



VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

Vysoká škola báňská

Technická univerzita Ostrava



# Úvod do teorie spalování tuhých paliv

Ing. Jirka Horák, Ph.D.  
[jirka.horak@vsb.cz](mailto:jirka.horak@vsb.cz)  
<http://vec.vsb.cz/cz/>





**VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM**

Vysoká škola báňská

Technická univerzita Ostrava



# Zkušebna

## Výzkumného energetického centra



**Web:** <http://vec.vsb.cz/zkusebna>



# Základy spalování tuhých paliv v lokálních topeništích

- 1) Co je to palivo a z čeho se skládá?
- 2) Výhřevnost a spalné teplo
- 3) Co je to spalování
- 3) Výpočet množství spalovacího vzduchu
- 4) Výpočet vzniklého množství spalin
- 5) Co je to přebytek vzduchu?





**VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM**

Vysoká škola báňská

Technická univerzita Ostrava



# Co je to palivo a z čeho se skládá?



**Palivo je látka, která hoří a že při tomto procesu se uvolňuje teplo, které využíváme pro naše potřeby (topení, vaření, koupání).**

**Hmotové složení tuhých paliv standardně vychází z definice tří základních složek hořlaviny (h), popeloviny (A) a vody (w)**

$$h + A + w = 1$$



## Spalování biomasy:

Citát: „Stromy vznikly převážně ze vzduchu. Když je spálíme vrátí se zpátky do vzduchu, přičemž se uvolní sálavé teplo, což je sálavé teplo Slunce, které bylo třeba, aby se vzduch přeměnil v dřevo stromů; trocha popela je pozůstatek té části stromů která neměla původ ve vzduchu, ale v zemi“

(Richard P. Feynman)



## Hrubý rozbor uhlí

uhlí v původním stavu (surové, těžené)					
přítěž (balast)			hořlavina U (uhelná hmota)		
voda veškerá $W_t^r$	popelovina M				
voda hrubá $W_{ex}$	zbylá $W_h$	sušina			
		popel $A^r$	$\Delta V$	prchavá hořlavina	tuhý uhlík $C_{fix}$
		zdánlivá prchavá h. V			
zdánlivá hořlavina					



# Hořlavina

- **Hořlavina** představuje nejvýznamější složku paliva, neboť je nositelem energie
- **C, H a S** představují aktivní prvky hořlaviny a jsou nositeli chemicky vázané energie, která se při jejich spalování uvolňuje.
- **O a N** představují pasivní složku hořlaviny, protože nepřinášejí žádnou energetickou hodnotu



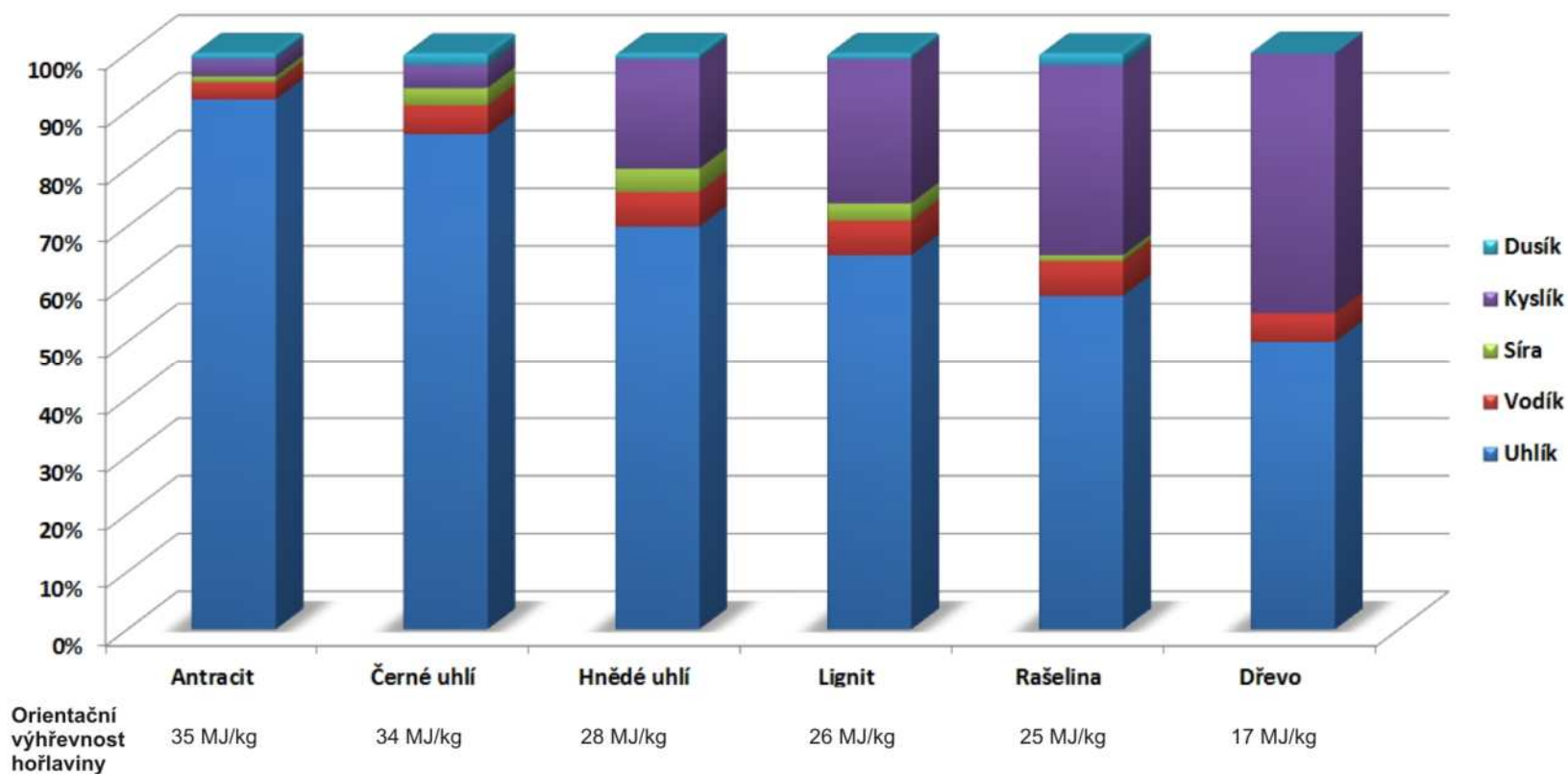
aktivní složky hořlaviny

pasivní složky hořlaviny





## Srovnání prvkového složení hořlaviny různých paliv včetně jejich výhřevností





## Prchavá hořlavina

- množství plynné látky uvolněné z hořlaviny zahříváním za nepřístupu vzduchu při 300-800 °C
- obsah závisí na geologickém stáří (stupeň prouhelnatění paliva)
- geologicky starší palivo má menší prchavou hořlavinu
- uhlí s velkou prchavou hořlavinou se snadno vzněcuje, ale obtížně vyhořívá

