



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI



Termodynamika pro +EE1 a PEE

2021

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.



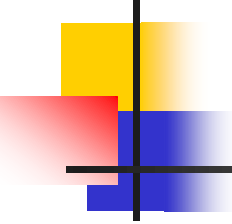
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
ELEKTROENERGETIKY

Literatura:

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

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

- 
-
- [0] **Zakladni pomocny text prednasek doc. Schejbala**
 - [1] **Pomocne texty ke cviceni**
 - [2] **Prednaska - Zaklady vyroby a termodynamiky**
 - [3] **Prednaska - Zaklady vyroby a termodynamiky - Doplnek - Ucininnost tepelne elektrarny**
 - [4] **Prednaska - Technologie vyroby v elektrarnach**
 - [5] **Otazky v zkusebnim elektronickem testu (toto je temer kompletni seznam)**
 - [6] **Caste otazky u ustni zkousky (toto neni pochopitelne vycerpavajici seznam)**
 - [7] **Adresar vseh techto vyse uvedenych a dalsich podpornych souboru pro predmety EE1 a PEE**



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, ...

Možné způsoby výroby elektrické energie v současnosti:

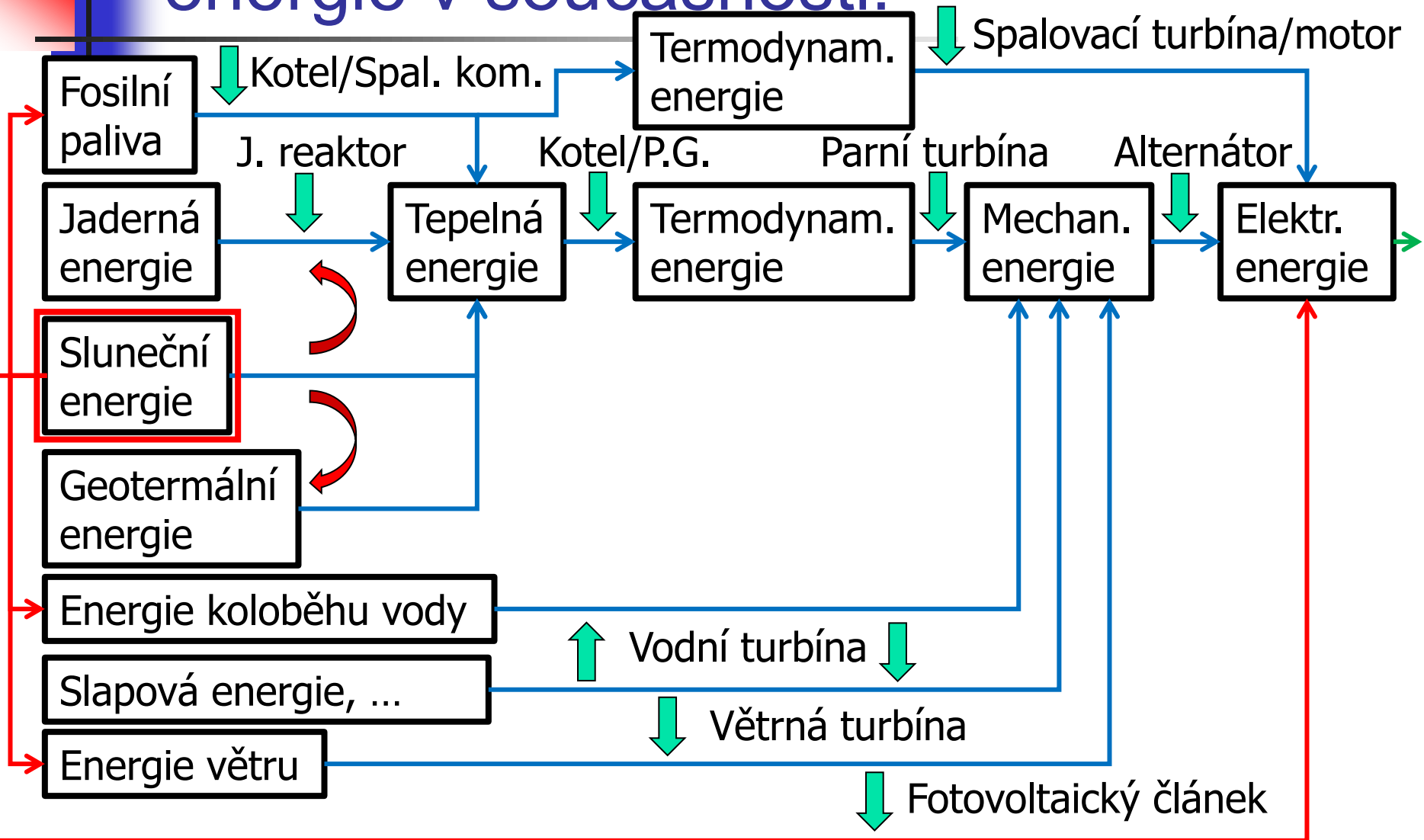
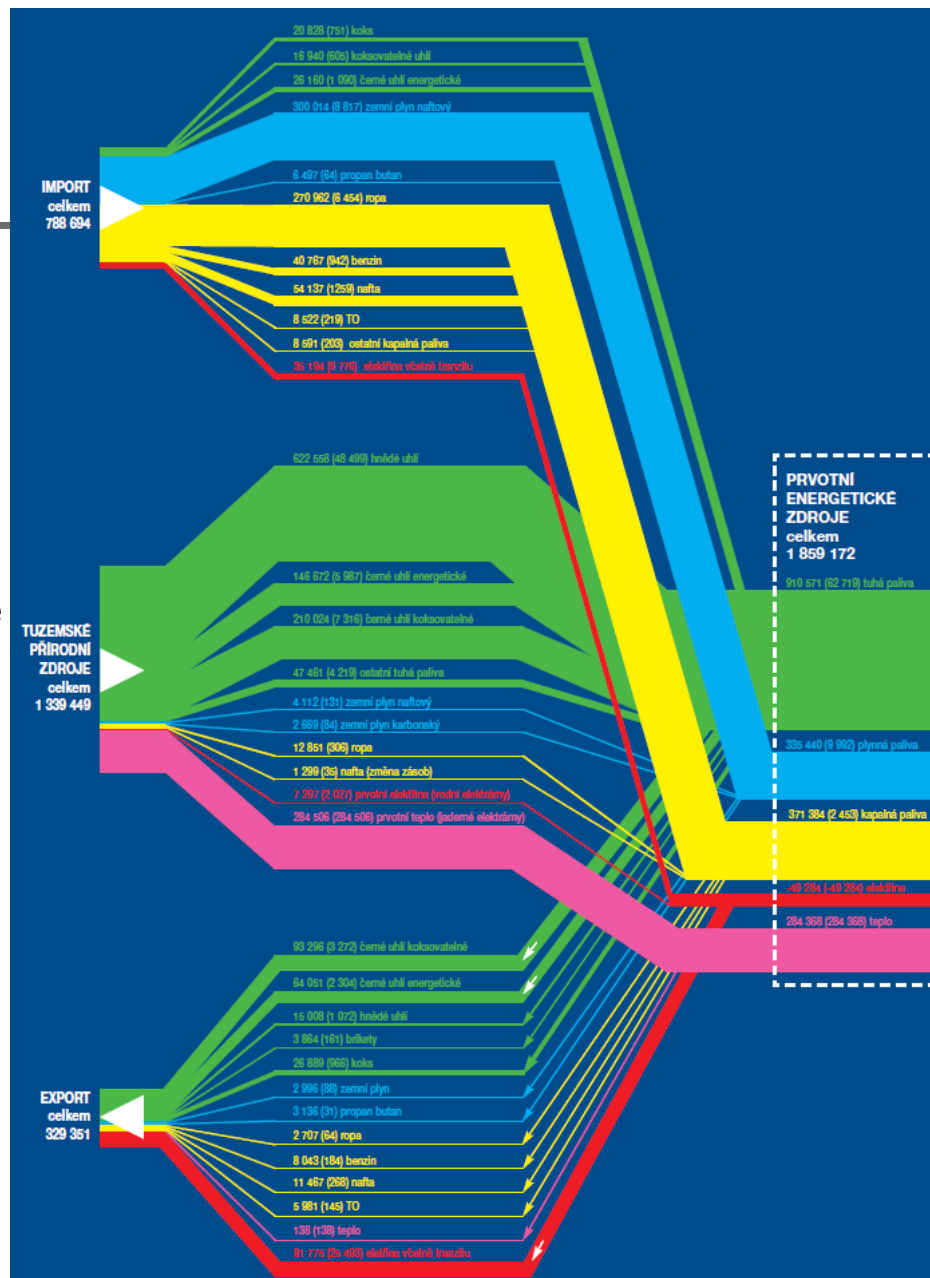


Diagram energetických toků v ČR:

Import

Tuzemské
přírodní
zdroje

Export



Tuhá paliva

Plynná paliva

Kapalná paliva

Elektřina

Teplo (z JE)

Zušlechťování

PRVOTNÍ
ENERGETICKÉ
ZDROJE
celkem
1 859 172

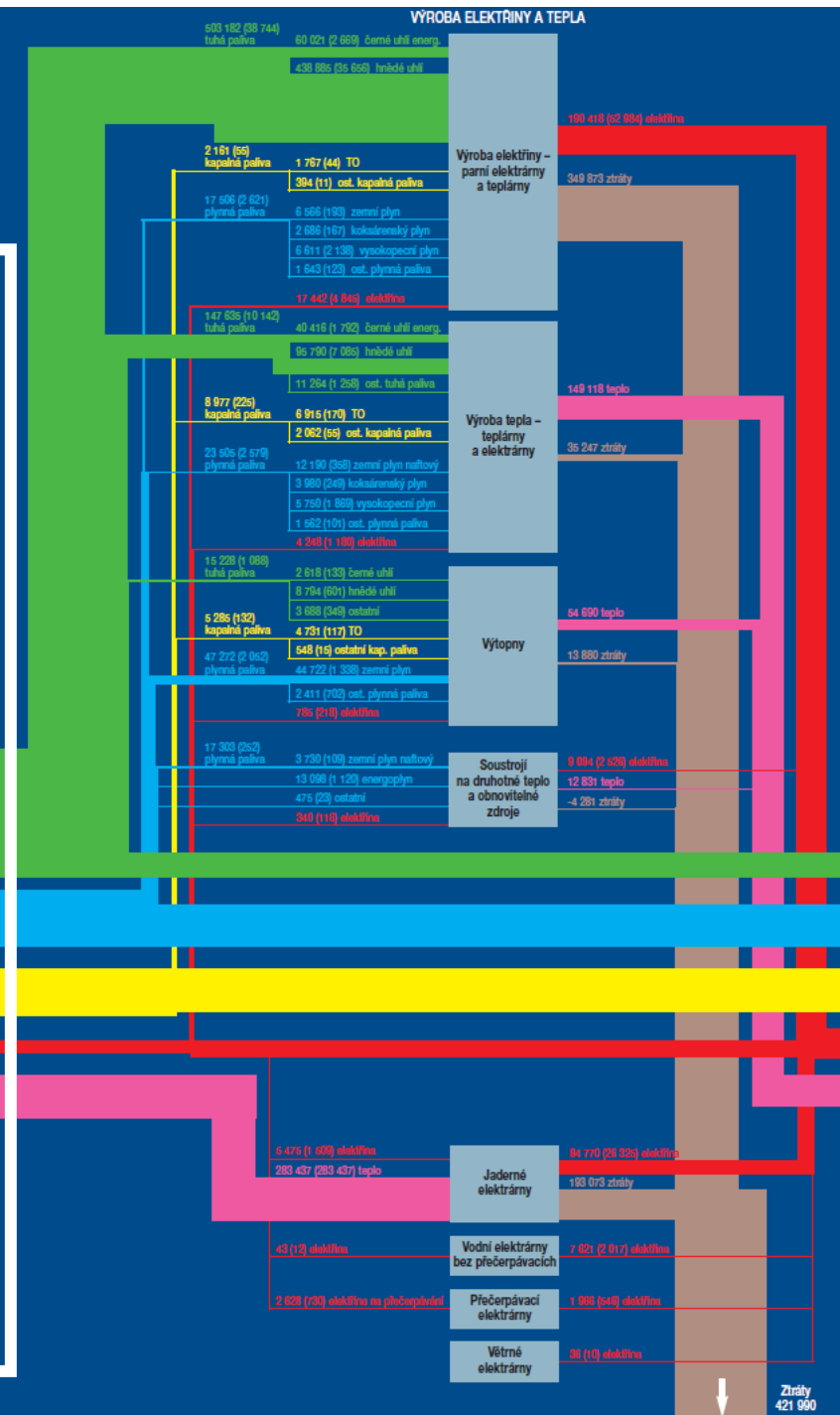
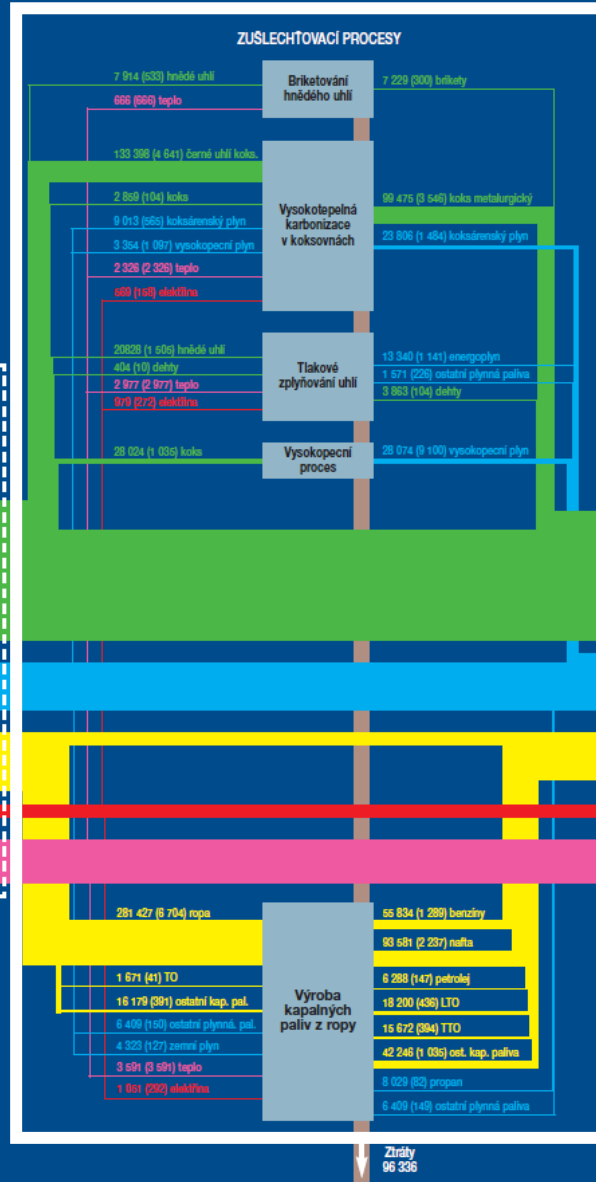
Tuhá paliva

Plynná paliva

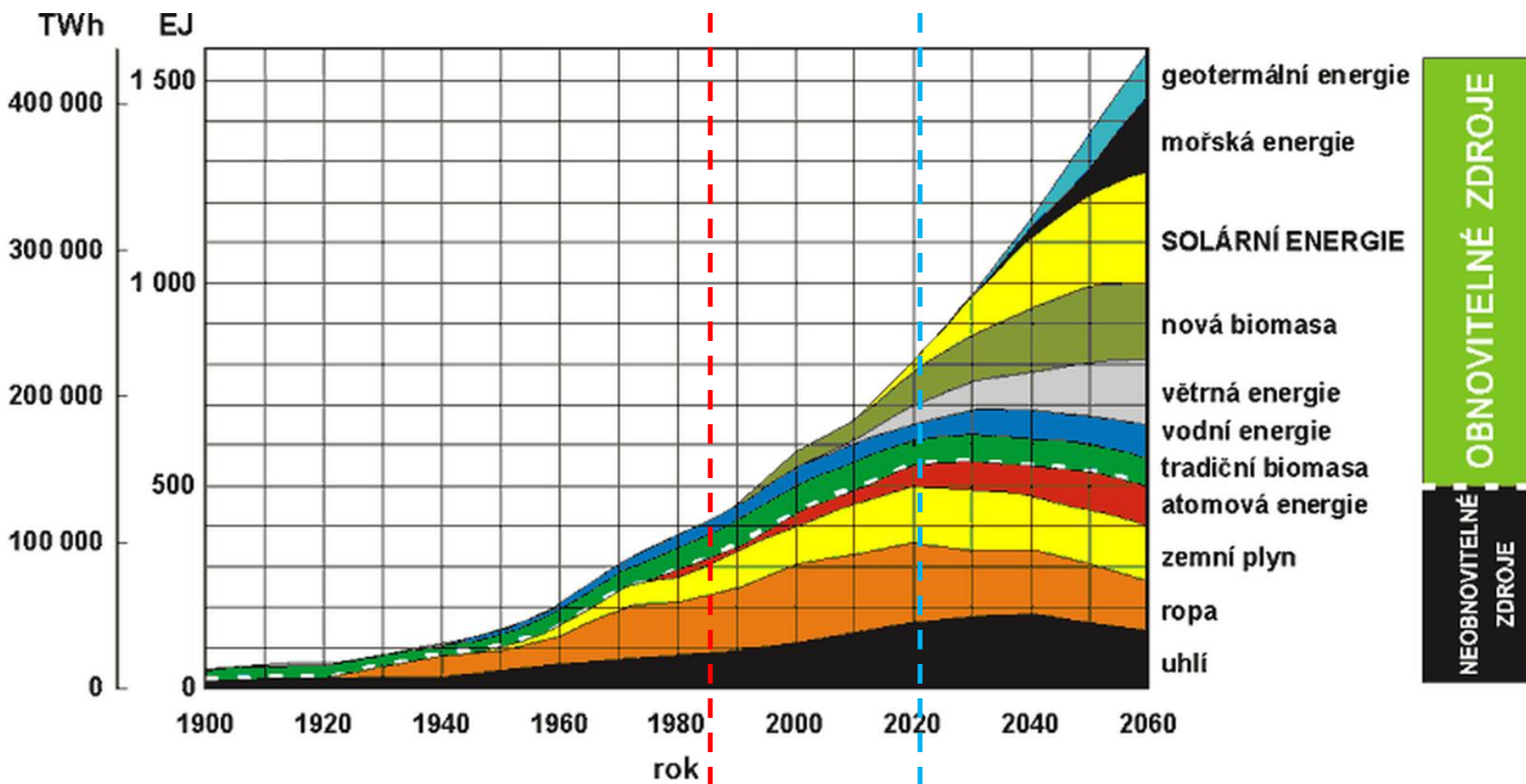
Kapalná paliva

Elektřina

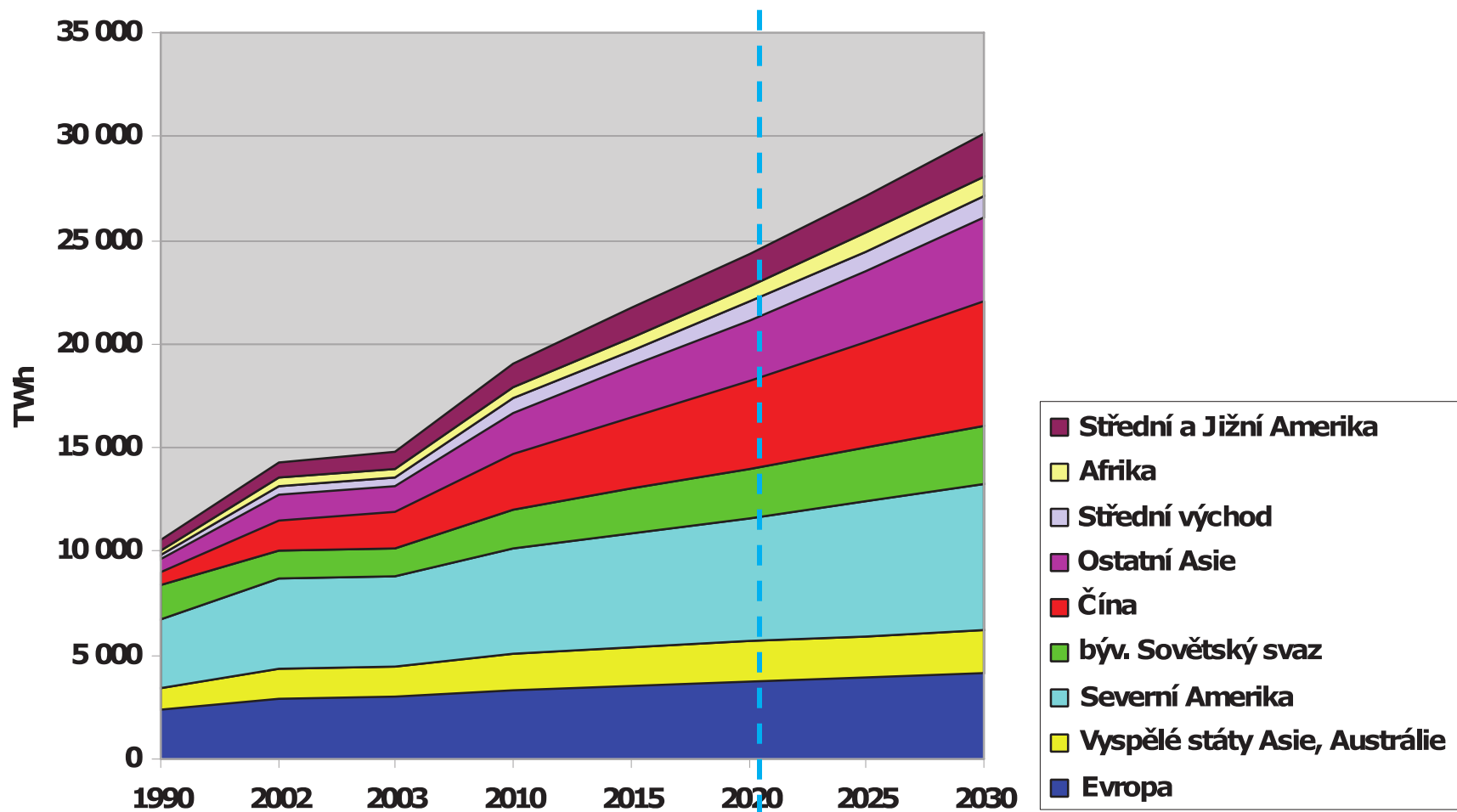
Teplo (z JE)



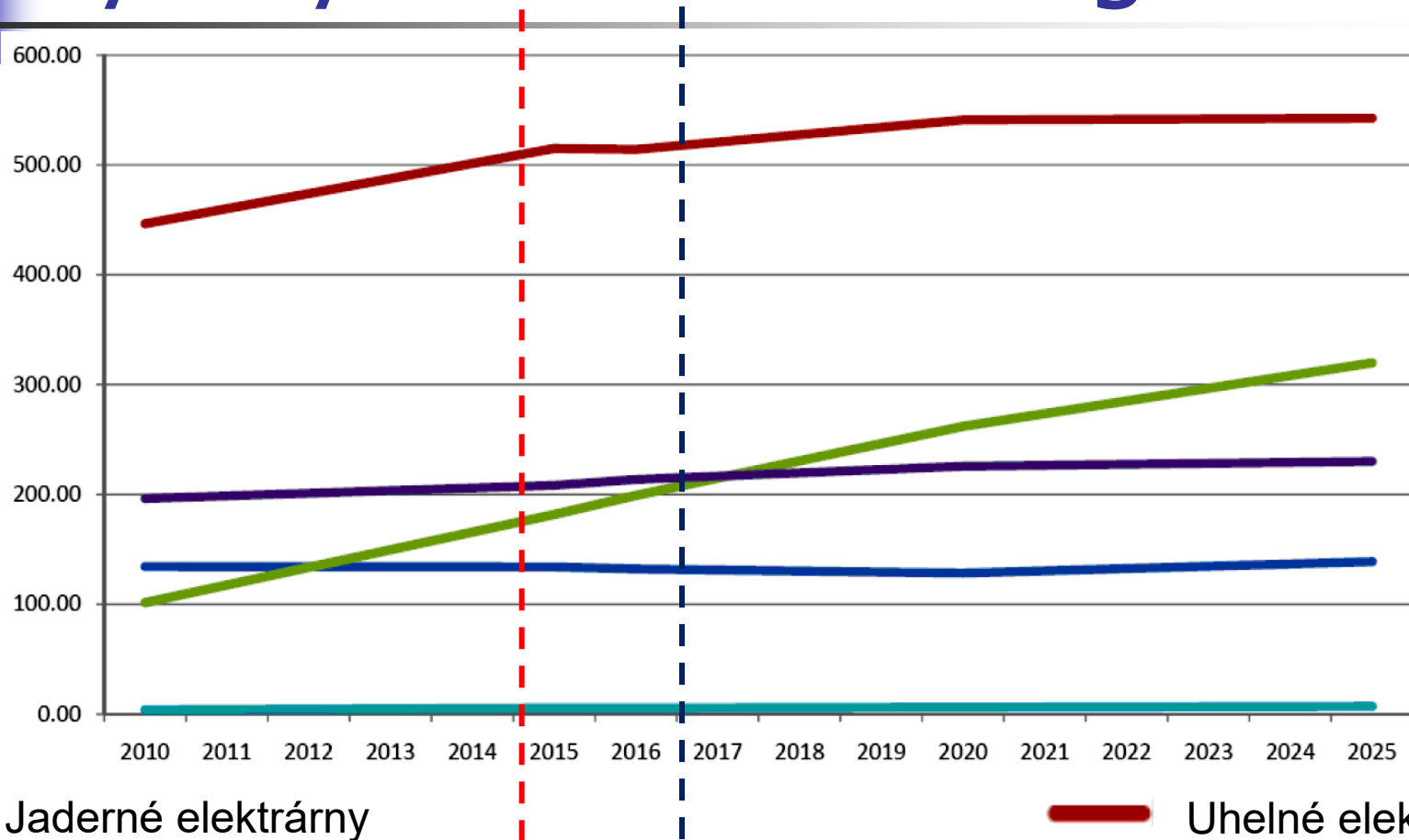
Předpoklad světového vývoje výroby elektrické energie:



Předpoklad světového vývoje výroby elektrické energie:

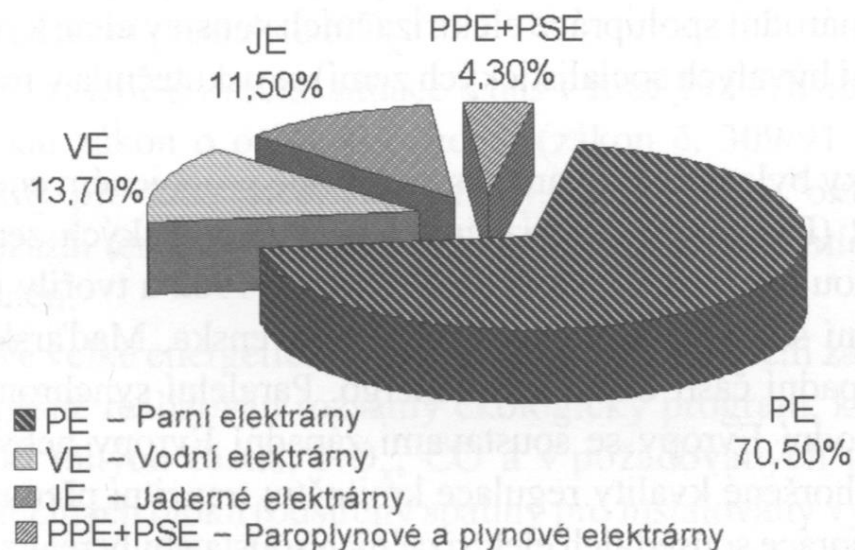


Předpoklad Evropského vývoje výroby elektrické energie:

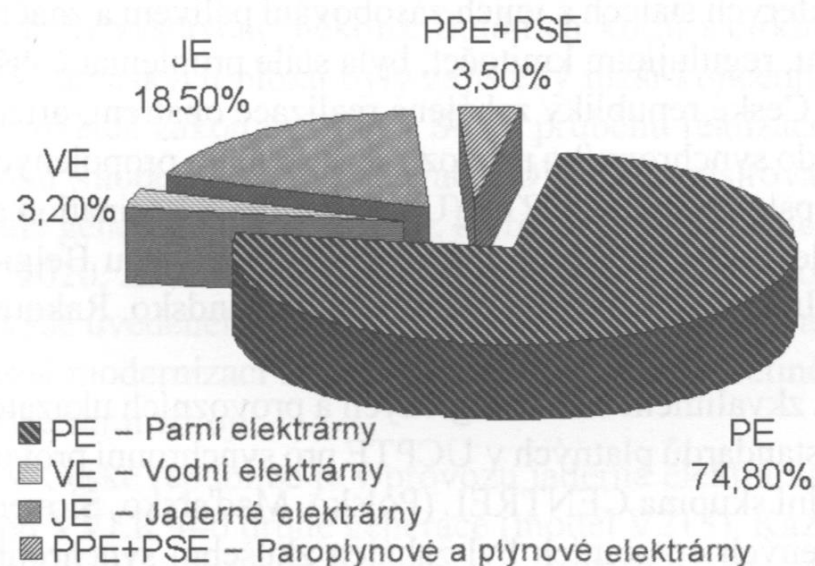


- Jaderné elektrárny
- Obnovitelné zdroje kromě vodních
- Ostatní zdroje
- Uhelné elektrárny
- Vodní elektrárny

Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:



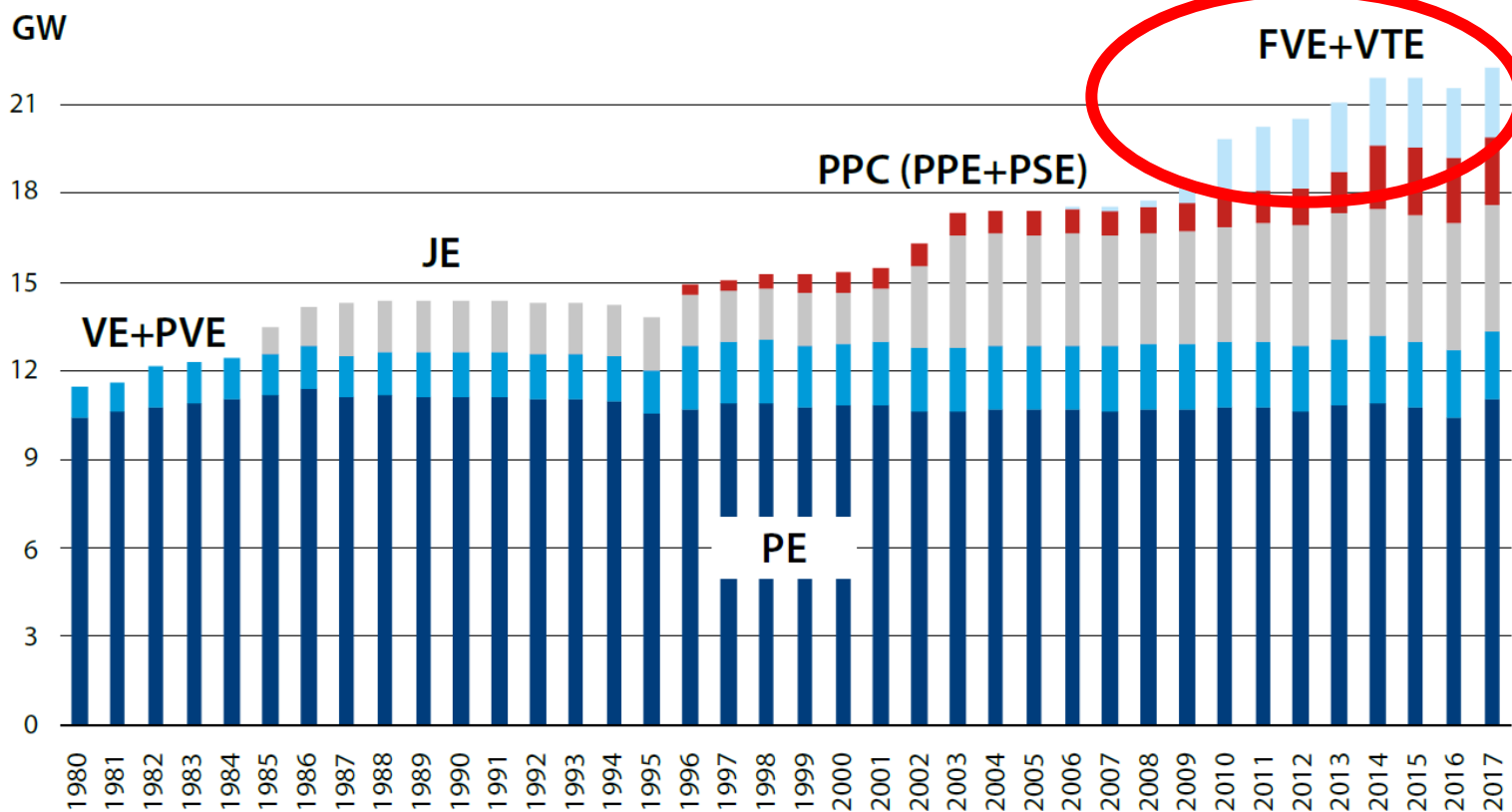
Instalovaný výkon



Vyrobená energie

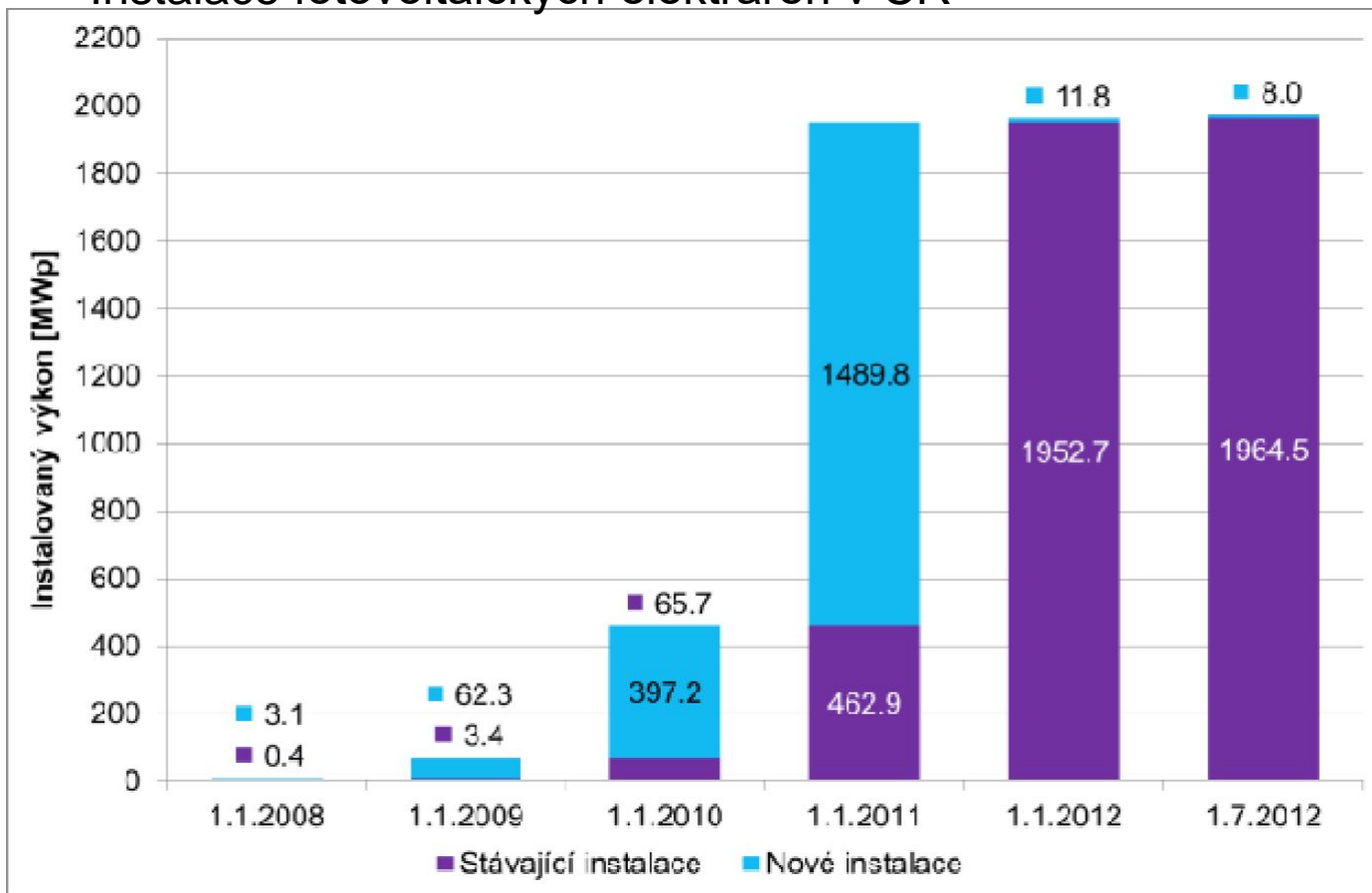
Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

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

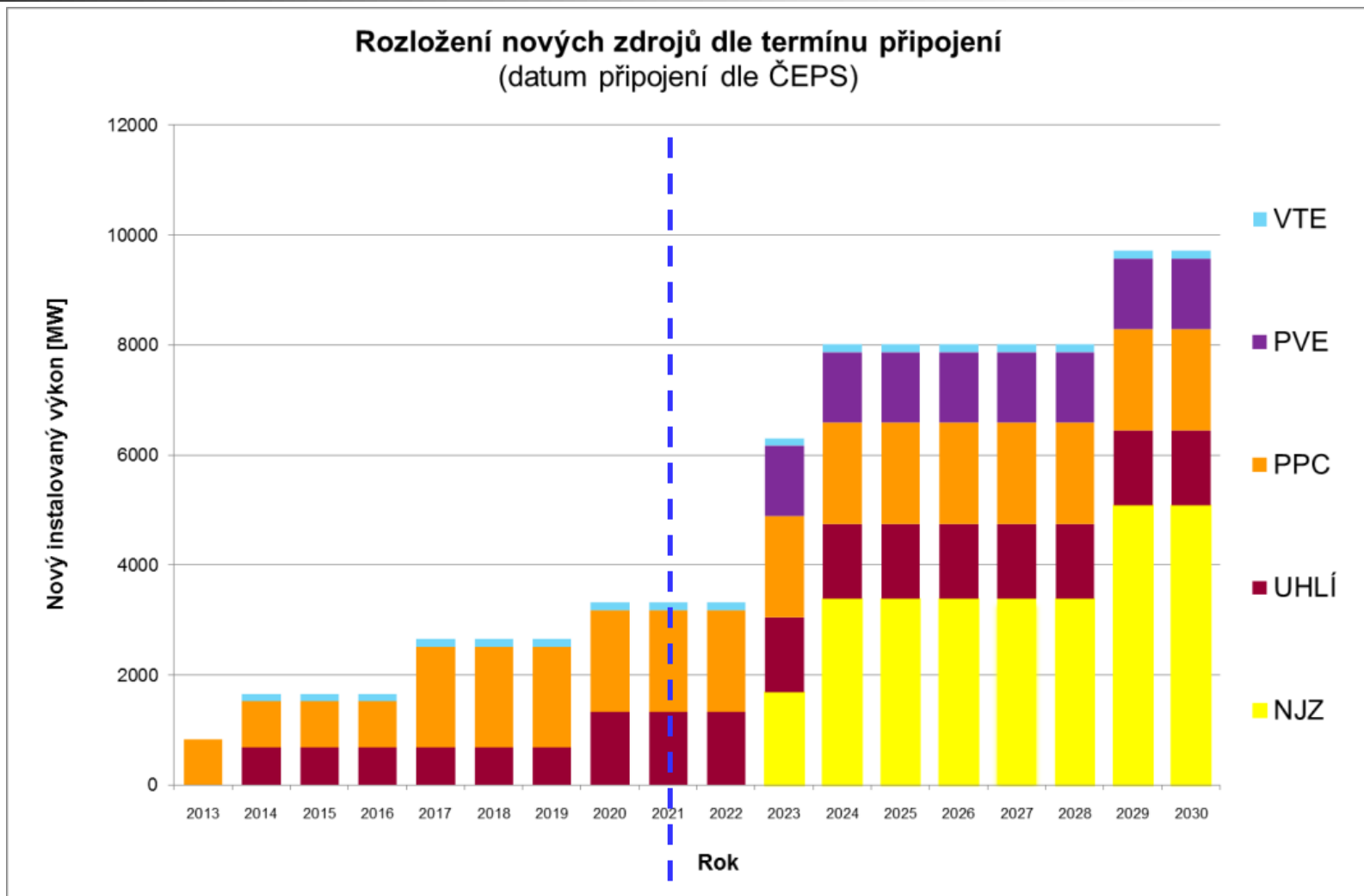


Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

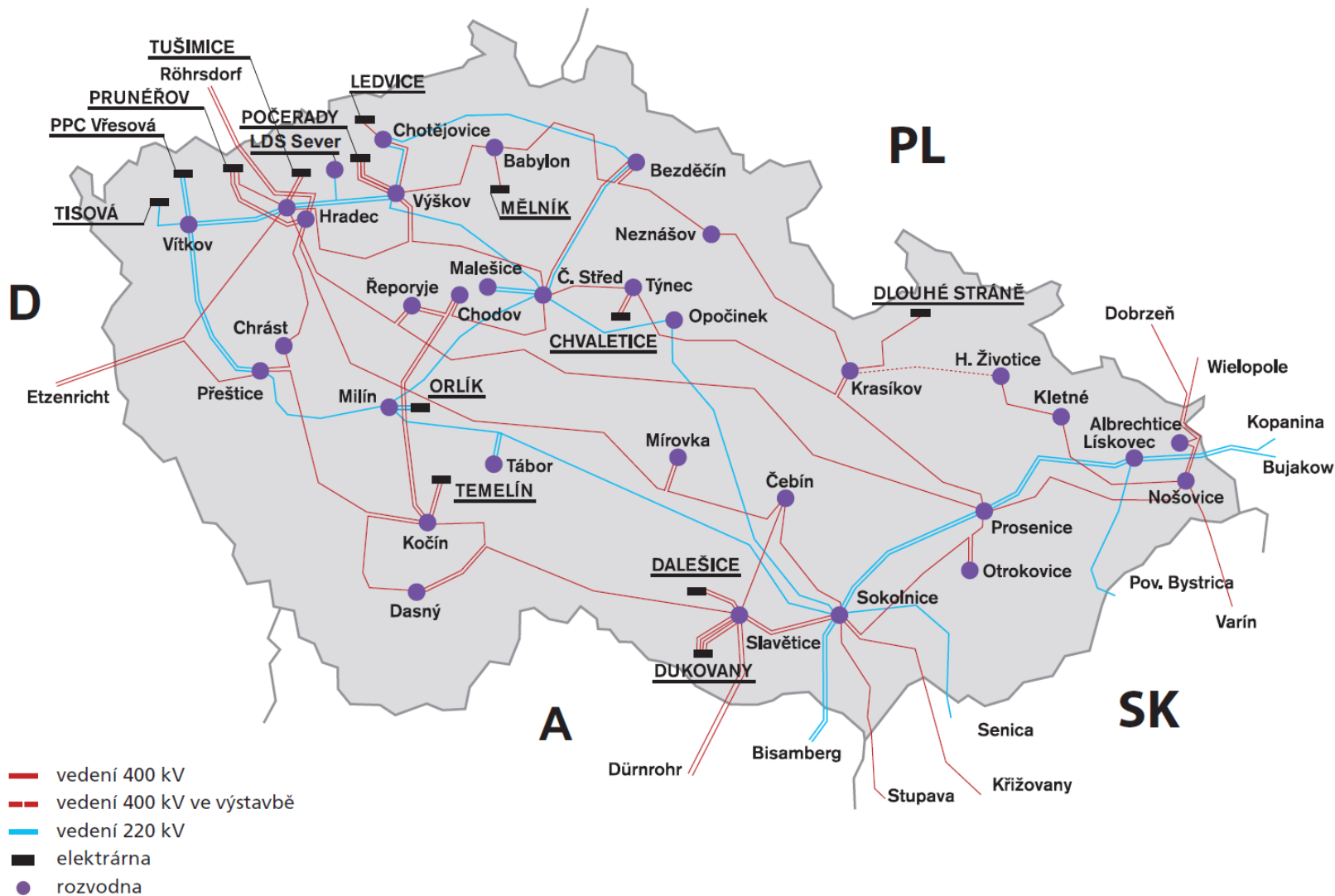
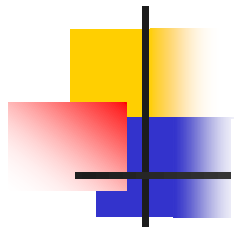
Instalace fotovoltaických elektráren v ČR



Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:



Struktura sítí v ČR:



Struktura sítí v ČR:

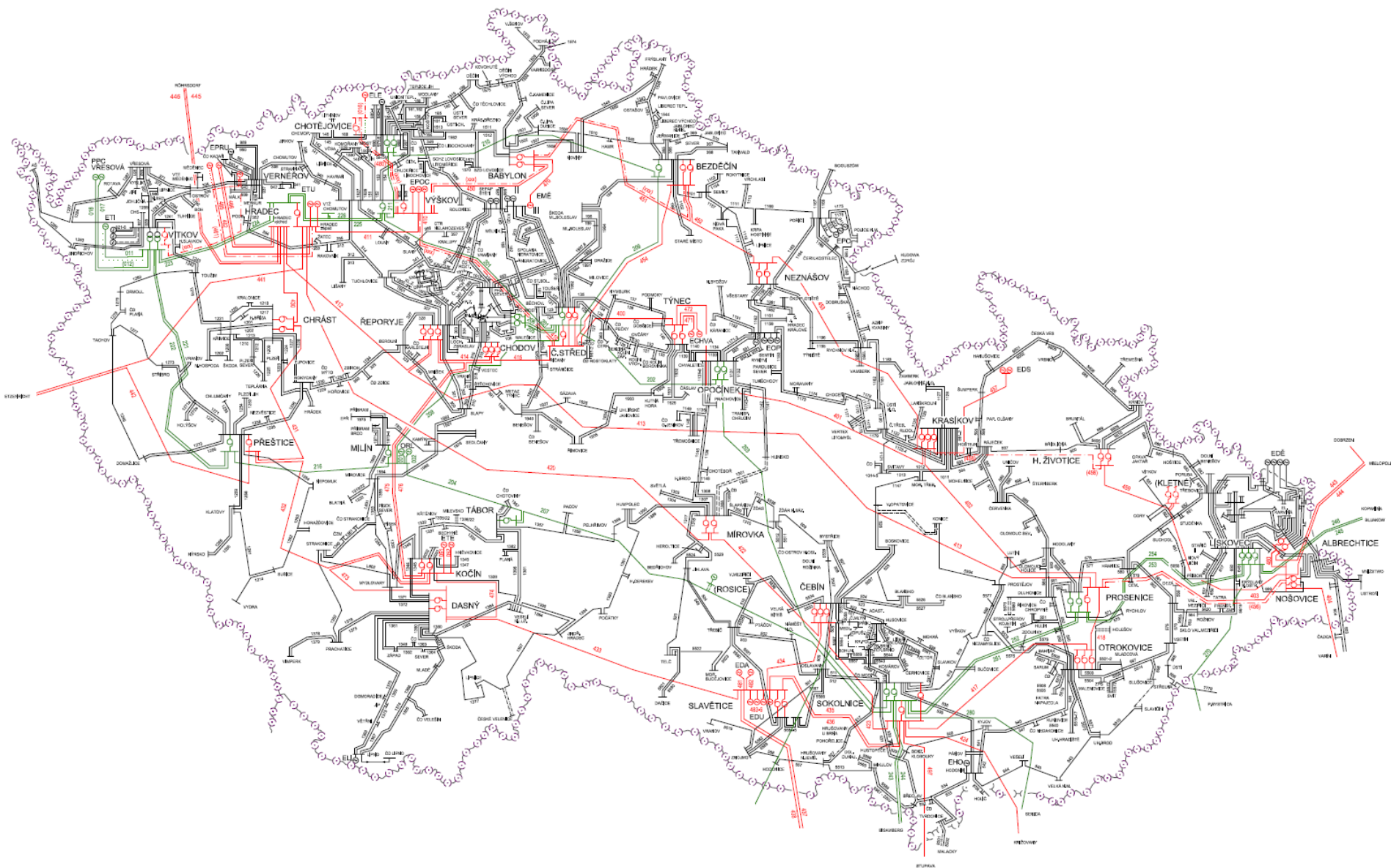


Schéma sítí ES ČR

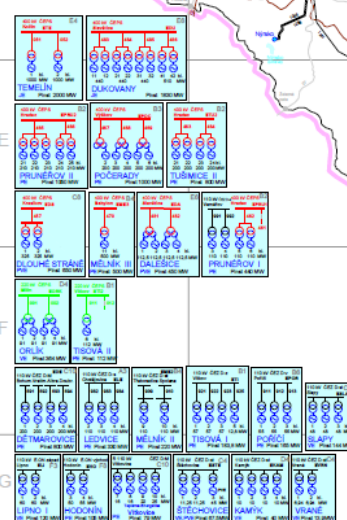
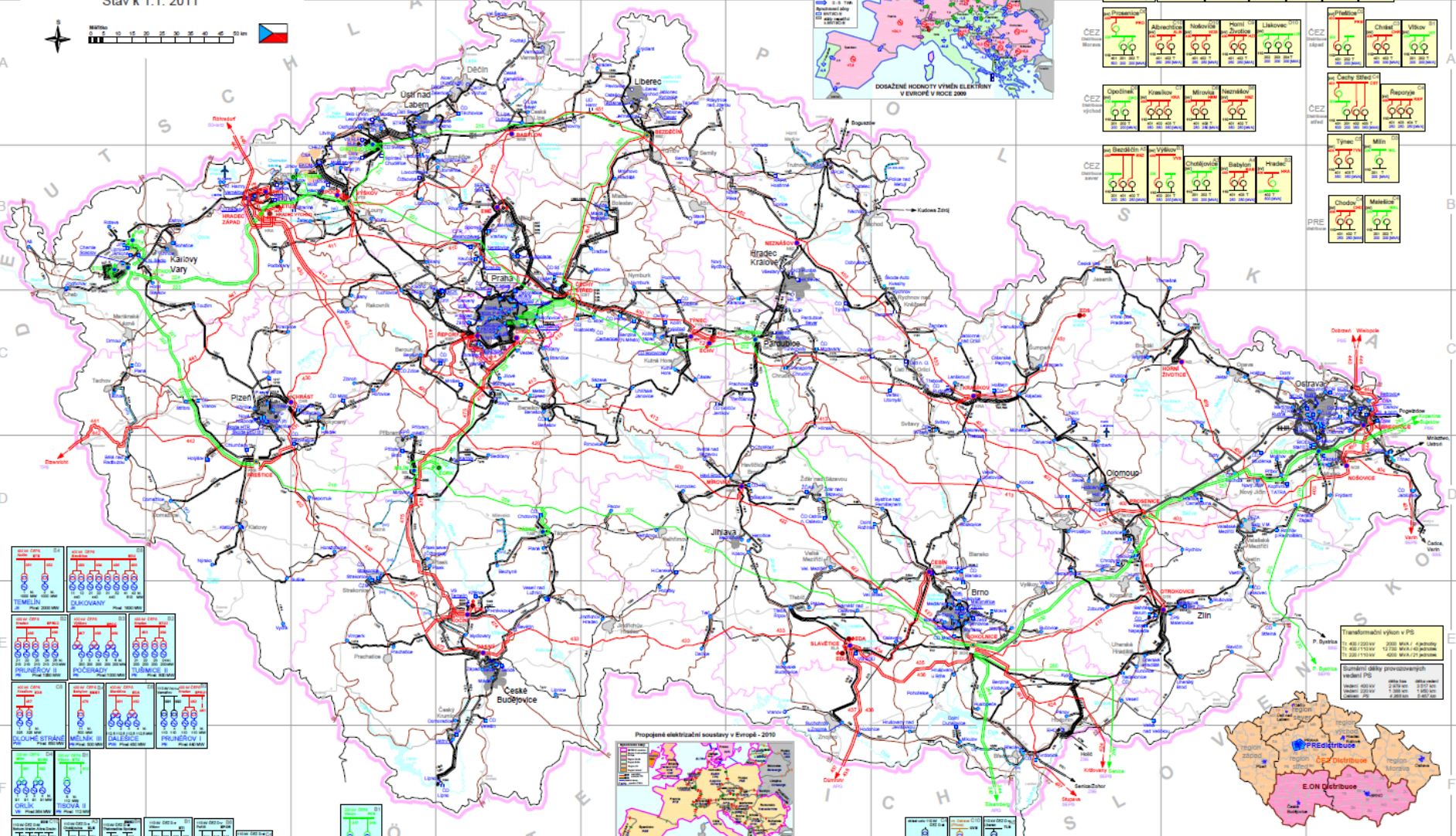
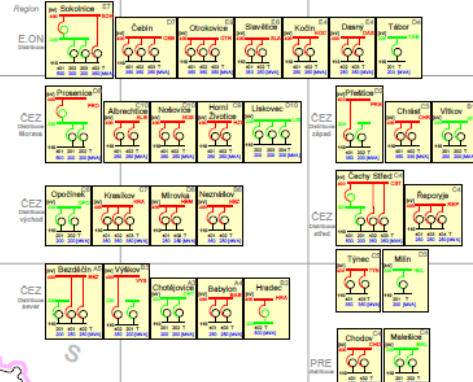
PS 400, 220 kV DS 110 kV
Stav k 1.1. 2011



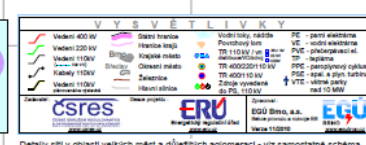
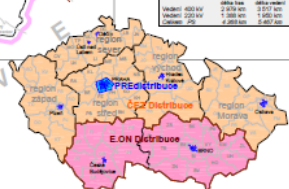
EXPORTY, IMPORTY A FYZIKÁLNÍ TOKY MEZI ES EVROPY



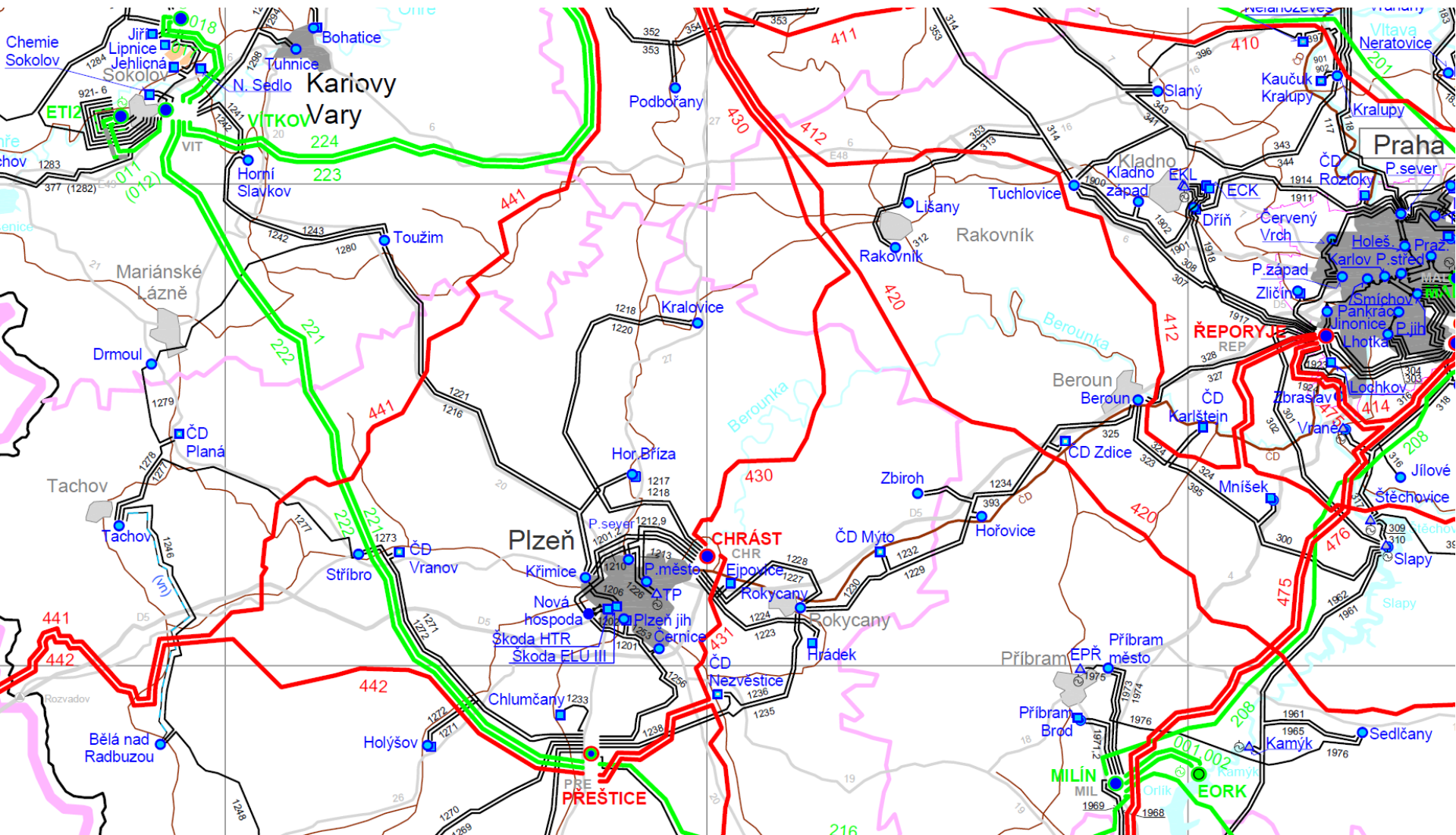
TRANSFORMACE 400/220, 400/110 a 220/110 kV (ČEPS, a.s.)



