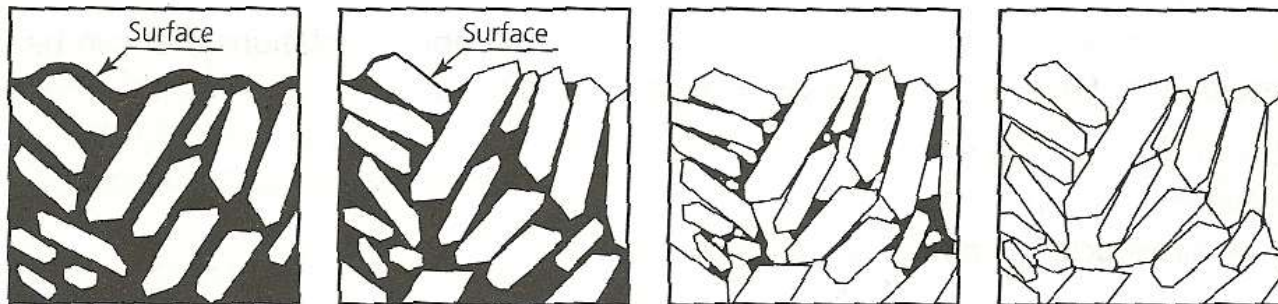


# 5. Sušení

- výlisek - **vyšší (plast. těsto, lití)** nebo nižší (lisování suchých a polosuchých směsí) obsah vody  $\Rightarrow$  nutno **nezávadně** odstranit.

**Sušení** = přestup tepla ze sušícího media (vlhký vzduch) do sušeného výlisku a současně látková výměna, tj. výměna vlhkosti z výlisku (odpařování vody) do okolního vlhkého vzduchu.

- princip: teplo  $\rightarrow$  voda v páru  $\rightarrow$  odváděna vlhkým vzduchem.
- Speciální případy: mikrovlnné sušení (pěnokeramické filtry).
- výlisek  $\rightarrow$  **výsušek** (pevnost, smršťování) – vlhkost daná podmínkami výpalu.
- přibližování částic, snižování tl. lyosféry (klesá  $\zeta$ -potenciál), stahování částic k sobě = smršťování, vznik kapilární pórovitosti.



- cíl: zkrácení doby a snížení spotřeby tepla na odpaření vody

# 3 „disciplíny“ sušícího procesu:


## 1. Dynamika sušení

- změna vlhkosti výlisku v čase s ohledem na parametry sušícího media a vlastnosti struktury vysoušené látky (smrštění aj.).
- *cíl: definice max. rychlosti sušení (množství dodávaného tepla x schopnost výlisků ztrácet vlhkost bez vzniku trhlin a deformací = citlivost k sušení).*

## 2. Statika sušení

- látková a tepelná bilance sušení - vlastnosti vlhkého vzduchu.
- *cíl: definice energetické náročnosti sušení - měrná spotřeba tepla = množství tepla [kJ] na odpaření 1 kg vody z výlisků (včetně tepelných ztrát sušárny).*

## 3. Technologie sušení

- poznatky dynamiky a statiky sušení uplatněné na výrobní zařízení = sušárny
- *cíl: konstrukce sušáren a regulace sušícího procesu  kvalitní výsušky s minimální spotřebou tepla.*

# 5.1 Voda ve výlisku (systém zemina-voda)

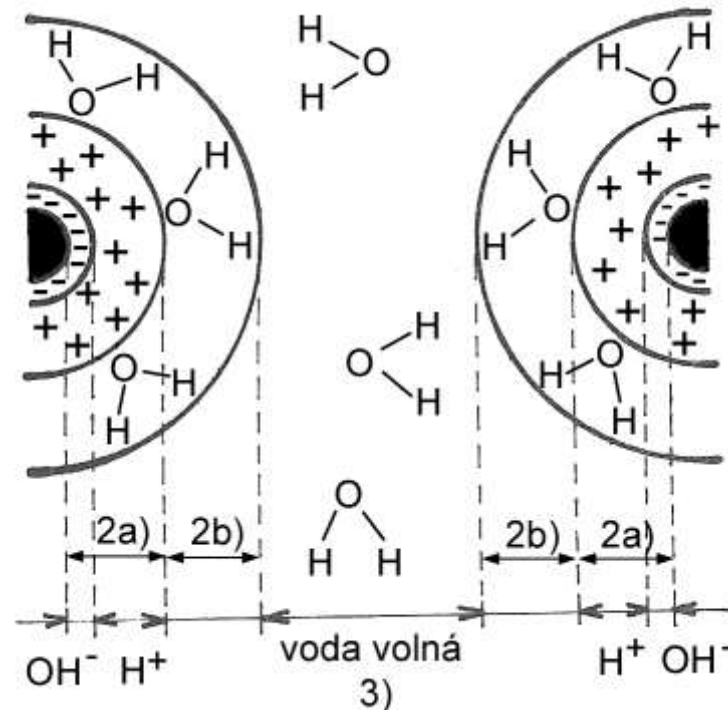
~~1) **Voda vázaná (adsorbovaná) chemicky** - krystalickou mřížka jílových minerálů (tzv. voda mřížková),  $\uparrow$  450 - 650 °C (DTA).~~

**2) Voda vázaná fyzikálně-chemicky** - na povrchu zrn jílových minerálů ve formě filmů (**lyosfér**) v místě působení přitažlivých sil zrna:

a) *hygroskopická* - nejtěsněji poutaná vazbou ion-dipól na povrch zrn,

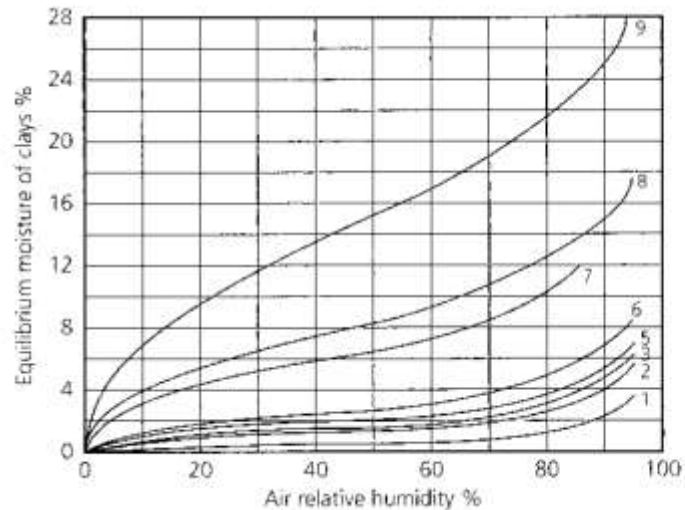
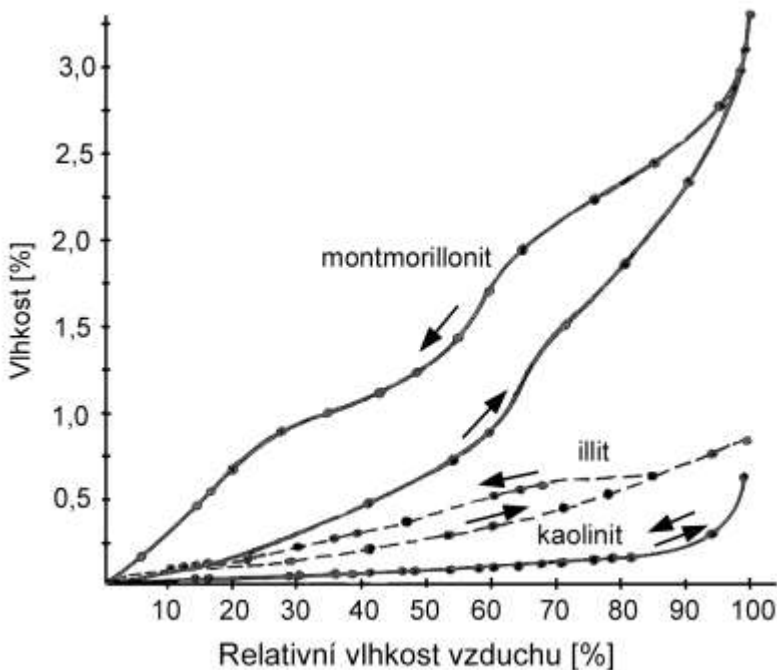
b) *difúzní obalová* - působí přitažlivé síly zrn jílových minerálů - pevně vázaná (nepohyblivá na vnitřním okraji) a málo vázaná.

**3) Voda volná** - v pórech mezi zrny minerálů mimo dosah přitažlivých sil zrn, při sušení odchází nejdříve.



**Jílovinové zeminy** – vysoký měrný povrch (až  $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )  $\Rightarrow$  **kapilární jevy:**

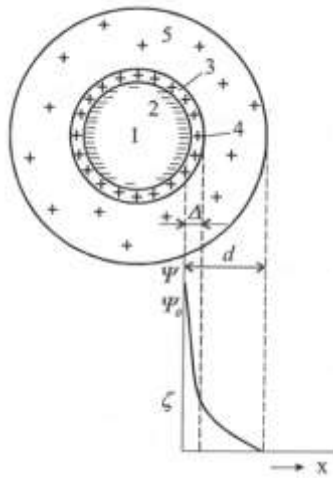
- vzlínání vody - různě velké kapiláry,
- adsorpce vody - schopnost suché zeminy vázat vodu ve vlhkém prostředí (např. z ovzduší) = **hygroskopičnost**. Smáčecí teplo (množství tepla vznikajícího při reakci obou složek) - bentonity až  $120 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ , cihlářské zeminy  $5 - 30 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ .



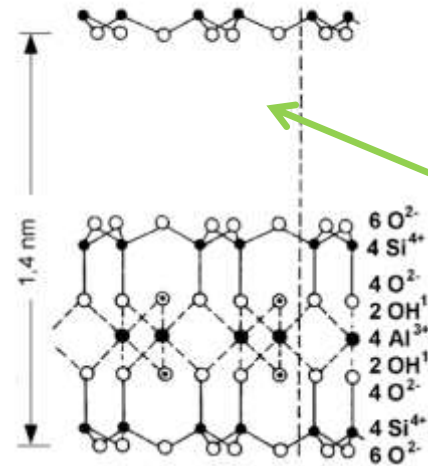
- 1 Kaolinite
- 2 Kaolinite
- 3 Kaolinite + illite
- 5 Kaolinite + illite
- 6 Kaolinite + illite + organic matter
- 7 Kaolinite + Montmorillonite
- 8 Kaolinite + lignite
- 9 Montmorillonite

Tloušťka adsorbovaného vodního filmu - 5  $\mu\text{m}$  u kaolinitu (60 vrstev molekul vody), u montmorillonitu až 30  $\mu\text{m}$   $\Rightarrow$  bobtnání:

- **intermicelární bobtnání** - adsorbovaná voda pro vznik lyosféry,
- **intramicelární bobtnání** - část vody také do mřížky (oddaluje základní trojvrství – typické pro montmorillonit).



**intermicelární**



**intramicelární**

$\text{H}_2\text{O}$

Vlhkost zemin  $w$  - vysoušením na 110  $^{\circ}\text{C}$  do stálé hmotnosti

- absolutní vlhkost - hmotnost vody v zemině vztažená na hmotnost sušiny v procentech ( $\times$  relativní vlhkost).
- **vlhkost rovnovážná  $w_{ro}$**  - vlhkost materiálu za rovnovážného stavu s okolní atmosférou o určité relativní vlhkosti,
- **vlhkost hygroskopická  $w_h$**  - vlhkost materiálu za rovnovážného stavu s okolní atmosférou o relativní vlhkosti 100 %.

# 5.2 Dynamika sušení

Rychlost sušení závisí na:

- *vlastnostech látky* (surovinové směsi, zeminy) – schopnost nezávadně ztrácet vodu,
- *podmínkách předávání tepla,*
- *pohybu sušícího média* (nebo i výrobku) apod.