Palivo	V <sup>daf</sup> [%]	Palivo	V <sup>daf</sup> [%]
Koks	0 až 5	Hnědé uhlí	45 až 60
Antracit	5 až 10	Rašelina	60 až 73
Černé uhlí	10 až 45	Dřevo	73 až 88



# Popelovina

- směs různě chemicky vázaných minerálů  
(jílové minerály, karbonáty, sulfidy, sulfáty, oxidy a halogenní minerály)
- při spalování probíhají v popelovině chemické reakce a vzniká popel
- se zvyšujícím se obsahem vody a popeloviny se snižuje obsah aktivních prvků a výhřevnost klesá
- dřevo má obsah popeloviny minimální (cca 1%)



## Voda v palivu

- geologicky starší uhlí obsahuje méně vody
- při spalování voda zvětšuje objem spalin a tím i komínovou ztrátu
- snižuje spalovací teplotu
- prodlužuje dobu zapalování paliva
- větší vlhkost spalin zvyšuje rosný bod (nebezpečí koroze teplosměrných ploch na konci kotle)
- vlhké palivo v zimě může až zamrznout



### 1 kg dřeva



w = 0,500 kg = 50 %

O = 0,225 kg = 22,5 %

C = 0,250 kg = 25 %

H = 0,025 kg = 2,5 %

surové dřevo  
(50% vody)

Výhřevnost: 7,3 MJ/kg

Spalné teplo: 9,1 MJ/kg



nízká hodnota výhřevnosti

### 0,714 kg dřeva



w = 0,214 kg = 30 %

O = 0,225 kg = 31,5 %

C = 0,250 kg = 35 %

H = 0,025 kg = 3,5 %

1 rok sušené dřevo  
(30% vody)

Výhřevnost: 11,2 MJ/kg

Spalné teplo: 12,7 MJ/kg



nárůst výhřevnosti o 53 %

### 0,625 kg dřeva



w = 0,125 kg = 20 %

O = 0,225 kg = 36 %

C = 0,250 kg = 40 %

H = 0,025 kg = 4,0 %

2 roky sušené dřevo  
(20% vody)

Výhřevnost: 13,1 MJ/kg

Spalné teplo: 14,5 MJ/kg



nárůst výhřevnosti o 79 %

w - voda  
O - kyslík  
C - uhlík  
H - vodík



**VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM**

Vysoká škola báňská

Technická univerzita Ostrava



**Dobře spálené uhlí je lepší než  
špatně  
spálené mokré dřevo.**



# Výhřevnost a spalné teplo

## Výhřevnost $Q_i$

Množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na výchozí teplotu 20 °C za vzniku vody ve formě páry (jen definice v praxi neuskutečnitelné), [kJ kg<sup>-1</sup>]

## Spalné teplo $Q_n$

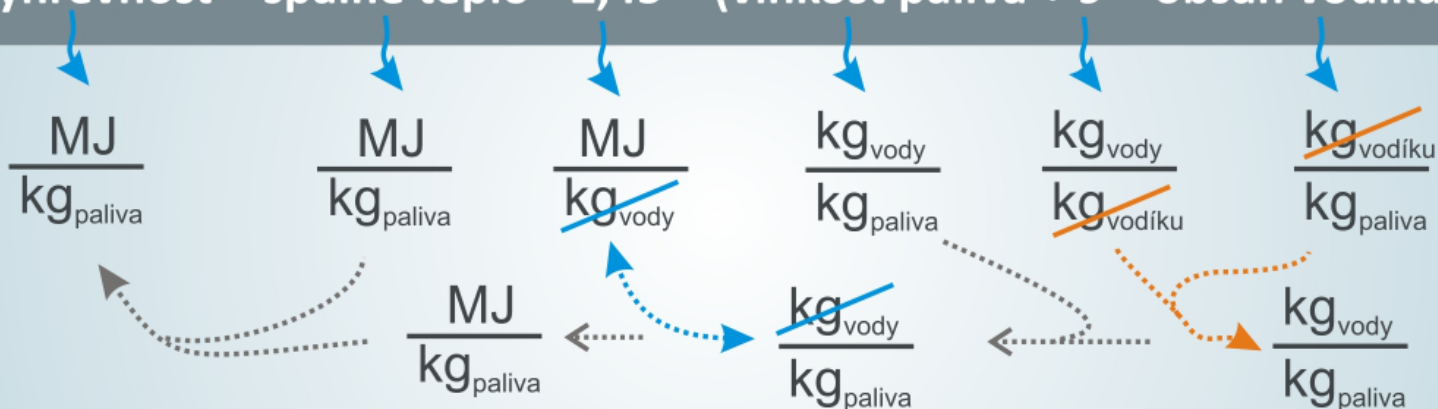
Teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu 20 °C, dojde ke kondenzaci vodní páry, [kJ kg<sup>-1</sup>]

Přepoččet mezi jednotlivými tepley vyjadřuje vzorec:



# Výhřevnost a spalné teplo

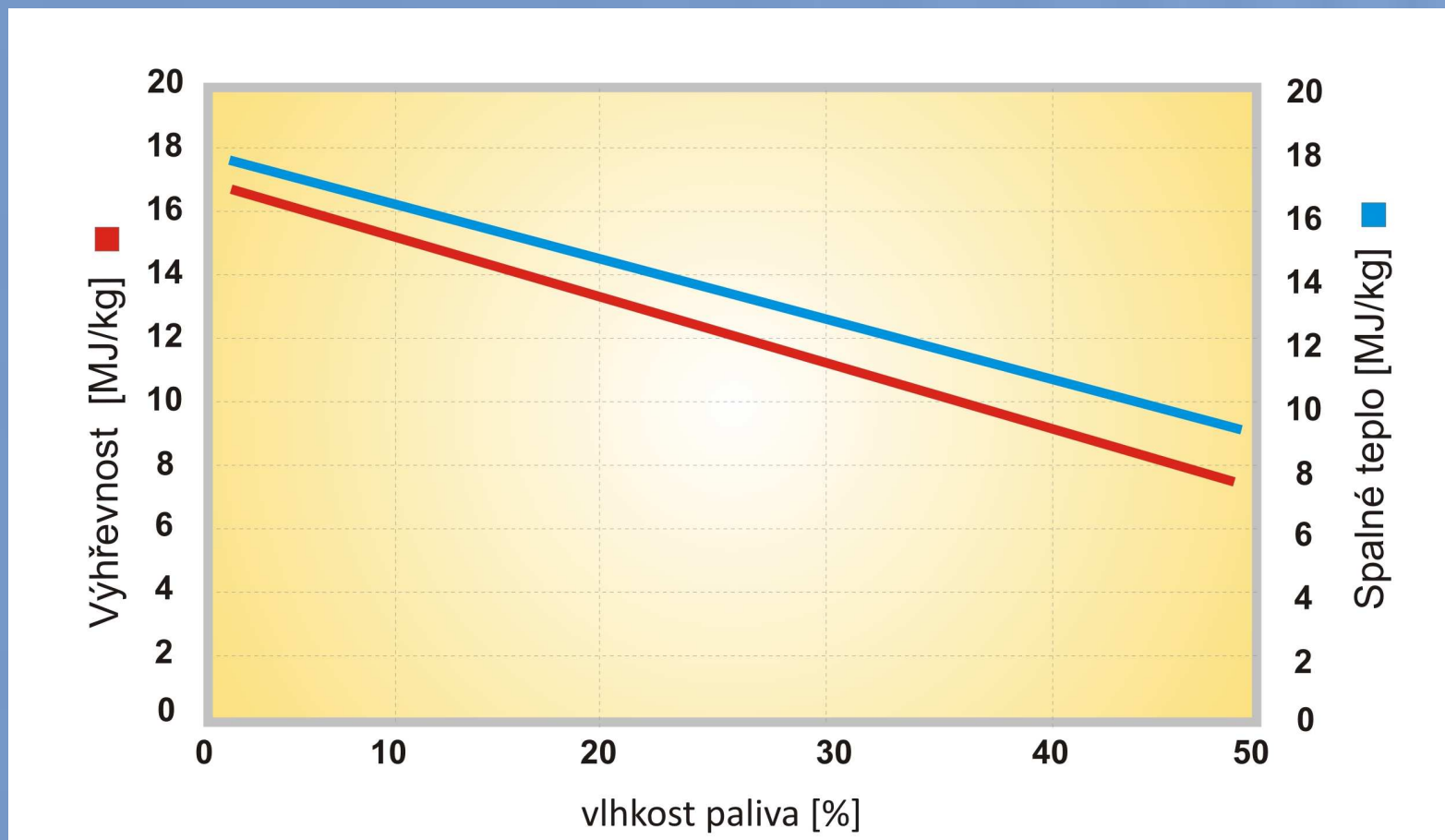
$$\text{výhřevnost} = \text{spalné teplo} - 2,45 * (\text{vlhkost paliva} + 9 * \text{obsah vodíku})$$