VYVEDENÍ, SKLADBA ZDROJŮ DO PS a 110 kV (BEZ ZAČOVNÍCH ELEKTREMNŮ DO 110 kV)



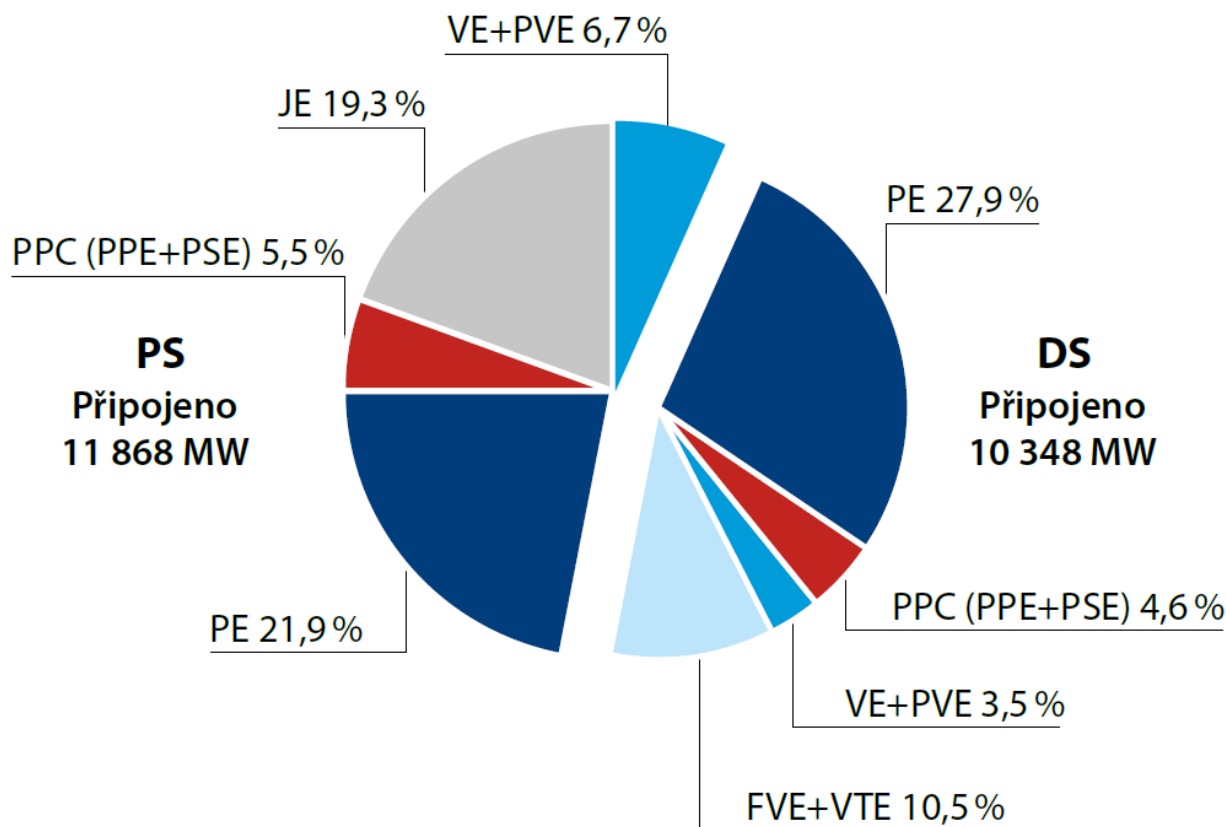
Struktura sítí v ČR:



Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

STRUKTURA INSTALOVANÉHO VÝKONU ELEKTRÁREN ČR

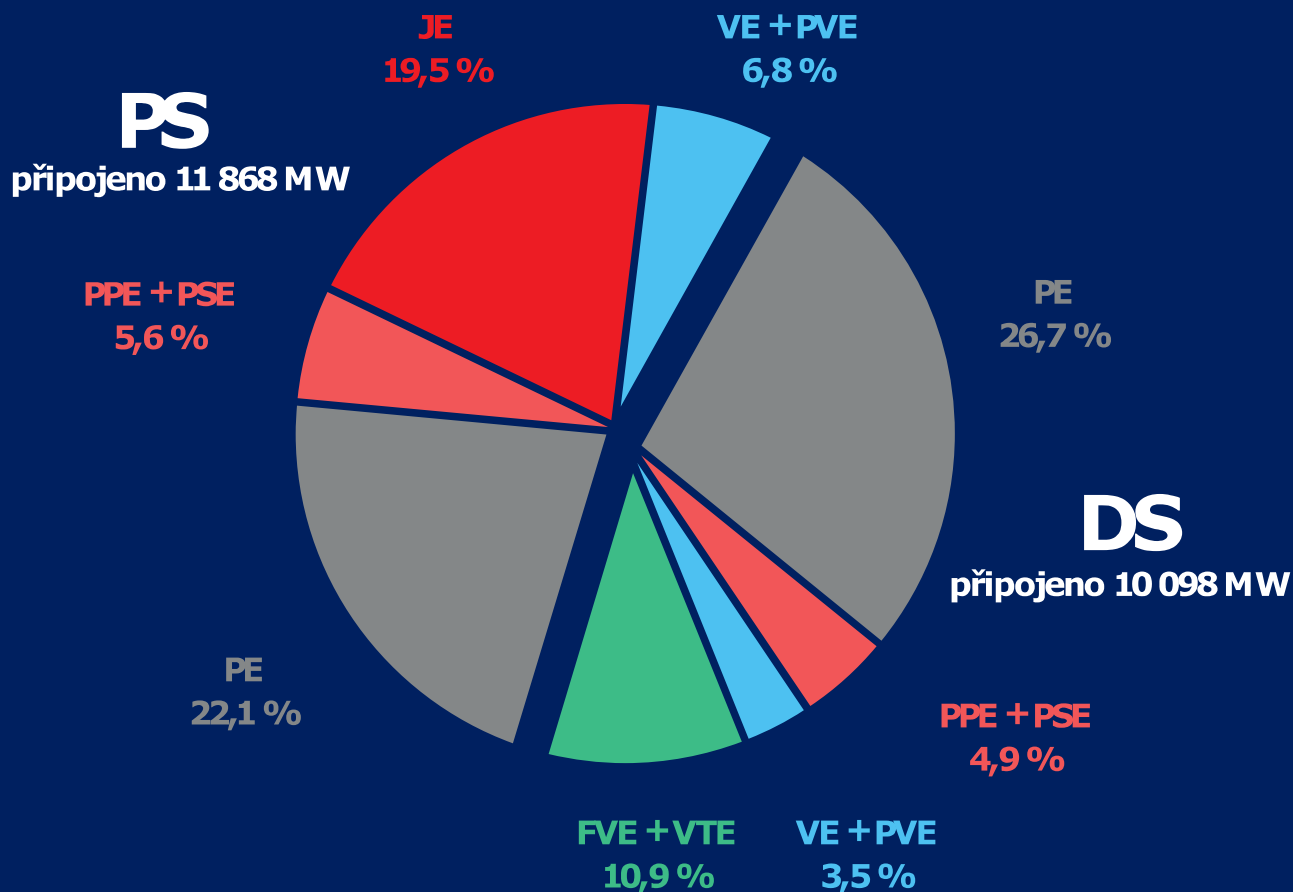
Celkový instalovaný výkon v ČR je 22 216 MW (brutto - k 31. 12. 2017)



Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

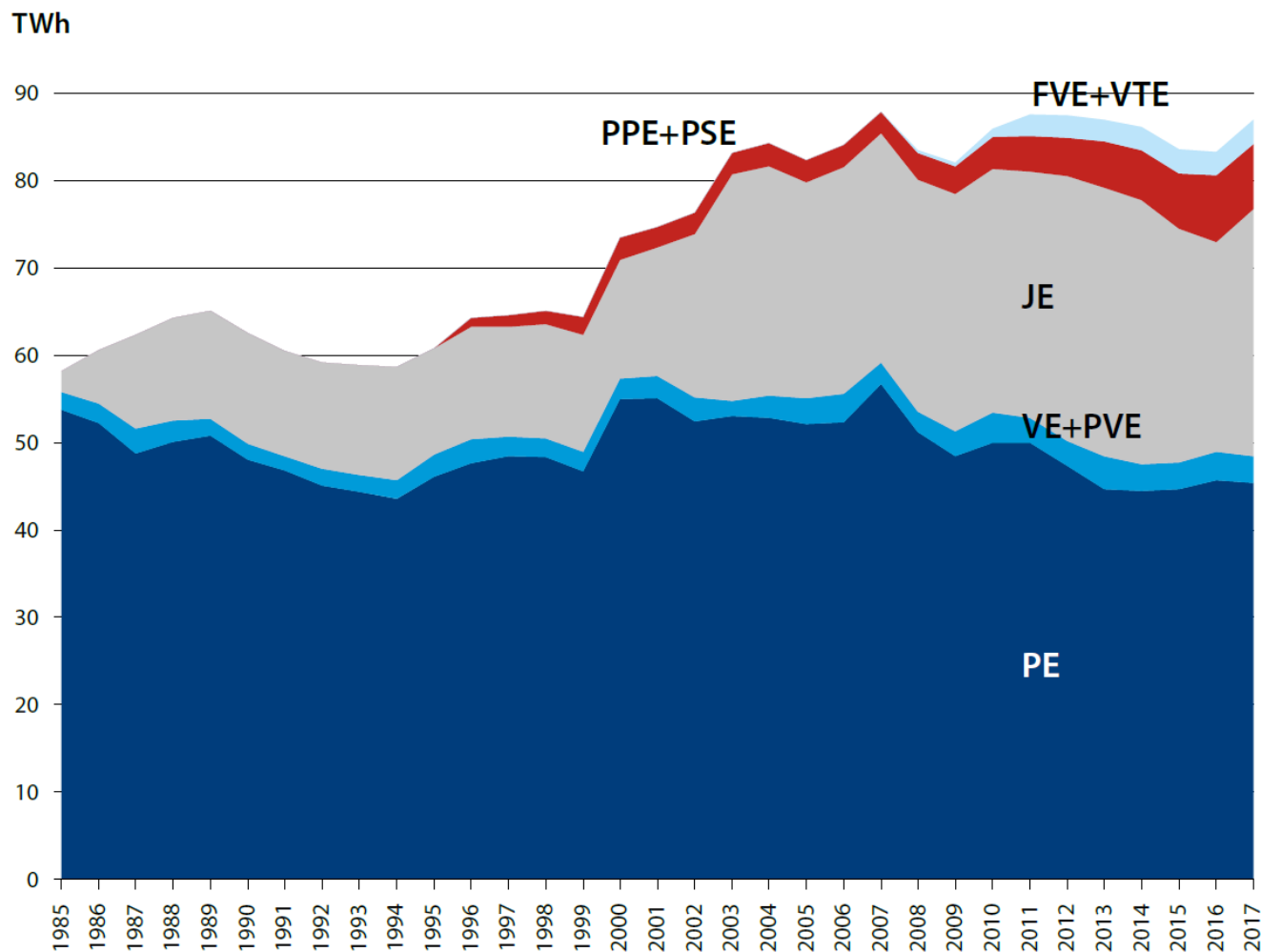
STRUKTURA INSTALOVANÉHO VÝKONU ELEKTRÁREN ČR

Celkový instalovaný výkon v ČR je 21 966 MW (brutto – k 31. 12. 2019)



Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

VÝVOJ BRUTTO VÝROBY OD ROKU 1985

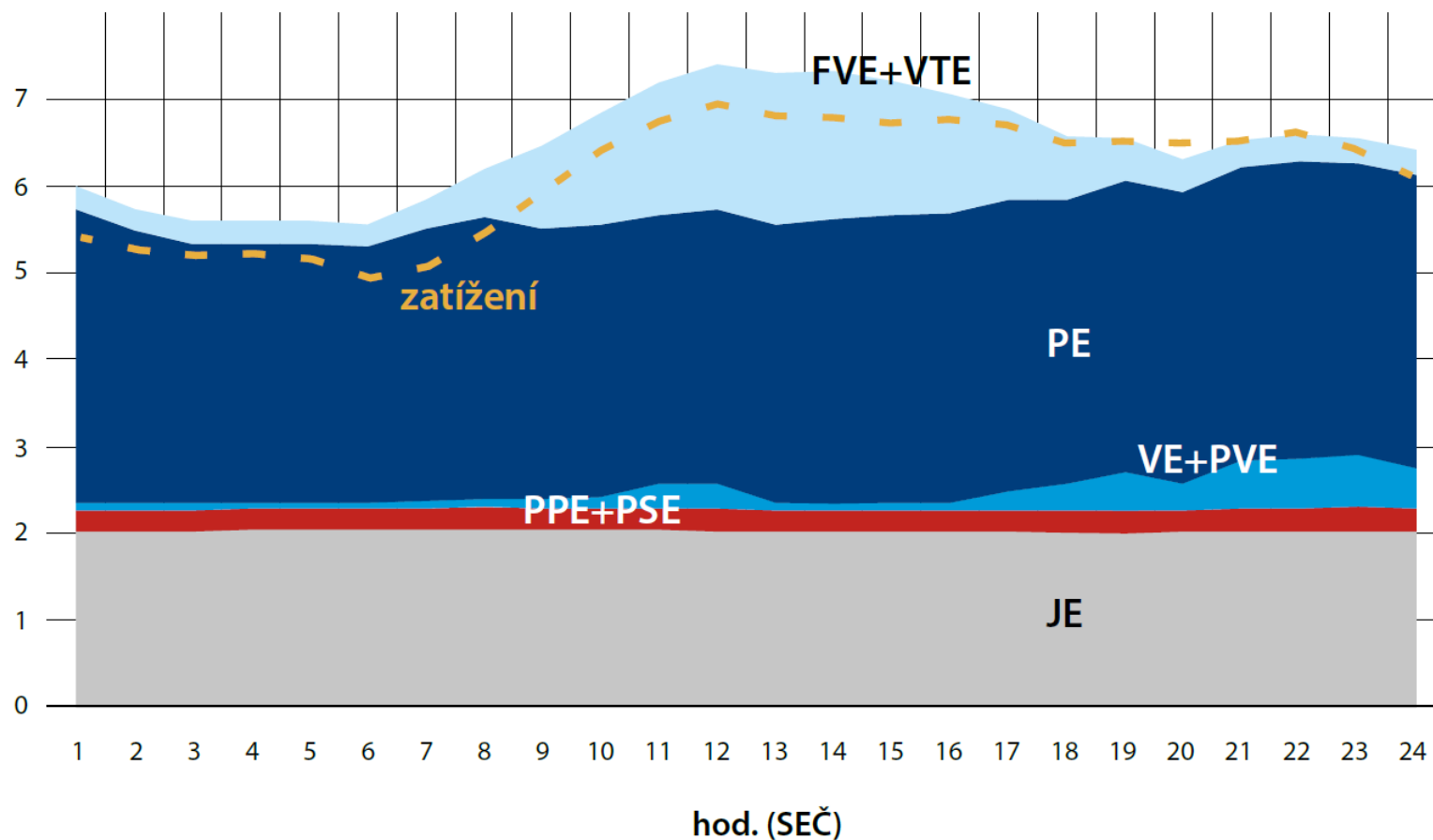


Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

BRUTTO VÝROBA A SPOTŘEBA V DEN ROČNÍHO MINIMA

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

GW

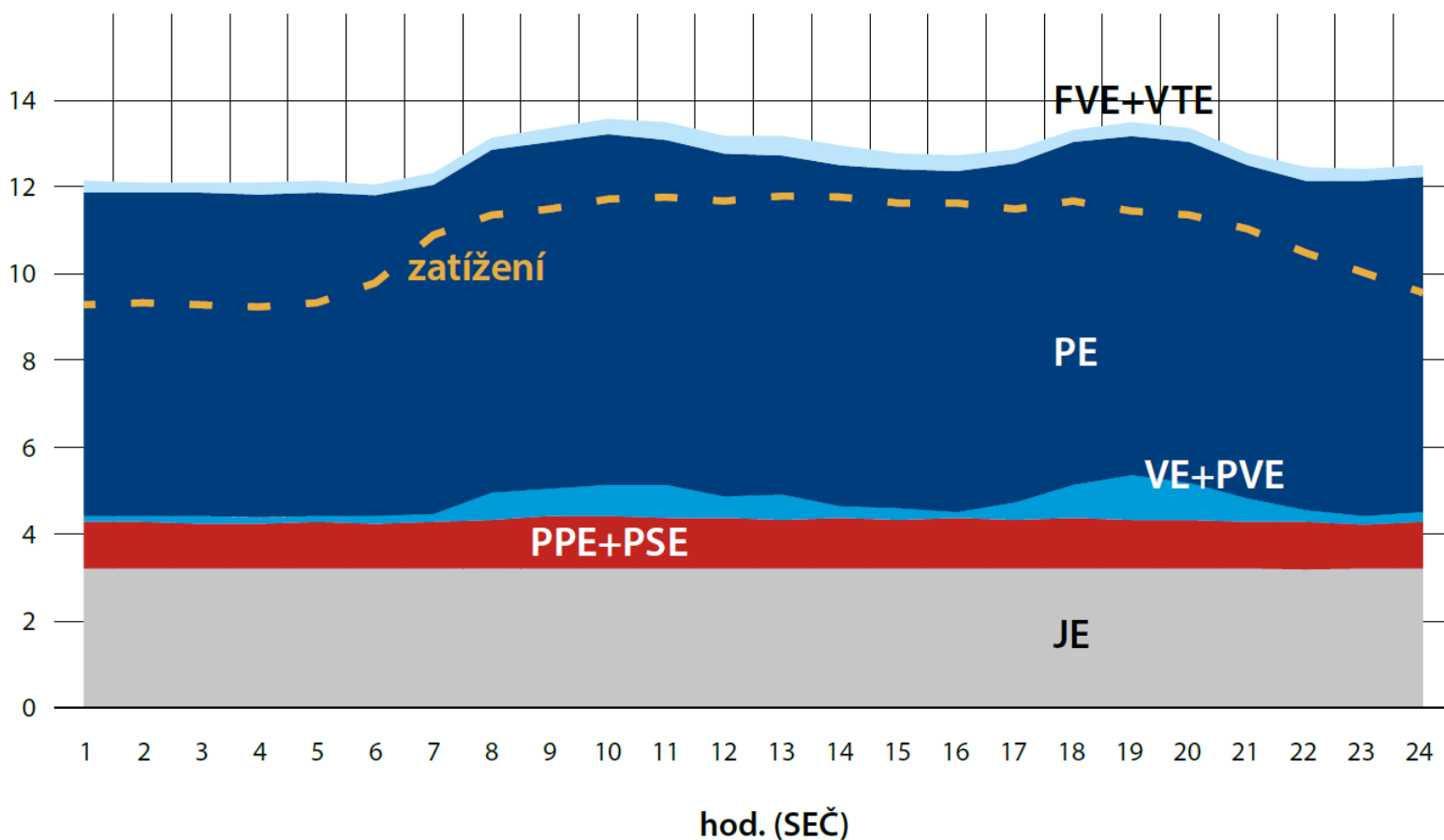


Struktura instalovaného výkonu a vyrobené energie v ČR:

BRUTTO VÝROBA A SPOTŘEBA V DEN ROČNÍHO MAXIMA

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

GW





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:

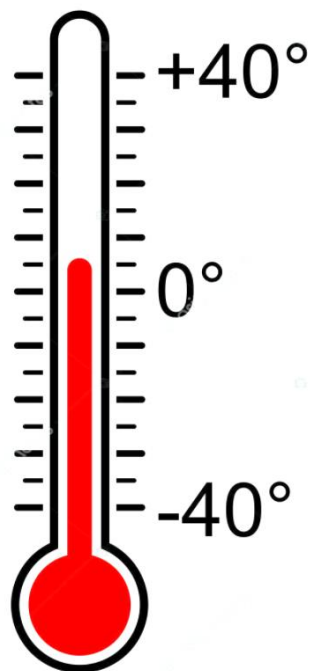


Termodynamika

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



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

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



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



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:

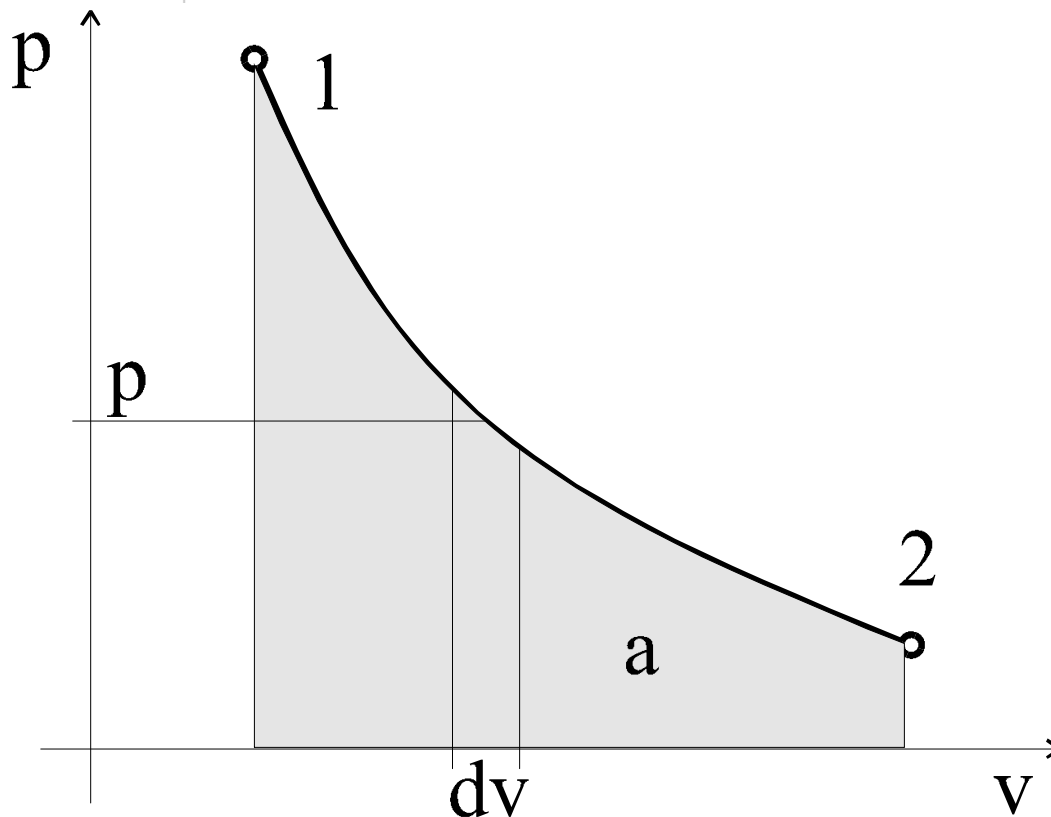
- **měrná tepelná kapacita**

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

voda při 20°C má $4.1818 \text{ kJ/kg/K} \approx 4,185 \text{ kJ/kg/K} = 1 \text{ kcal/kg/K}$

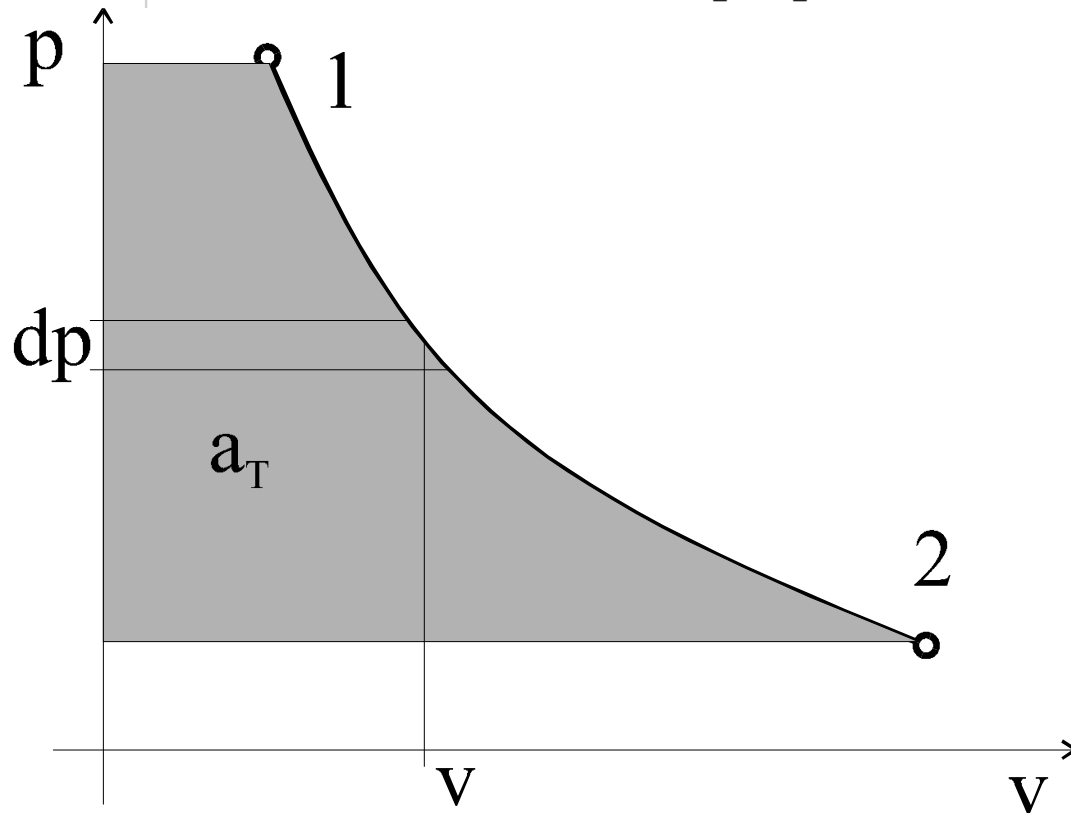
Základní termodynamické veličiny:

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



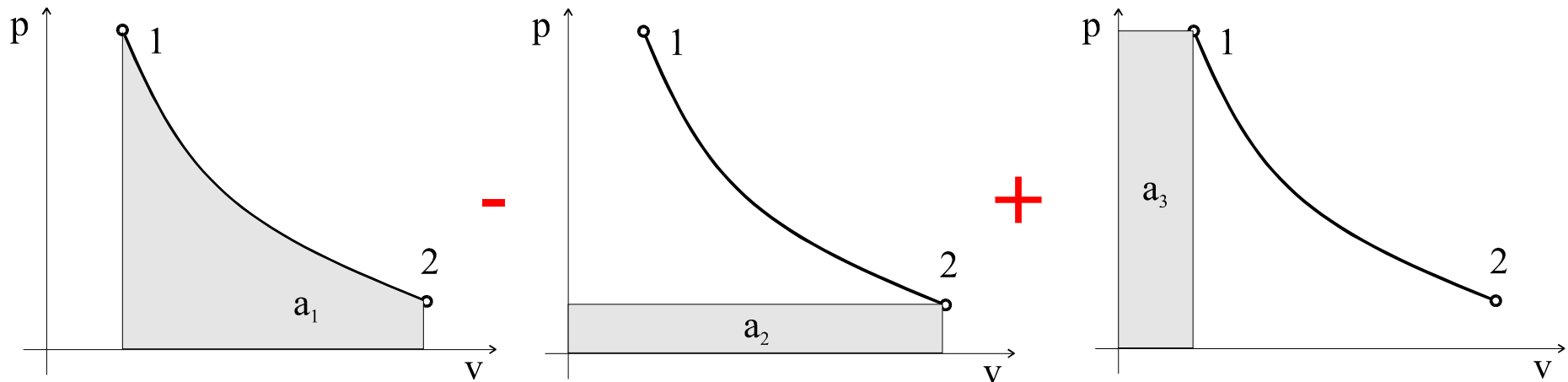
Základní termodynamické veličiny:

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

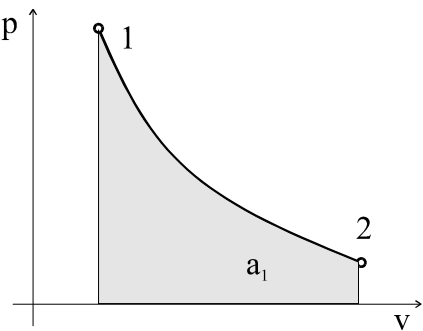


Základní termodynamické veličiny:

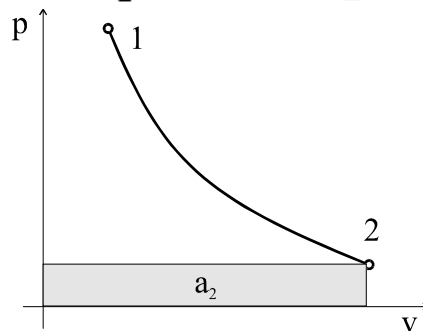
- technická práce**

práce vykonaná plynem v pracovním cyklu

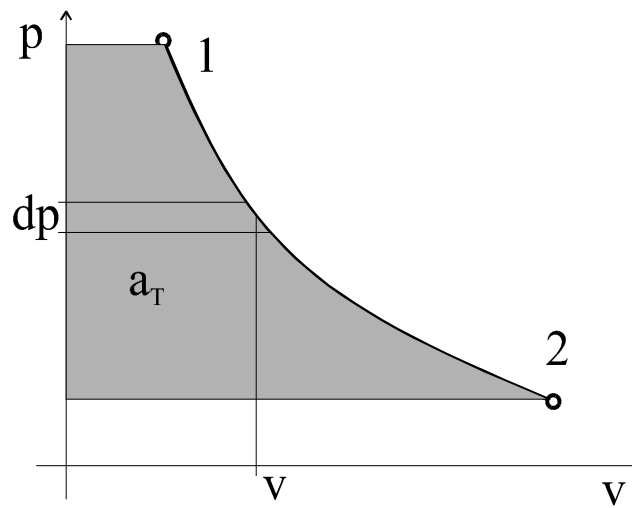
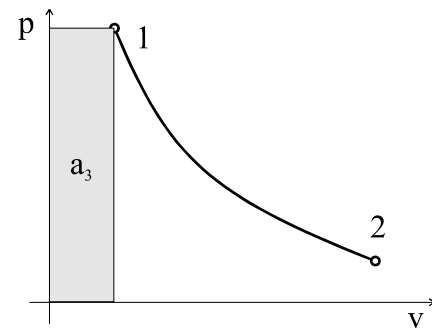
$$da_T = dl_T = -v \cdot dp \quad [kJ]$$



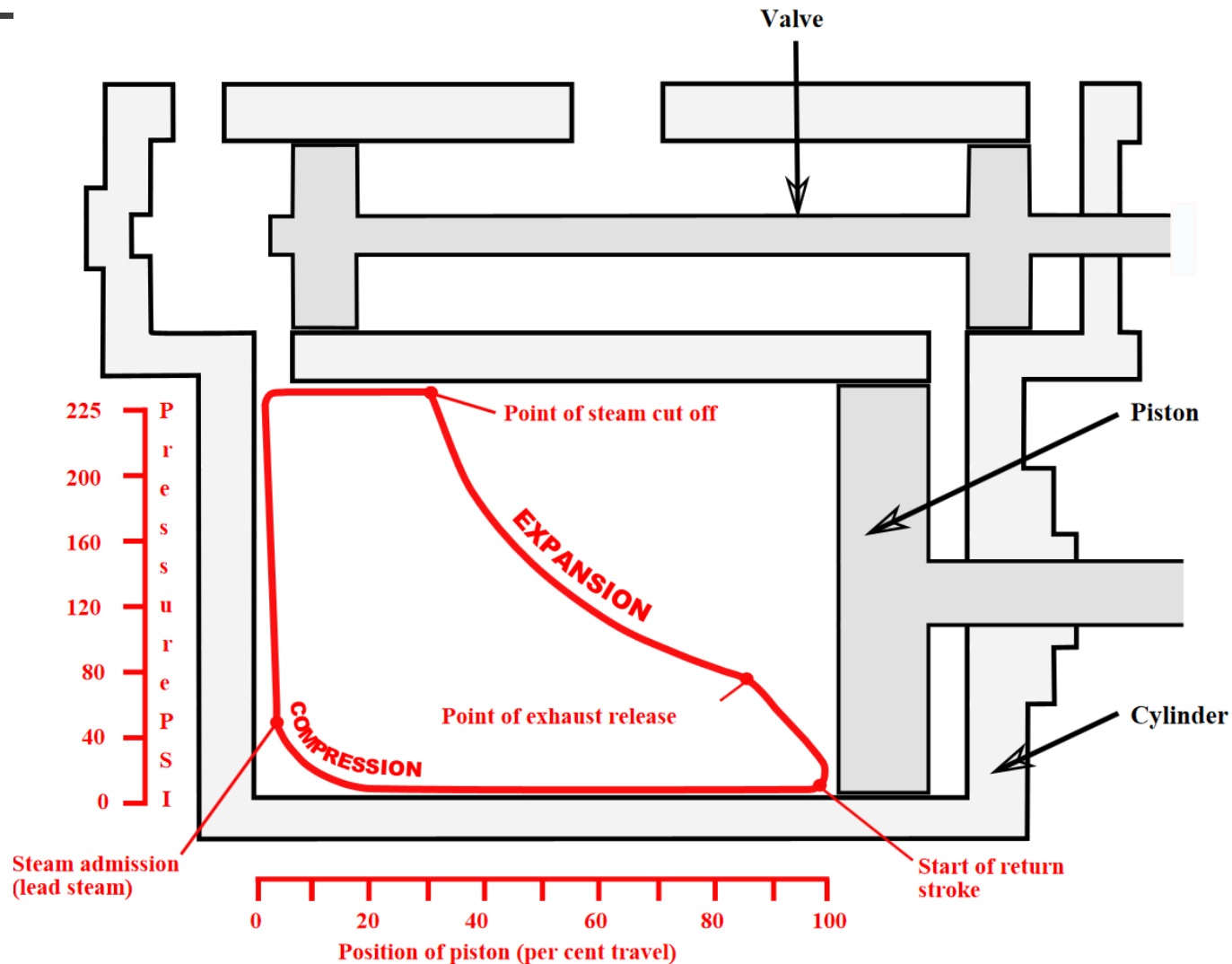
-



+



Základní termodynamické veličiny:

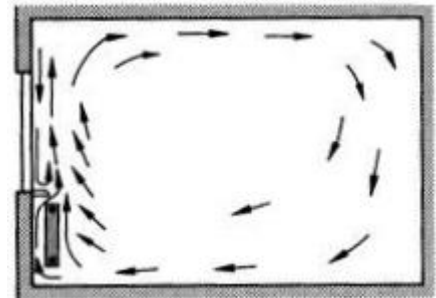


Základní termodynamické veličiny:

- **teplo**

úhrnná tepelná energie při výměně v termodynamickém systému

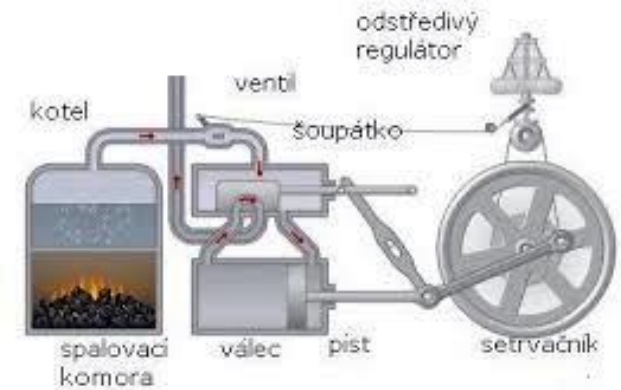
$$dq = du + da = c_V dT + p \cdot dv \quad [kJ] [kWh] [kcal]$$



- **vnitřní energie**

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

Základní termodynamické veličiny:



- entalpie**

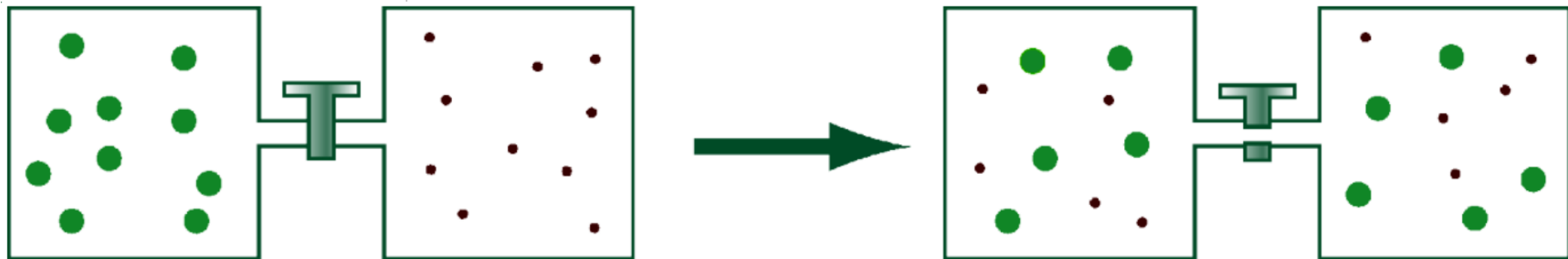
součet vnitřní tepelné energie a mechanické vtačovací práce

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

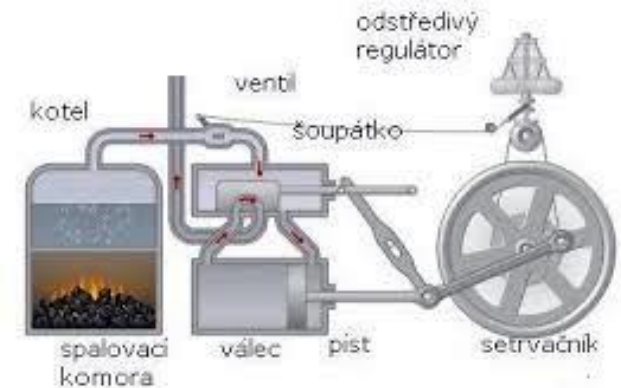
$$di = \underbrace{du + p \cdot dv}_{dq} + \underbrace{v \cdot dp}_{dq - dl_T = -da_T}$$

- 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

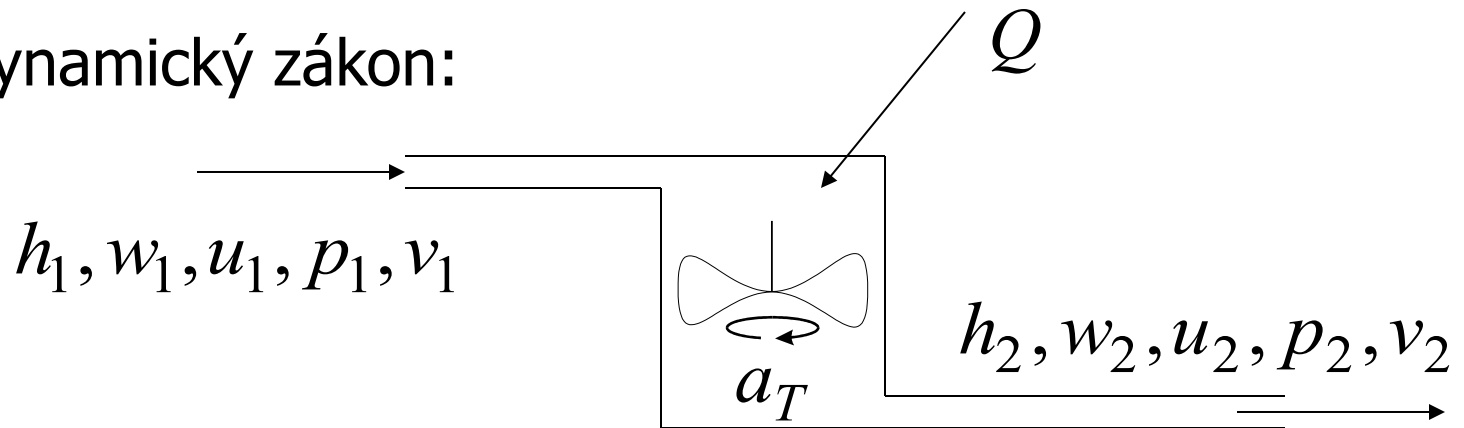
$$ds = \frac{dq}{T} \quad s = \int \frac{1}{T} dq \approx \int \frac{1}{T} du = \int \frac{c_V}{T} dT = c_V \cdot \ln \frac{T}{T_0} + s_0$$

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

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:

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

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

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

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

$$a_{T12} = 0$$



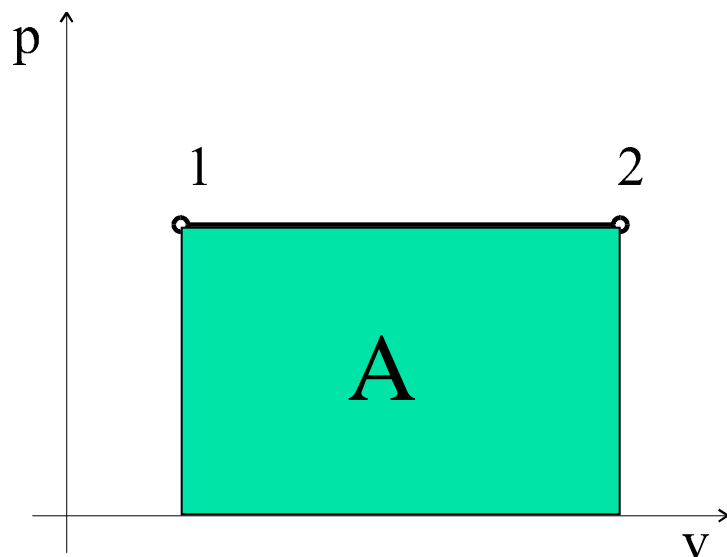
Základní termodynamické děje:

Zákon Gay-Lussacův-děj izobarický:

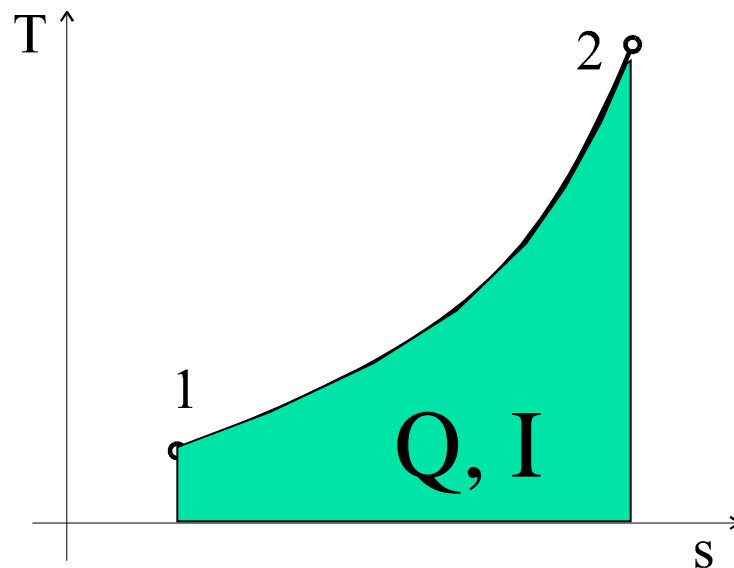
$$S_{12} = \int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{c_p \cdot dT}{T} = c_p \int_1^2 \frac{dT}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{V_2}{V_1}$$

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:

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

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

$$a_{12} = 0$$

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



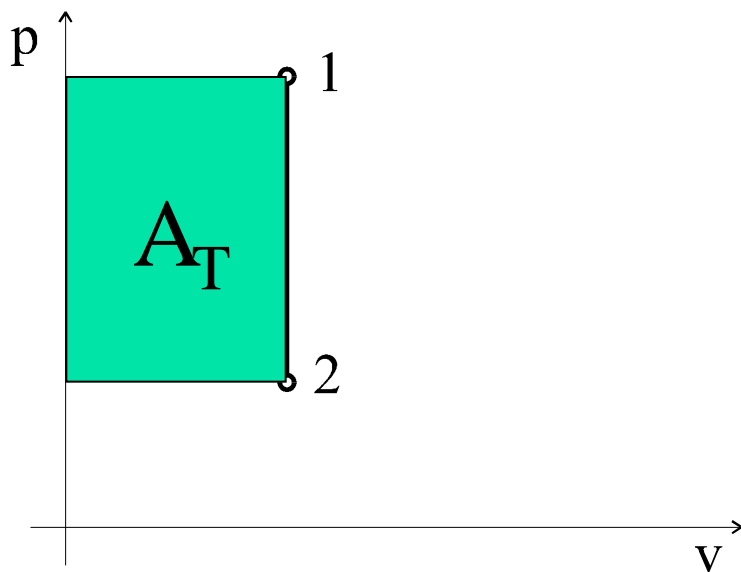
Základní termodynamické děje:

Zákon Charlesův - děj izochorický:

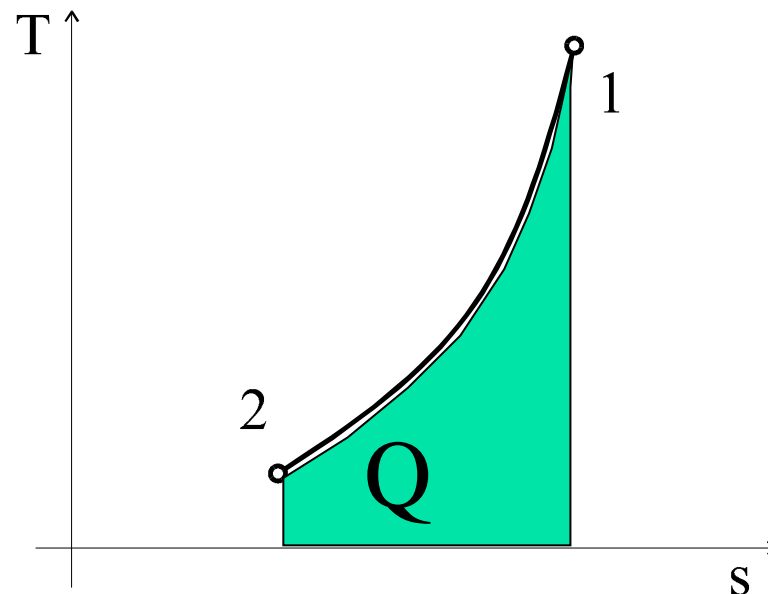
$$S_{12} = \int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{c_v \cdot dT}{T} = c_v \int_1^2 \frac{dT}{T} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

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:

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

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

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

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

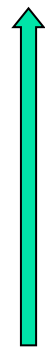
$$\underline{p_1 \cdot V_1} = p_2 \cdot V_2 = \underline{p \cdot V} = r \cdot T \quad \Uparrow$$

Základní termodynamické děje:

Zákon Boyle-Mariotův-děj izotermický:

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

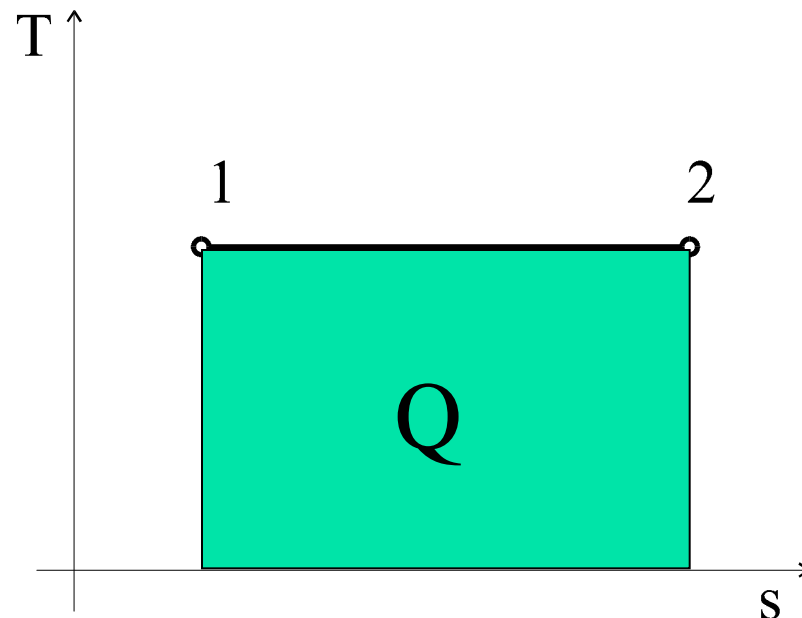
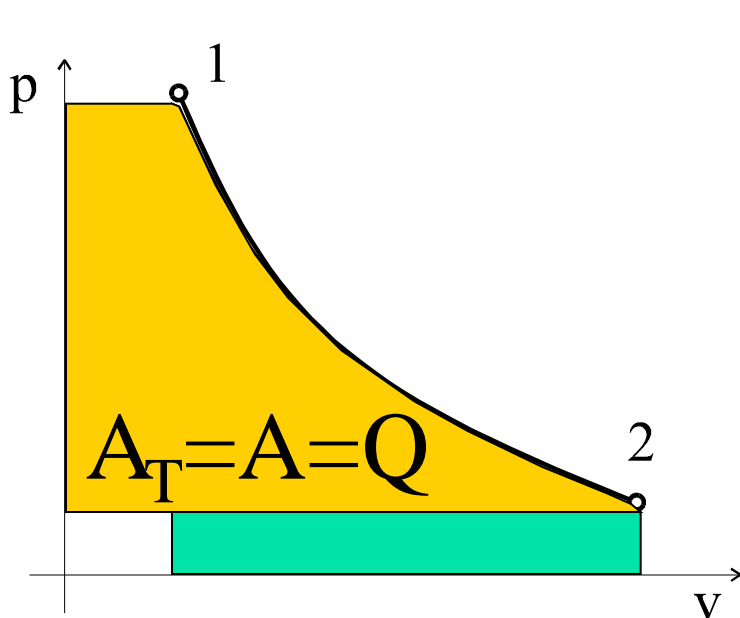
$$= r \ln \frac{V_2}{V_1} = r \ln \frac{p_1}{p_2}$$



$T = konst$

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:

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

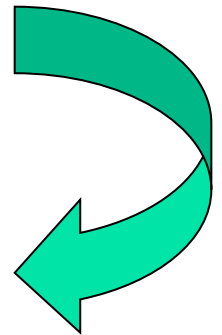
$$dq = 0 \Rightarrow du + da = c_V \cdot dT + p \cdot dV = 0 \quad \Downarrow$$

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

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

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

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



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:

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

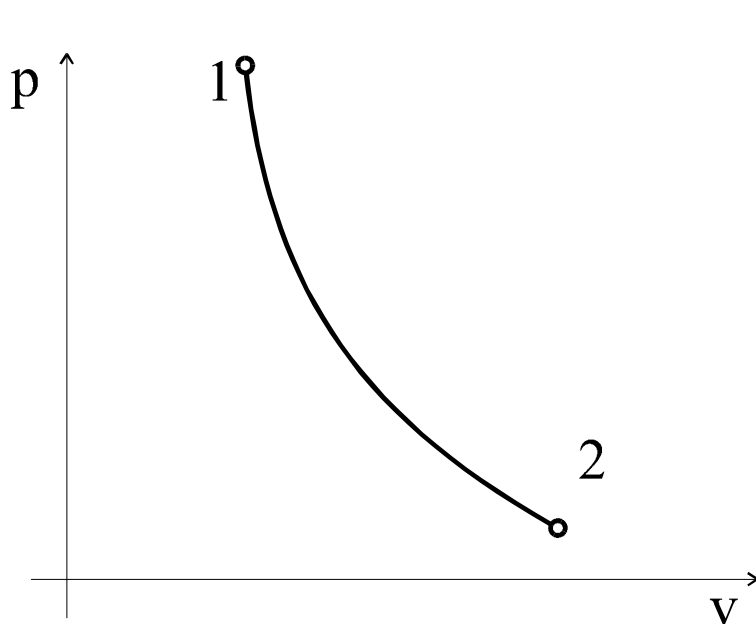
$$p_1 \cdot V_1 \cdot V_1^{\kappa-1} = p_2 \cdot V_2 \cdot V_2^{\kappa-1} \quad \Rightarrow \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \underline{p_1 \cdot V_1} = p_2 \cdot V_2$$

Dosazením za $p_2 \cdot V_2$:

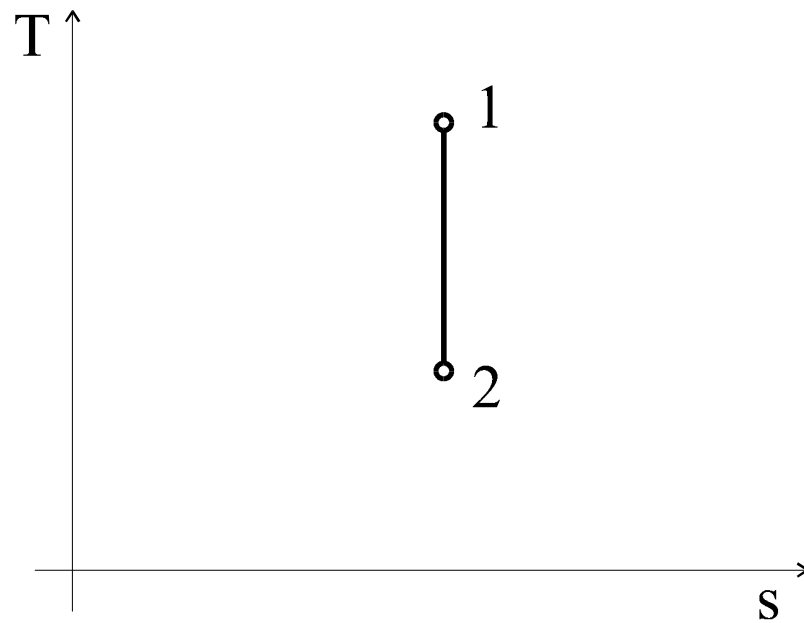
$$a_{12} = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \right]$$

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:

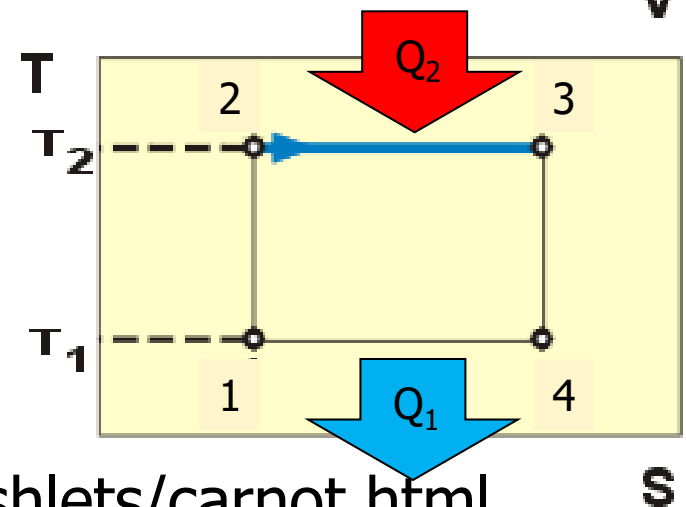
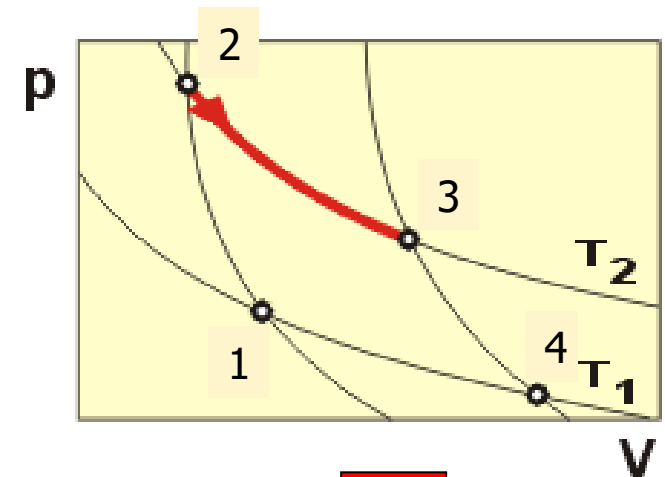
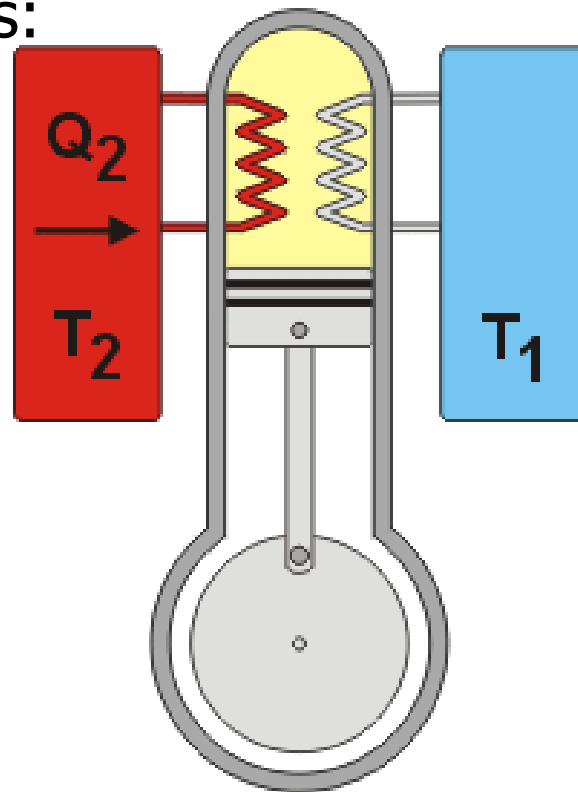
Obecný ideální termodynamický cyklus:

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

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

Ideální termodynamické cykly:

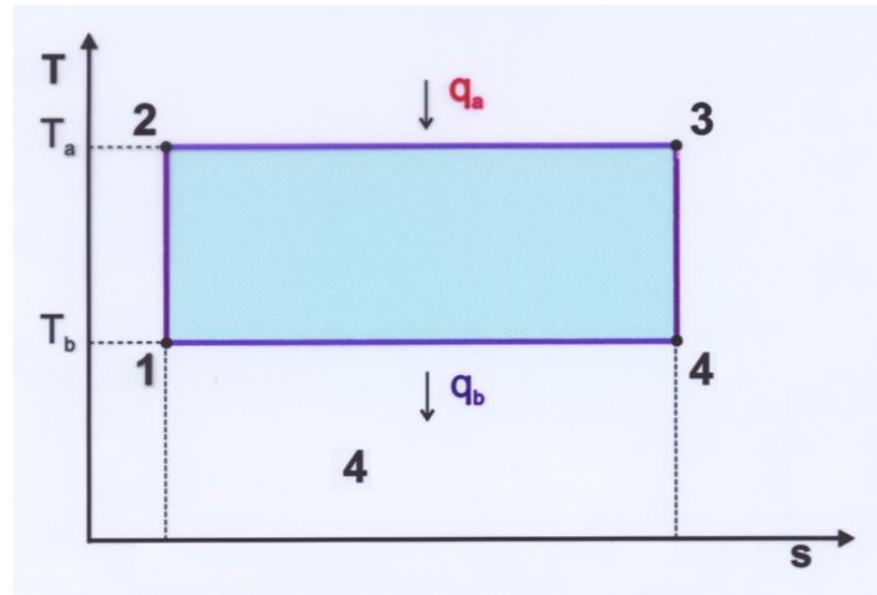
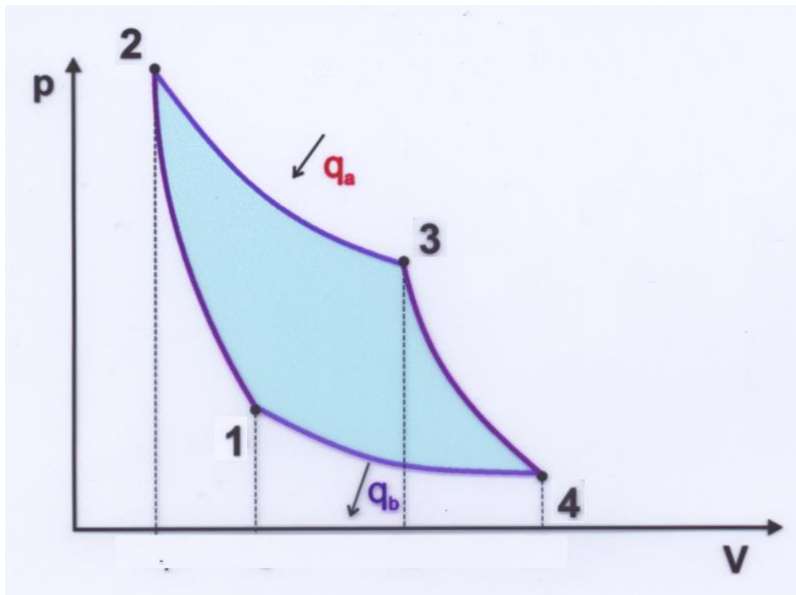
Carnotův cyklus:



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:

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

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

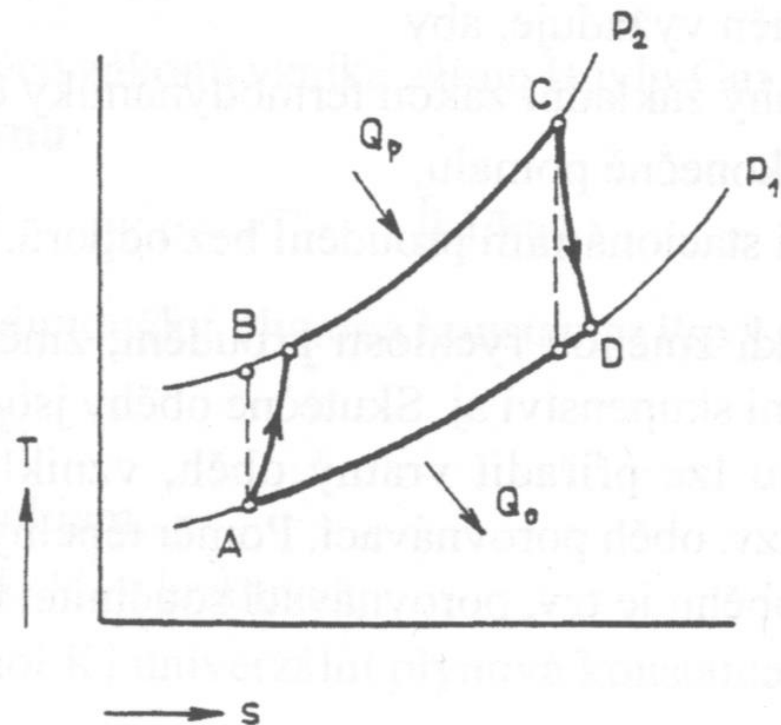
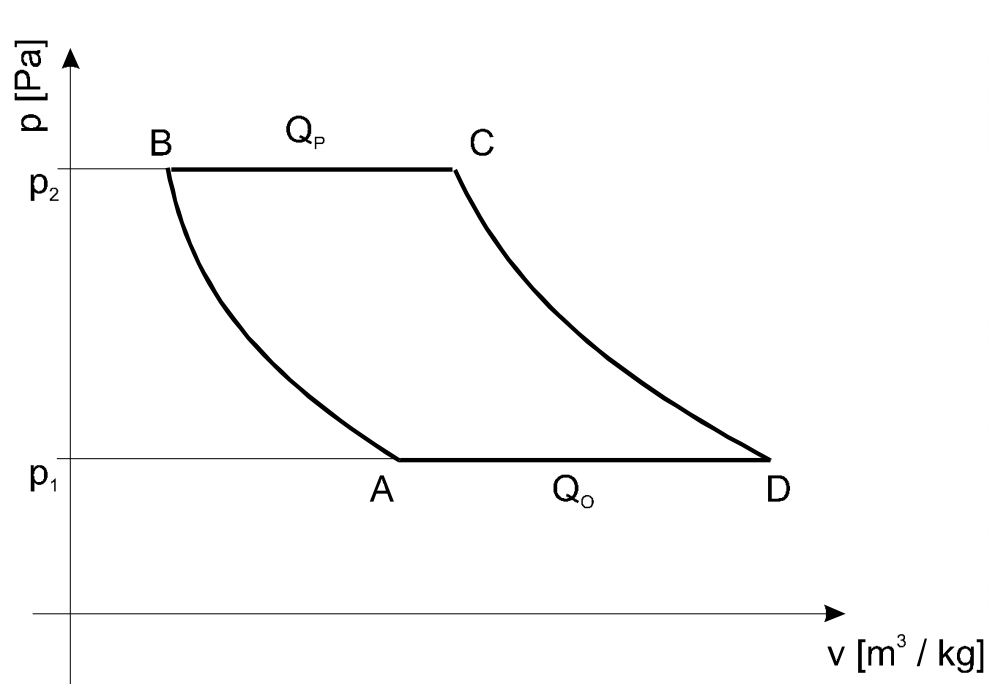
První adiabata

Druhá adiabata

Ideální termodynamické cykly:

Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

- sestává ze dvou izobar a dvou adiabat



Ideální termodynamické cykly:

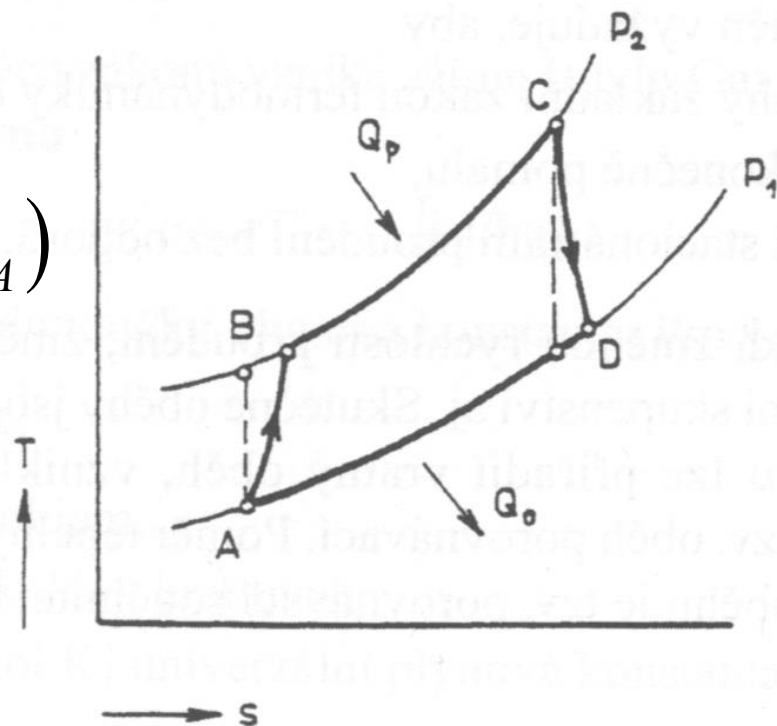
Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

- 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:

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

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

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



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:

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

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

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

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



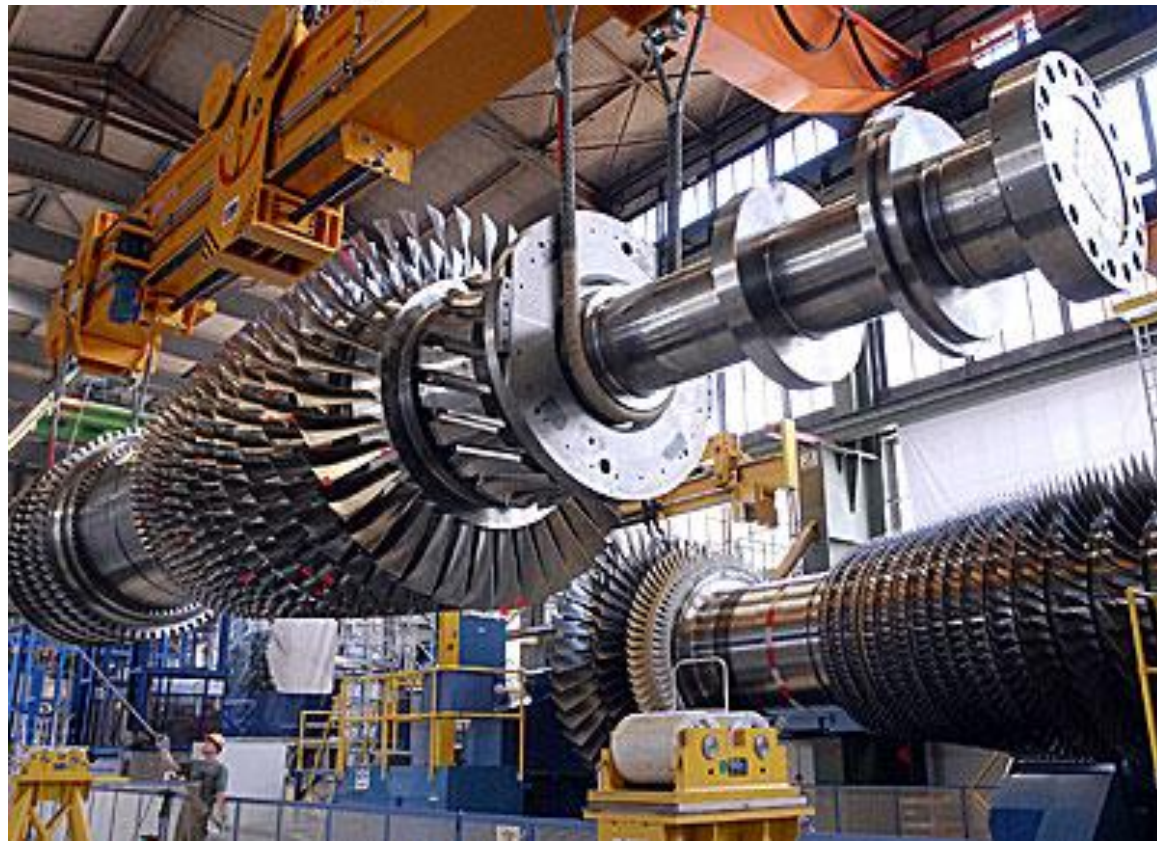
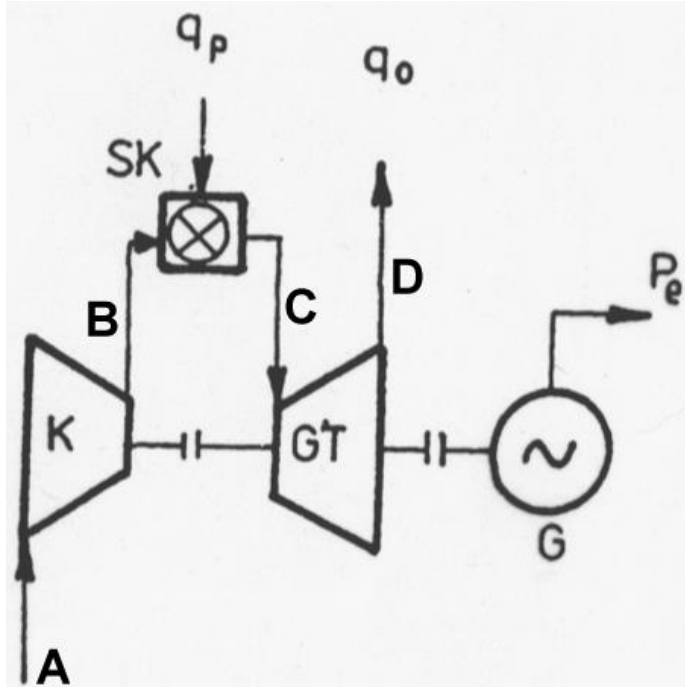
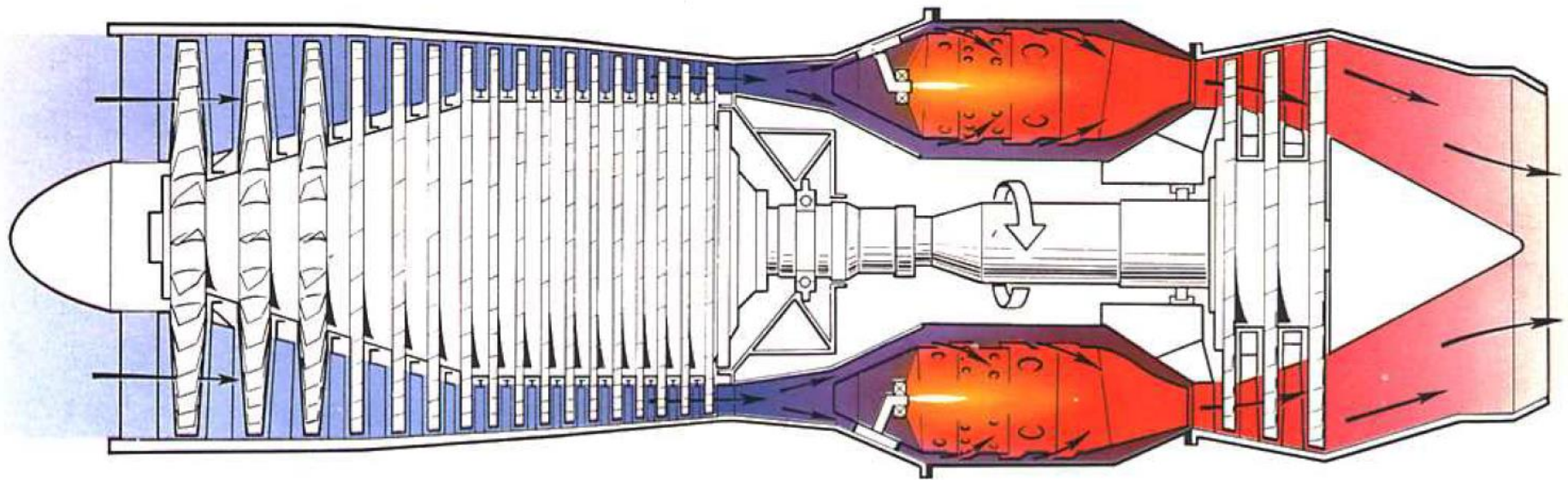
Ideální termodynamické cykly:

Jouleův-Braytonův cyklus plynové turbíny:

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

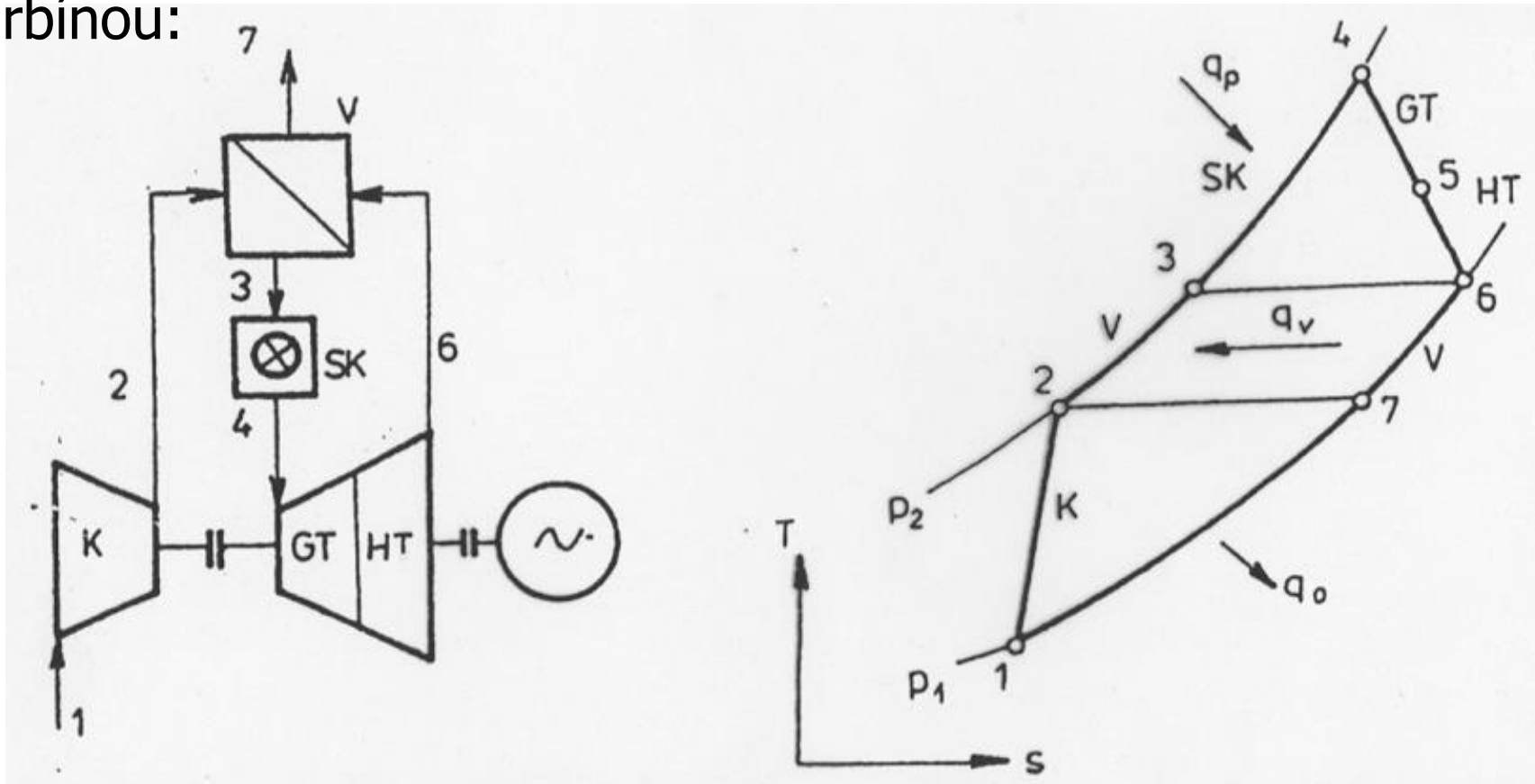
$$\eta = 1 - \frac{T_A \Psi - T_A}{\Psi \varepsilon^{\kappa-1} T_A - T_A \varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{\Psi - 1}{\Psi \varepsilon^{\kappa-1} - \varepsilon^{\kappa-1}} =$$

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



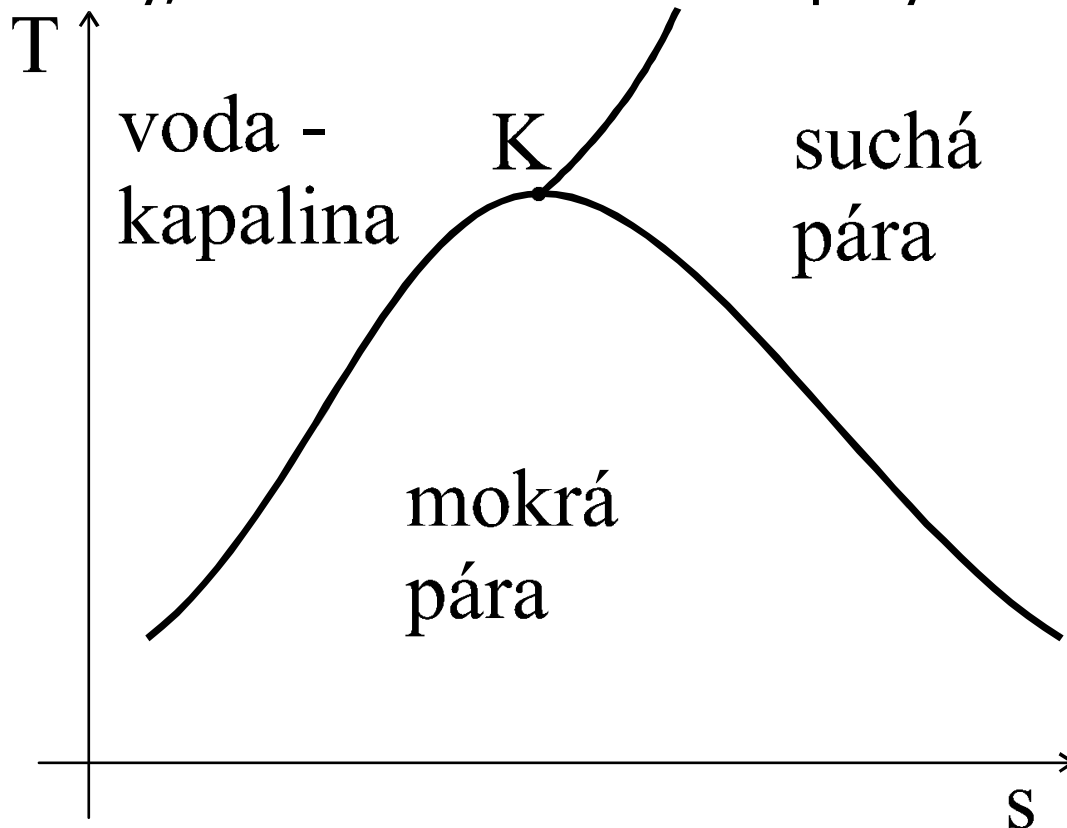
Cyklus s plynovou turbínou:

Praktická realizace s výměníkem tepla a rozdělenou turbínou:



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

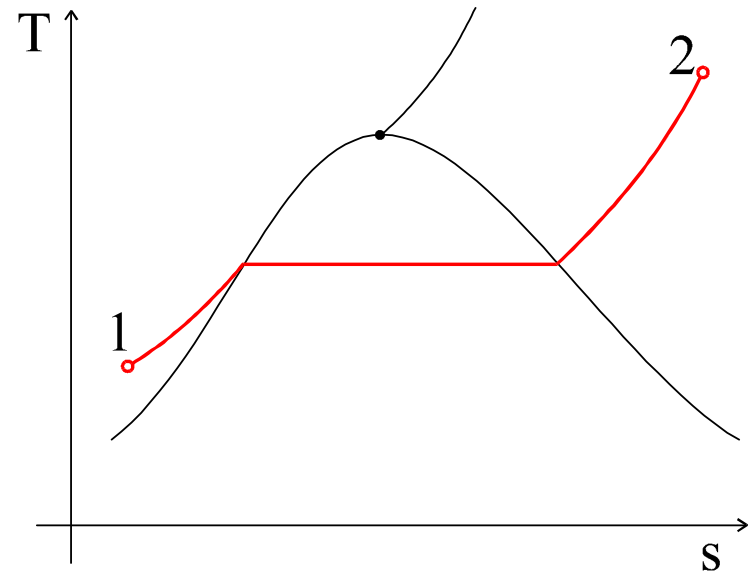
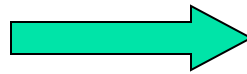
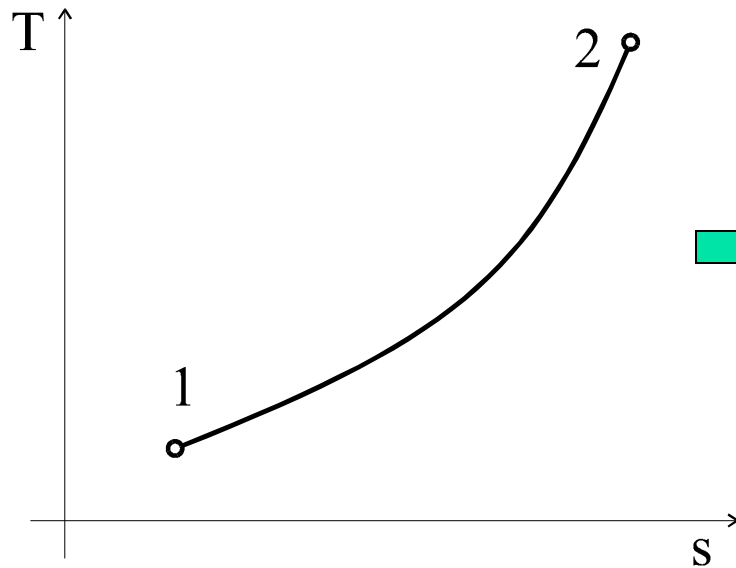
Cyklus sestává ze dvou izobar a dvou adiabat v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:



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

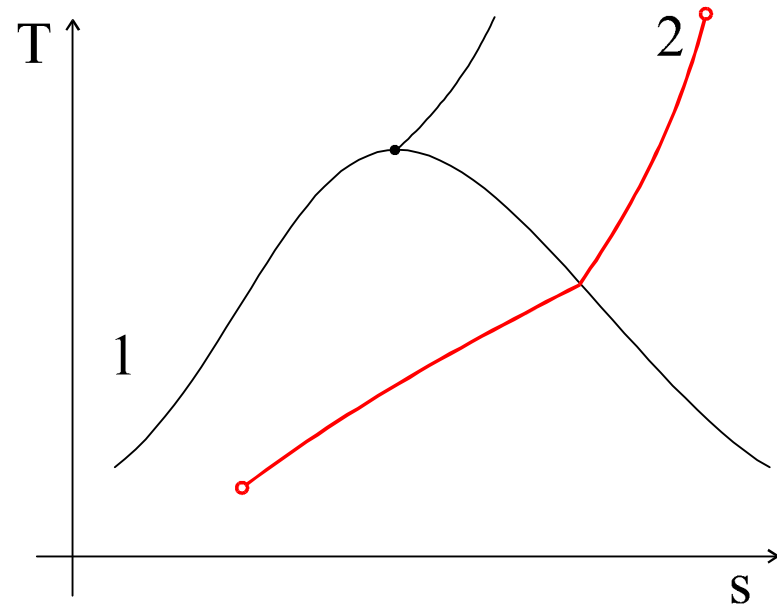
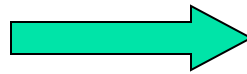
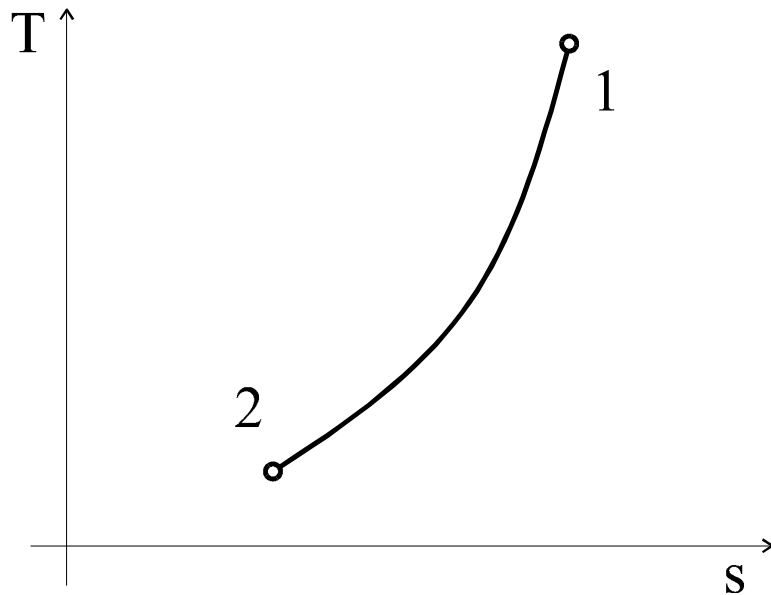
Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Izobara v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:



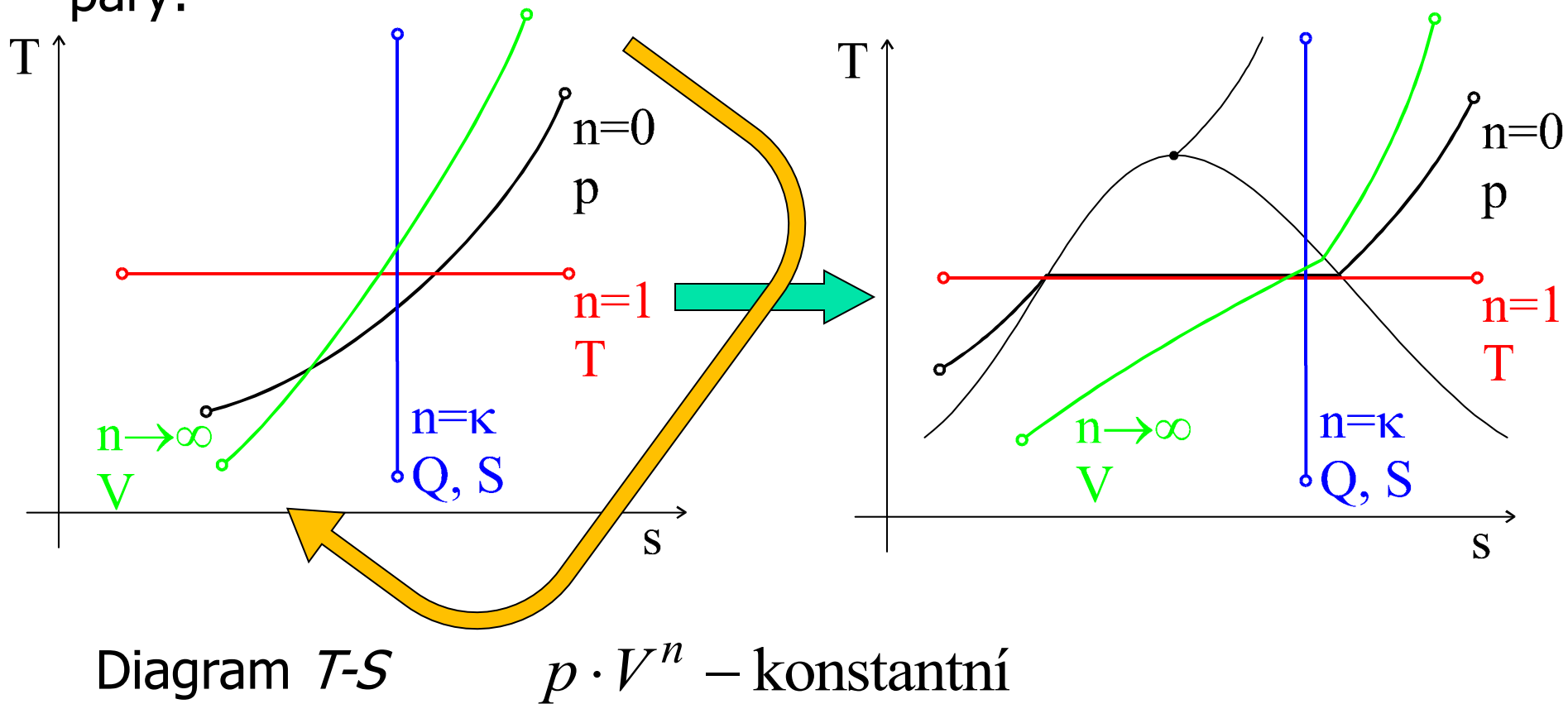
Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Izochora v prostředí vody, mokré a suché vodní páry:



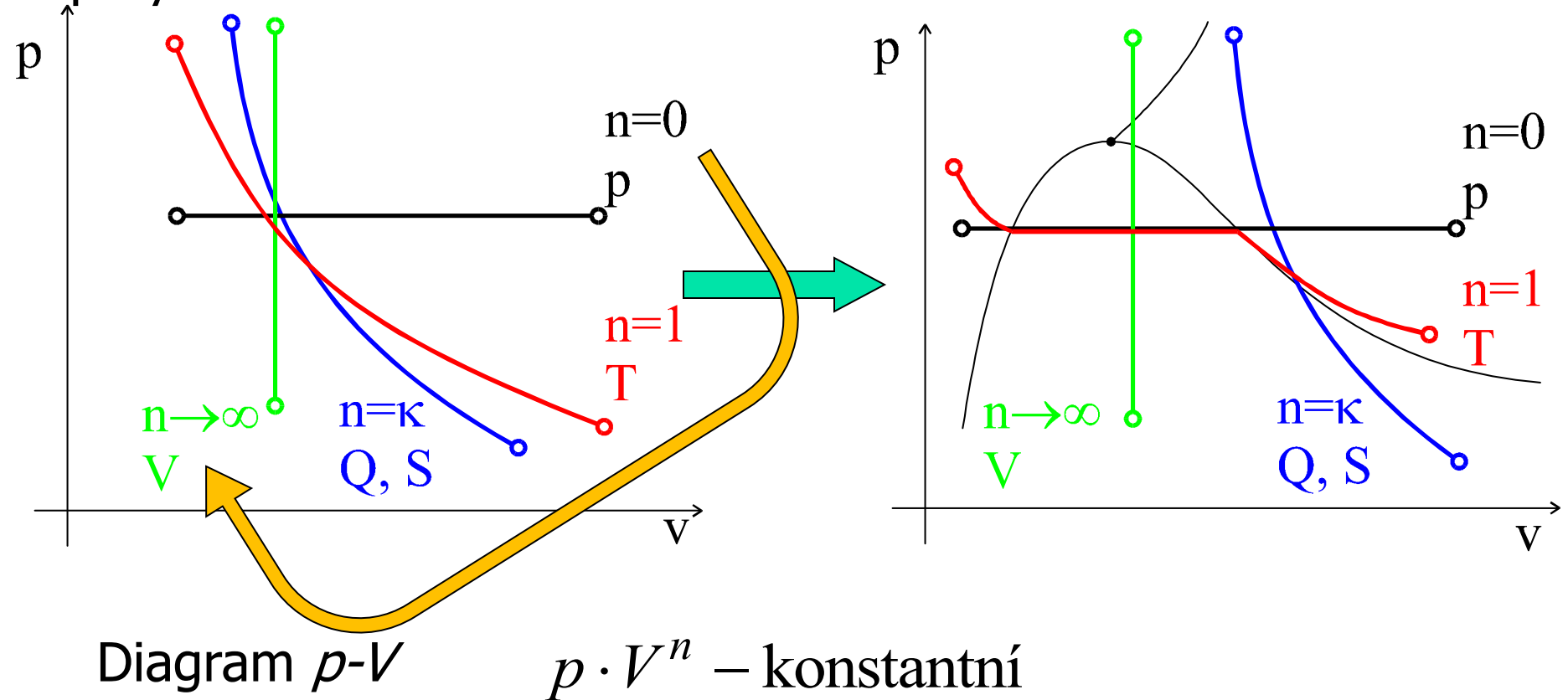
Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

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:



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

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

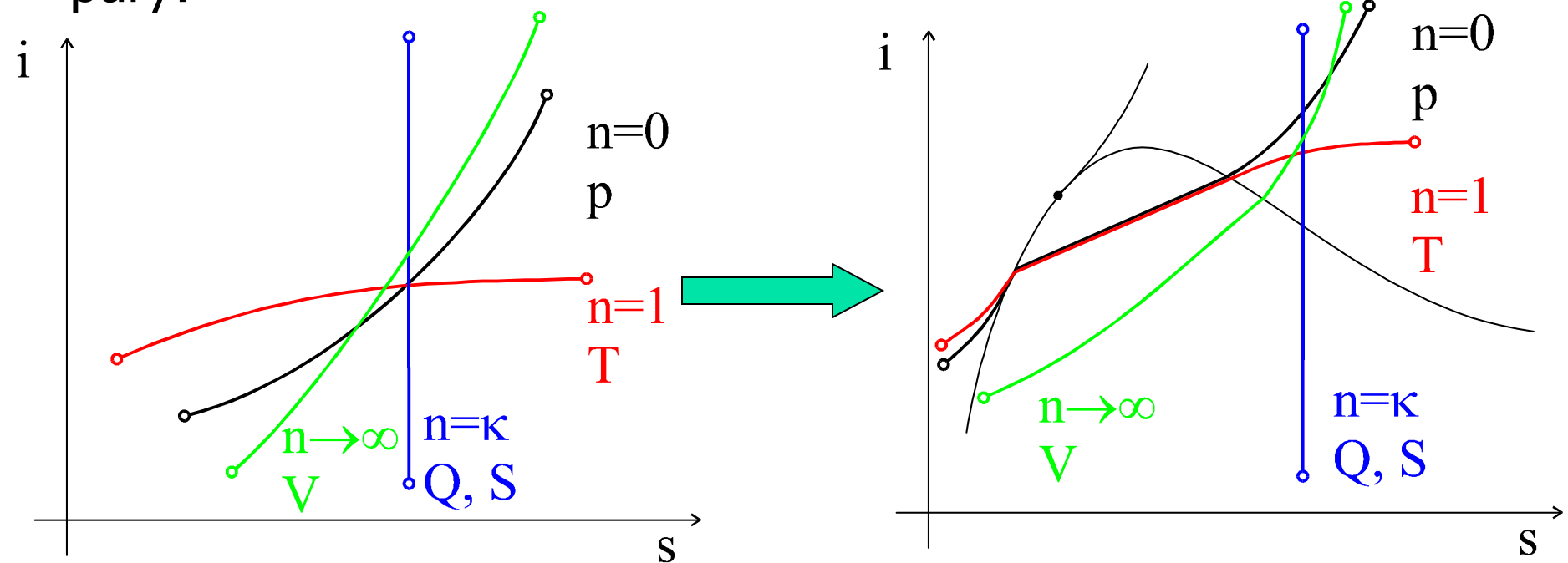
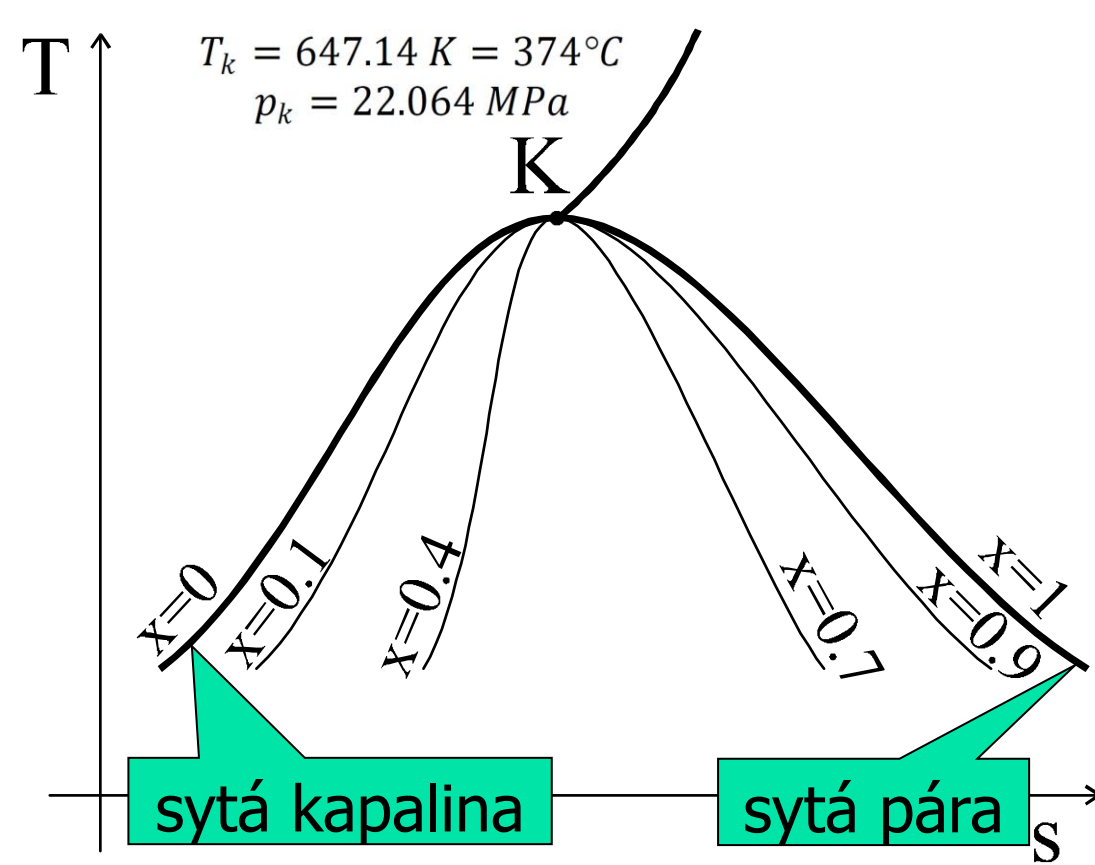


Diagram i - S

$p \cdot V^n$ – 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 syťou kapalinu

tedy ($x=0$)

Index '' znamená syťou páru

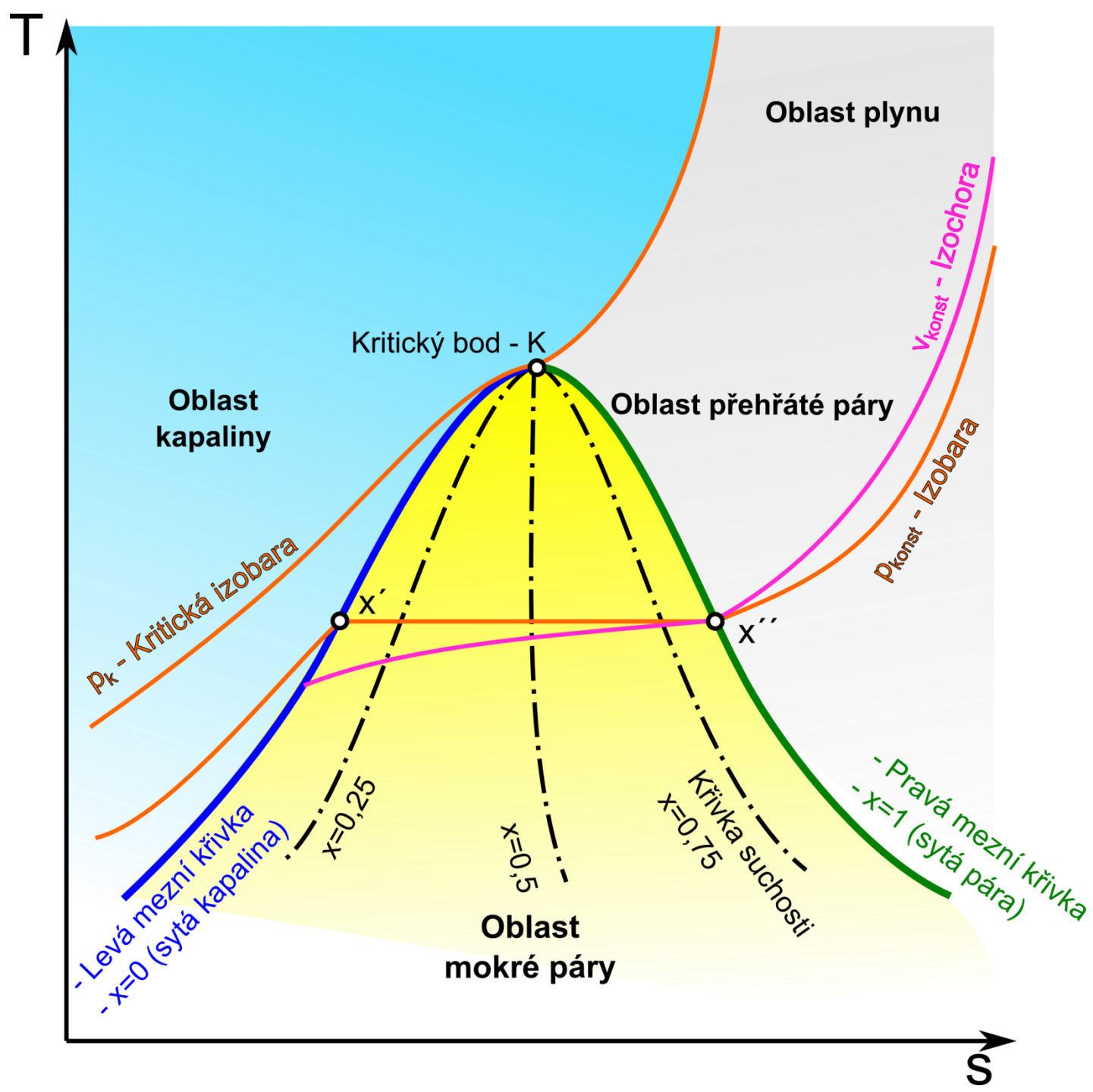
tedy ($x=1$)

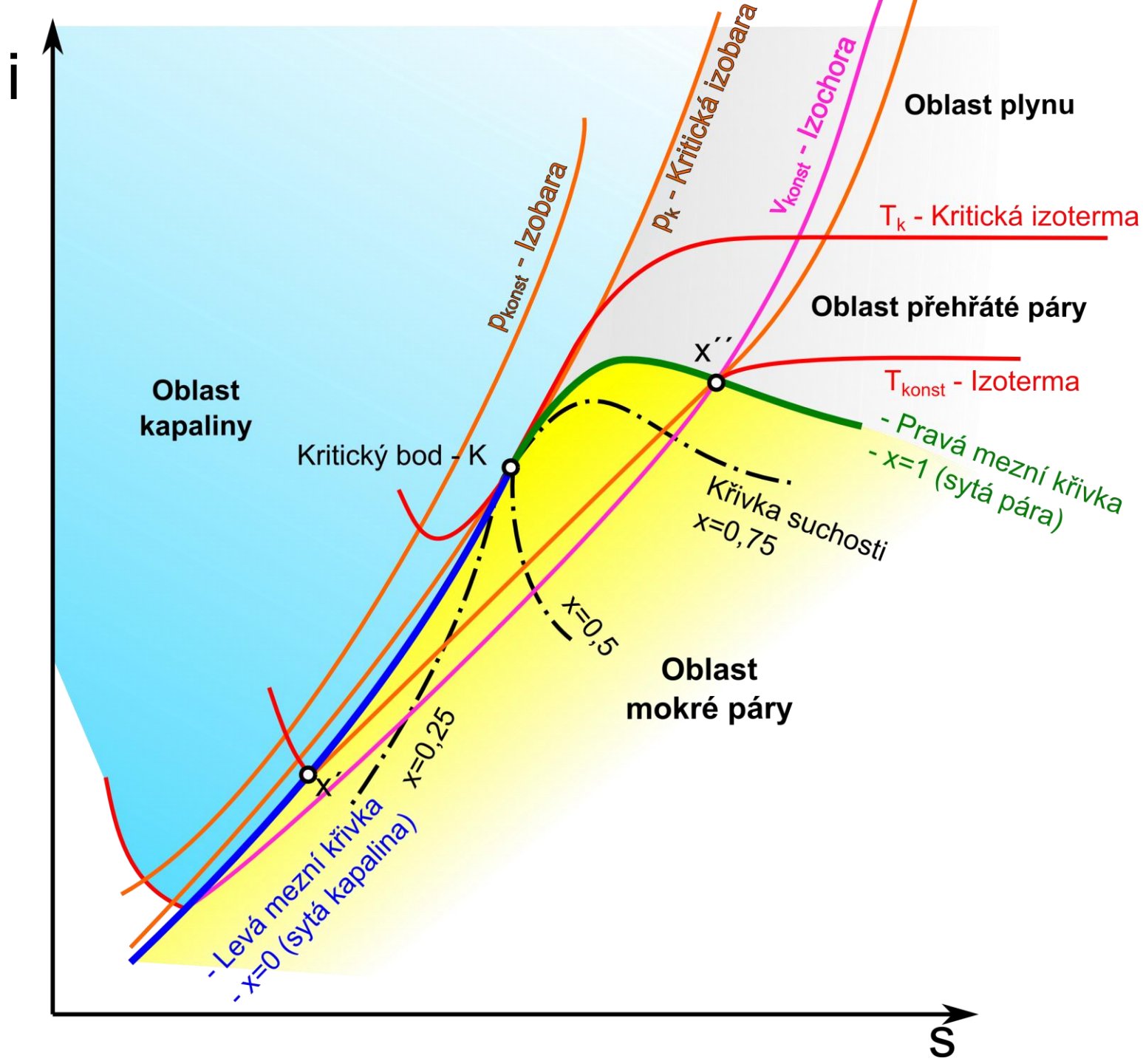


Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

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:

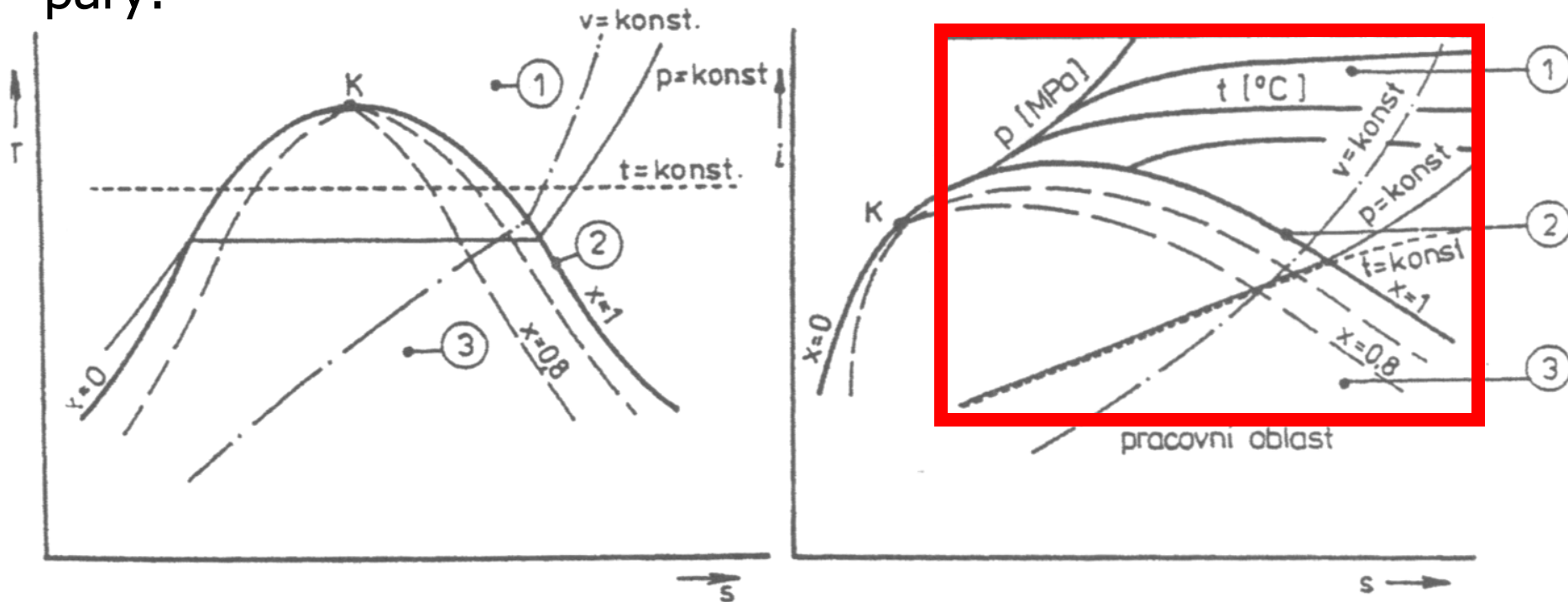
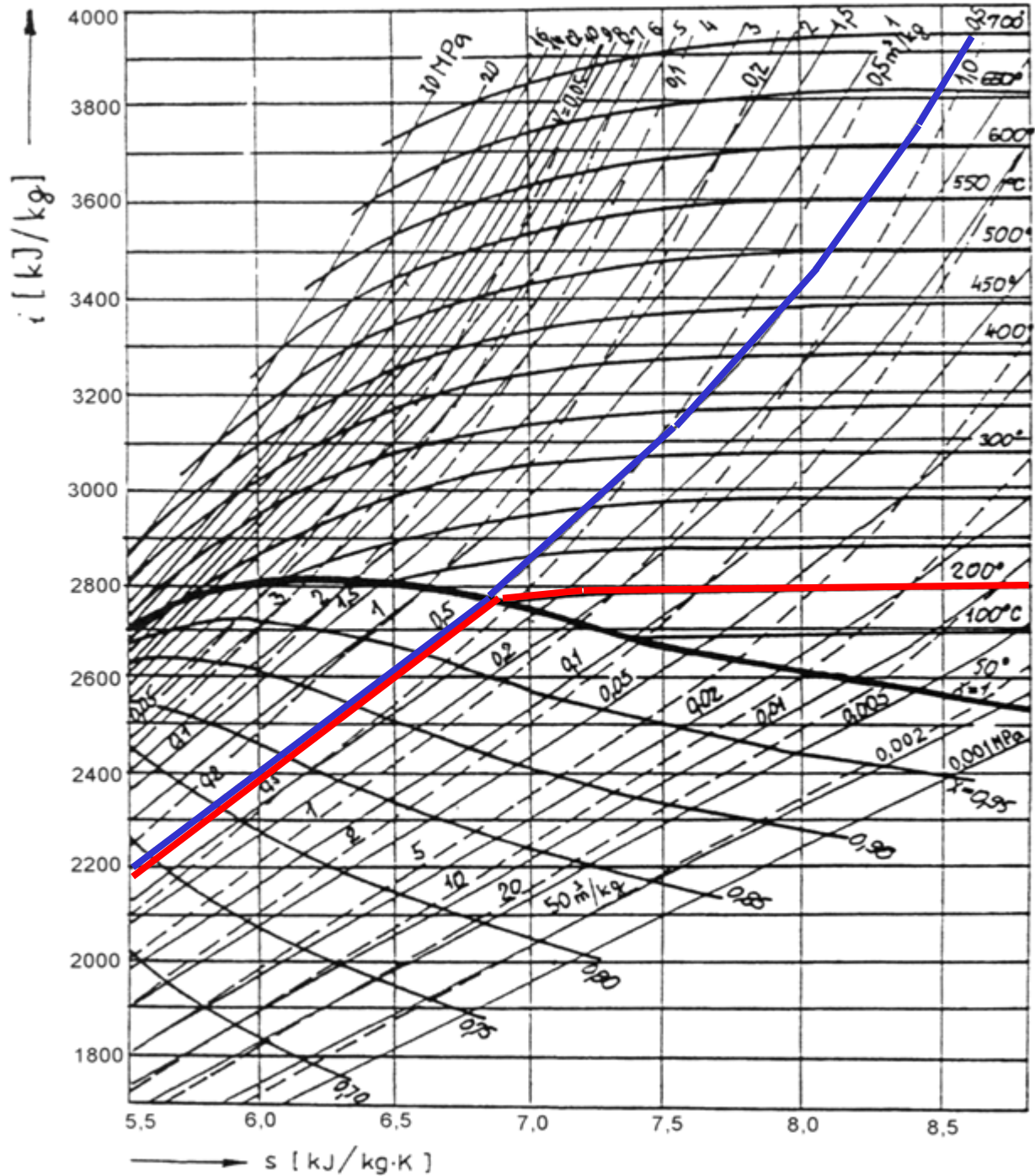
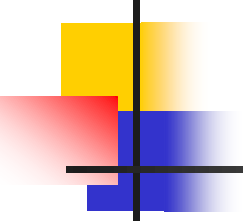