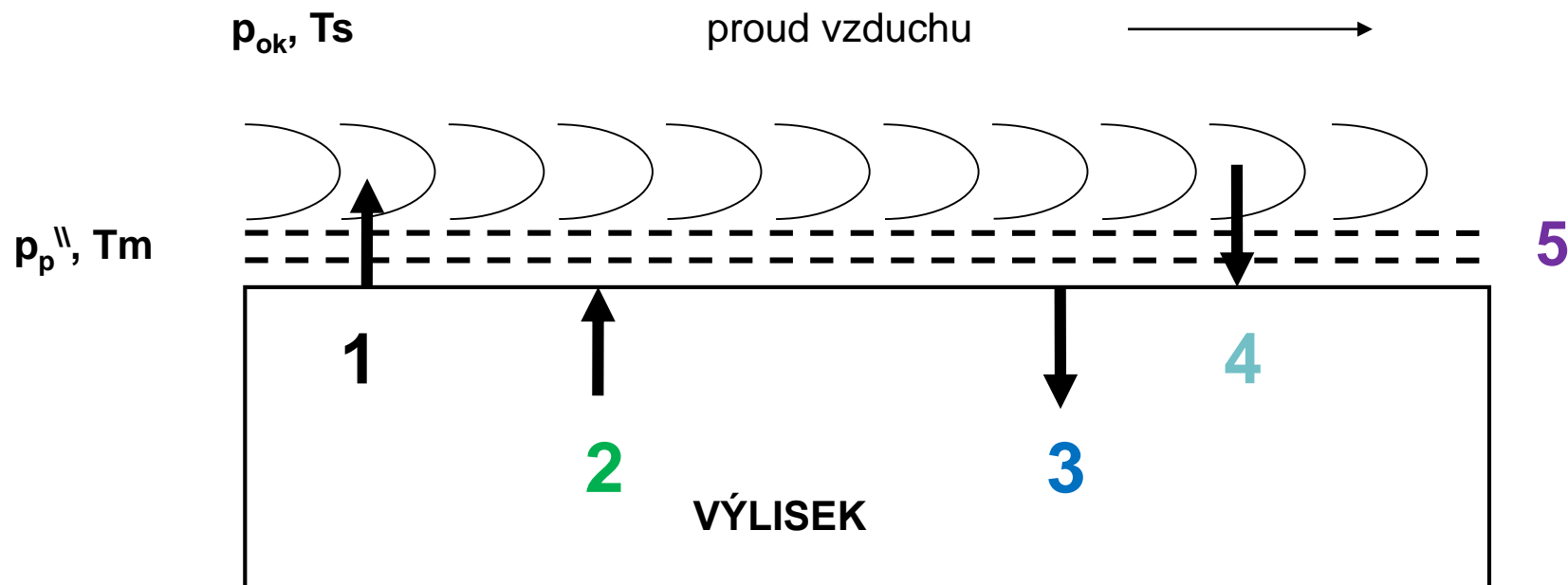
**Rychlost sušení dána:**

- množstvím tepla a vzduchu - *vnější parametry sušení* – parametry sušícího média:  **$T, \varphi, v,$**
- schopností výlisků ztrácet vlhkost bez vzniku trhlin a deformací (tzv. *citlivostí k sušení*) - *vnitřní parametry sušení* - geometrie výlisků, mineralogické složení, granulometrie, způsob vytváření apod.

**Cíl: definovat maximální rychlost sušení [ $g_{H_2O} \cdot \text{hod}^{-1}$ ].**

## Procesy ve výlisku při sušení :

- **vnější difuze vodní páry (1)** - odpařování vody z povrchu výlisku,
- **vnitřní difuze vodní páry (2)** - vyrovnávání vlhkosti střed-povrch výlisku (Součinitel vnitřní difuze  $D$ )
- **termodifuze (3)** - pohyb vody ve směru tepelného toku, zpomaluje proces sušení.



4-přenos tepla, 5-nepohyblivá vrstva vodní páry

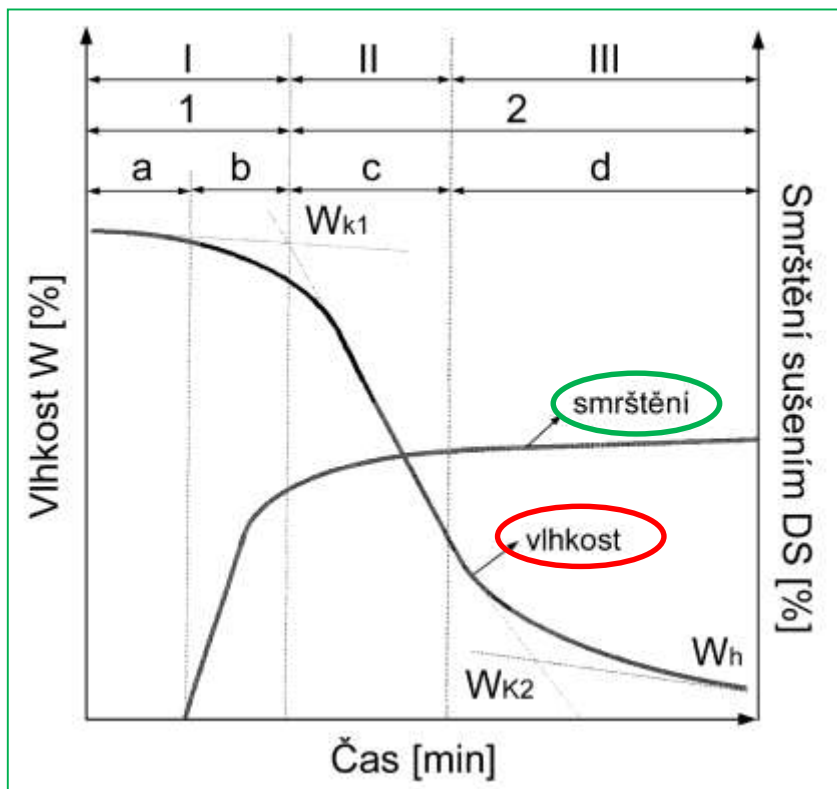
# 5.2.1 Smršťování při sušení, vznik trhlin a deformací

## Vlhkost:

**I. Úsek** - Voda směrem k povrchu výlisku a difúze vodní páry.

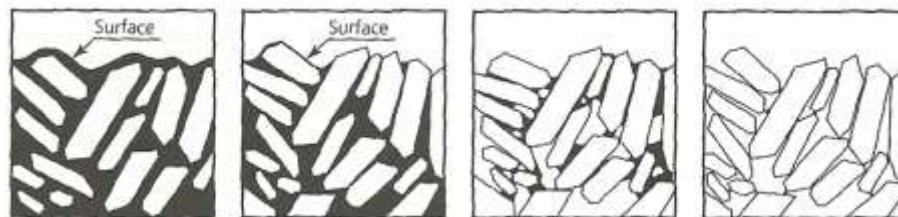
**II. Úsek** – posun hladiny odpařování vody do středu výlisku (1. kritický bod  $W_{k1}$  - voda se odpařuje z hladiny uvnitř výlisku).