## Závislost výhřevnosti a spalného tepla na vlhkosti dřeva

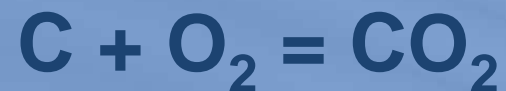




**Spalování** – chemická reakce probíhající při každé teplotě

**Hoření** – fyzikálně chemický děj slučování hořlaviny s oxidem uhlíkovým (vzdušným kyslíkem) za doprovodného světelného efektu a vzniku tepla.

Příkladem je spalování uhlíku dle rovnice:





**Stechiometrické spalování – veškerý kyslík se spotřebuje na vznik produktů hoření**

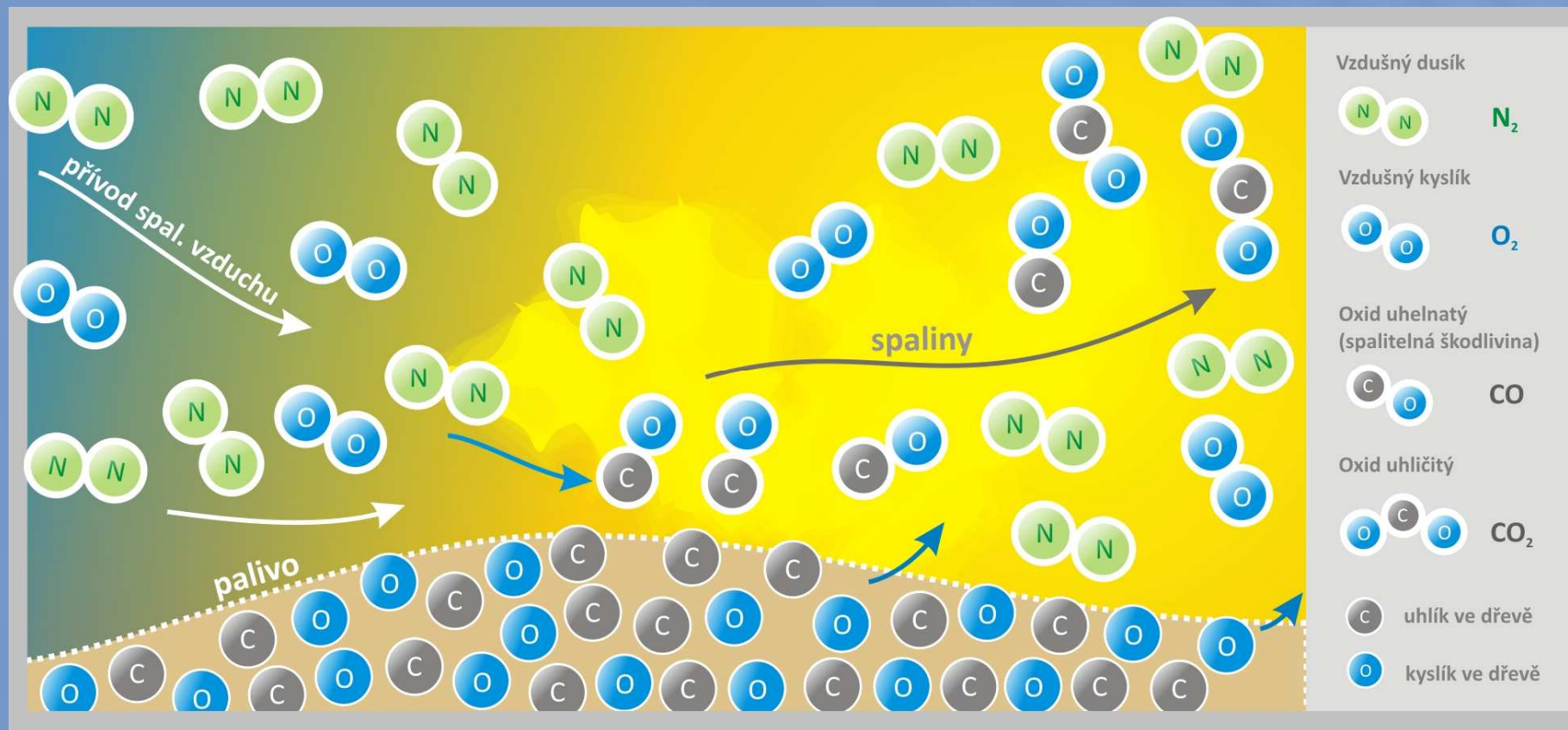
**Spalování – probíhá u hořlavých složek paliva, pro tuhá paliva je to C, H, S**

**Rovnice je možno vyjádřit několika způsoby:**

- molárně (součet počtů molů na levé a na pravé straně rovnice se nemusí rovnat)
- hmotnostně (hmotnost reagentů a produktů hoření je stejná)
- objemově
- kombinovaně (tuhé složky v hmotnostním vyjádření, plynné objemově)

