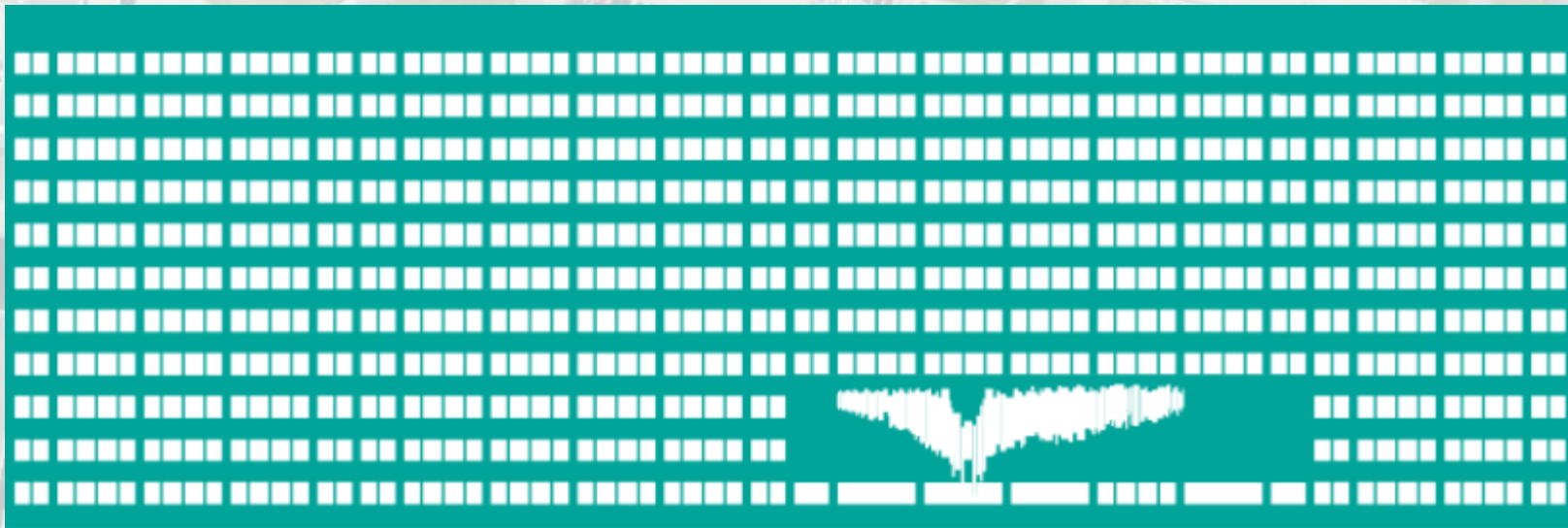




VŠB TECHNICKÁ  
UNIVERZITA  
OSTRAVA



# Parametry spalovacího procesu

Doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek

Rychlost hoření paliva určuje přímo okamžitý tepelný výkon ohniště. S ním souvisí dosažená teplota v ohništi, velikost komínové ztráty a také vytváření podmínek pro dokonalé vyhoření hořlaviny paliva, zajišťující také minimální produkci spalitelných škodlivin.

Zdroj: <http://energetika.tzb-info.cz/8716-proces-horeni-kusoveho-dreva>, Kubesa, P. Horák, J.

## Spalovací proces můžeme do tří hlavních částí:

### **ZAPALOVÁNÍ** - nejdůležitější část

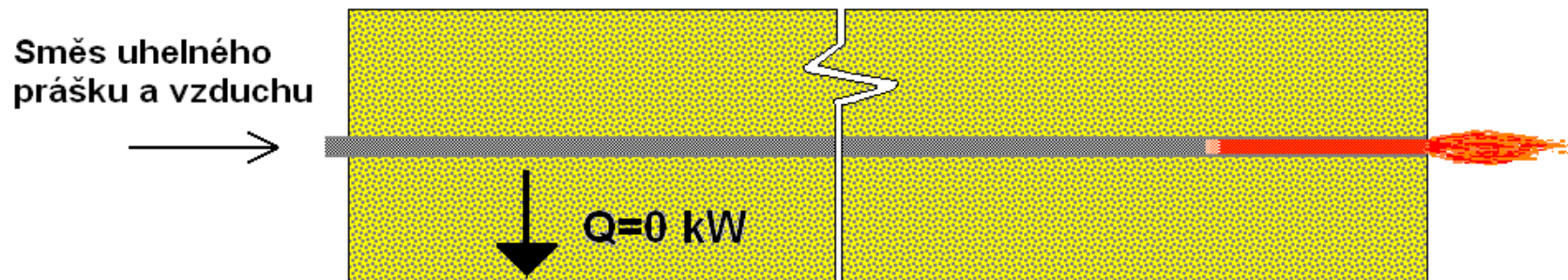
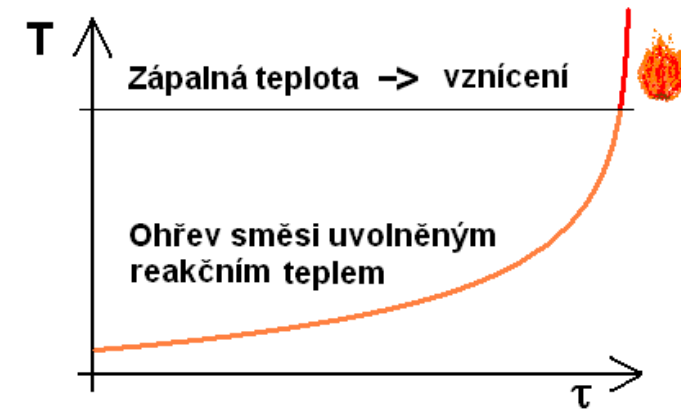
- sušení a ohřev paliva
- uvolnění a zapálení prchavé hořlaviny
- zapálení a hoření tuhého zbytku

