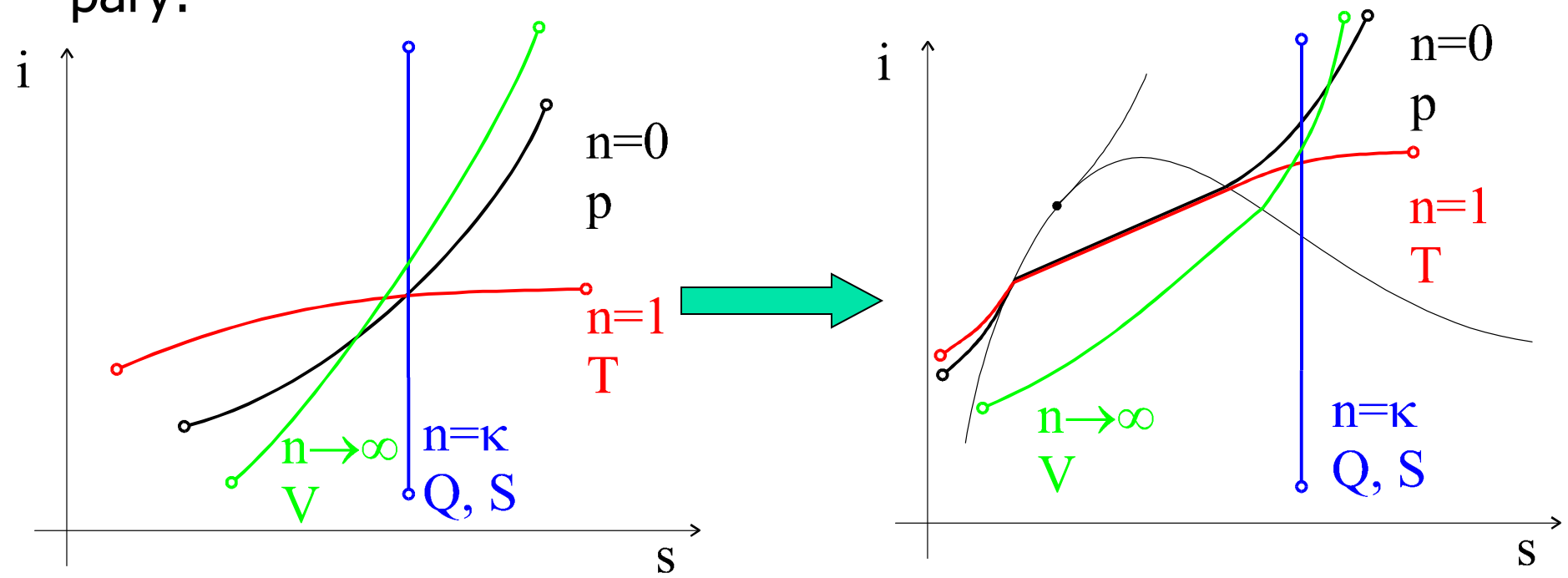


Diagram $i-S$

$p \cdot V^n$ – konstantní

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

V oblasti mokré páry zavádíme veličinu suchost:

$$x = \frac{m''}{m' + m''} \in \langle 0;1 \rangle \quad []$$

$$s = s' + x(s'' - s')$$

$$i = i' + x(i'' - i')$$

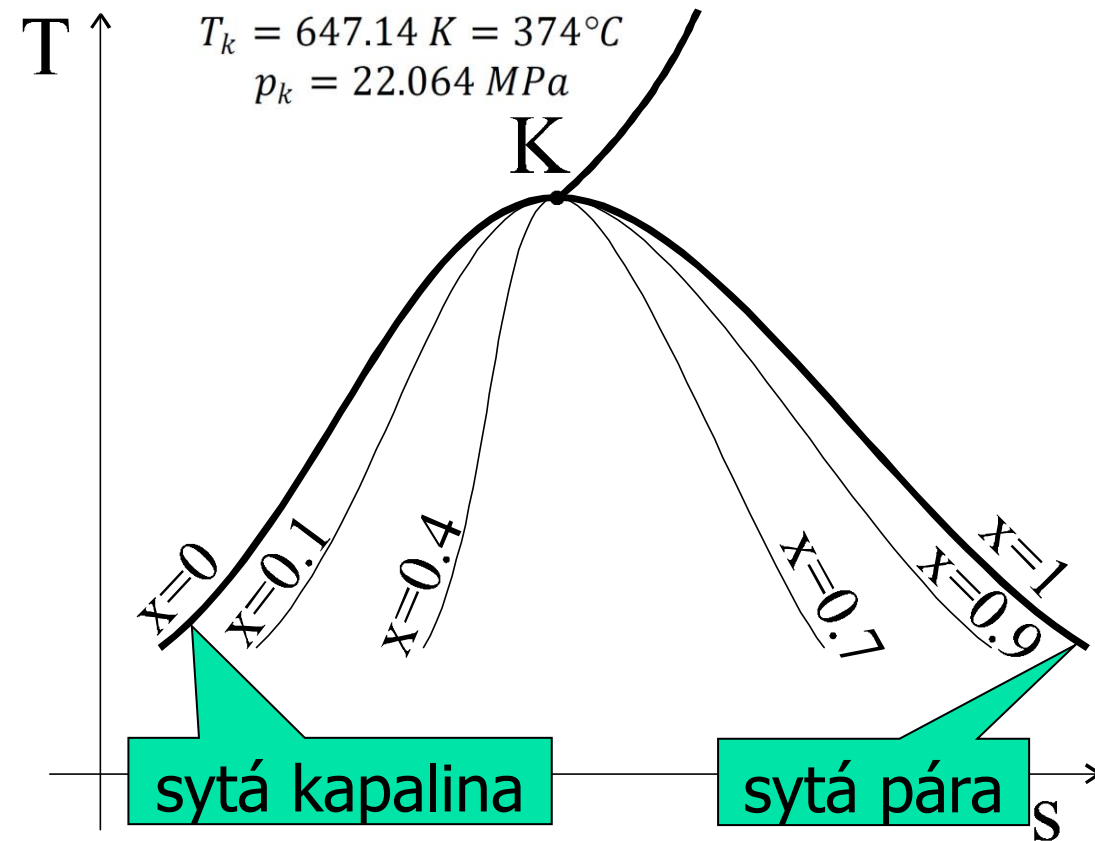
$$v = v' + x(v'' - v')$$

Index ' znamená sytou kapalinu

tedy ($x=0$)

Index '' znamená sytou páru

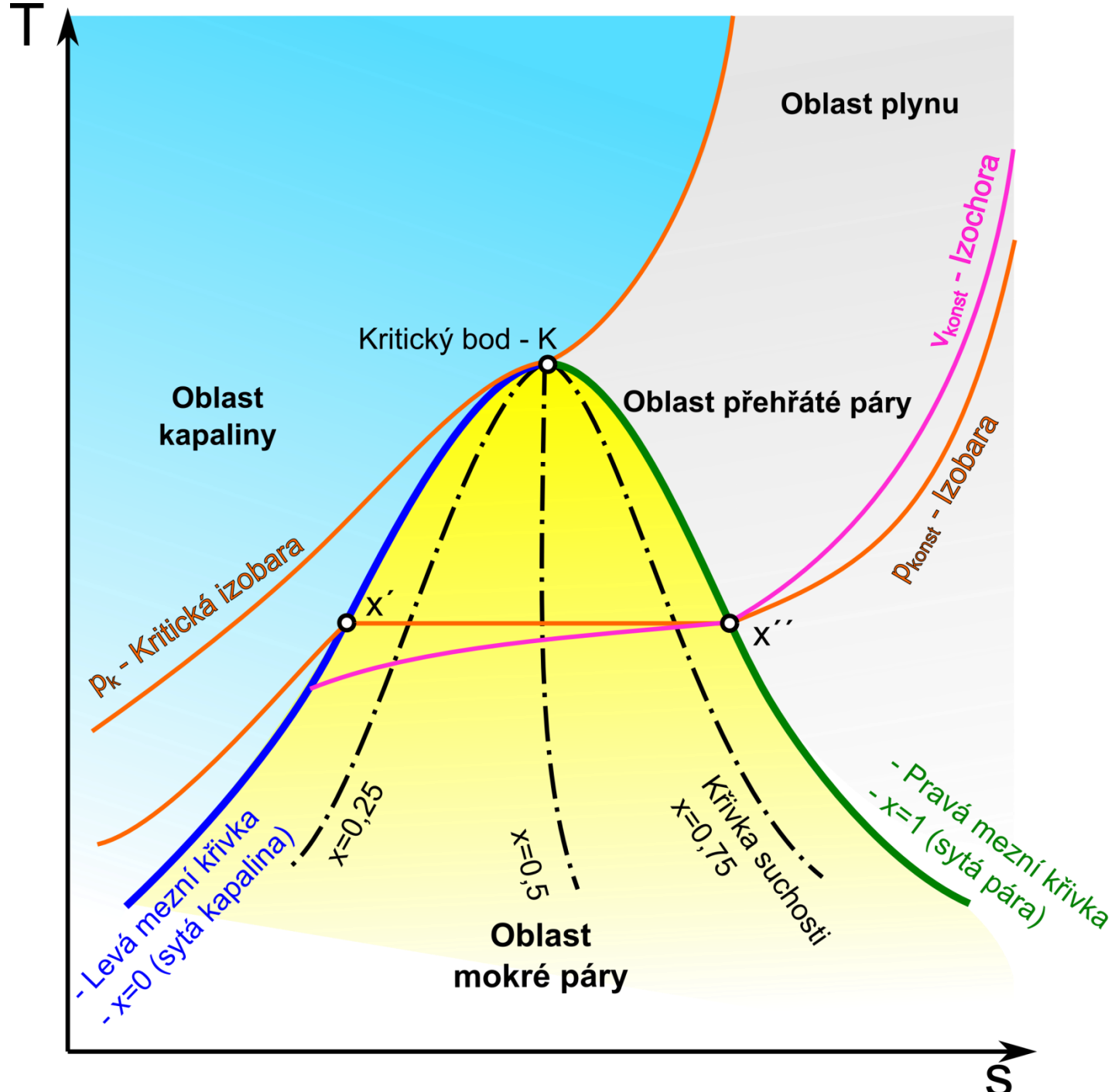
tedy ($x=1$)