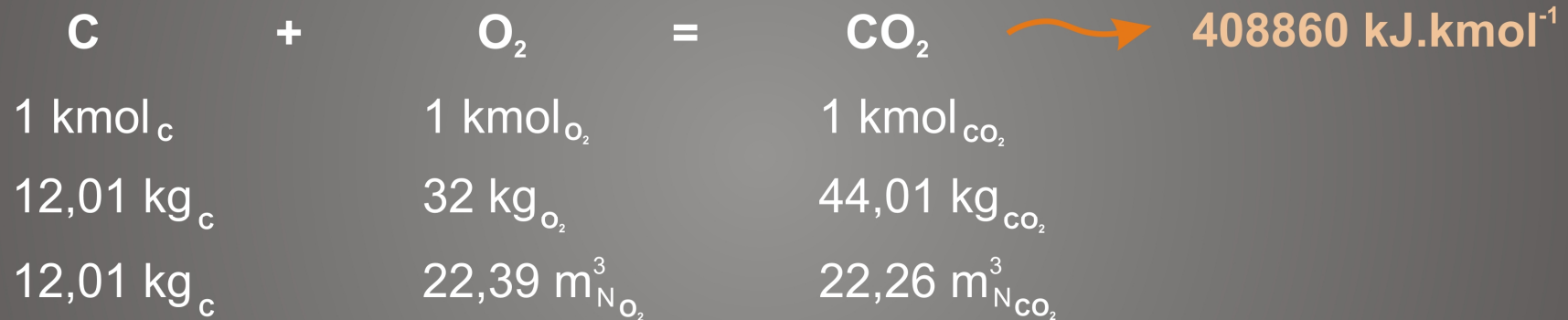


## Zjednodušené znázornění hoření dřeva





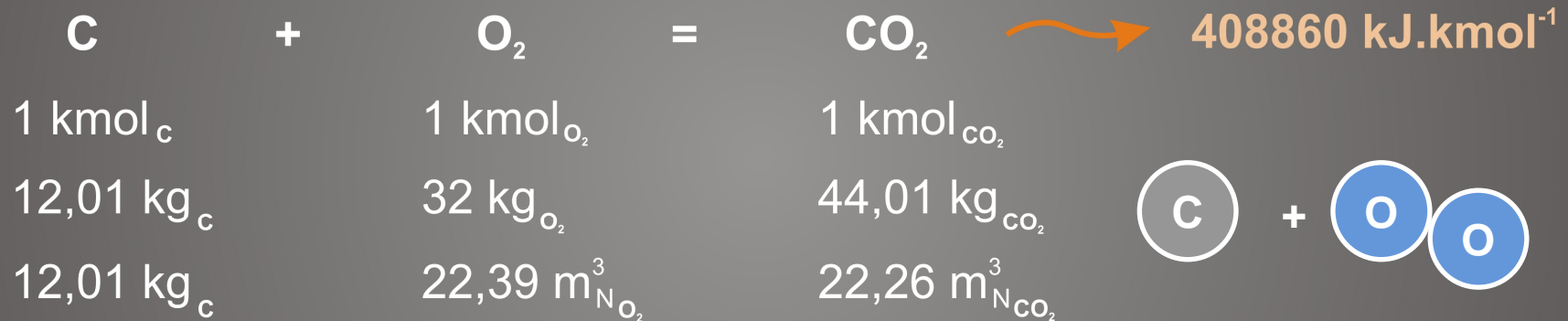
## Spalovací reakce uhlíku a kyslíku



Všechny stechiometrické výpočty spalovacích reakcí se provádí za  
Předpokladu normálního stavu (0°C, 101 325 Pa)



## Spalovací reakce uhlíku a kyslíku



### Ze spalovací rovnice vyplývá

#### Hmotnostní vyjádření

- pro spálení 1 kg C je zapotřebí  $32 : 12,01 = 2,667$  kg O<sub>2</sub>
- spálením 1 kg C vznikne  $44,01 : 12,01 = 3,667$  kg CO<sub>2</sub>



## Hessův zákon

Tepelný efekt reakce nezávisí na cestě, kterou reakce probíhá ke konečnému produktu, nýbrž jen na počátečním a konečném stavu soustavy.

sumární popis oxidace uhlíku:



soubor dílčích reakcí:

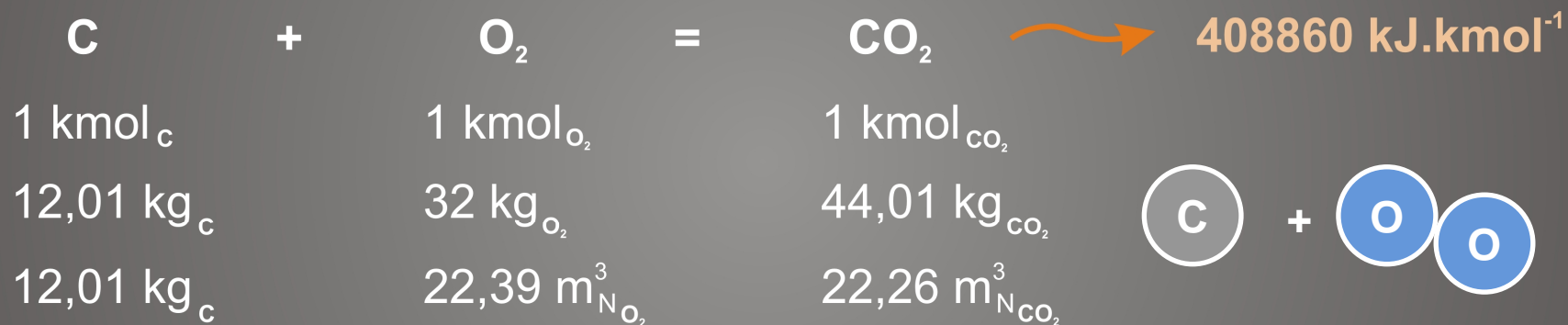


dle Hessova zákona platí:

$$Q_s = Q_1 + Q_2 \quad (28\% + 72\%)$$



## Spalovací reakce uhlíku a kyslíku



### Ze spalovací rovnice vyplývá

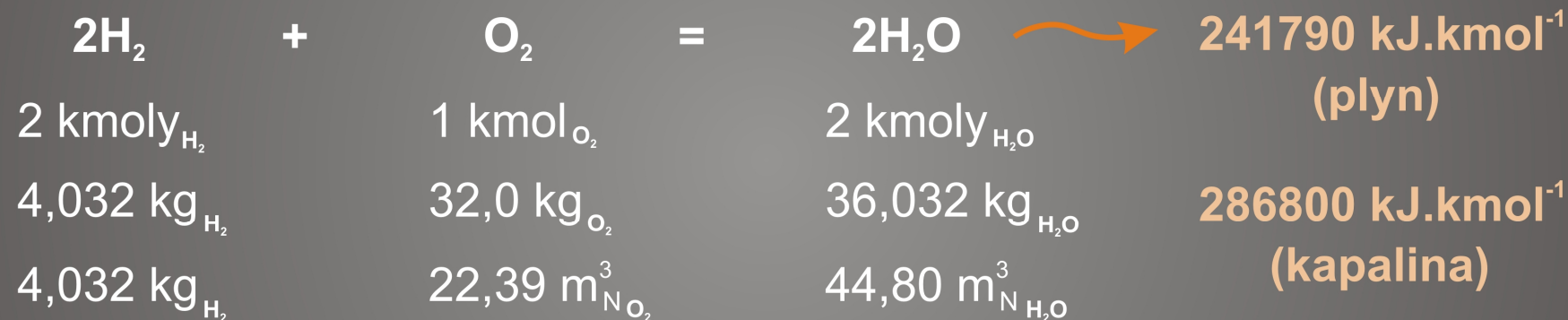
#### Objemové vyjádření

- pro spálení 1 kg C je zapotřebí  $22,39 : 12,01 = 1,865 \text{ m}_N^3 \text{ O}_2$
- spálením 1 kg C vznikne  $22,26 : 12,01 = 1,855 \text{ kg m}_N^3 \text{ CO}_2$