### **HOŘENÍ** - stabilní režim

- uvolňuje se podstatná část tepla
- dá se do něj zasahovat

### **DOHOŘÍVÁNÍ** - vyhořívají poslední zbytky paliva

Představme si dostatečně dlouhou dokonale izolovanou trubku, ve které proudí směs uhlénoho prášku a vzduchu. Již při libovolně nízké vstupní teplotě probíhá oxidační reakce a uvolňované teplo směs ohřívá. Ohřevem se podle Arrheniova zákona zvyšuje rychlost reakce, a tím roste i množství uvolněného tepla. Proces tedy po čase dospěje ke vznícení.



## Rychlost reakce ( rychlost vznícení) je určena:

- koncentrací reagentů,
- složením hořlaviny,
- počáteční teplotou.

Tyto podmínky jsou vstupními podmínkami ovlivňujícími rychlost chemické reakce, kterou lze tedy urychlit:

- zvýšením koncentrace prášku ve směsi,
- zvýšením koncentrace kyslíku ve směsi,
- volbou reaktivnějšího uhlí (např. s vyšším podílem prchavé hoř.),
- zvýšením počáteční teploty směsi.

Druhá skupina podmínek souvisí s tepelnými poměry vzněcující se soustavy, která ve skutečnosti nebude tepelně izolovaná od okolí.

Uvolněné reakční teplo  $Q_R$  se tedy neužije pouze k ohřevu aktivních látek  $Q_{OA}$  (kyslíku a hořlaviny), ale i k ohřevu pasivních látek  $Q_{OP}$  (popeloviny, vzdušného dusíku a vody), a část tepla se předá do okolí  $Q_Z$ .

Aby proces šel ke vznícení, musí být reakční teplo větší než součet tepla k ohřevu a tepla odvedeného do okolí.

$$Q_R > Q_O + Q_Z$$

$$Q_R > Q_{OA} + Q_{OP} + Q_Z$$

$Q_O = Q_{OA} + Q_{OP}$  můžeme brát za konstantní, nedá se příliš měnit.

## Reakční teplo lze vyjádřit pro 1 m<sup>3</sup> směsi takto:

Jelikož se jedná o počáteční fázi hoření, předpokládá se dostatečné promíchání směsi a nízké teploty spalování=>kinetický režim.

$$Q_R = Q_i \cdot \beta_S \cdot C_O \cdot C_P \cdot s_t \cdot k_0 \cdot e^{\left(-\frac{E_A}{R \cdot T}\right)} \quad [kW \cdot m^{-3}]$$

Kde:

$Q_i$ ...výhřevnost paliva [kJ.kg<sup>-3</sup>]

$\beta_S$ ...stechiometrický koeficient [1]

$C_O, C_P$ ...koncentrace kyslíku a paliva [kg.m<sup>-3</sup>]

$s_t$ ...teplosměnná plocha 1 m<sup>3</sup> směsi [m<sup>-1</sup>]

$k_0$ ...maximální hodnota součinitele rychlosti reakce [m.s<sup>-1</sup>]

$E_A$ ...aktivační energie [kJ.kmol<sup>-1</sup>]

$R$ ...univerzální plynová konstanta [kJ.kmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$T$ ...termodynamická teplota [K]



**Ve stejných jednotkách se dá vyjádřit i množství tepla odvedeného do okolí:**

$$Q_Z = s_t \cdot \alpha \cdot (t_s - t_o) \quad [kW \cdot m^{-3}]$$

Kde:

$s_t$ ...teplosměnná plocha 1 m<sup>3</sup> směsi [m<sup>-1</sup>]

$\alpha$ ...součinitel přestupu tepla [kW.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]

$t_s$ ...teplota směsi [K]

$t_o$ ...teplota okolí [K]