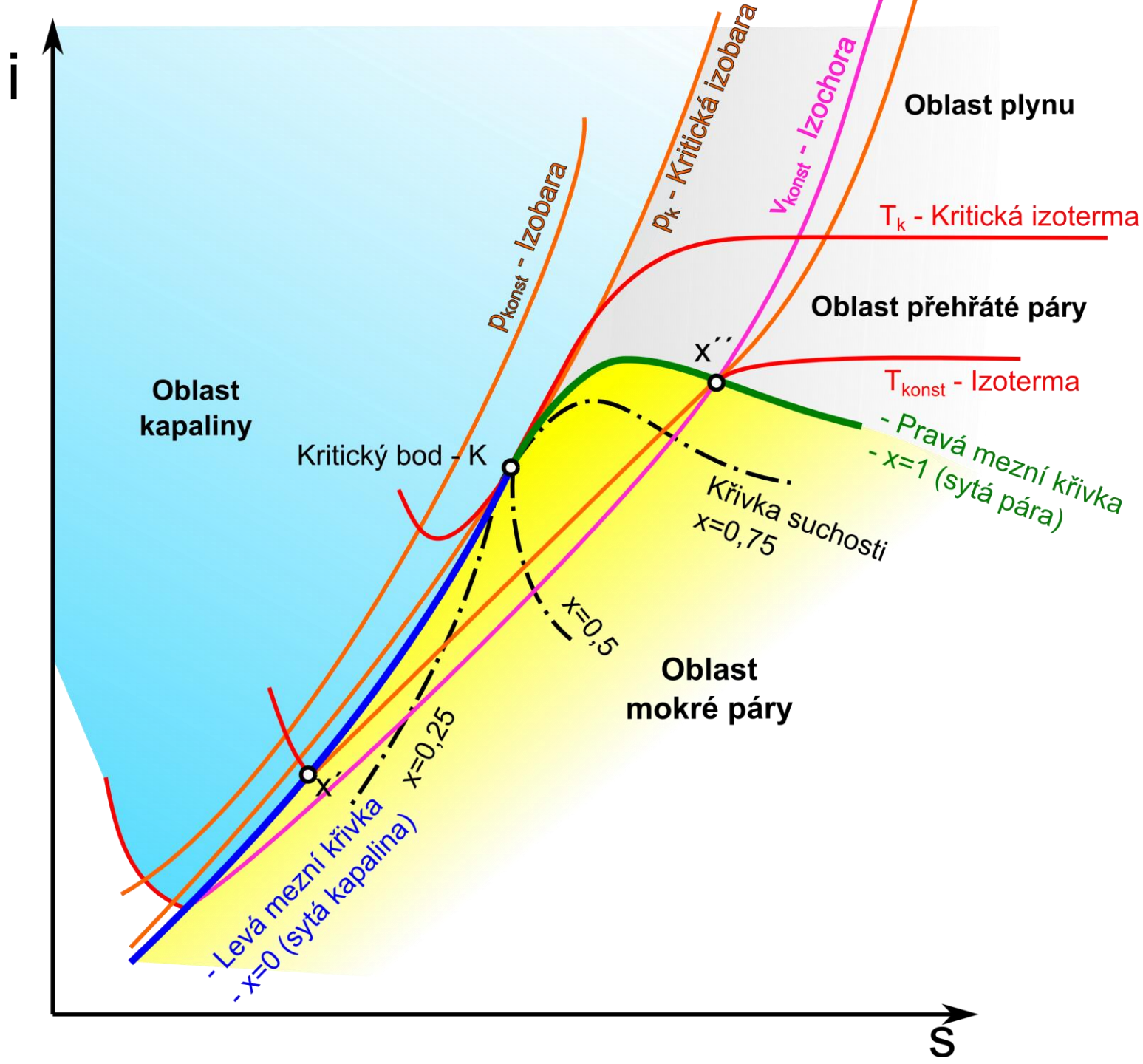


Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Mezní hodnoty veličin pro sytou kapalinu a sytou páru:

p [MPa]	t [°C]	v' [m ³ /kg]	v'' [m ³ /kg]	i' [kJ/kg]	i'' [kJ/kg]	s' [kJ/kg K]	s'' [kJ/kg K]
0,0010	6,9696	0,0010001	129,18	29,30	2513,7	0,1059	8,9749
0,0020	17,495	0,0010014	66,99	73,43	2532,9	0,2606	8,7227
0,0030	24,080	0,0010028	45,66	100,99	2544,9	0,3543	8,5766
0,0040	28,962	0,0010041	34,79	121,40	2553,7	0,4224	8,4735
0,0050	32,875	0,0010053	28,19	137,77	2560,8	0,4763	8,3939
0,0070	39,001	0,0010075	20,53	163,37	2571,8	0,5591	8,2746
0,010	45,808	0,0010103	14,67	191,81	2583,9	0,6492	8,1489
0,015	53,977	0,0010140	10,02	225,94	2598,3	0,7548	8,0071
0,020	60,059	0,0010171	7,648	251,40	2608,9	0,8320	7,9072
0,025	64,963	0,0010198	6,203	271,93	2617,4	0,8931	7,8302
0,030	69,095	0,0010222	5,229	289,23	2624,6	0,9439	7,7675
0,040	75,857	0,0010264	3,993	317,57	2636,1	1,0259	7,6690
0,050	81,317	0,0010299	3,240	340,48	2645,2	1,0910	7,5930
0,060	85,926	0,0010331	2,723	359,84	2652,9	1,1452	7,5311
0,070	89,932	0,0010359	2,365	376,68	2659,4	1,1919	7,4709





Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Termodynamické děje v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:

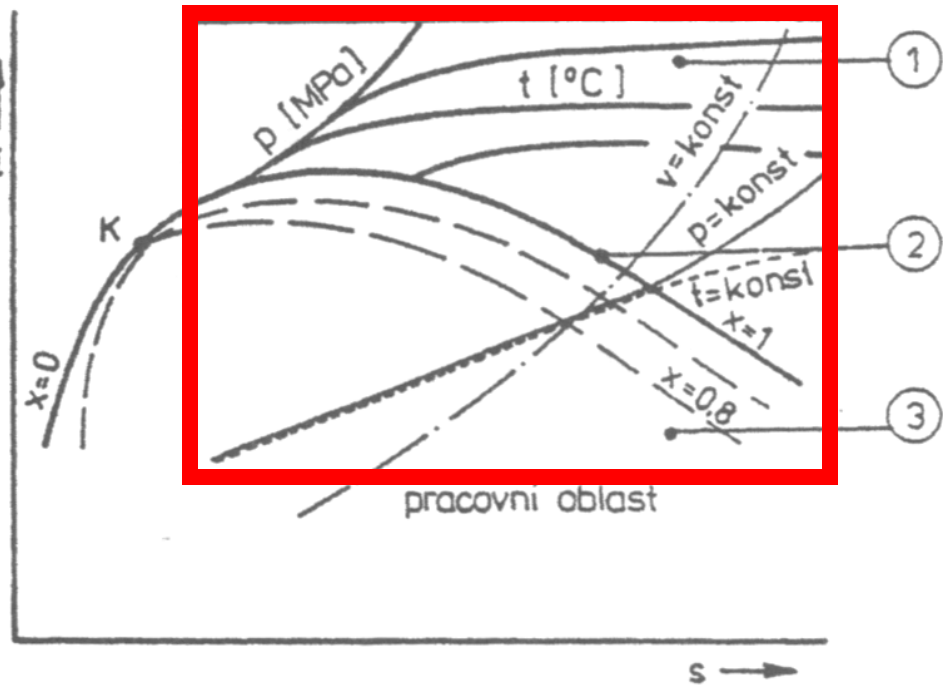
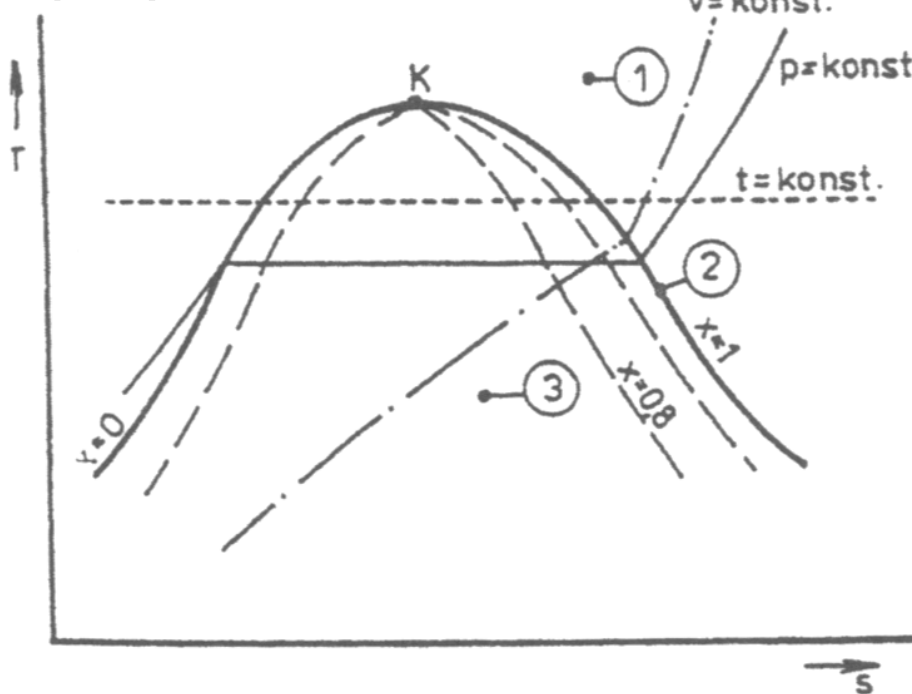
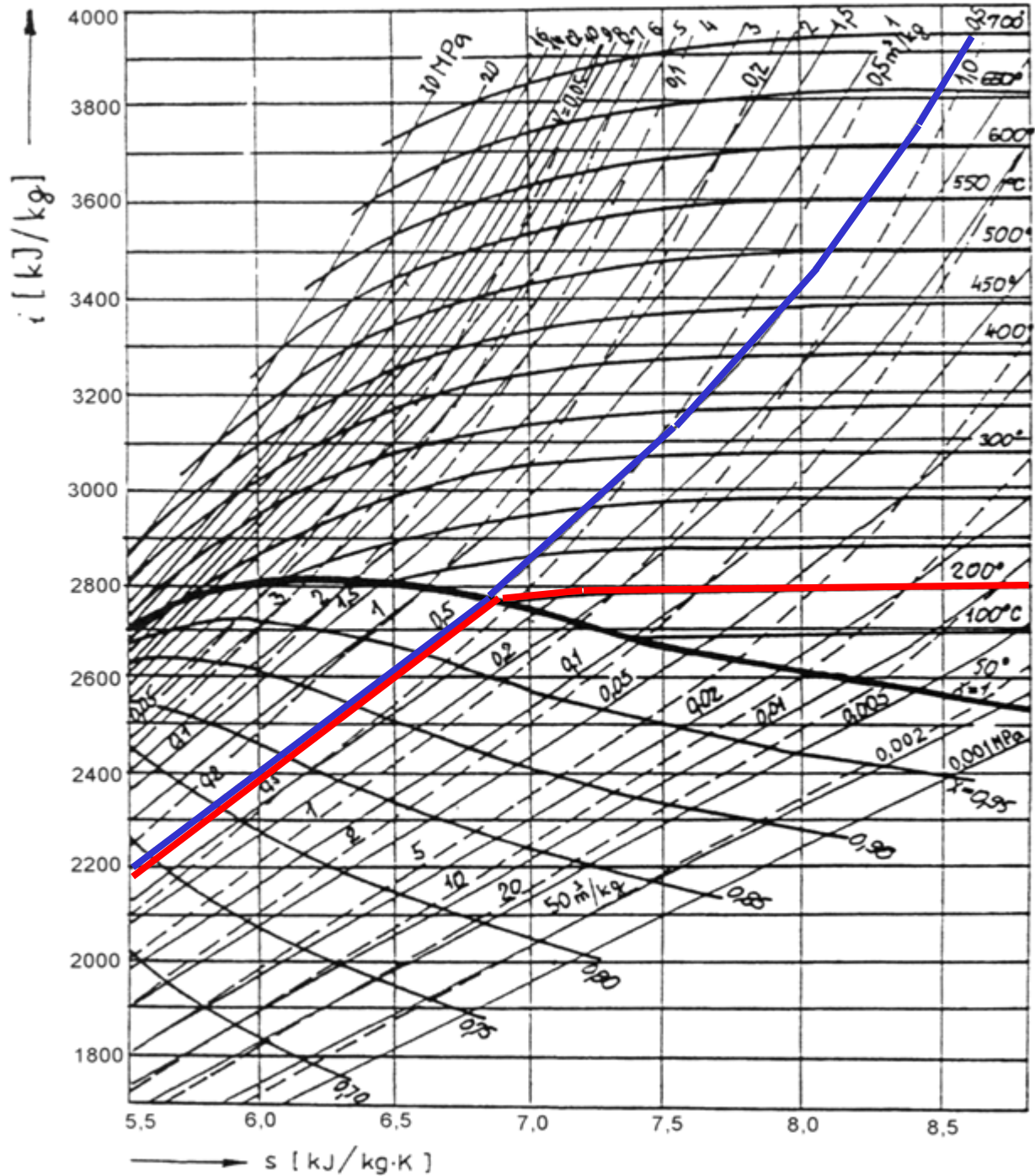
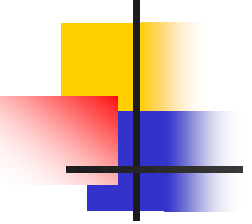