**III. Úsek** - 2. kritický bod  $W_{k2}$  - mizí hladina vody uvnitř výlisku. Rychlost sušení pomalu limituje k nule až dosáhne rovnovážné vlhkosti.



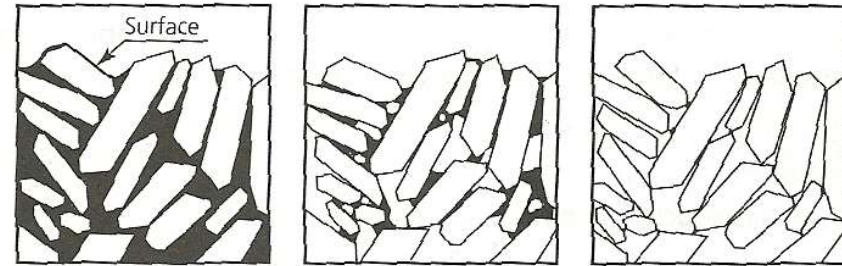
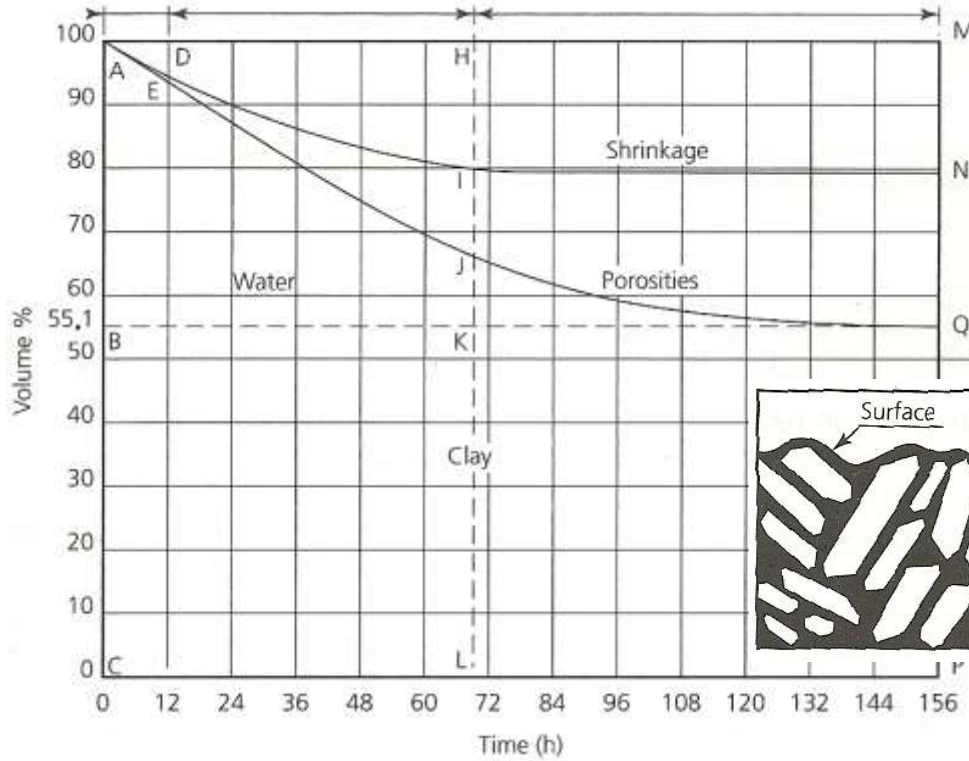
## Smršťování:

- **1. fáze** - nebezpečná oblast na Bigotově křivce. **část a** – ohřev výlisku, kdy smrštění ještě nenastalo, **část b** – konstantní rychlosti smršťování (ideální smršťování).
- **2. fáze** - **část c** – rychlost smršťování se snižuje, limituje k nule a **část d** – smršťování je ukončeno.

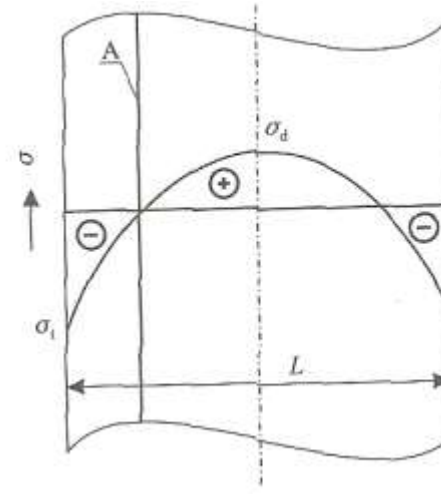
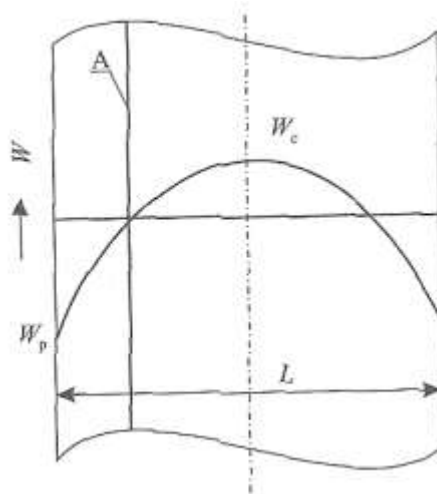