## Jak se dá urychlit průběh vzněcování z pohledu tepelných poměrů?

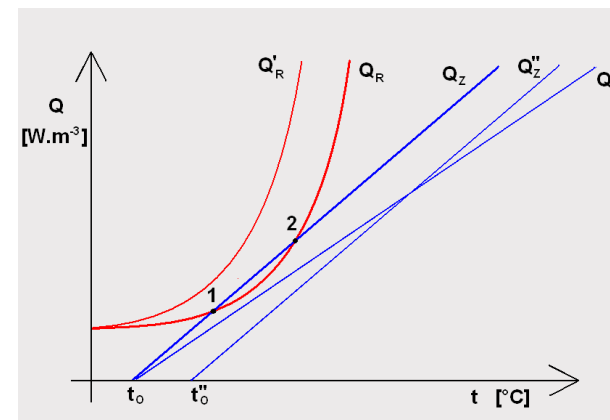
- 1) Omezení tepla předaného do okolí  $Q_R > Q_O + Q'_Z$
- 2) Zvýšení teploty spalovacího vzduchu  $Q_R > Q_O + Q''_Z$
- 3) Zvýšení reakčního výkonu  $Q'_R > Q_O + Q_Z$
- 4) Přívod dodatečného tepla  $Q_R > Q_O + Q_Z - Q_D$   
 $Q''_R > Q_O + Q_Z$

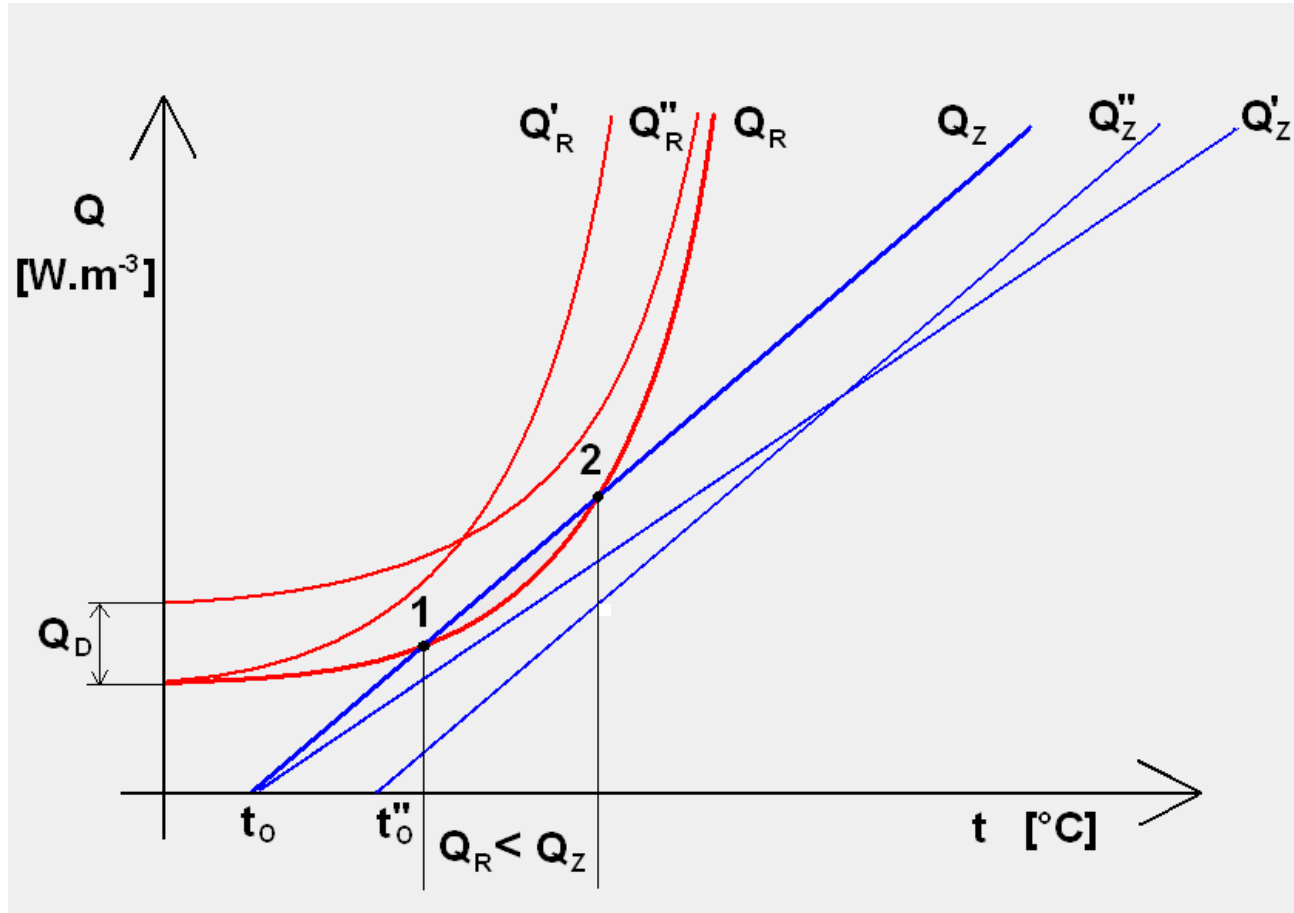
Pokud není  $Q_R$  větší pravá strana rovnice, proces je nestabilní a zastaví se. Podmínka, že  $Q_R$  je větší než pravá strana rovnice, musí platit pro celý průběh zapalování.