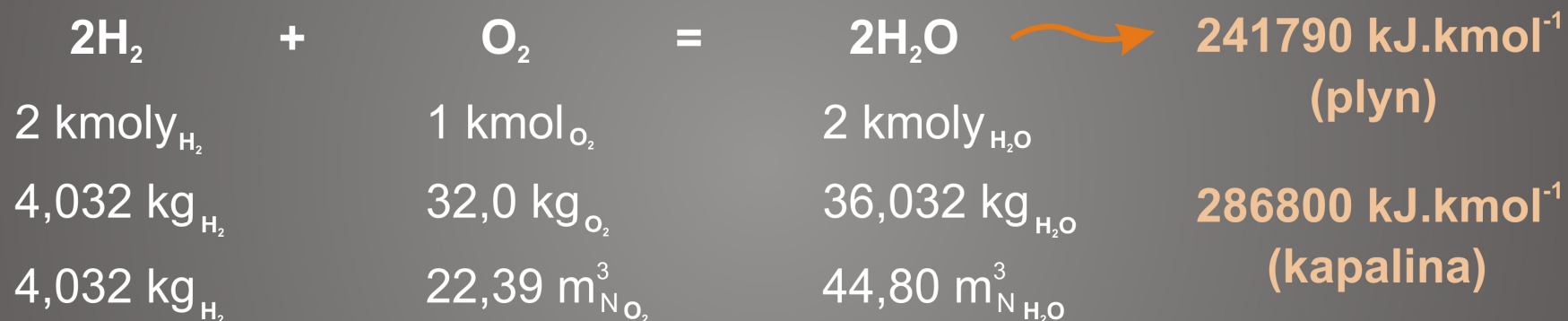


## Spalovací reakce vodíku a kyslíku





## Spalovací reakce vodíku a kyslíku



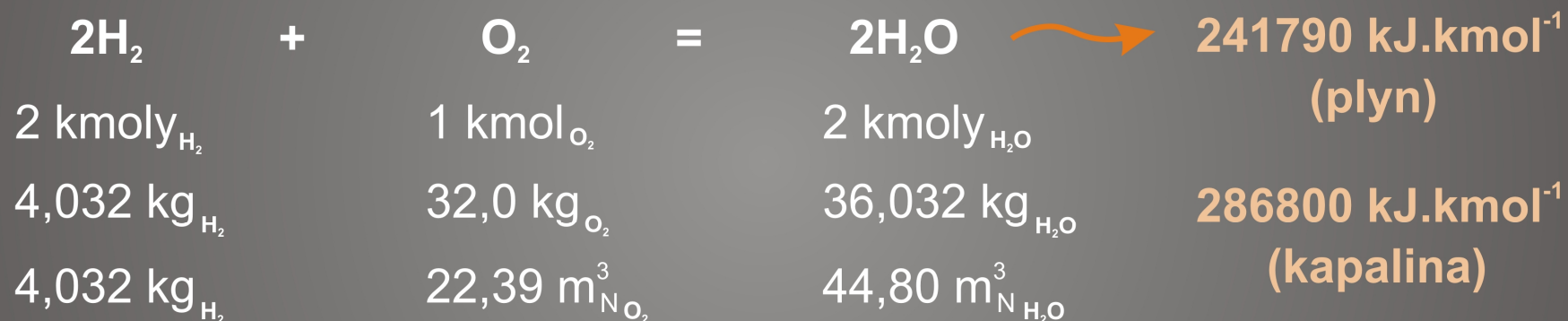
### Ze spalovací rovnice vyplývá

#### Hmotnostní vyjádření

- pro spálení 1 kg H<sub>2</sub> je zapotřebí  $32 : 4,032 = 7,937$  kg O<sub>2</sub>
- spálením 1 kg H<sub>2</sub> vznikne  $36,032 : 4,032 = 8,937$  kg H<sub>2</sub>O



## Spalovací reakce vodíku a kyslíku



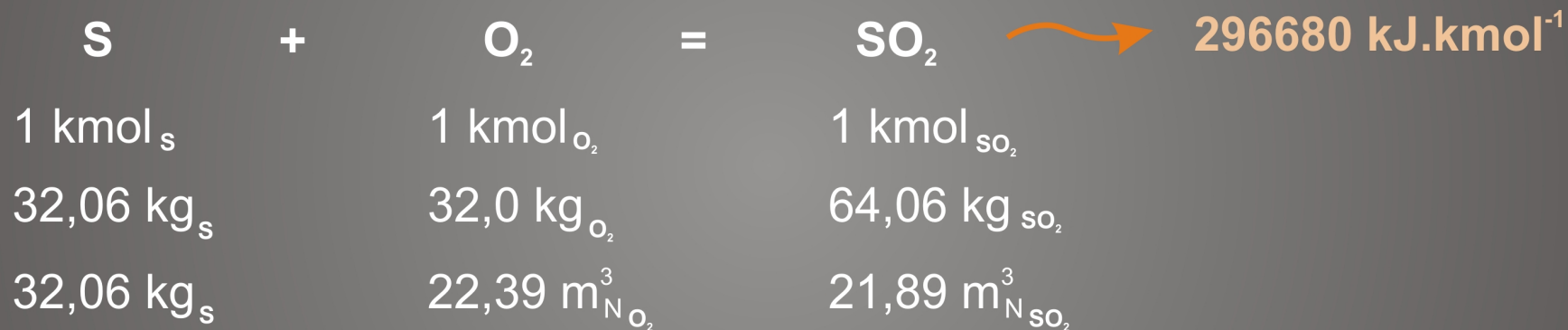
### Ze spalovací rovnice vyplývá

#### Objemové vyjádření

- pro spálení 1 kg H<sub>2</sub> je zapotřebí  $22,39 : 4,032 = 5,553 \text{ m}_N^3 \text{ O}_2$
- spálením 1 kg H<sub>2</sub> vznikne  $44,8 : 4,032 = 11,111 \text{ m}_N^3 \text{ H}_2\text{O}$