Diagram T-S

Diagram i-S

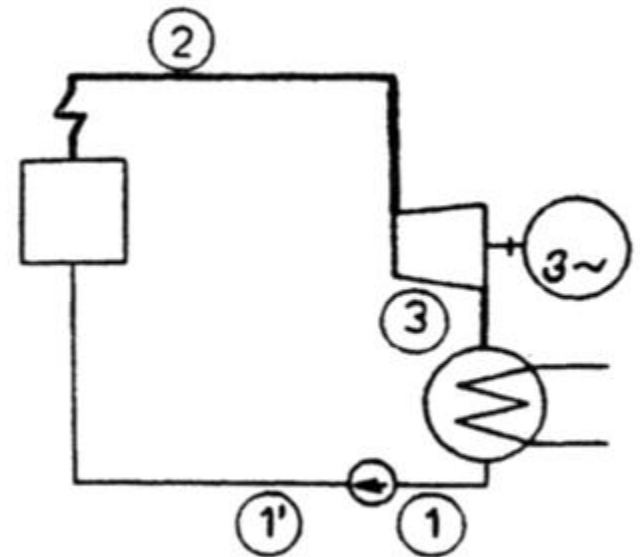
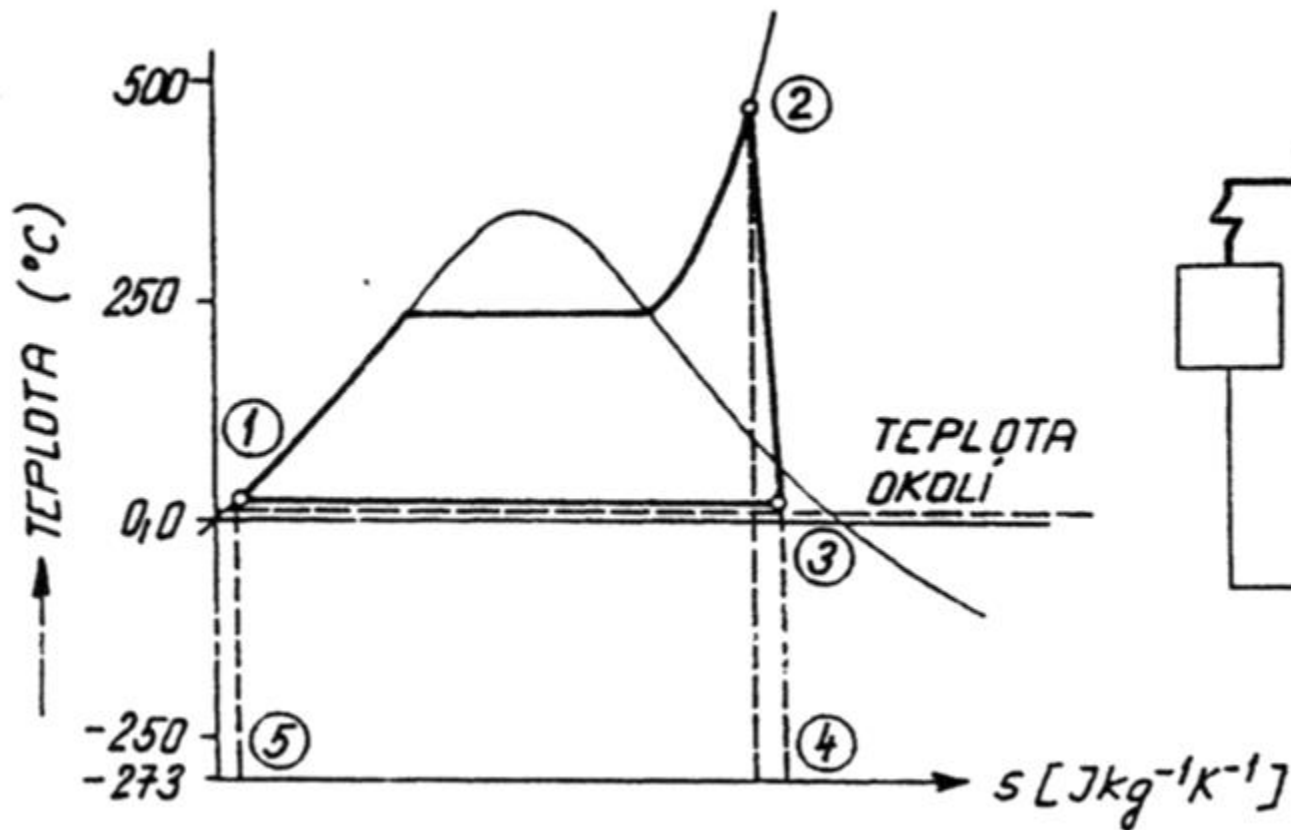


$p - \text{konst.}$

$T - \text{konst.}$

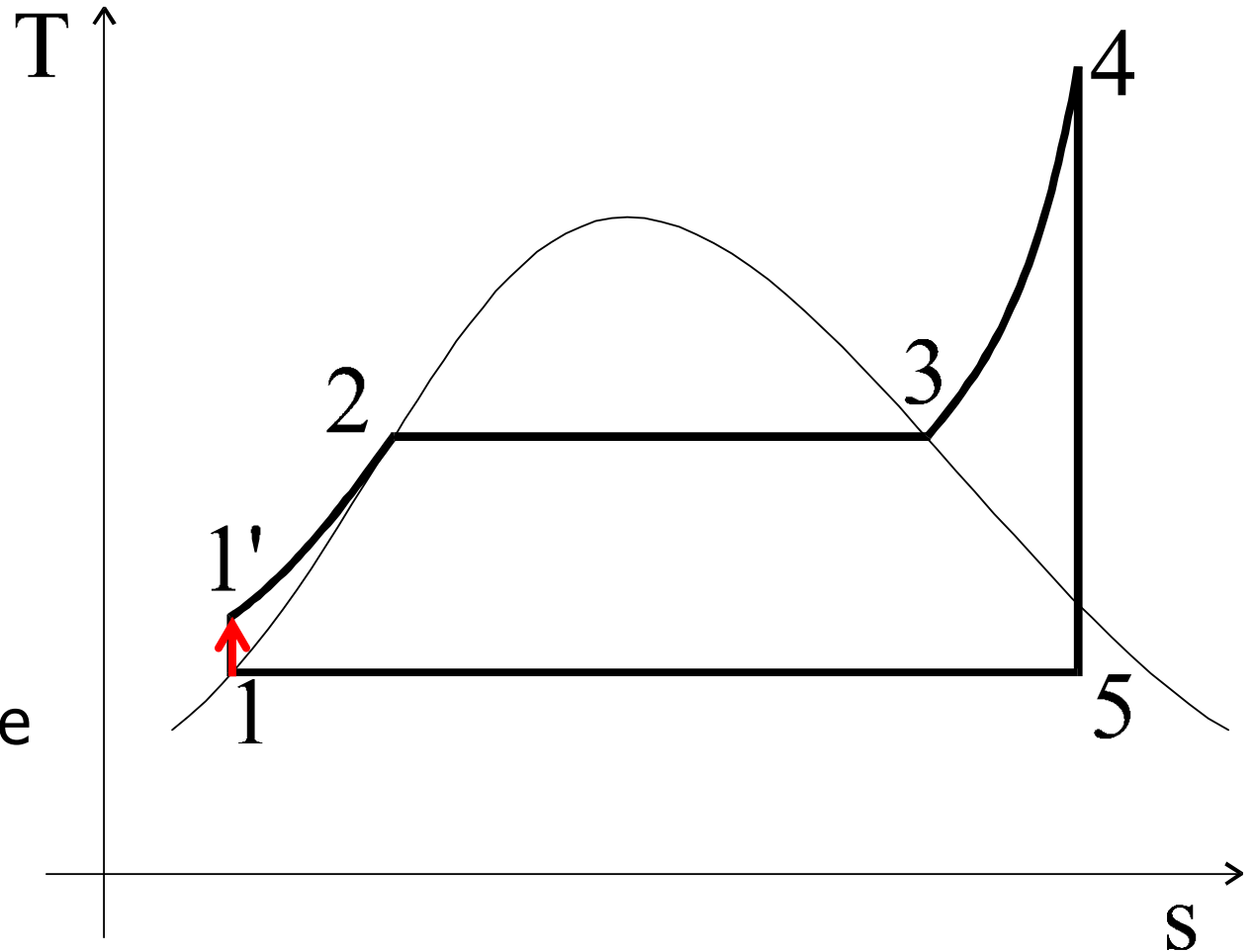
Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Základní oběh a schéma parní elektrárny:



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:



1 - 1'

adiabatická

kompresa

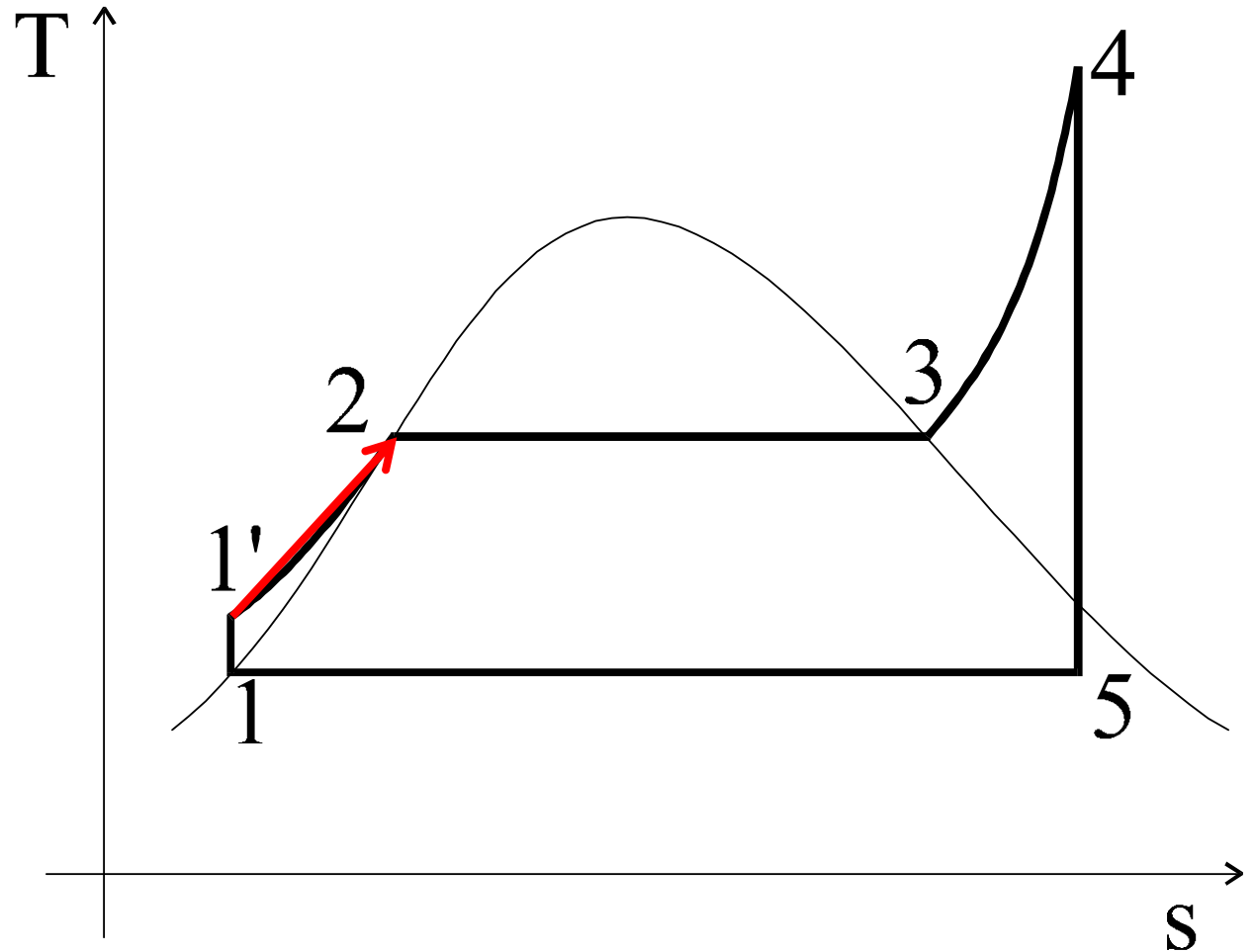
v hlavním

oběhovém čerpadle

(napáječe)

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:



1' - 2

izobarický

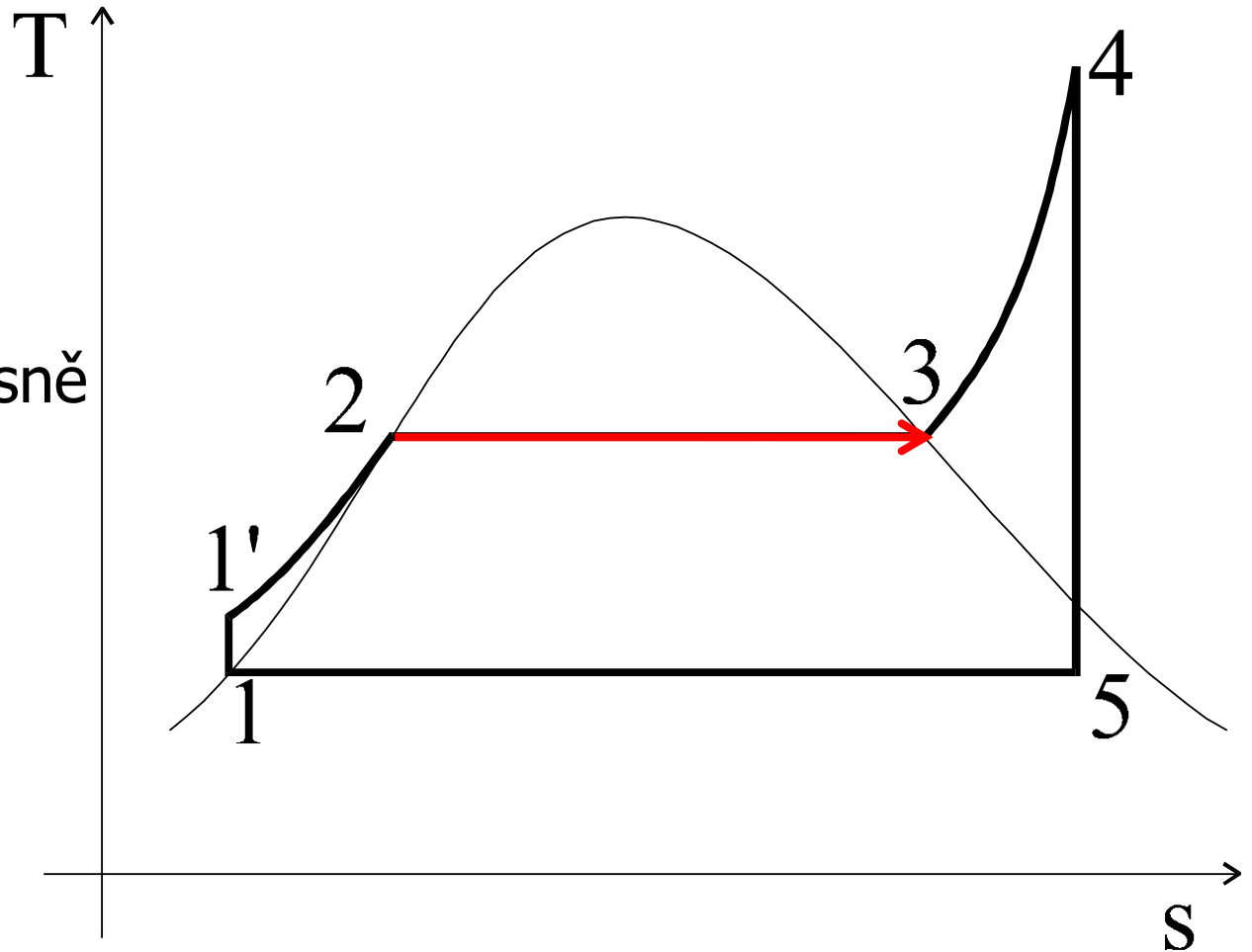
ohřev

v ohříváku -
ekonomizéru

(součást kotle)

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:



2 - 3

izobarický a současně

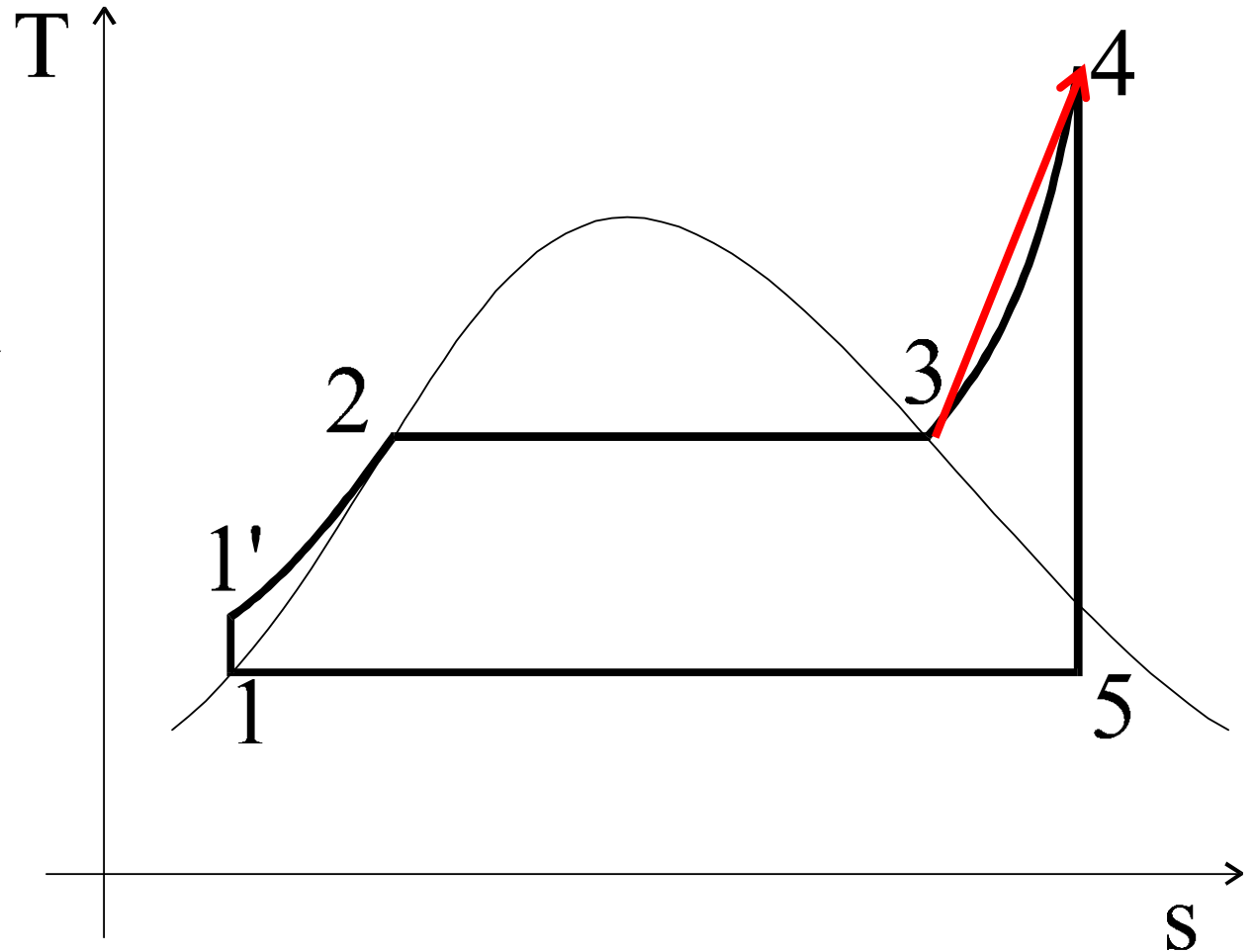
izotermický var

ve výparníku

(součást kotle)

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:

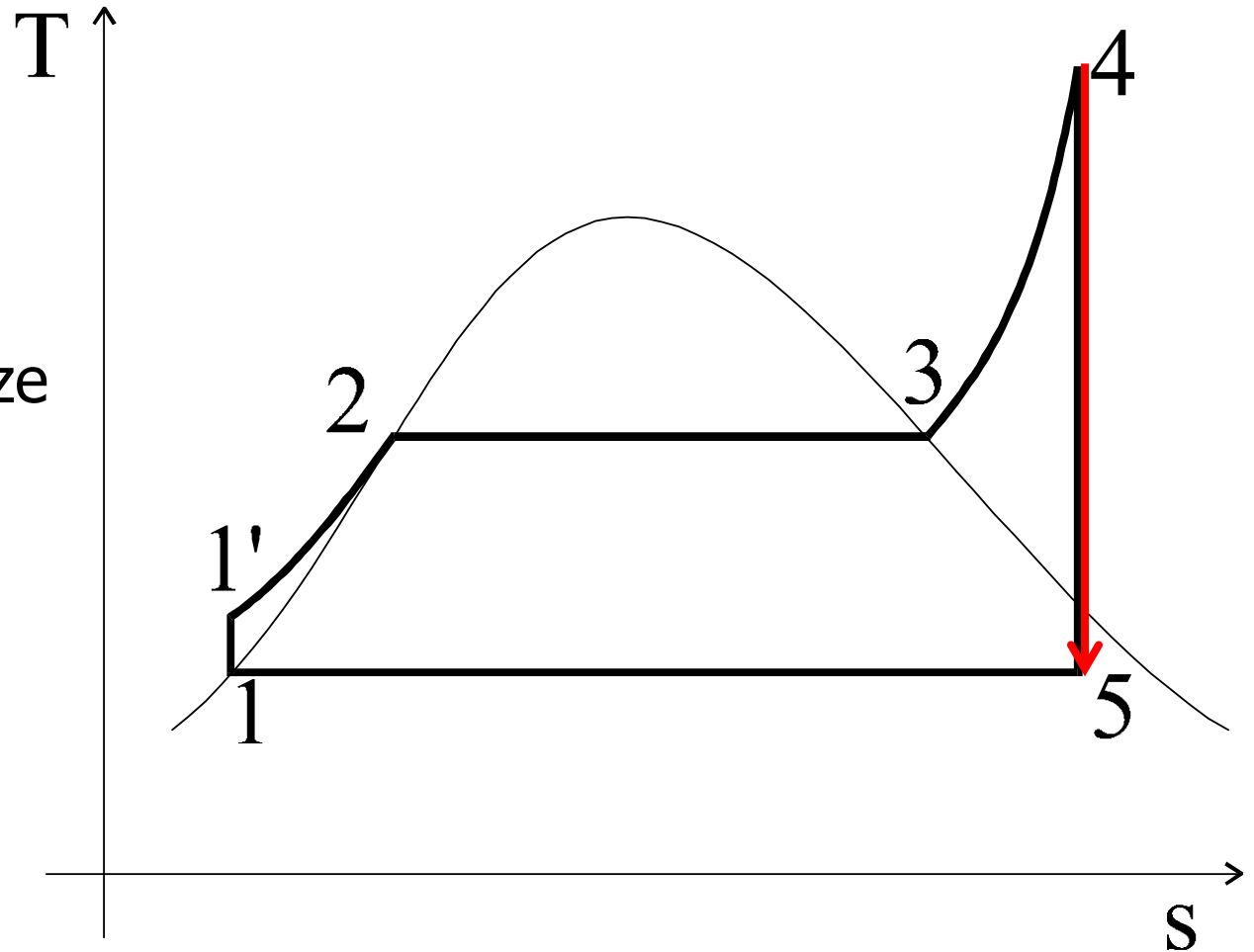


3 - 4

izobarické přehřátí
páry v přehříváku
(součást kotle)

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:

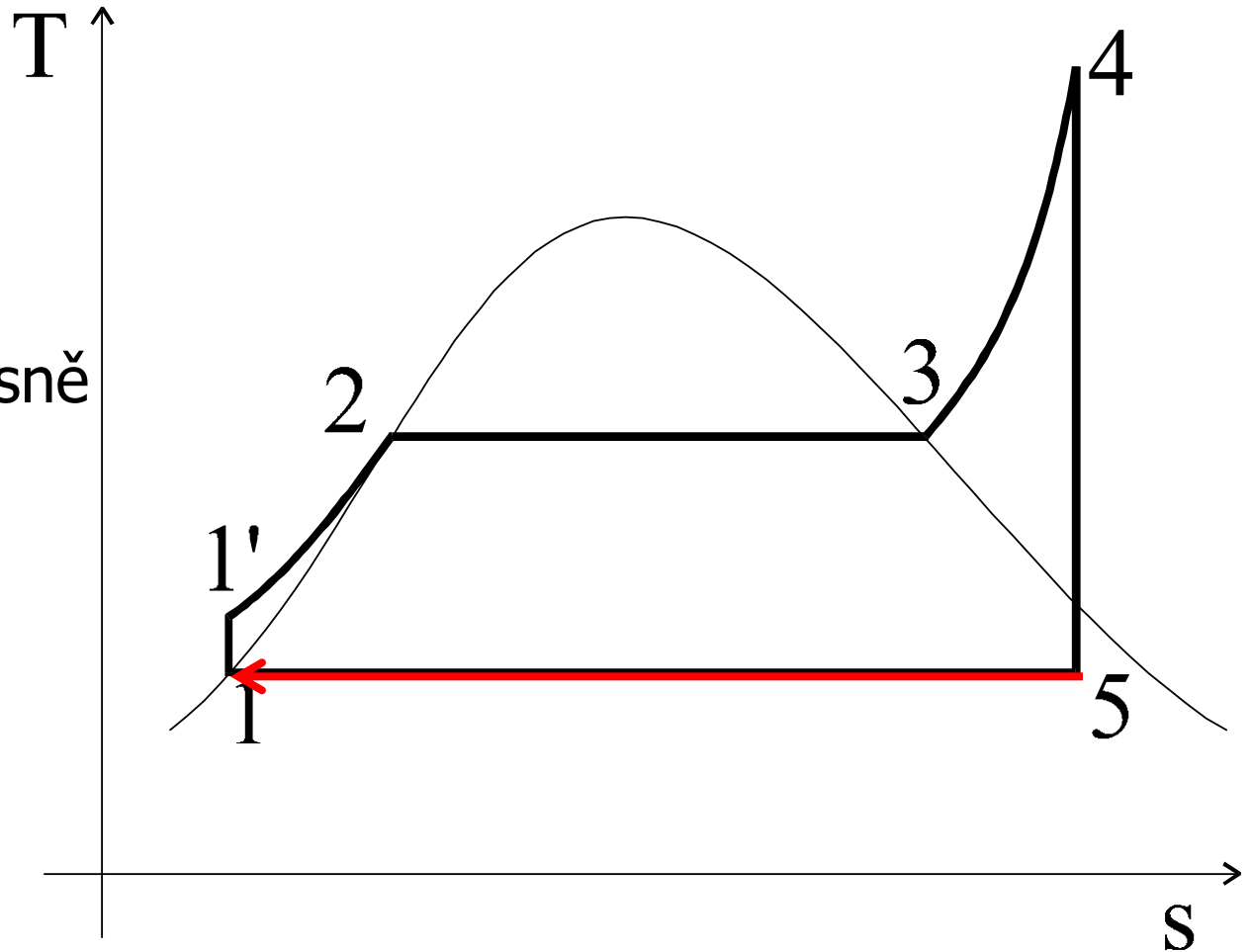


4 - 5

adiabatická expanze
páry v turbíně

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:



5 - 1

izobarická a současně

izotermická
kondenzace

v kondenzátoru

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

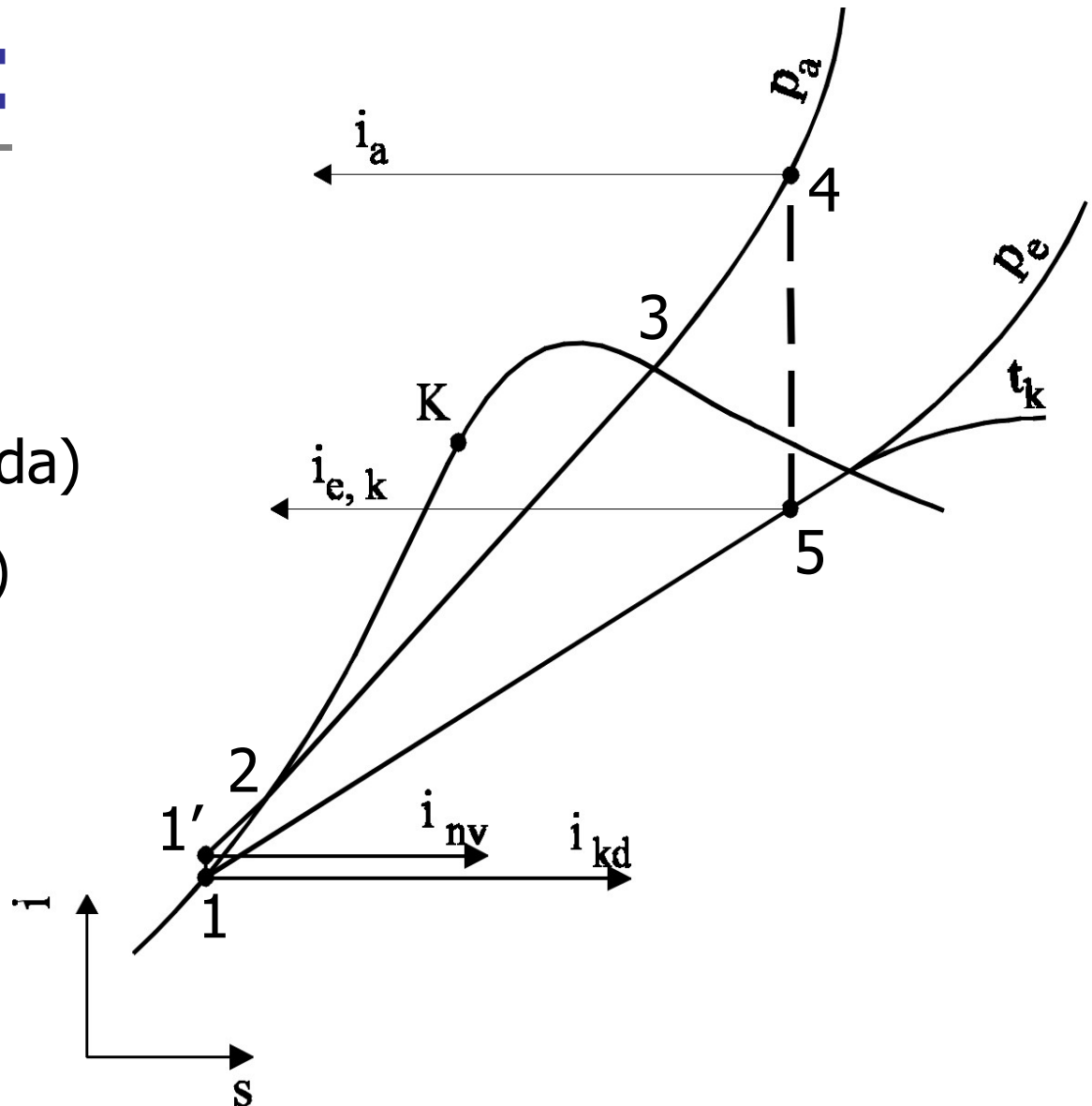
Diagram i-S:

1 – kd (kondenzát)

1' – nv (napájecí voda)

4 – a (admisní pára)

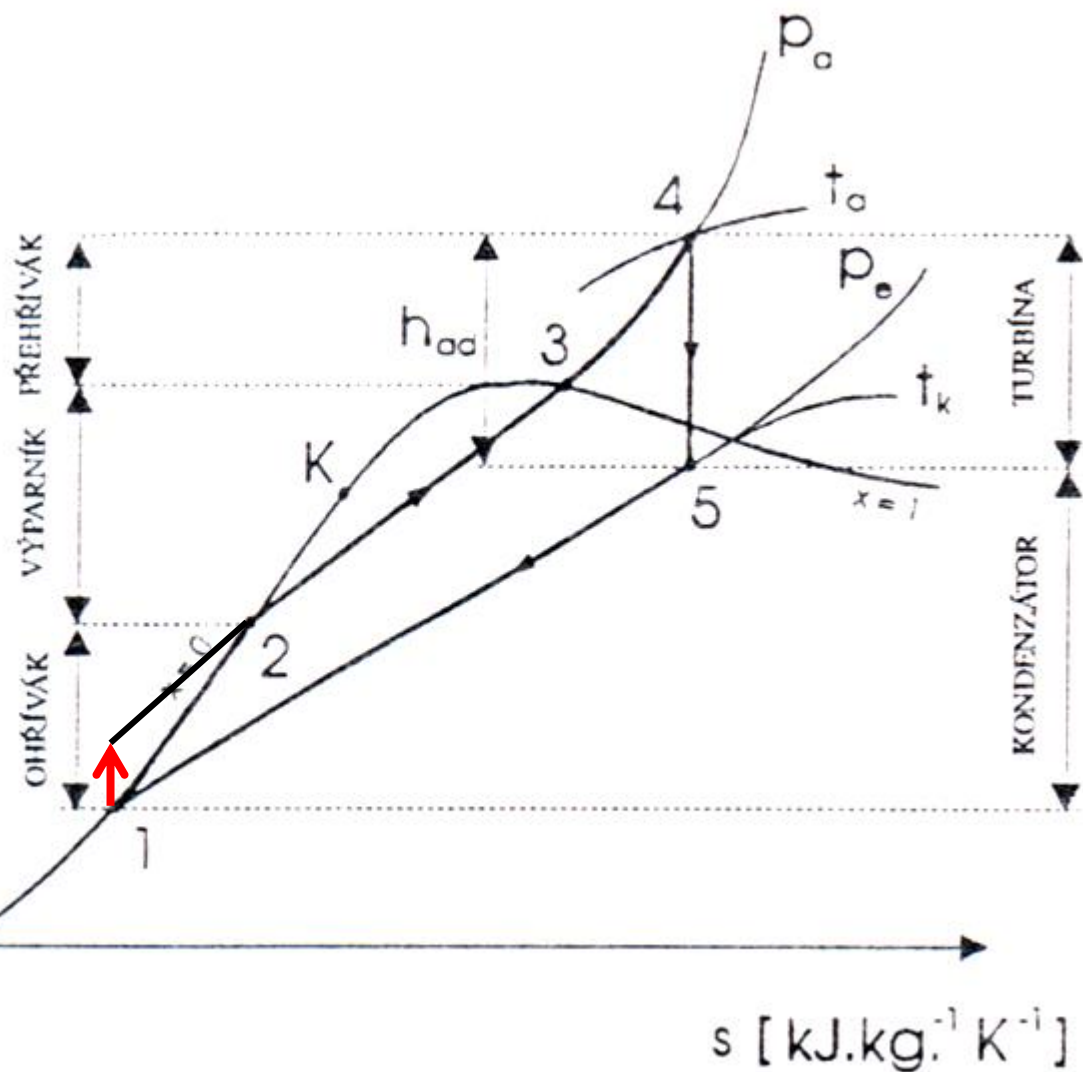
5 – e,k (pára po expanzi)



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

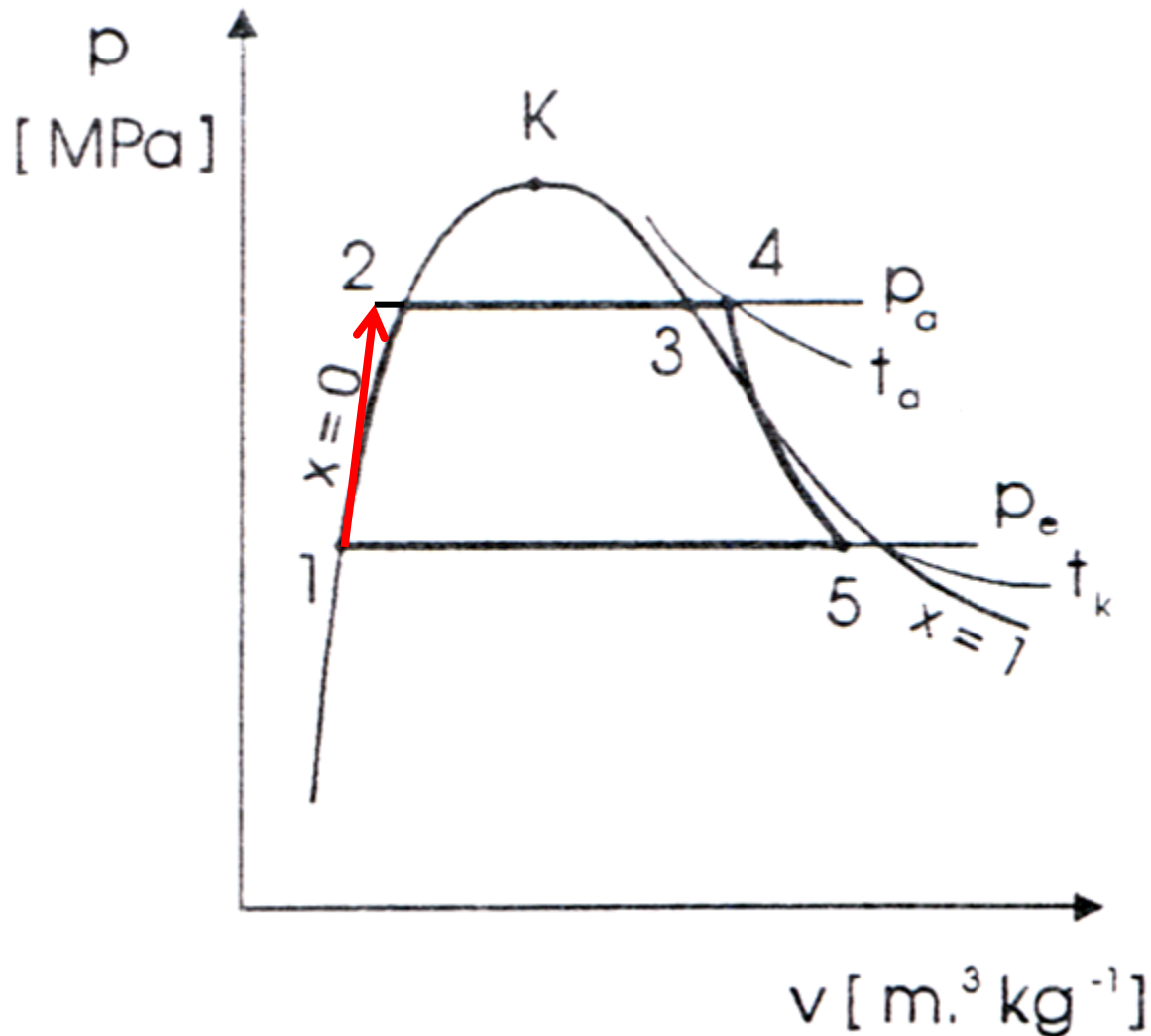
Diagram i-S:

i [kJ.kg⁻¹]