Na obrázku (na dalším snímku) jsou zobrazeny průběhy jednotlivých tepelných výkonů v závislosti na čase.

Silně vyznačené průběhy reakčního výkonu a tepelného výkonu do okolí se protínají v bodě 1 a 2. Mezi těmito body je odvod tepla do okolí větší, než je uvolňované reakční teplo. Směs se tedy vychlazuje a proces není schopen oblast překonat.

Vyhnout se této oblasti lze několika způsoby, které byly naznačeny na předešlém snímku.





- $Q'_Z$ ...omezení tepla odváděného do okolí
- $Q''_Z$ ...zvýšení teploty spalovacího vzduchu
- $Q'_R$ ...zvýšení reakčního výkonu
- $Q''_R$ ...přívod dodatečného tepla

### Ad 1) Omezení tepla předaného do okolí

- tepelná izolace ústí hořáku

### Ad 2) Zvýšení počáteční teploty

- ohřev směsi na vyšší teploty

### Ad 3) Zvýšení reakčního výkonu

- použití reaktivnějšího paliva ( $k_0$ ,  $E_A$ )
- použití paliva s vyšší výhřevností
- zvýšení koncentrace reagentů (kyslíku, paliva)
- zvýšení reakčního povrchu (jemnost mletí)

### Ad 4) Přívod dodatečného tepla

- stabilizační hořák spalující kvalitní palivo
- recirkulace spalin

## Recirkulace spalin - vířivé hořáky

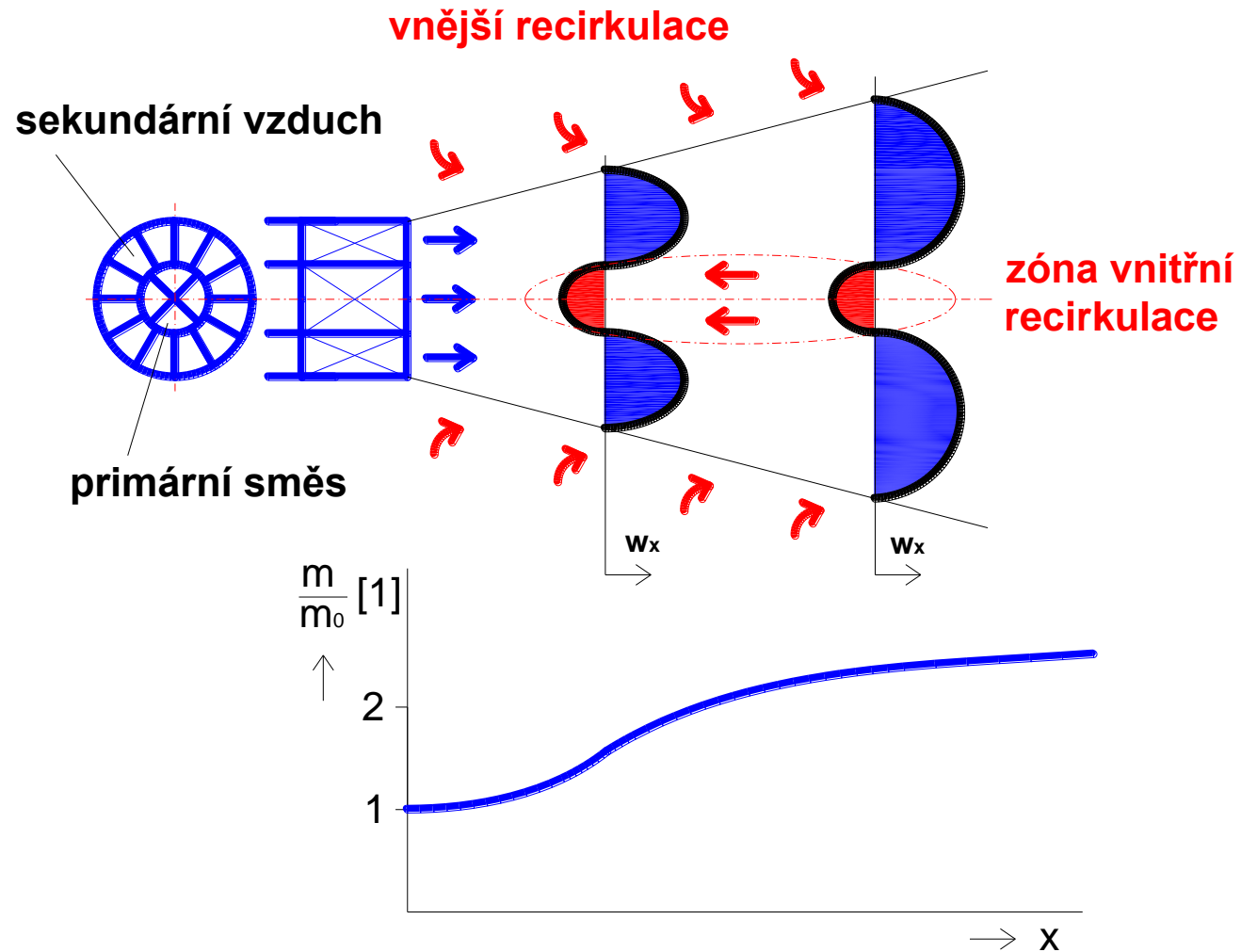
Vnitřní přívod - primární směs  
- zaviřovací lopatky  
- rotace proudu