# Bourryho diagram

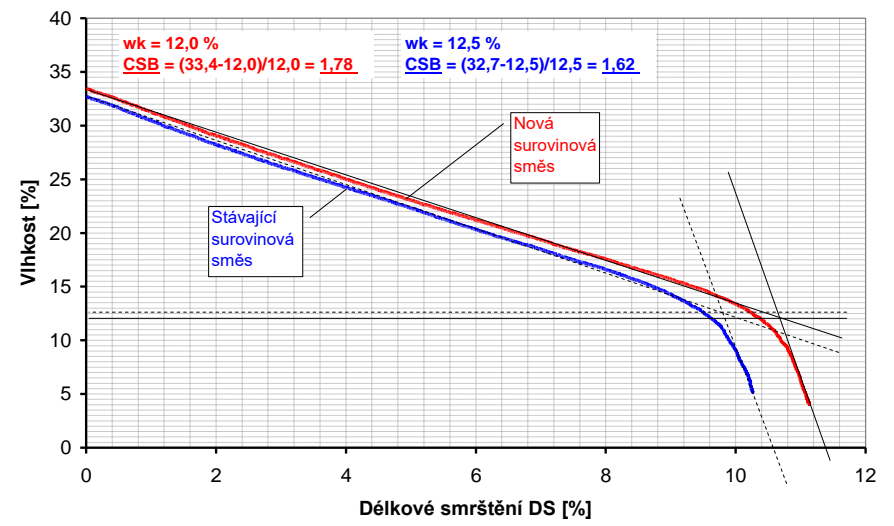
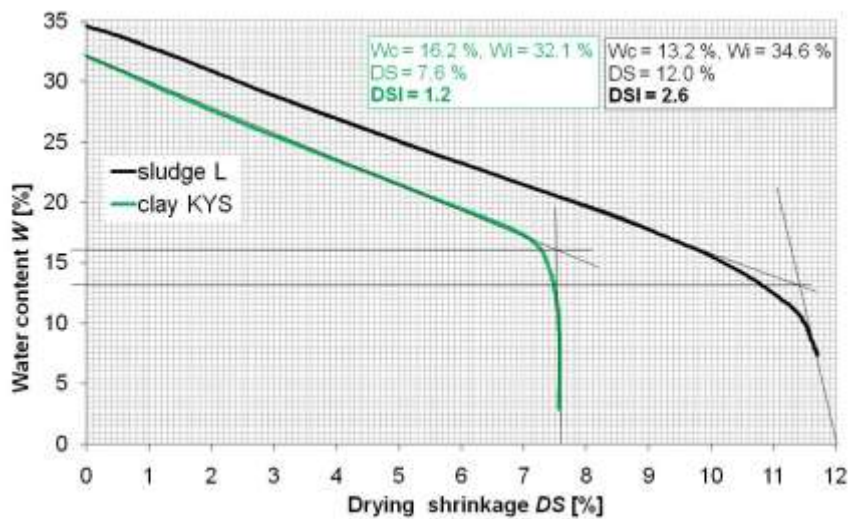
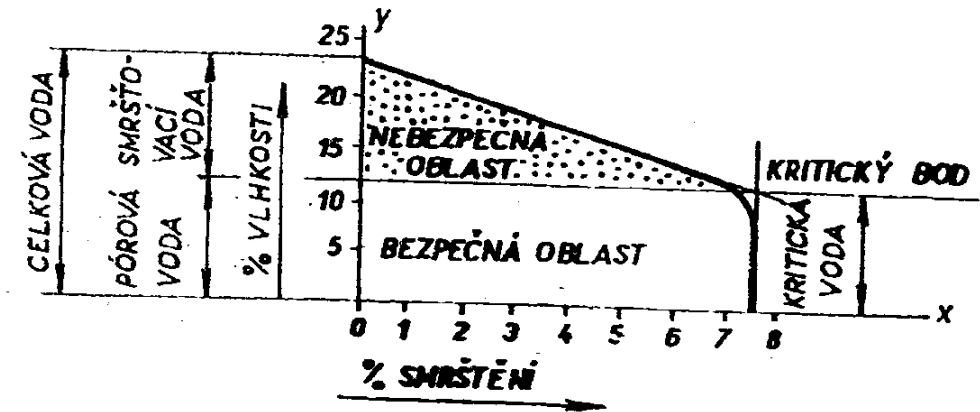


Při sušení - na povrchu výlisku tahová napětí (smršťování) x uprostřed tlaková.  
**Optimální parametry sušení  $\Leftrightarrow$  maximální rychlost, při níž ještě nevznikají trhlinky.**



# 5.2.2 Citlivost k sušení

- **přímé metody** (stanovuje se vlhkost nebo doba vzniku první trhlinky) a
- **nepřímé metody** (posuzují smrštění, gradienty vlhkosti, pevnosti výsušku v tahu ohybem → stupnici verbálního hodnocení – mj. BIGOT).



# 5.3 Statika sušení

- modely teoretické sušárny (sušárny bez tepelných ztrát) - bilancování množství vstupního a výstupního vzduchu, množství odpařené vody.

Sušící medium (vlhký vzduch) - nositel vypařené vlhkosti a tepla.

Sušící proces závisí na :

- *teplotě a obsahu vlhkosti ve vzduchu,*
- množství vzduchu, které proudí podél výlisků (stupeň obměny vzduchu),
- měrném povrchu výlisků (poměr vysušovaného povrchu ke hmotě výlisku),
- parametrech výlisků, které ovlivňují sušení (povrch, kapilarita, sorpční vlastnosti).

**Vzduch** = suchý vzduch + vodní pára.

Daltonův zákon: tlak směsi plynů je součtem tlaků jednotlivých složek → **tlak vlhkého vzduchu = tlak vodní páry  $p_p$  + tlak suchého vzduchu  $p_v$ .**

Při konkrétní teplotě - částečný (parciální) tlak vodní páry  $p_p \leq p_p^*$ . Poté kondenzace vodní páry - **rosný bod**.

# Parametry vlhkého vzduchu

## 1. Vlhkost vzduchu:

- relativní (relativní vlhkost vzduchu  $\varphi$ ) nebo
- absolutní (*měrná vlhkost vzduchu*  $x$  je hmotnost vody v kg obsažená v jednom kg suchého vzduchu)

$$\varphi = \frac{p_p}{p_p''} \in (0;1) \Rightarrow p_p = \varphi \cdot p_p'' \qquad x = \frac{\text{kg(voda)}}{\text{kg(suchý vzduch)}}$$