Diagram T - S

Diagram i - S

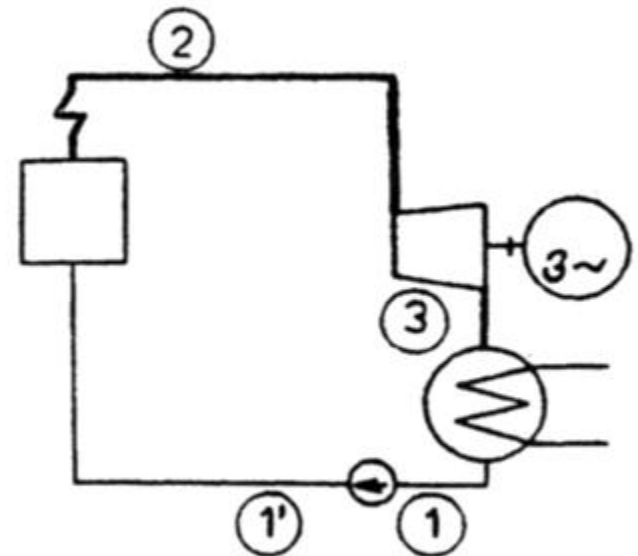
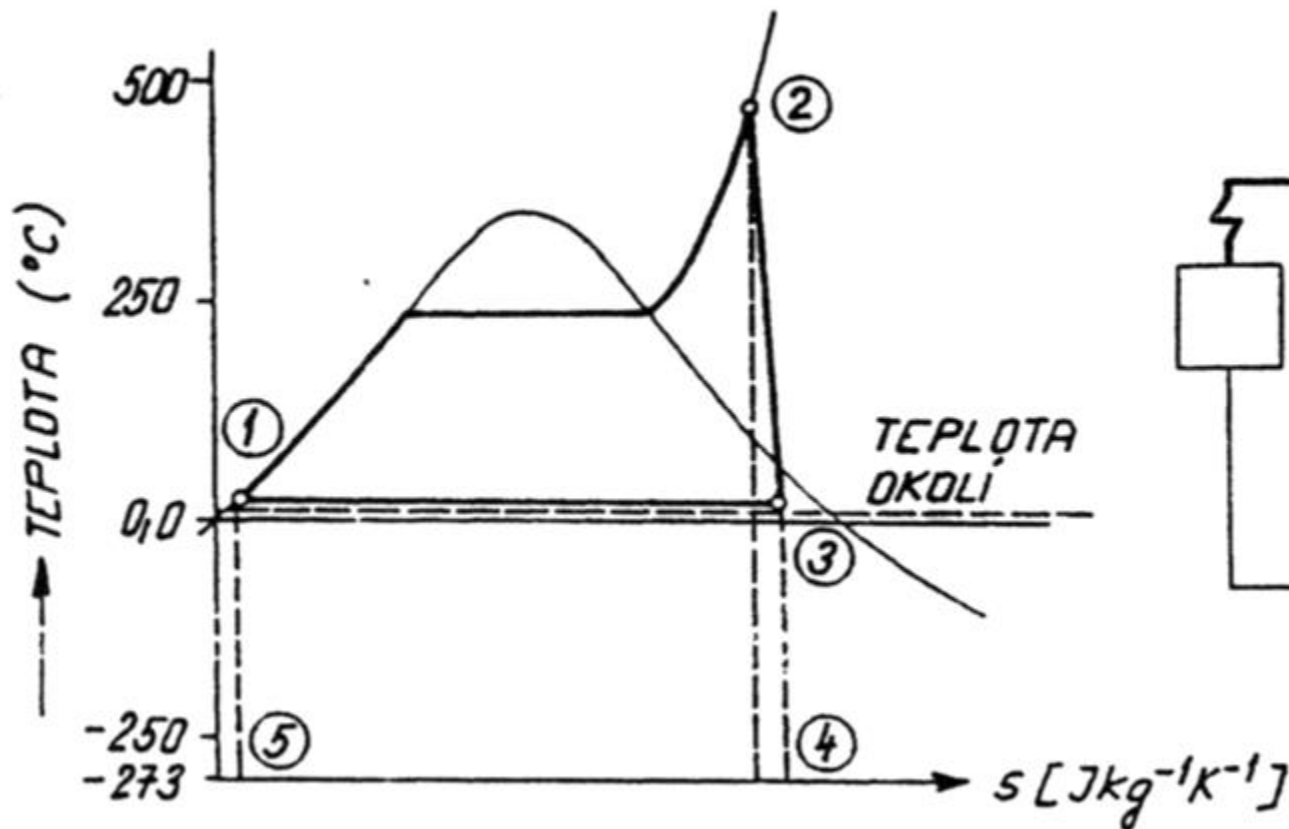


$p - \text{konst.}$

$T - \text{konst.}$

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Základní oběh a schéma parní elektrárny:



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:

1 - 1'

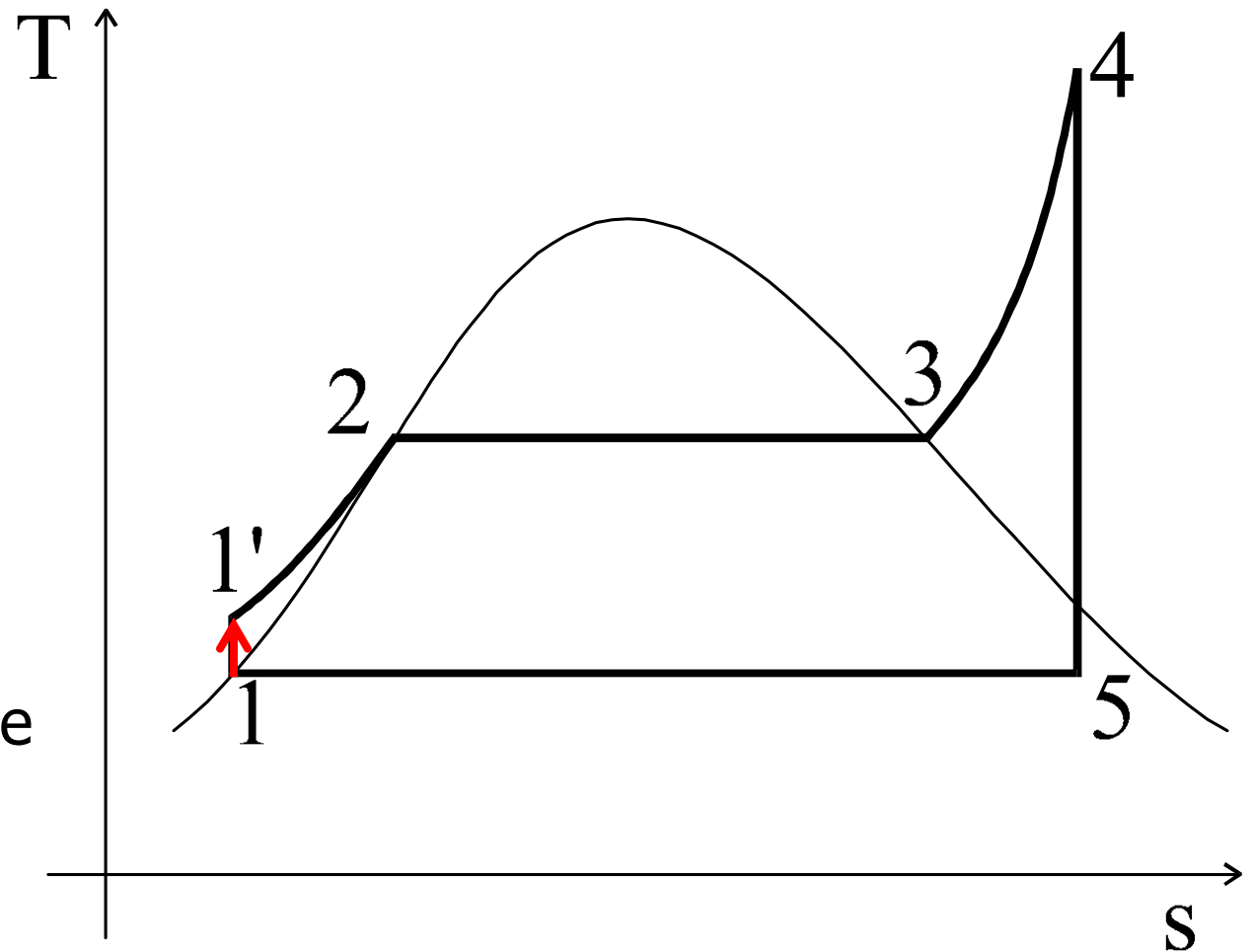
adiabatická

komprese

v hlavním

oběhovém čerpadle

(napáječe)



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:

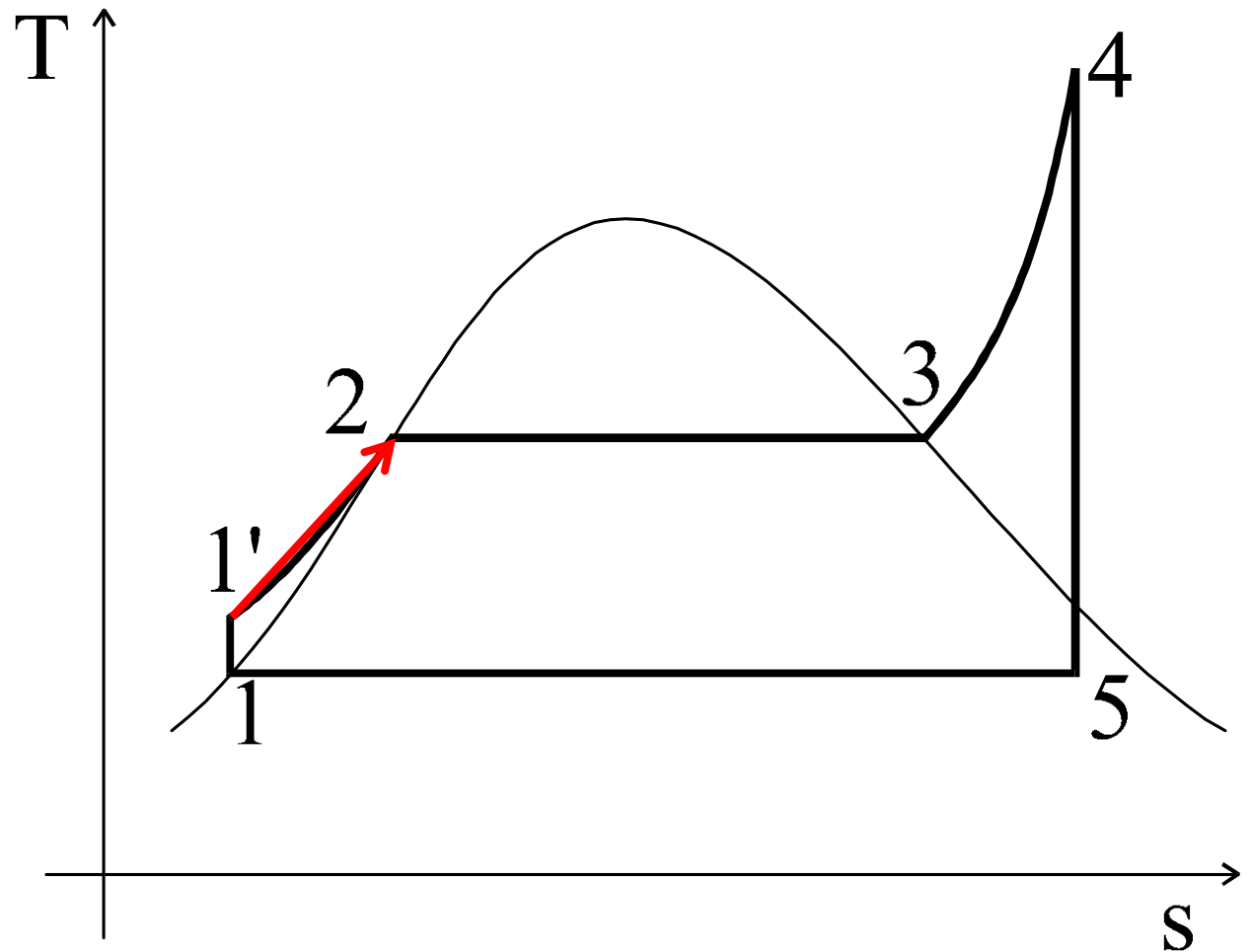
1' - 2

izobarický

ohřev

v ohříváku -
ekonomizéru

(součást kotle)

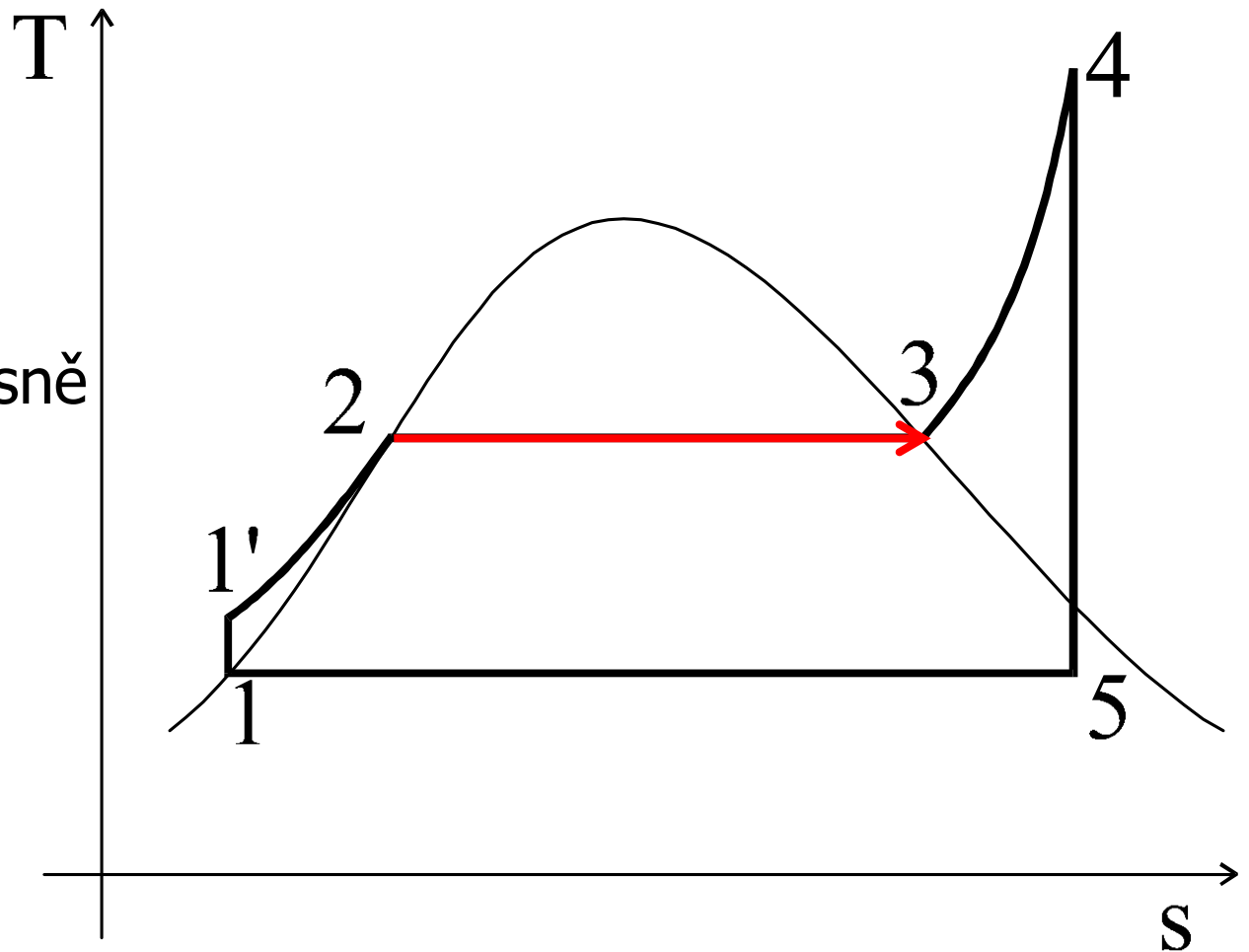


Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:

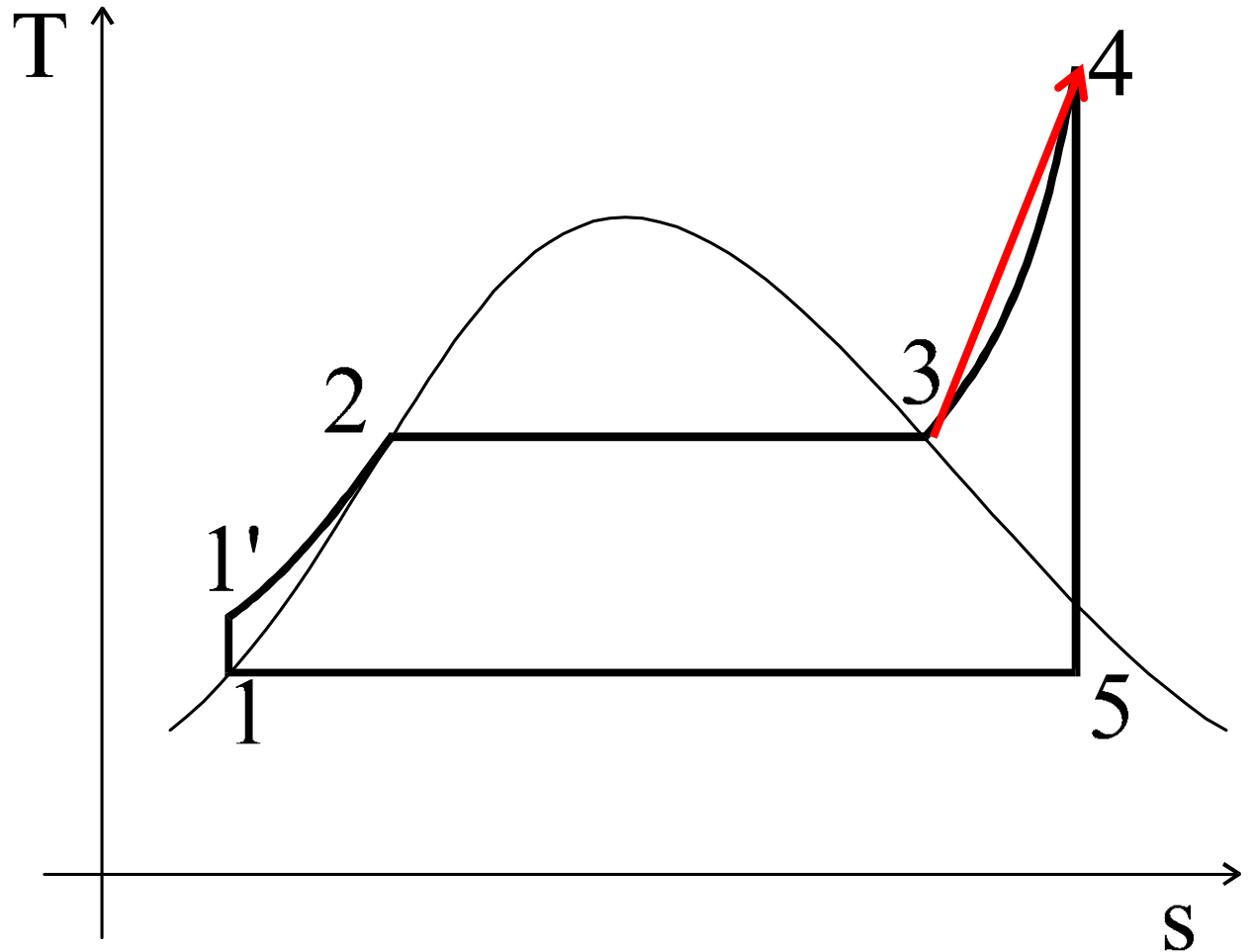
2 - 3

izobarický a současně
izotermický var
ve výparníku
(součást kotle)



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:

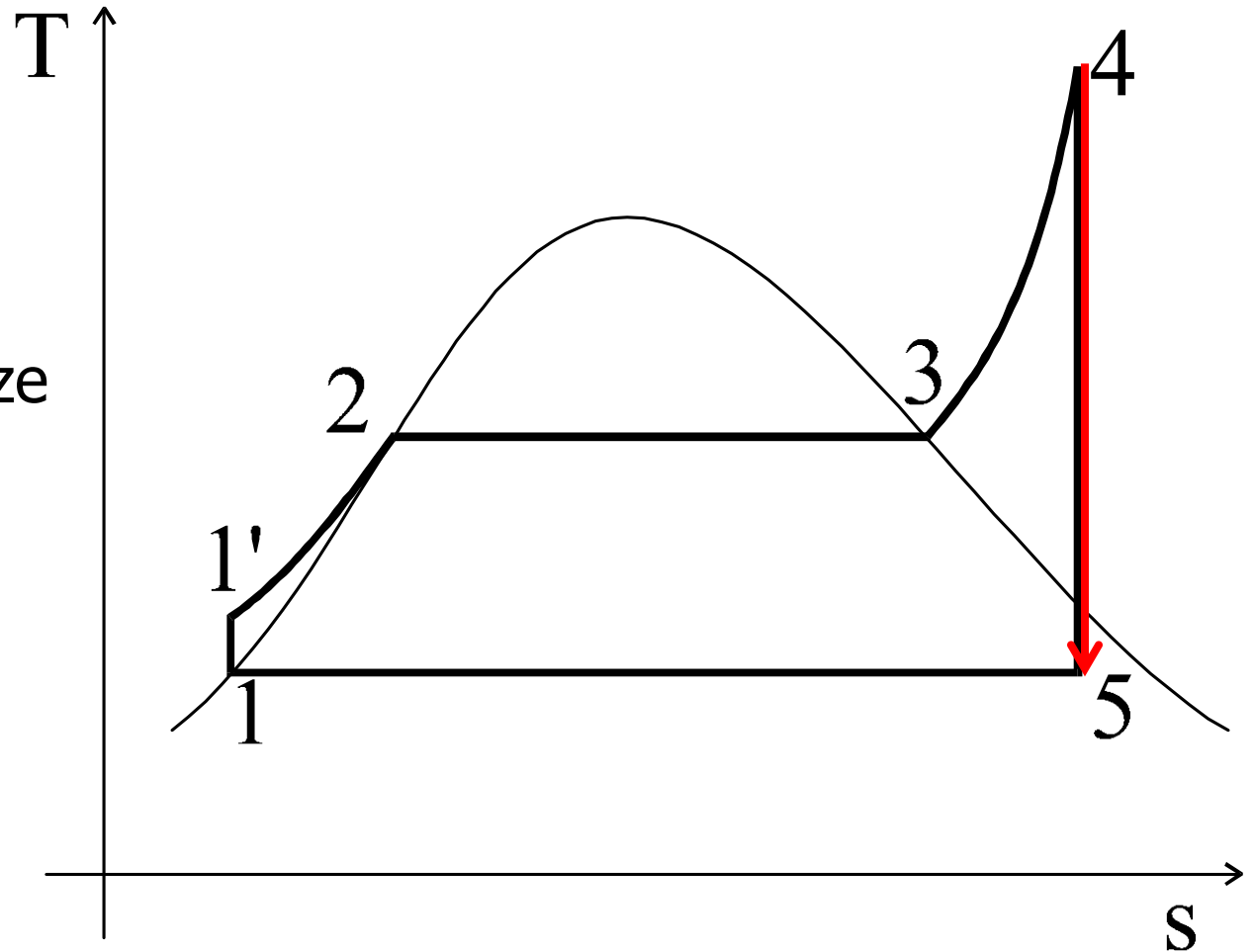


3 - 4

izobarické přehřátí
páry v přehříváku
(součást kotle)

Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

Diagram T-S:

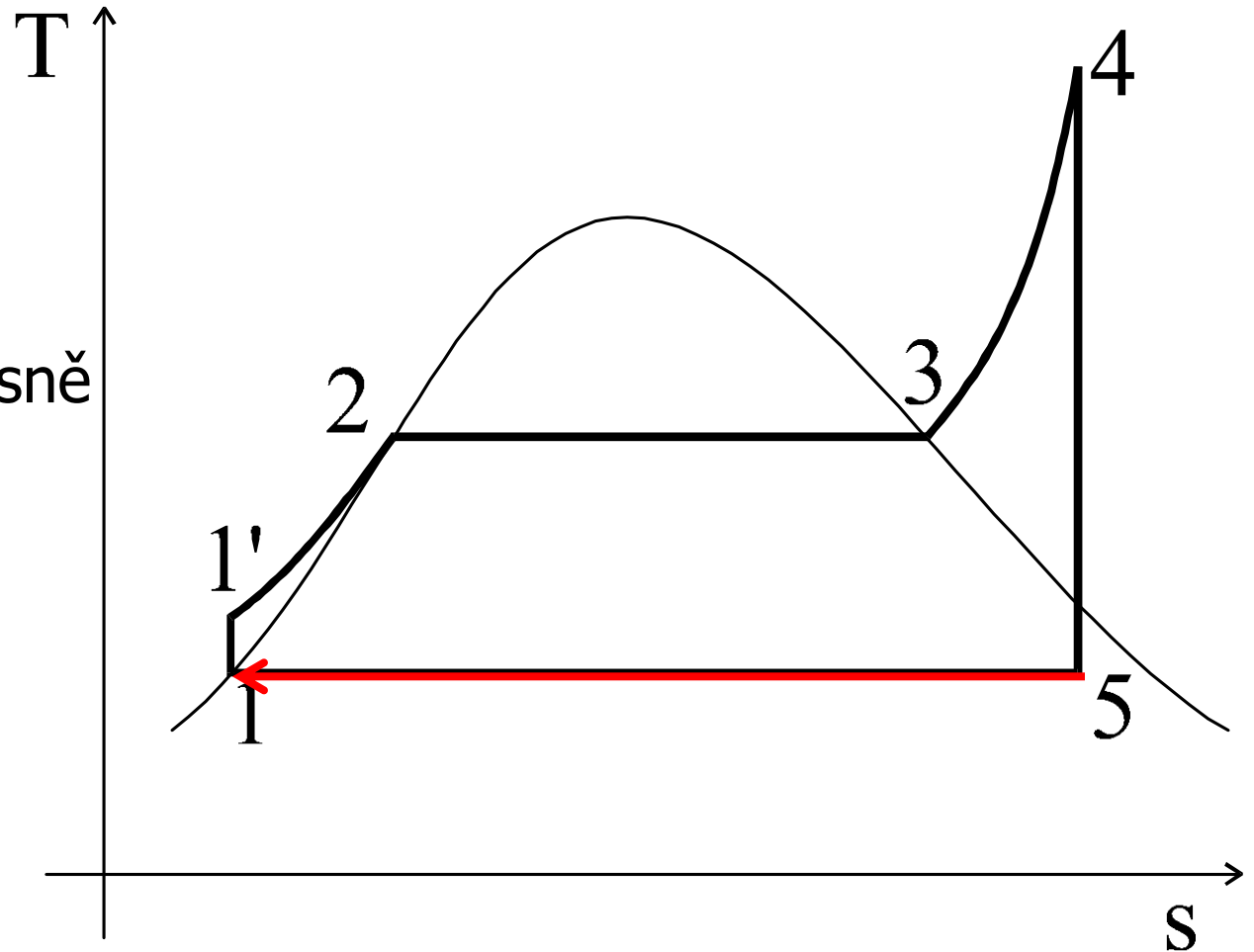


4 - 5

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:

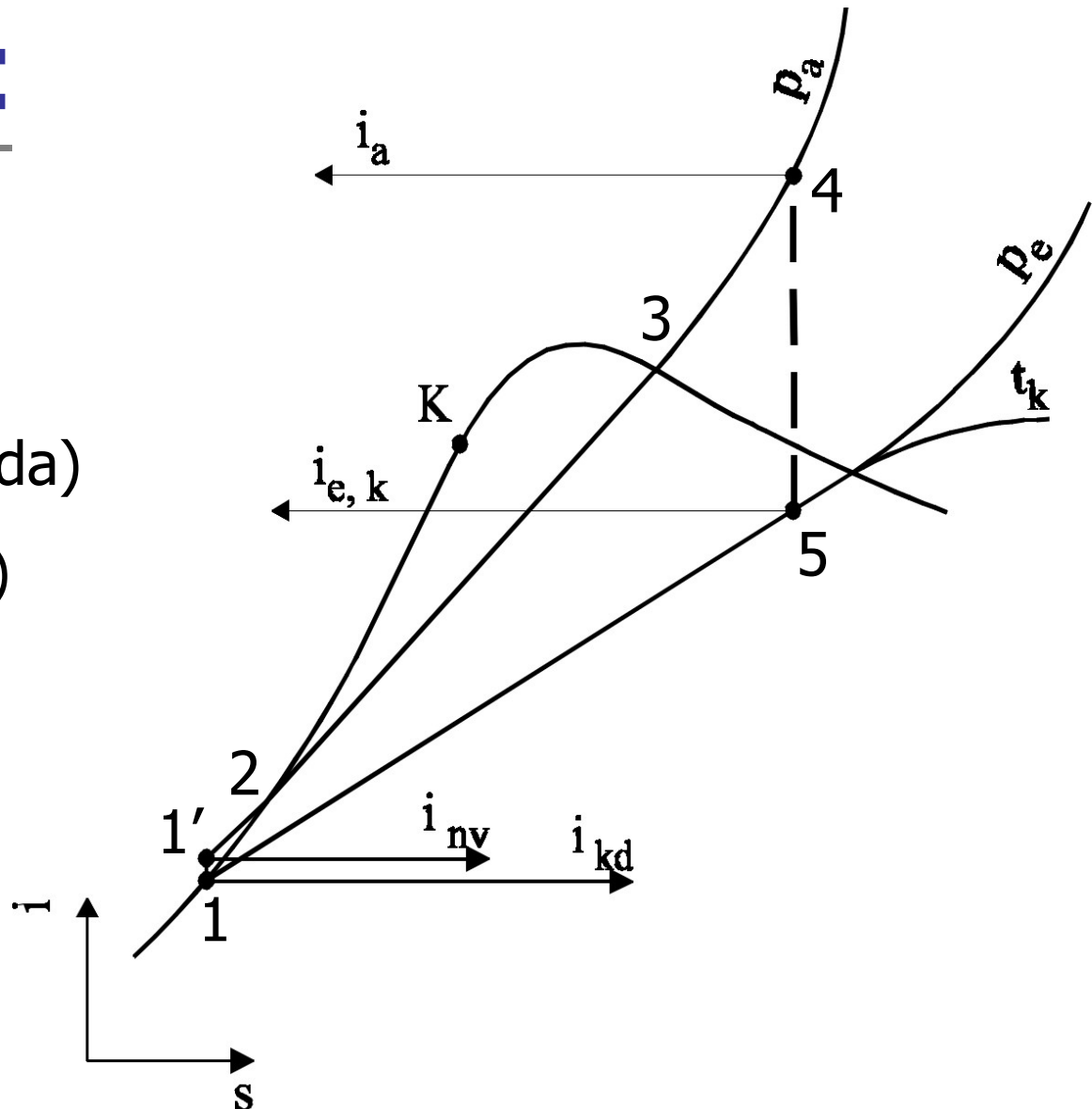
Diagram i-S:

1 – kd (kondenzát)

1' – nv (napájecí voda)

4 – a (admisní pára)

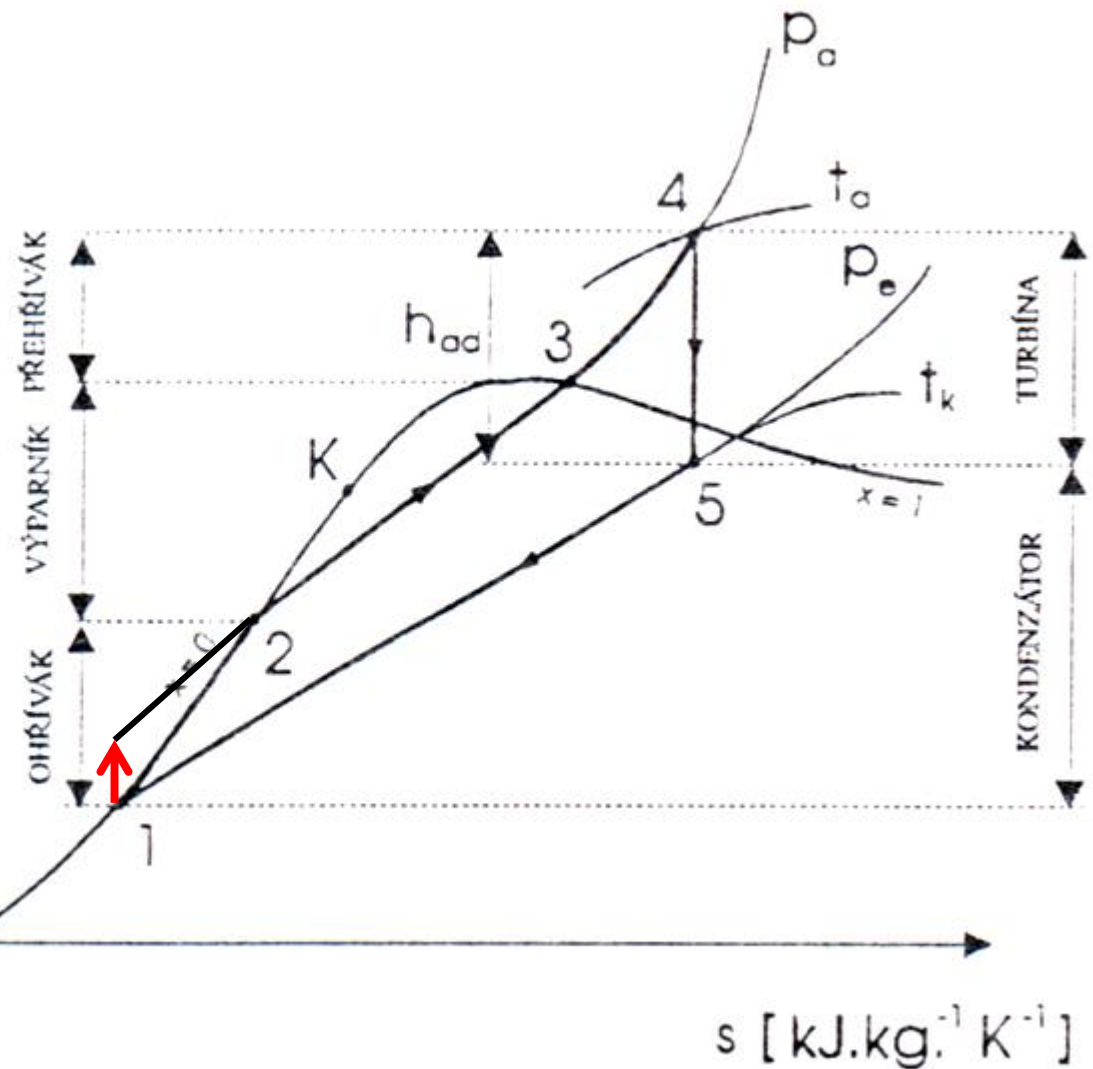
5 – e,k (pára po
expanzi)



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

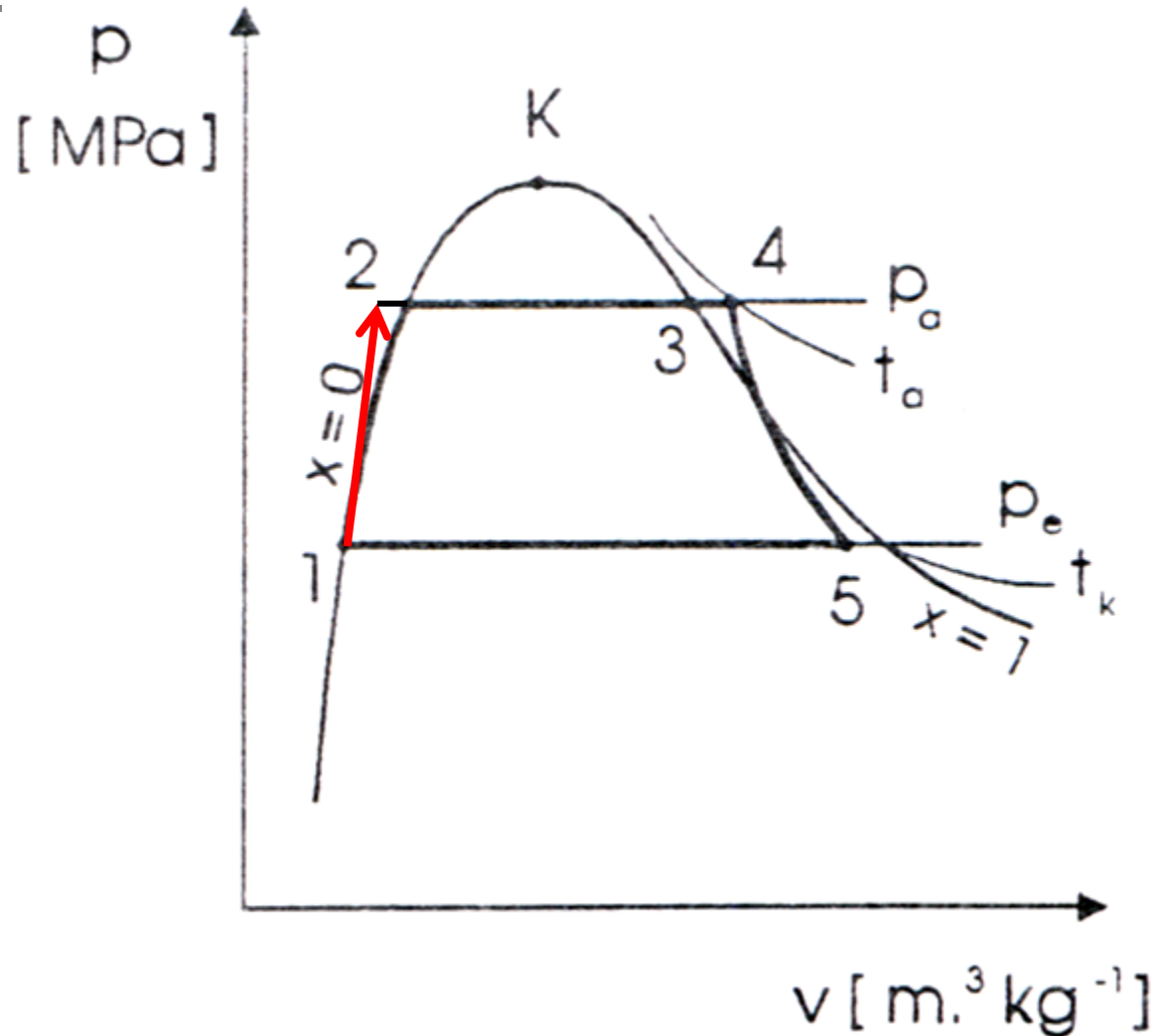
Diagram i-S:

i
[kJ.kg⁻¹]



Cyklus Clausius-Rankin parní turbíny:

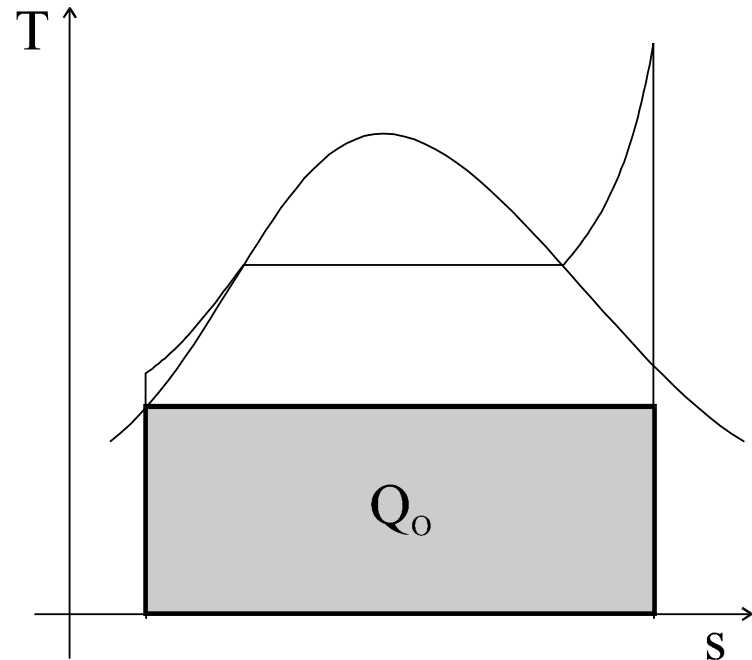
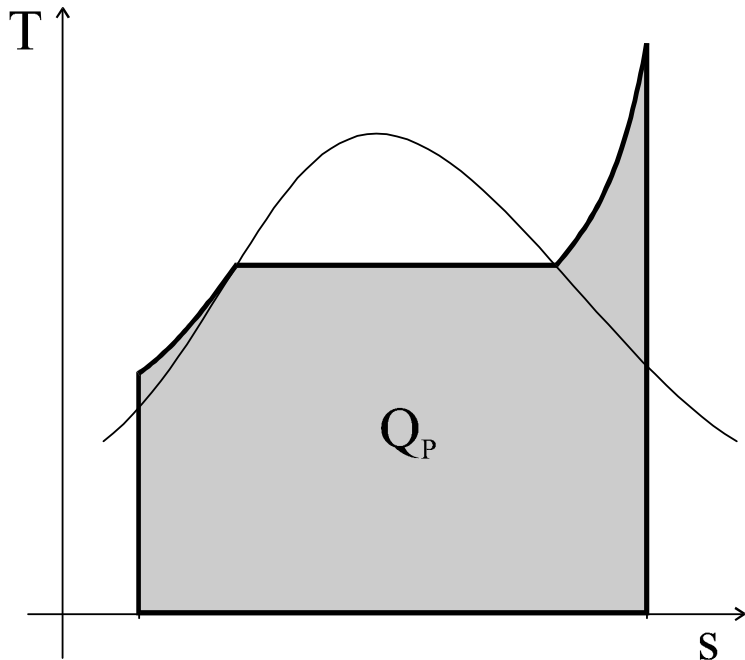
Diagram p-V:



Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Vyšetření z diagramu T-S:

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

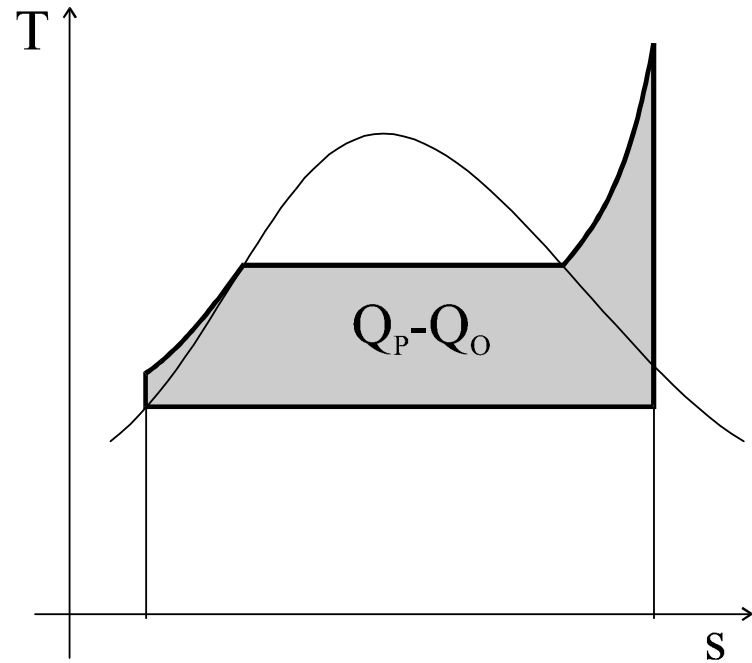
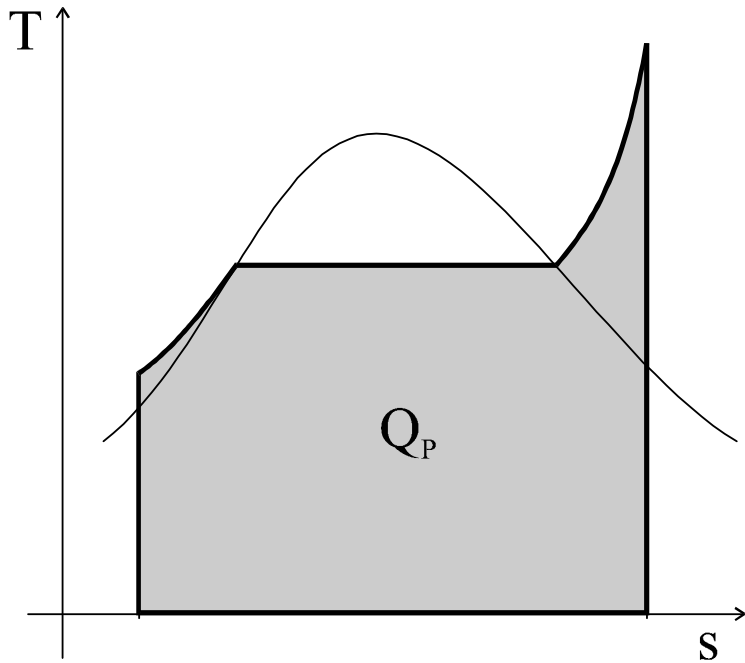


Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Vyšetření z diagramu T-S:

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

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



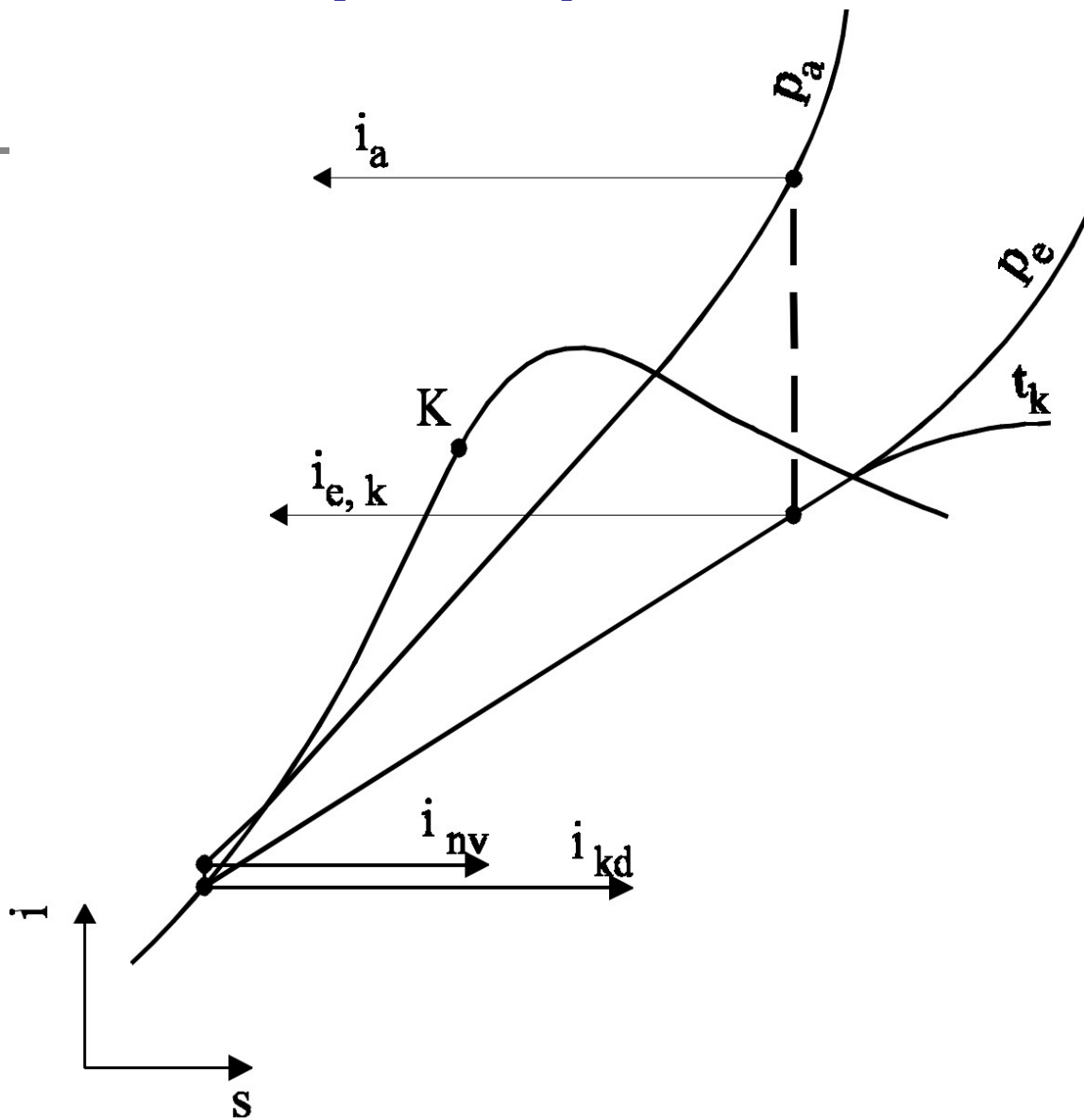
Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Vyšetření z diagramu

i-S:

$$l = (i_a - i_e)$$

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



Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

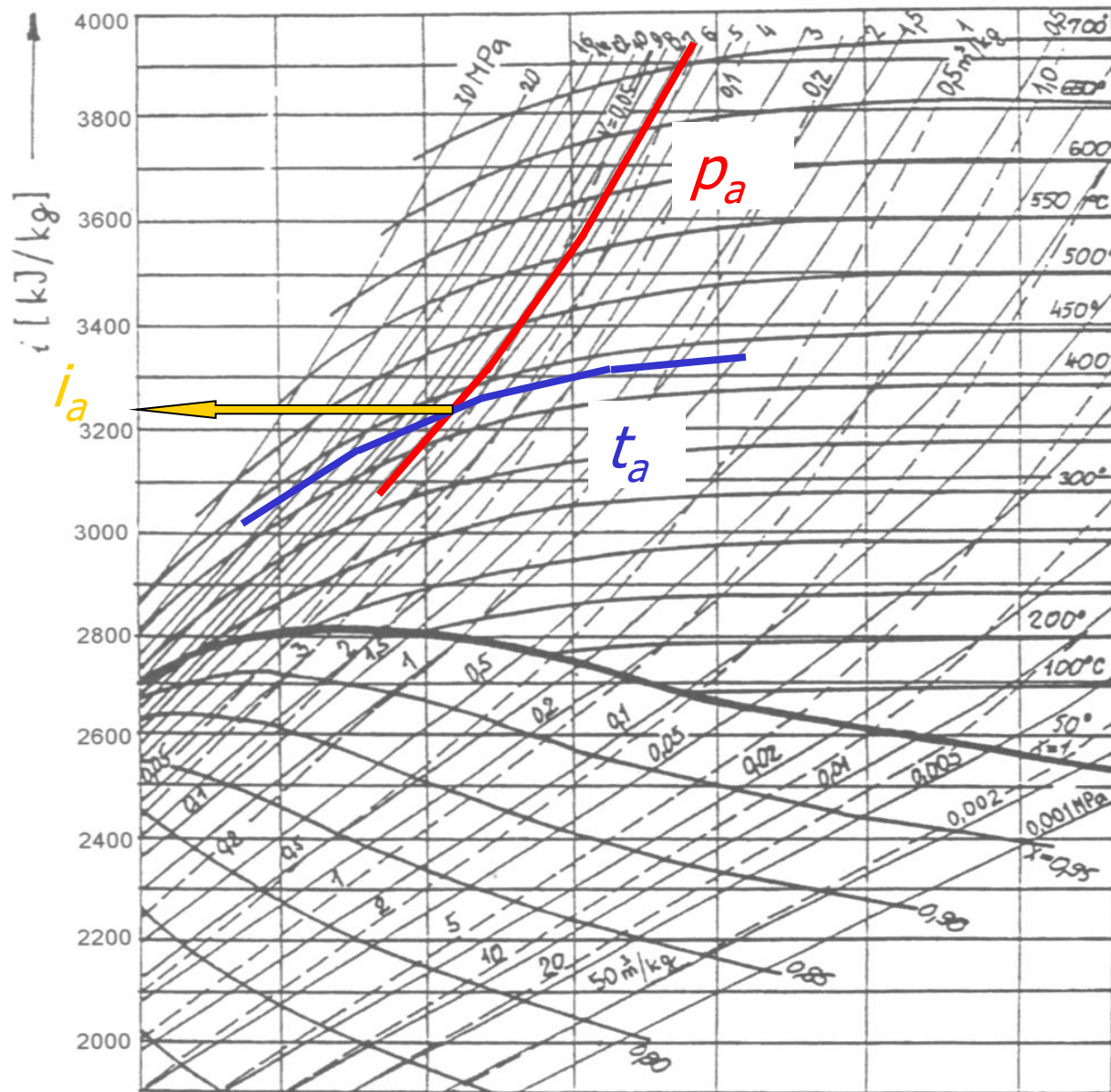
Výpočet
z diagramu i-S:

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

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

=>

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



Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Adiabatická
expanze
v turbíně:

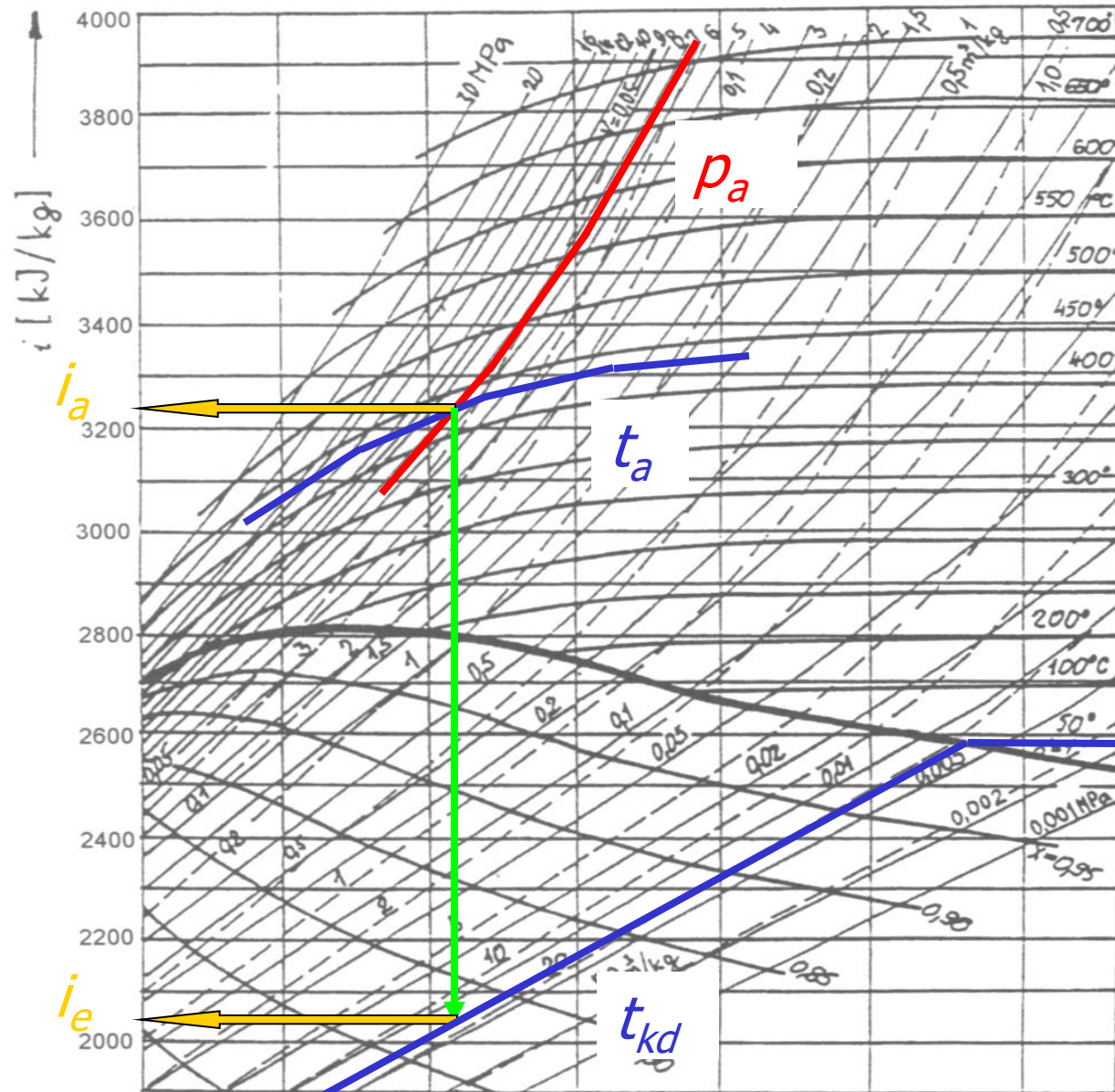
$$t_{kd} = 37^\circ\text{C} \Rightarrow$$

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

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

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

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



Účinnost C-R cyklu parní turbíny:

Parametry
kondenzátu:

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

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

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

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

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