Vnější přívod - sekundární vzduch  
- zaviřovací lopatky  
- rotace v opačném směru

Vlivem víření dojde k **rychlému promíšení**, vytvoření **zóny vnitřní recirkulace**, vnější recirkulace, tím **přívodu tepla a hmoty** do proudu. Přívodem tepla dochází ke stabilizaci hoření, je však nutno říci, že dochází i ke **snižování koncentrace kyslíku** v proudu.

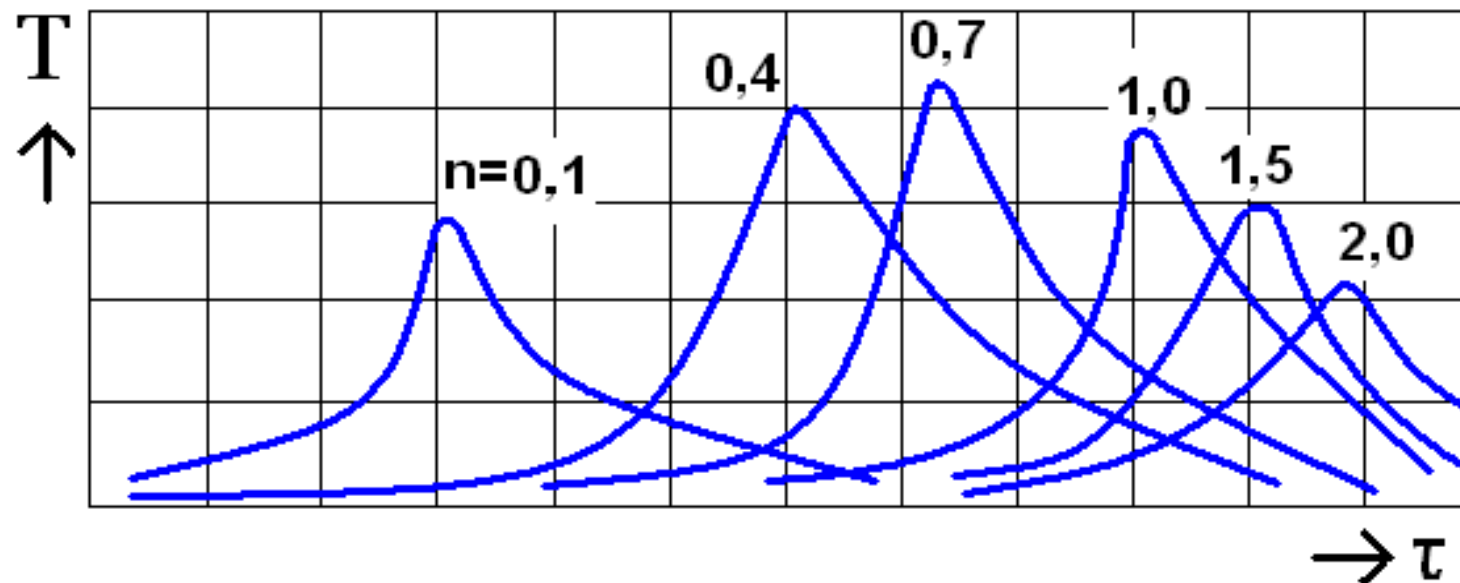
Vířivé hořáky jsou dražší než proudové, proto se používají pro stabilizaci v obtížných podmínkách a pro hůře zapalitelné uhlí.

## Vnější a vnitřní recirkulace spalin v ohništi



Vznícení se dá matematicky namodelovat, viz. graf, přičemž se nejčastěji hodnotí průběh teploty v čase.