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

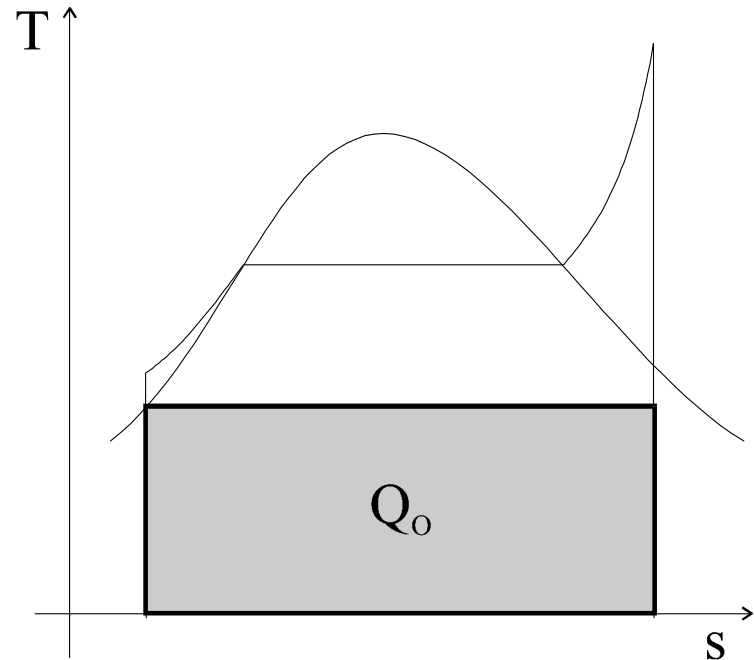
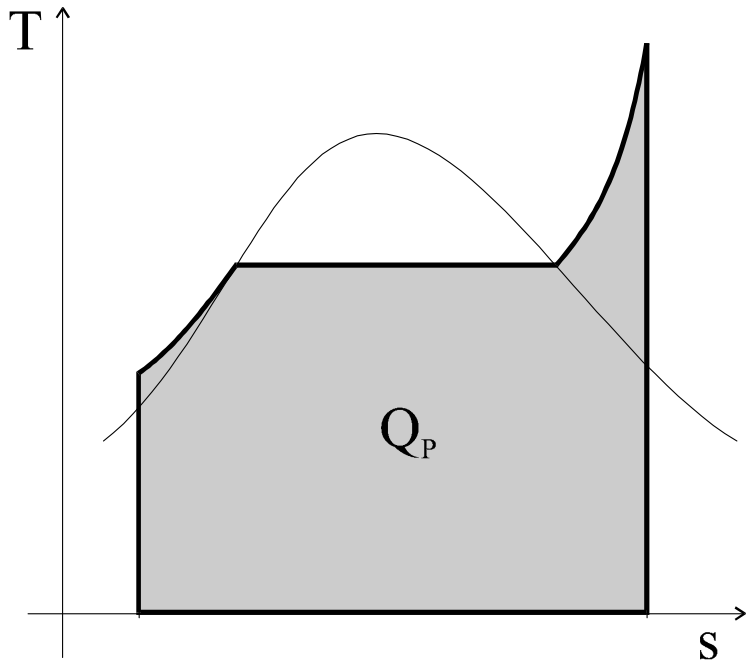
Diagram p-V:



Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Vyšetření z diagramu T-S:

$$\eta = 1 - \frac{Q_O}{Q_P} = \frac{Q_P - Q_O}{Q_P}$$

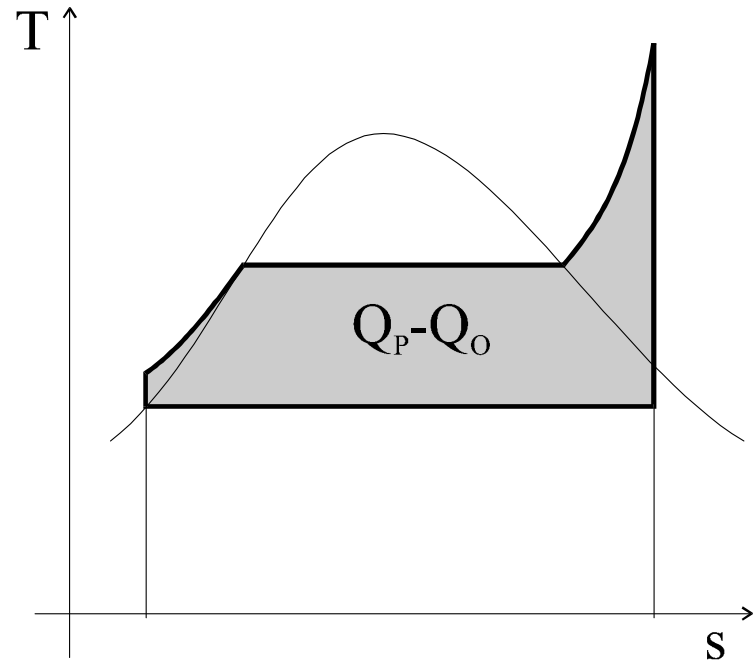
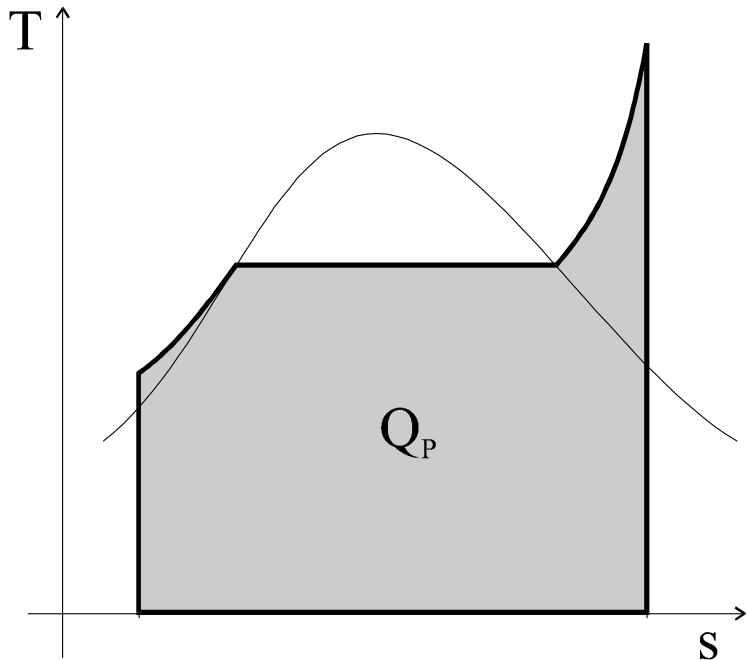


Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Vyšetření z diagramu T-S:

$$\eta = 1 - \frac{Q_O}{Q_P} = \frac{Q_P - Q_O}{Q_P}$$

$$\eta \approx 40\% \quad (!)$$



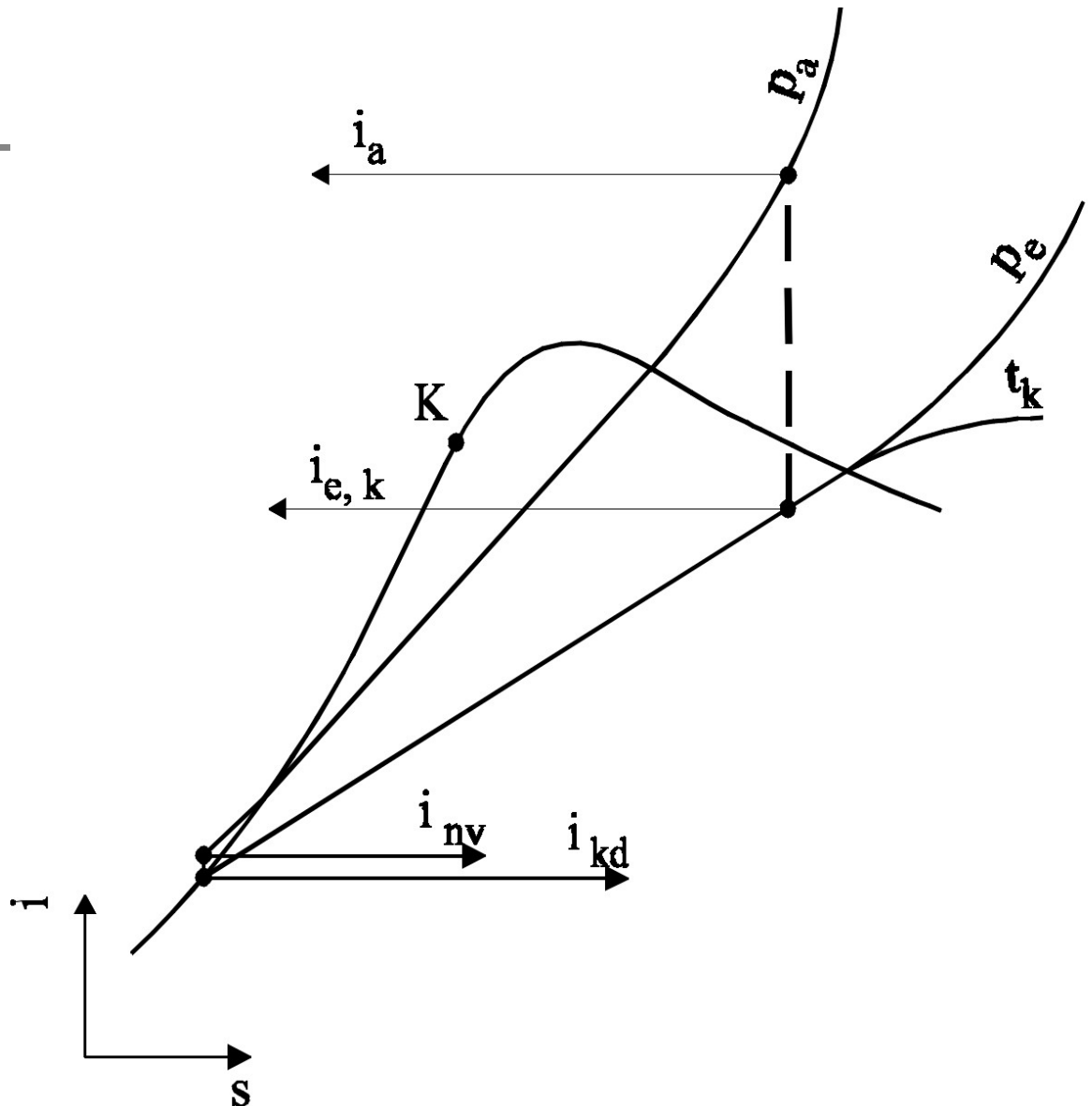
Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Vyšetření z diagramu