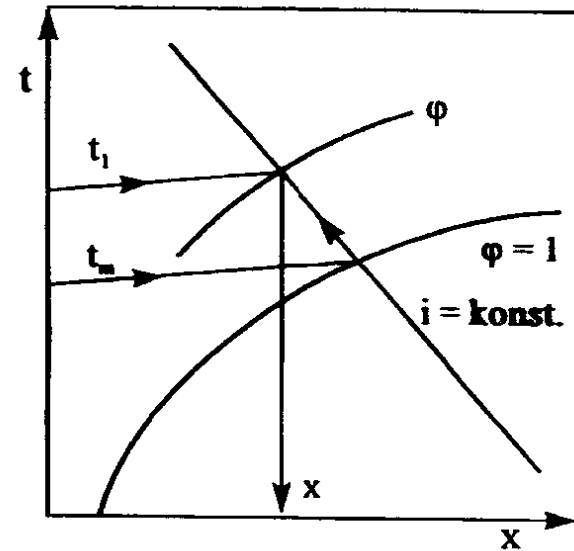
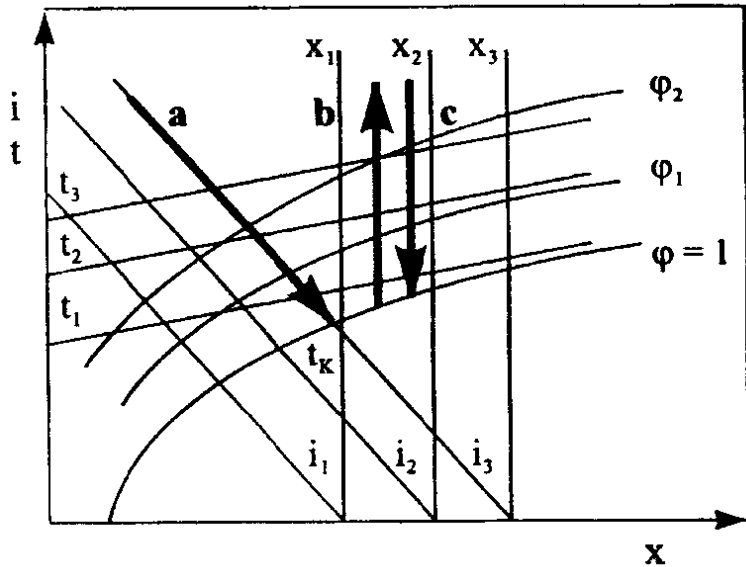
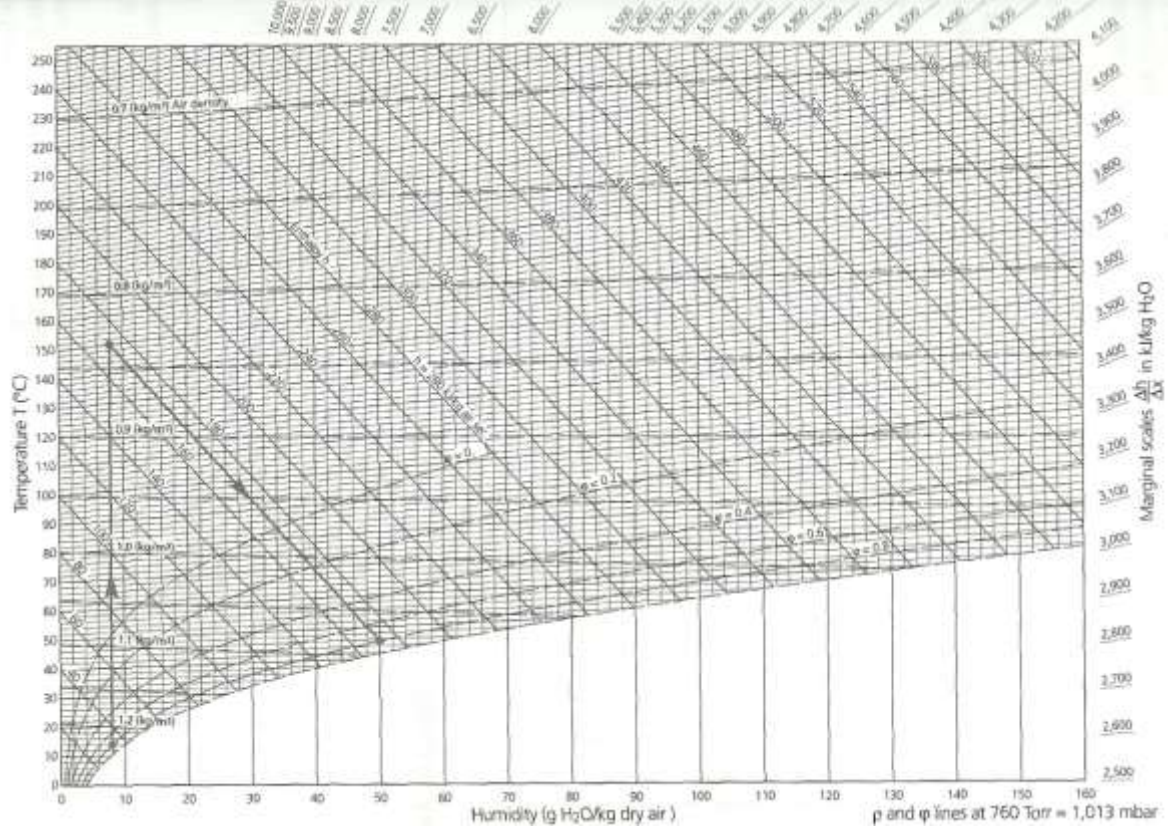
## 2. Entalpie (tepelný obsah) vlhkého vzduchu $i$ [kJ.kg<sup>-1</sup>]:

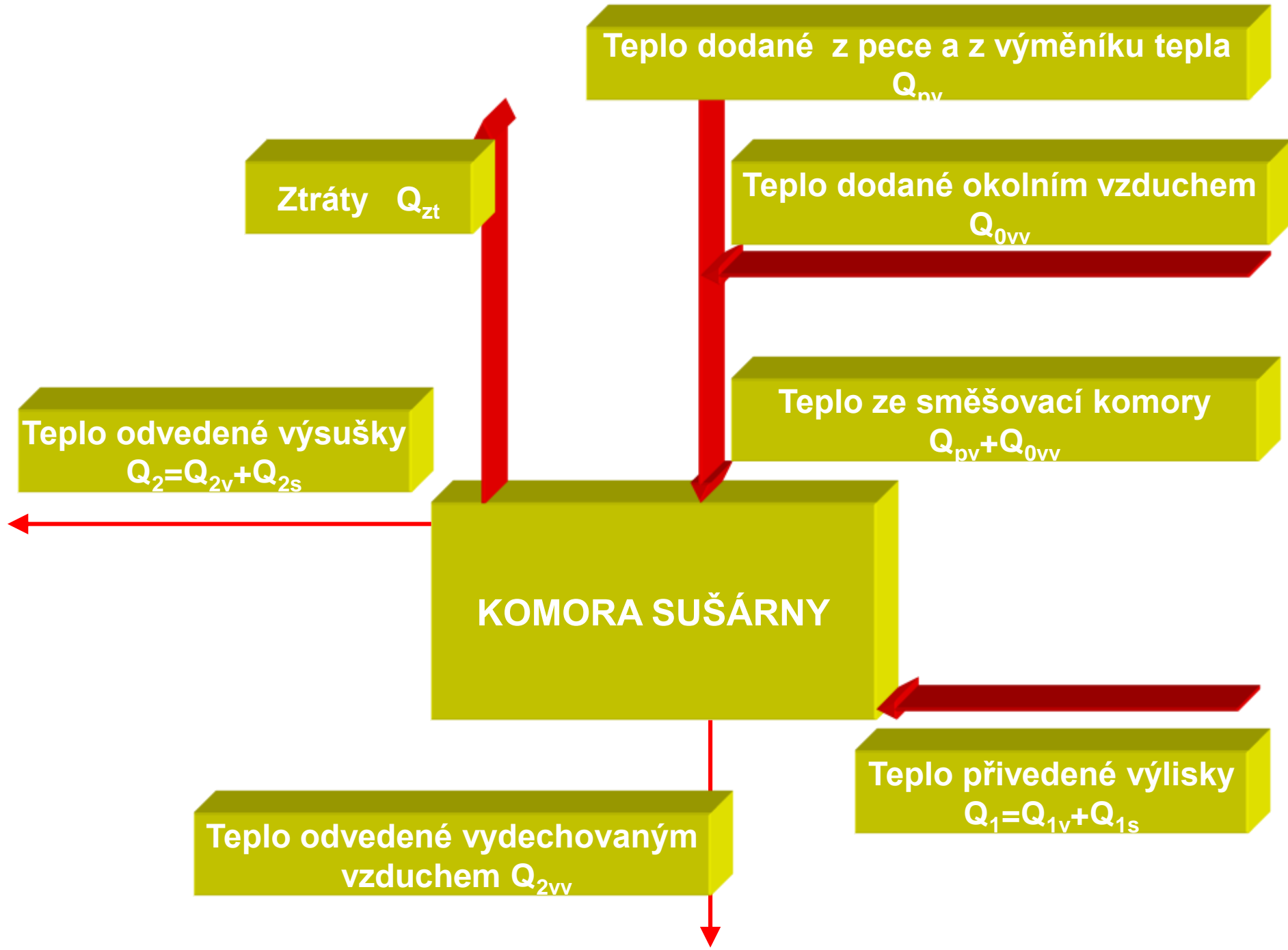
$$i = c_{pv} \cdot t + (r_0 + c_{pp} \cdot t) \cdot x \Rightarrow i = t + (2500 + 1,92 \cdot t) \cdot x$$

$c_{pv}$ ,  $c_{pp}$ ... měrná tepla vzduchu a vodní páry ( $c_{pv} = 1$ ,  $c_{pp} = 1,92$ ) [kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>],  
 $r_0$ ...výparné teplo vody [kJ.kg<sup>-1</sup>] (= 2500 kJ.kg<sup>-1</sup>).

## 3. Teplota

# Moliérův diagram





Teplo dodané z pece a z výměníku tepla

$$Q_{pv}$$

Ztráty  $Q_{zt}$

Teplo dodané okolním vzduchem

$$Q_{0vv}$$

Teplo odvedené výsušky

$$Q_2 = Q_{2v} + Q_{2s}$$

Teplo ze směšovací komory

$$Q_{pv} + Q_{0vv}$$

KOMORA SUŠÁRNÝ

Teplo přivedené výlisky

$$Q_1 = Q_{1v} + Q_{1s}$$

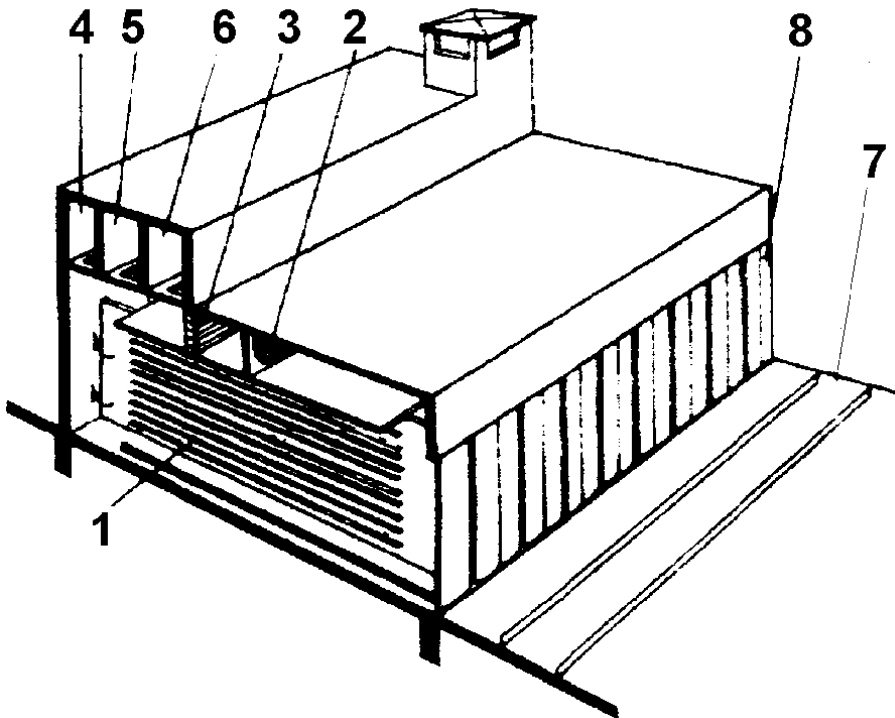
Teplo odvedené vydechovaným vzduchem

$$Q_{2vv}$$

# 5.4 Technologie sušení

## 5.4.1 Periodické sušárny

- změna sušárenského klima (stav vzduchu) podle režimu sušení. Sušárenský prostor (komory) se periodicky zavází a vyvází.
- přírodní sušárny,
- velkoprostorové (nadpecní) sušárny,
- **komorové sušárny** - teplý vzduch z chladnacího pásma pece + parní radiátory v komorách.