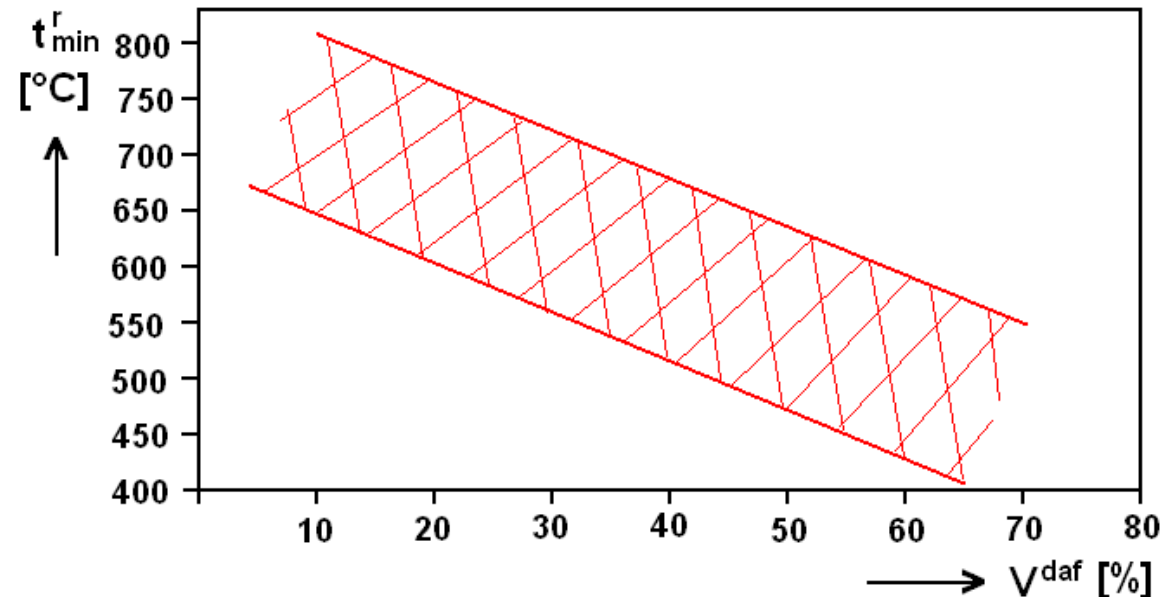
Se vrůstajícím přebytkem klesá koncentrace prášku ve směsi a vzduch spotřebovává teplo ke svému ohřevu. S klesajícím přebytkem se reakce zrychluje, v důsledku nedostatku kyslíku však hoření nedosahuje tak vysokých teplot. Maximálních teplot se dosahuje u mírně podstechiometrických směsí.



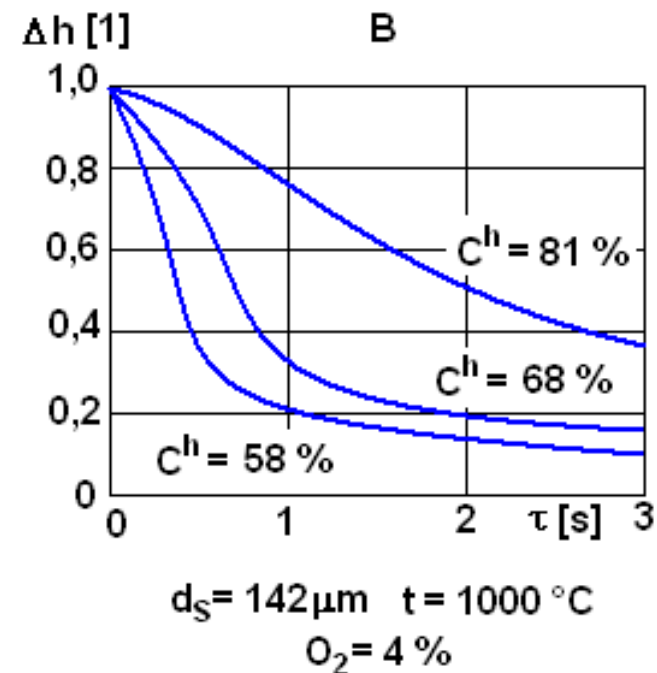
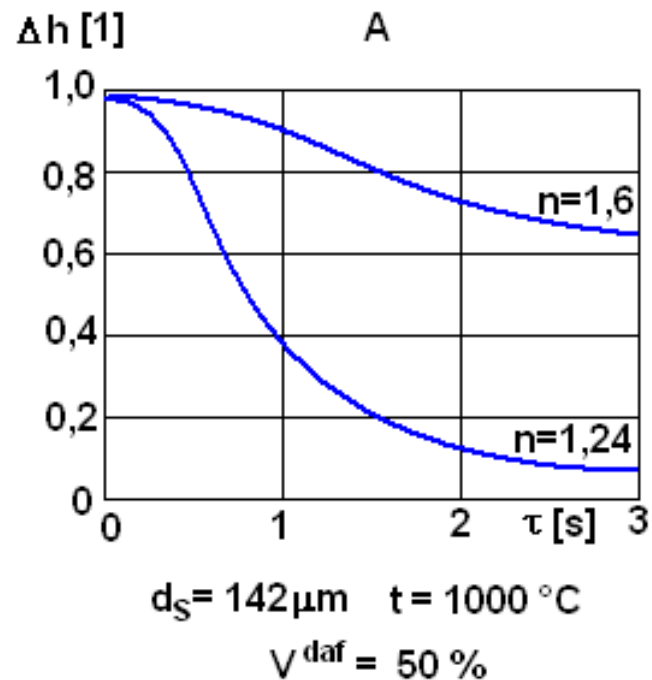