i-S:

$$l = (i_a - i_e)$$

$$\eta = \frac{l}{i_a - i_{kd}}$$



Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

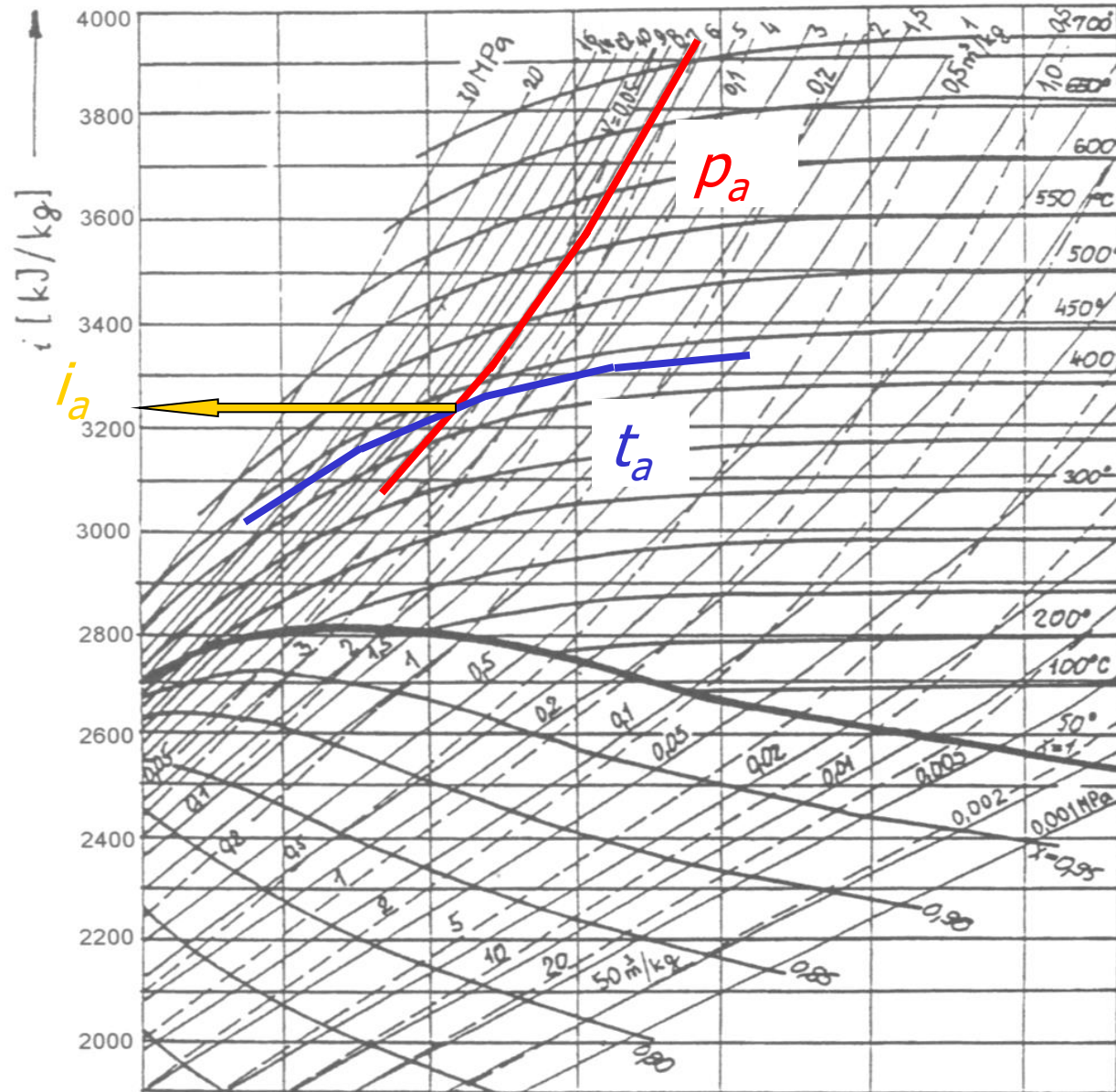
Výpočet
z diagramu i-S:

$$p_a = 6.5 \text{ MPa},$$

$$t_a = 430^\circ\text{C}$$

\Rightarrow

$$i_a = 3245 \text{ kJ/kg}$$



Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Adiabatická expanze v turbíně:

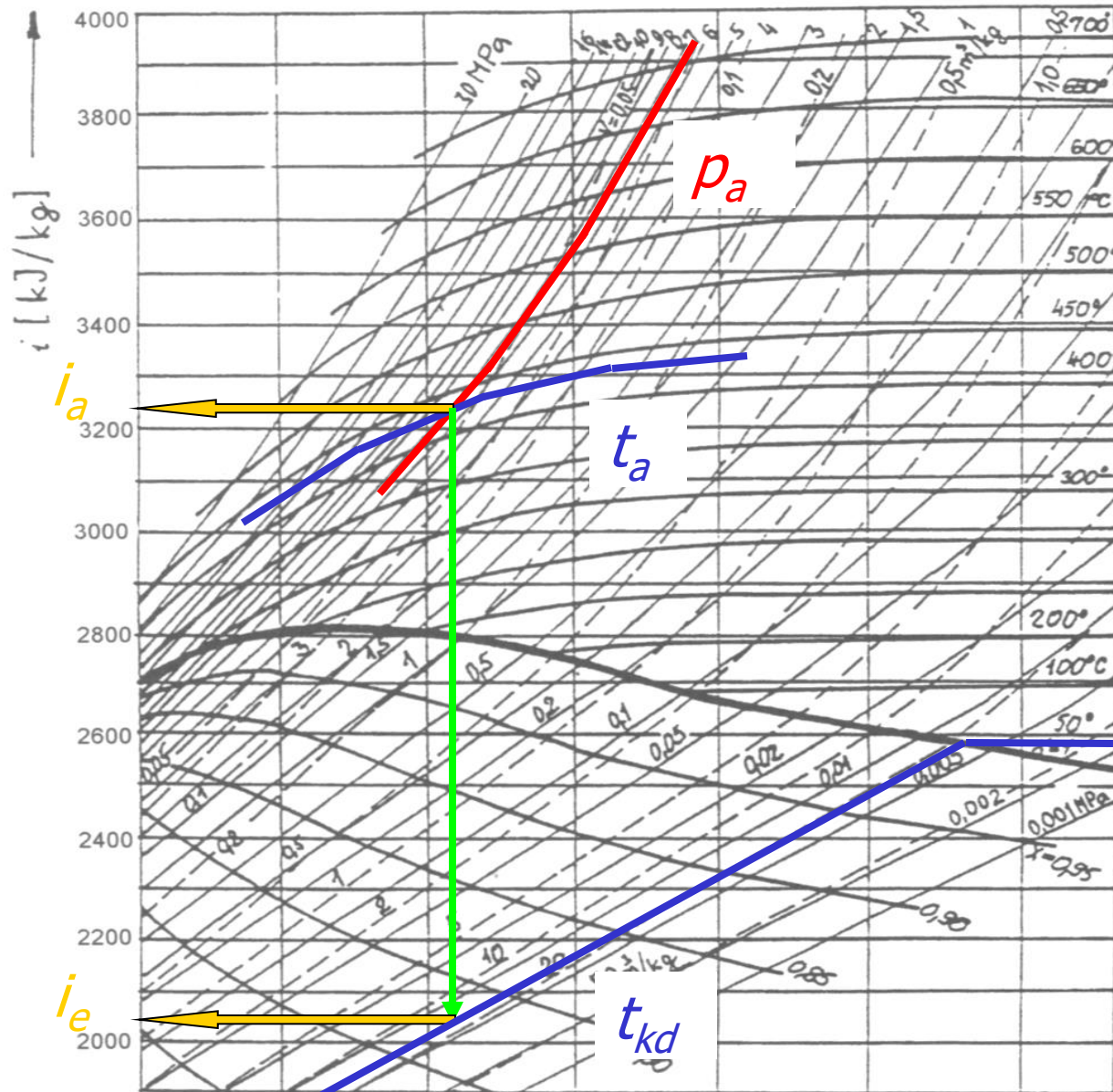
$$t_{kd} = 37^{\circ}\text{C} \Rightarrow$$

$$p_e = 6.4 \text{ kPa}$$

$$i_e = 2040 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{ad} = i_a - i_e$$

$$h_{ad} = 1205 \text{ kJ/kg}$$



Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Parametry
kondenzátu:

$$i_{kd} = t_{kd} \cdot c_p =$$

$$i_{kd} = 37 \cdot 4.1868 \text{ kJ / kg}$$

$$i_{kd} = 154.9 \text{ kJ / kg}$$

$$\eta = \frac{h_{ad}}{i_a - i_{kd}}$$

$$\eta = \frac{1205}{3245 - 154.9} = 0.39$$