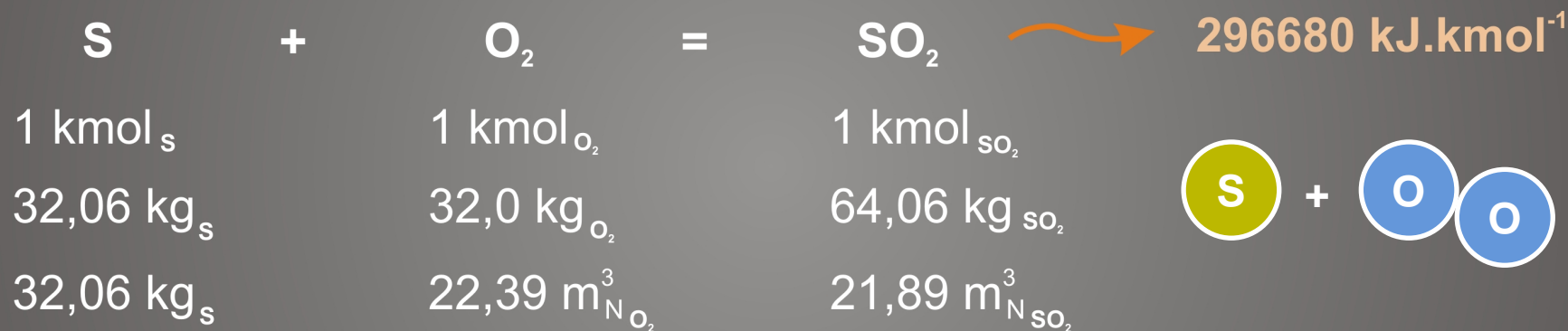


## Spalovací reakce síry a kyslíku





## Spalovací reakce síry a kyslíku



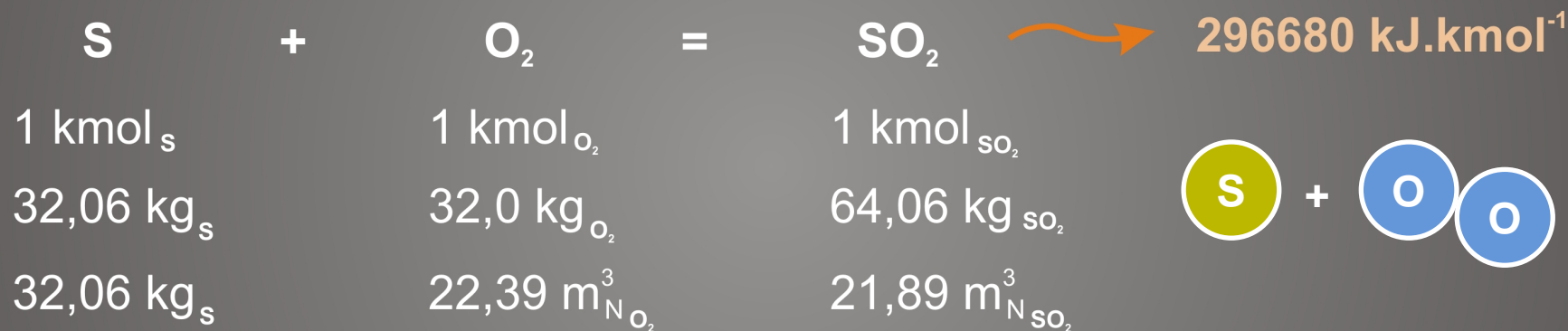
### Ze spalovací rovnice vyplývá

#### Hmotnostní vyjádření

- pro spálení 1 kg S je zapotřebí  $32 : 32,06 = 0,998$  kg O<sub>2</sub>
- spálením 1 kg S vznikne  $64,06 : 32,06 = 1,998$  kg SO<sub>2</sub>



## Spalovací reakce síry a kyslíku



### Ze spalovací rovnice vyplývá

#### Objemové vyjádření

- pro spálení 1 kg S je zapotřebí  $22,39 : 32,06 = 0,699 \text{ m}_N^3 \text{ O}_2$
- spálením 1 kg S vznikne  $21,89 : 32,06 = 0,683 \text{ m}_N^3 \text{ SO}_2$



## Teoretické množství kyslíku pro spálení 1kg paliva (objemově)

$$V_{O_2,t} = 1,865 \cdot C + 5,553 \cdot H + 0,699 \cdot S - 0,700 \cdot O$$

$$\frac{22,39 \text{ m}^3_{N_{O_2}}}{12,01 \text{ kg}_C} \cdot \frac{\text{kg}_C}{\text{kg}_{pal}}$$

kyslík pro spálení  
uhlíku v palivu

$$\frac{22,39 \text{ m}^3_{N_{O_2}}}{4,03 \text{ kg}_{H_2}} \cdot \frac{\text{kg}_{H_2}}{\text{kg}_{pal}}$$

kyslík pro spálení  
vodíku v palivu

$$\frac{22,39 \text{ m}^3_{N_{O_2}}}{32,06 \text{ kg}_S} \cdot \frac{\text{kg}_S}{\text{kg}_{pal}}$$

kyslík pro spálení  
síry (spalitelné)  
v palivu

$$\frac{22,39 \text{ m}^3_{N_{O_2}}}{32 \text{ kg}_{O_2}} \cdot \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_{pal}}$$

odečtený kyslík, který  
je obsažený v palivu



## Průměrné složení dřeva a výpočet množství kyslíku pro spálení 1 kg dřeva

C <sup>r</sup>	45,80	%hm.
H <sup>r</sup>	5,00	%hm.
N <sup>r</sup>	0,12	%hm.
O <sup>r</sup>	38,07	%hm.
S <sup>r</sup>	0,01	%hm.
A <sup>r</sup>	1,00	%hm.
w <sup>r</sup>	10,00	%hm.
suma	100,00	%hm.

Pro spálení 1 kg dřeva je zapotřebí

teoreticky **0,865 m<sup>3</sup>** kyslíku

$$V_{O_2,t} = 1,865 \cdot 0,458 + 5,553 \cdot 0,05 + 0,699 \cdot 0,0001 - 0,700 \cdot 0,381$$

$$V_{O_2,t} = \mathbf{0,865} \frac{m_{NO_2}^3}{kg_{pal}}$$





## Teoretické množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva

### Množství suchého vzduchu

$$V_{VZ,t}^S = \frac{100}{21} \cdot V_{O_2,t} = \frac{1}{0,21} \cdot V_{O_2,t}$$
$$\frac{m_{N_{VZ}}^3}{m_{N_{O_2}}^3} \cdot \frac{m_{NO_2}^3}{kg_{pal}} \rightarrow \frac{m_{N_{VZ}}^3}{kg_{pal}}$$

### Množství vlhkého vzduchu

$$V_{VZ,t}^V = v \cdot V_{VZ,t}^S$$
$$\frac{m_{N_{VZ}}^3}{kg_{pal}} = 1 \cdot \frac{m_{N_{VZ}}^3}{kg_{pal}}$$

$v$  – poměrné zvětšení objemu vlhkého vzduchu oproti vzduchu suchému  
V našich podmínkách lze tuto hodnotu zanedbat a množství suchého vzduchu a vlhkého vzduchu se bude rovnat