Parametrem charakterizujícím vznětlivost nebo reaktivnost uhlí je laboratorně určená minimální teplota vznícení rozvířené směsi  $t_{r,min}$ . Ukázalo se, že tato teplota je závislá na obsahu prchavé hořlaviny. Pro uhlí se středním rozměrem částic  $d_s=70$  mm platí s přesností na cca 10 % vztah:

$$t_{min}^r = 752 - 4,125 \cdot V^{daf} \quad [^{\circ}C]$$



Obsah prchavé hořlaviny má tedy velice významný vliv, proces se dá také ovlivnit množstvím přebytku vzduchu, jak bylo naznačeno již dříve. Čím je směs chudší (větší přebytek), tím pomaleji vyhořívá, obr. A – horní křivka. Jak je vidět na obr. B – podobný vliv na vyhořívání má i obsah prchavé hořlaviny (čím víc je uhlíku, tím míň je prchavé hořlaviny). Například pro severočeská HU je doba vyhoření 0,29 s, pro karvinské ČU je to 3,36 s.



## Proces vznícení

- Rozhoduje o celém dalším průběhu hoření a dohořívání.
- Je ovlivňován celou řadou parametrů, týkajících se kvality uhlí a fyzikálních podmínek procesu.
- Zásah do spalovacího procesu je možný až v oblasti stabilního hoření.
- Je nezbytné co nejvíce minimalizovat dobu vznícení, aby bylo dost času na vyhoření paliva a zásahy do procesu.

Průběh vznícení je samozřejmě složitější než teoretické modely nebo laboratorní experimenty.

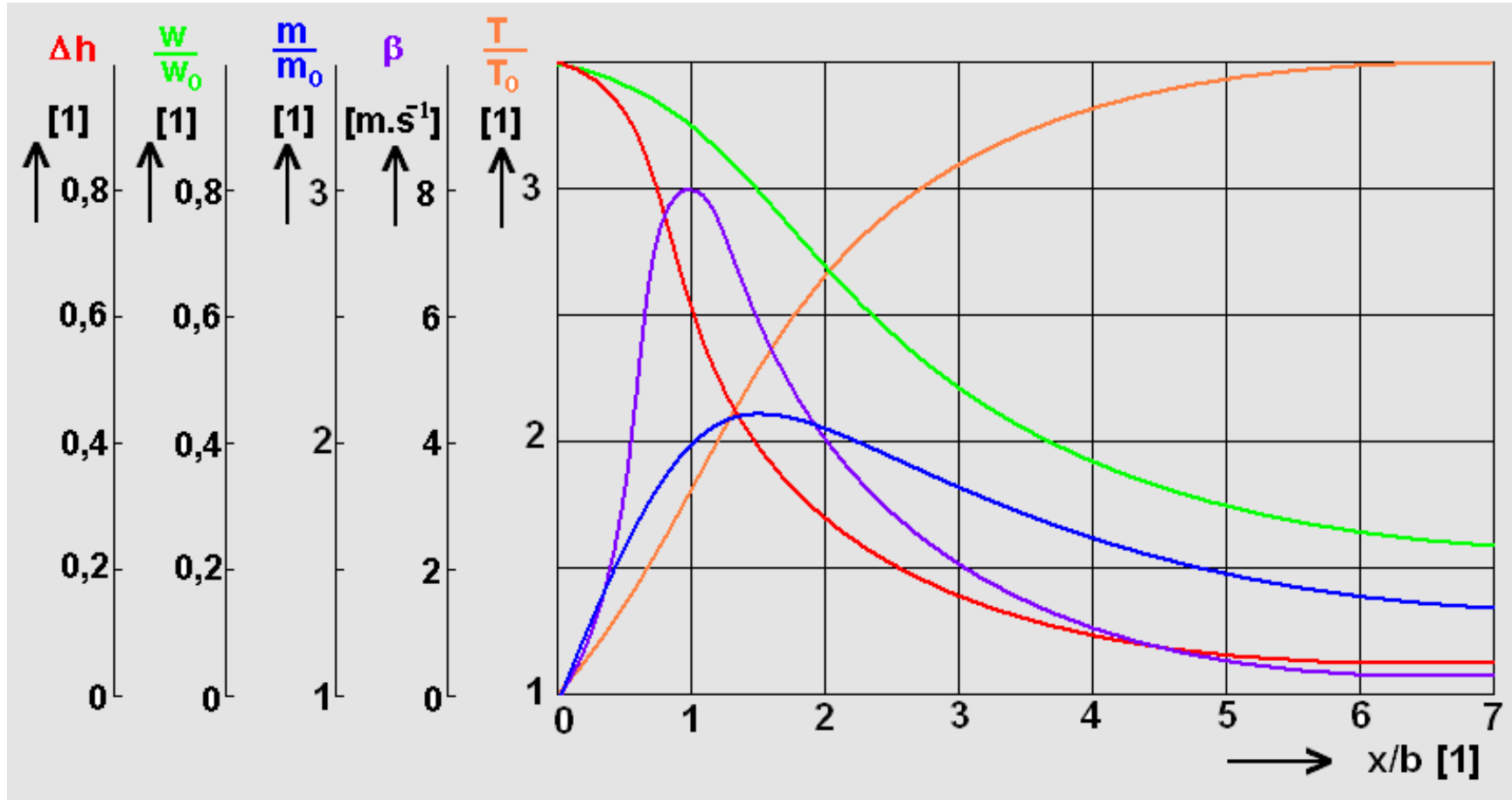
## Projevují se vlivy dané provozními podmínkami:

- Dosud jsme zanedbávali **sálavou složku** při odvodu tepla, takže závislost již není lineární.
- Projeví se i odvod tepla k **ohřevu směsi**, zvláště balastu.
- Velký vliv má **nerovnoměrnost dodávky** prášku **a kvality** uhlí.

Tyto vlivy způsobují nestabilitu a řeší se použitím **stabilizačních hořáků** na mazut nebo odpadní plyn.

Předpokládá se, že vznícení probíhá v hořákové oblasti, což je oblast od ústí hořáku do místa, kde teplota spalin dosáhla maxima. Charakteristické veličiny se hodnotí v závislosti na  $x/b$ , kde  $x$  je vzdálenost od hořáku a  $b$  je charakteristický rozměr hořáku.

## Průběhy zapálení uhlého prášku v plameni dobře seřízeného hořáku 200 MW kotle na HU.



Křivka vyhoření  $Dh$  ukazuje rychlé zapálení a vyhořívání prášku, inflexní bod se nachází kolem vzdálenosti  $x/b=1$ .

Tomuto bodu odpovídá přechod z kinetického k difuznímu hoření, součinitel difuze  $b$  zde nabývá maximálních hodnot.

Dochází k výrazné recirkulaci spalin, narůstá hmotový tok na poměrnou hodnotu  $m/m_0$  cca 2, což je podle zkušeností vyhovující.

Maximálních teplot  $T/T_0$  je dosahováno ve vzdálenosti asi 6,5. U dobře seřízeného hořáku se tato hodnota pohybuje od 5 do 7.

Rychlost proudu  $w/w_0$  díky velké disipaci rychle klesá.

Uvedené průběhy platí pro konkrétní kotel, hořák a palivo. Pro jiné podmínky budou průběhy jiné, vždy by však mělo platit:

- Inflexní bod křivky vyhořívání **Dh** by měl být co nejbližší ústí hořáku, tzv. těžiště hoření.
- Maximum součinitele difuze **b** by měl být v oblasti inflexního bodu a zároveň by měl mít co největší hodnotu.
- Těsně za touto hranicí by měl dosáhnout maxima poměrný hmotový tok **m/m<sub>0</sub>**, neměl by však přesáhnout hodnotu 2,5.

**Rychlé zapálení** má za následek **zvýšení spalovací teploty**, což může mít negativní následky, jako je **struskování a tvorba NO<sub>x</sub>**. Průběh zapalování můžeme zpomalit, ale zkracuje se nám tím doba pro vyhoření uhelného prášku. V každém případě však **musíme zajistit spolehlivé zapálení a stabilní hoření.**

**Závěrečná fáze** dohořívání odplyněných a z části vyhořelých částic již probíhá **podle podmínek vytvořených v hořákové oblasti**.

Rychlost hoření je dána **difuzí** kyslíku k povrchu částic.

Díky vysoké vazkosti spalin jsou **zásahy** do průběhu spalovacího procesu **obtížné a málo efektivní**.

Uvedený popis se dá s určitými modifikacemi použít i u splování uhlí na roštu nebo ve fluidní vrstvě.

### **Rošt:**

- velká relativní rychlost vzduchu – intenzivní přívod okysličovadla
- velké rozměr částic

### **Fluidní vrstva:**

- vysoká intenzita turbulence
- dlouhá doba setrvání částic v ohništi



# Děkuji za pozornost