## Teoretické množství vzduchu pro spálení 1kg dřeva

$$V_{O_2,t} = 1,865 \cdot 0,458 + 5,553 \cdot 0,05 + 0,699 \cdot 0,0001 - 0,700 \cdot 0,381$$

$$V_{O_2,t} = 0,865 \frac{m^3_{NO_2}}{kg_{pal}}$$

$$V_{VZ,t} = \frac{1}{0,21} \cdot V_{O_2,t} = \frac{1}{0,21} \cdot 0,865$$

$$V_{VZ,t} = 4,12 \frac{m^3_{NVZ}}{kg_{pal}}$$

Pro spálení 1 kg dřeva je tedy  
zapotřebí teoreticky  
min. 4,12 m<sup>3</sup> vzduchu

Pro 1 kg uhlí je to cca. 6 m<sup>3</sup>  
vzduchu



## Přebytek vzduchu

- v praxi je do ohniště dodáváno větší množství spalovacího vzduchu než množství teoretické
- poměr skutečného a teoretického množství spal. vzduchu nazýváme součinitelem přebytku vzduchu  $n$  [1]

$$n = \frac{V_{VZ,sk}}{V_{VZ,t}}$$

Diagram illustrating the coefficient of excess air ( $n$ ). The numerator is  $V_{VZ,sk}$  (actual air volume) and the denominator is  $V_{VZ,t}$  (theoretical air volume). The units for both are  $\frac{m^3_{N_{VZ}}}{kg_{pal}}$ . An arrow points from the '1' below  $n$  to the denominator, indicating that  $n=1$  represents the theoretical case.

Automatické a zplyňovací kotle –  $n$  cca. 2

Kotle s ruční dopravou paliva –  $n$  cca. 2 až 4

Otevřené krby –  $n$  cca. až 20



## Výpočet přebytku vzduchu

- z koncentrace kyslíku ve spalinách

$$n = \frac{21}{21 - O_2}$$

Diagram illustrating the calculation of air excess (n) based on oxygen concentration in flue gases (O<sub>2</sub>).

The diagram shows the formula  $n = \frac{21}{21 - O_2}$  with arrows pointing to the components:

- 21**: přbytek vzduchu (air excess)
- 21 - O<sub>2</sub>**: podíl kyslíku v přebytku spal. vzduchu v % (percentage of oxygen in excess combustion air)
- O<sub>2</sub>**: koncentrace kyslíku ve spalinách v % (oxygen concentration in flue gases in %)



## Výpočet přebytku vzduchu

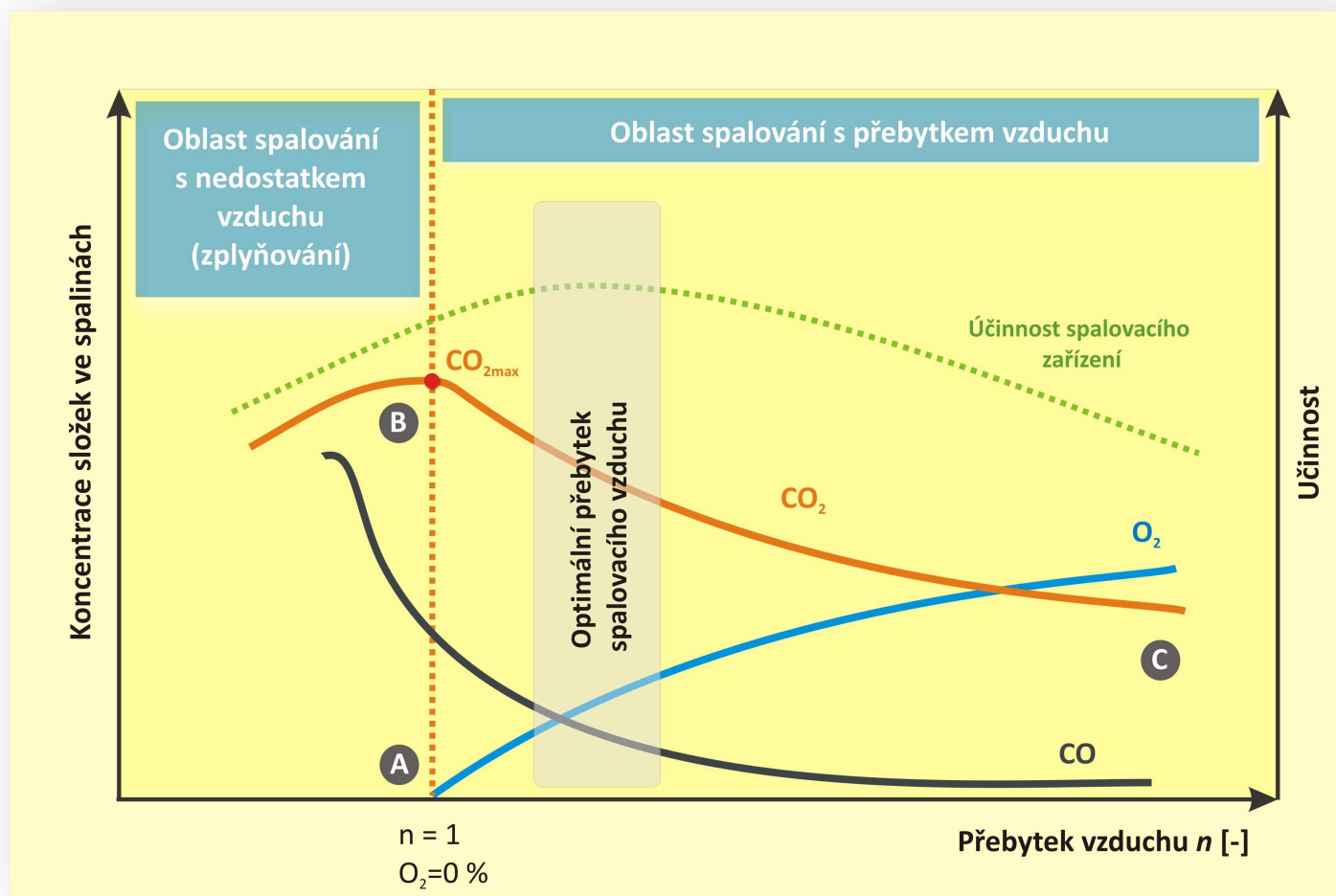
- z koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách

$$n = \frac{\text{CO}_{2, \text{max}}}{\text{CO}_2}$$

přebytek vzduchu

max. koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při stechiometrickém spalování  
(pro dřevo  $\text{CO}_{2, \text{max}} = 20$ )

koncentrace  $\text{CO}_2$  ve spalinách





## Množství skutečného vzduchu

$$V_{VZ,sk} = n \cdot V_{VZ,t}$$

Při spalování dřeva v klasickém prohořivacím kotli např. s  $n = 4$  bude skutečné množství spalovacího vzduchu:

$$V_{VZ,sk} = n \cdot V_{VZ,t} = 4 \cdot 4,12$$

$$V_{VZ,sk} = 16,5 \frac{m^3_{N_{VZ}}}{kg_{pal}}$$



## Množství vzniklých spalin

### Teoretické množství suchých spalin

- výpočet je podobný výpočtu množství spalovacího vzduchu

$$\frac{m_{N_{SP}}^3}{kg_{pal}} \leftarrow V_{sp,t}^s = 1,855 \cdot C + 0,683 \cdot S + 0,796 \cdot N + 0,79 \cdot V_{VZ,t}^s$$

$\frac{22,26 \text{ m}^3_{N_{CO_2}}}{12,01 \text{ kg}_C} \cdot \frac{kg_C}{kg_{pal}}$   
.....  
objem vzniklého  $CO_2$

$\frac{21,89 \text{ m}^3_{N_{SO_2}}}{32,06 \text{ kg}_S} \cdot \frac{kg_S}{kg_{pal}}$   
.....  
objem vzniklého  $SO_2$

$\frac{22,40 \text{ m}^3_{N_{N_2}}}{28 \text{ kg}_N} \cdot \frac{kg_N}{kg_{pal}}$   
.....  
dusík z paliva

$\frac{79 \text{ m}^3_{N_{N_2}}}{100 \text{ m}^3_{N_{VZ}}} \cdot \frac{m^3_{N_{VZ}}}{kg_{pal}}$   
.....  
dusík ze spalovacího vzduchu





# Množství vzniklých spalin

## Množství vody ve spalinách

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,1 \cdot H + 1,244 \cdot w + (v - 1) \cdot V_{\text{VZ,t}}^s$$

$\frac{\text{m}^3_{\text{N}_{\text{H}_2\text{O}}}}{\text{kg}_{\text{pal}}}$

$\frac{44,80 \text{ m}^3_{\text{N}_{\text{H}_2\text{O}}}}{4,032 \text{ kg}_{\text{H}_2}} \cdot \frac{\text{kg}_{\text{H}_2}}{\text{kg}_{\text{pal}}}$

.....  
vlhkost po  
spálení vodíku  
z paliva

$\frac{22,40 \text{ m}^3_{\text{N}_{\text{H}_2\text{O}}}}{18 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{pal}}}$

.....  
vlhkost z vody  
v palivu

vlhkost ze spalovacího  
vzduchu



## Množství spalin

Teoretické množství vlhkých spalin =  
teoretické množství suchých spalin + množství vody ve spalinách

$$V_{sp,t}^V = V_{sp,t}^S + V_{H_2O}$$

$\frac{m_{N_{SP}}^3}{kg_{pal}}$

teoretické množství suchých spalin

$\frac{m_{N_{SP}}^3}{kg_{pal}}$

množství vody ve spalinách

$\frac{m_{N_{H_2O}}^3}{kg_{pal}}$



## Množství spalin

Pokud vezmeme v úvahu přebytek vzduchu, tak skutečné množství vzniklých spalin bude:

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,t}^v + (n-1) \cdot V_{vz,t}^v$$

$\frac{m_{N_{SP}}^3}{kg_{pal}}$

teoretické množství  
vlhkých spalin

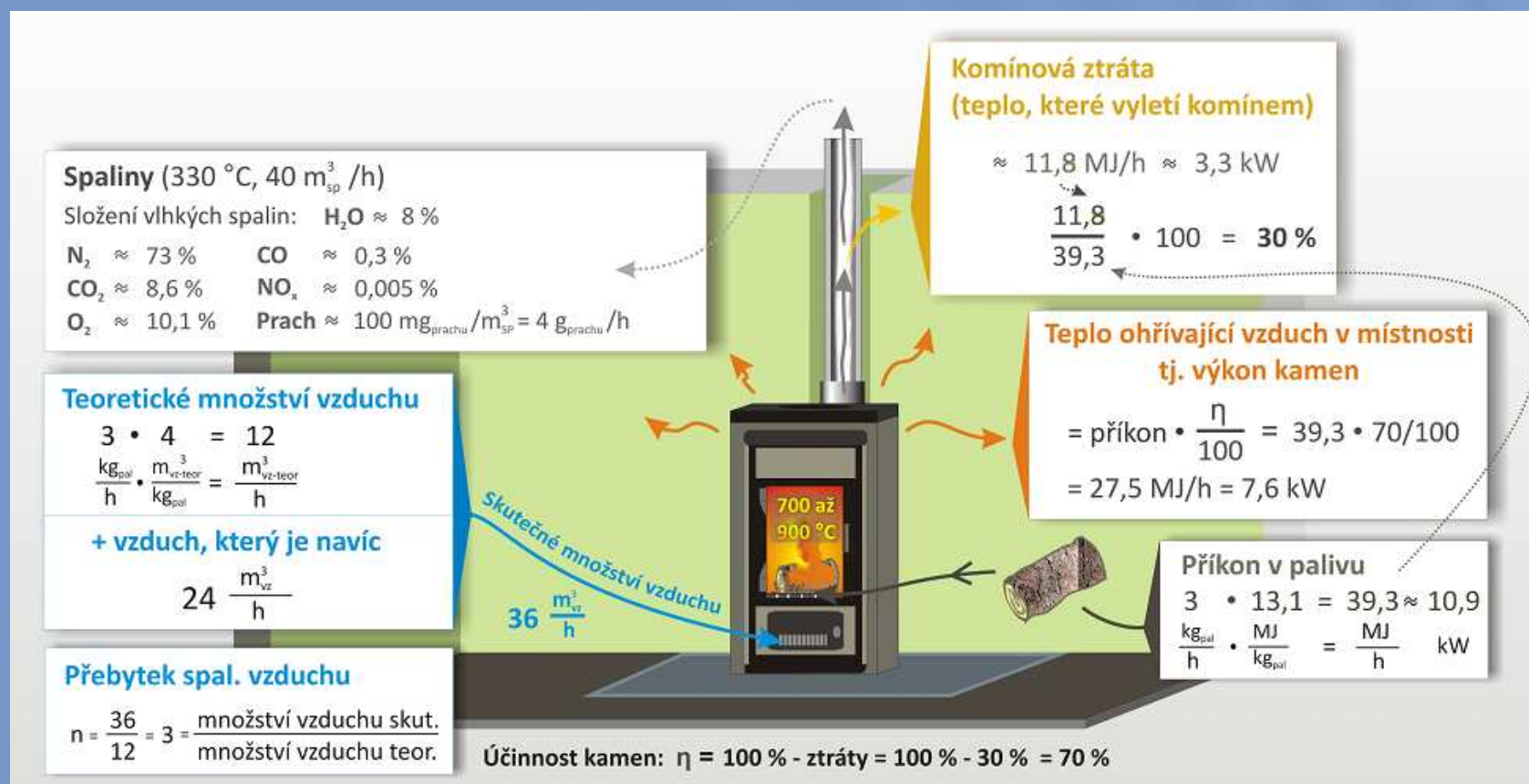
$\frac{m_{N_{SP}}^3}{kg_{pal}}$

přebytek vzduchu  
ve spalinách

$\frac{m_{N_{VZ}}^3}{kg_{pal}}$



## Zjednodušeně lze říct, že množství spalovacího vzduchu a množství vzniklých spalin jsou si podobné





**Děkuji za pozornost.**