- + flexibilita, různé druhy výrobků,
- + možnosti změny doby sušení,
- + malá poruchovost,
- vyšší spotřeba tepla,
- vyvážka, zavážka,
- náklady na obsluhu,
- větší obestavěný prostor.

# Nadpecní sušárna



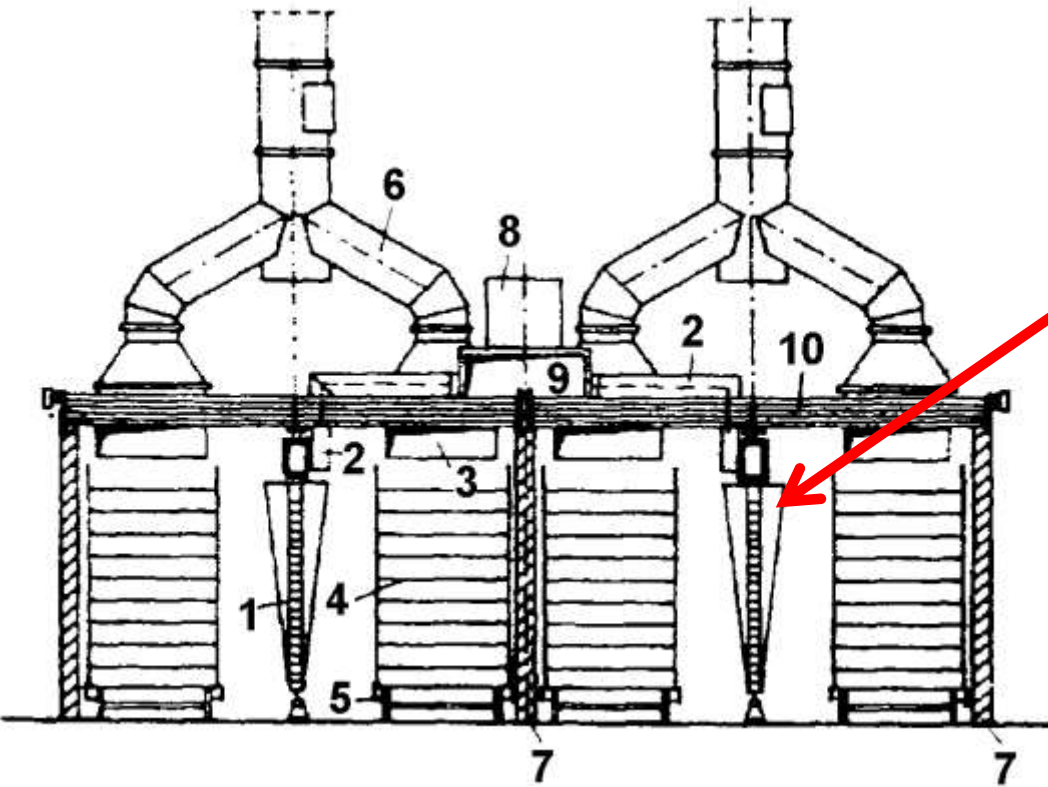


# Komorové sušárny

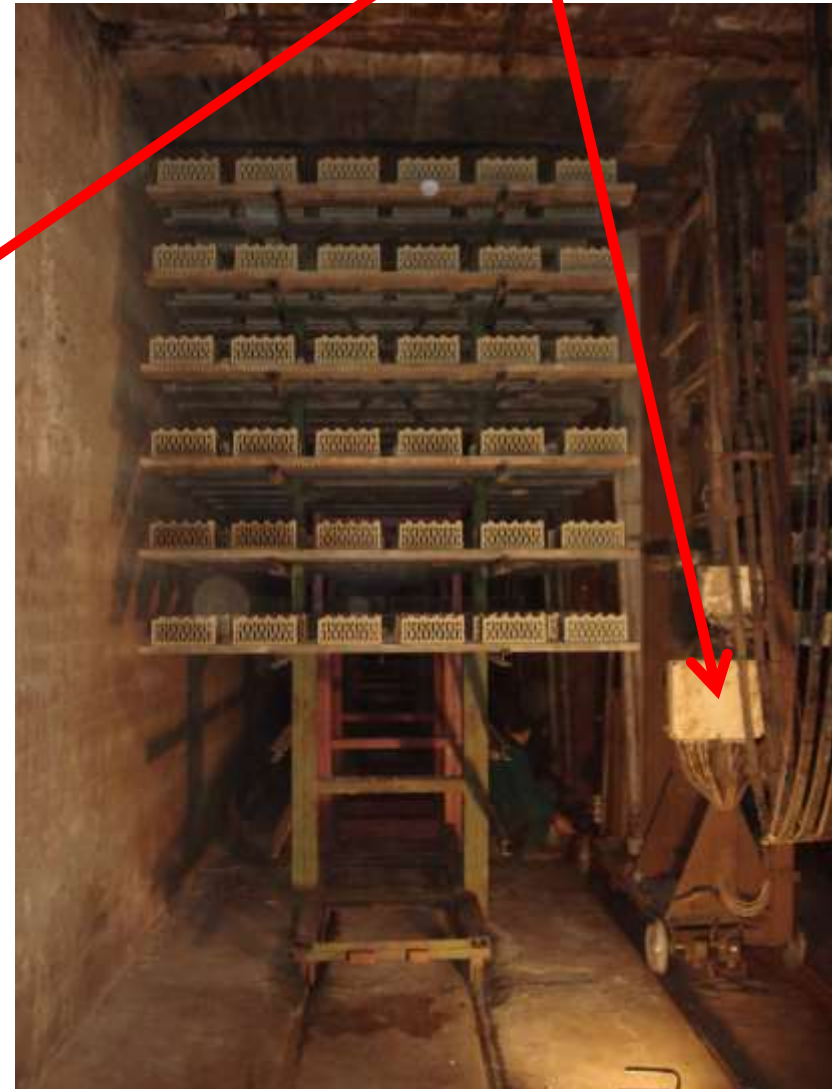


## 5.4.2 Kontinuální sušárny

- kanálové, jednovrstvé (štěrbinové) sušárny.
- **kanálové sušárny** – nejčastěji protiproudé + příčné proudění (**aeromixery**).



- + kratší doba sušení
- + nižší spotřeba tepla
- + jednoduchá obsluha
- + mechanizace, automatizace
- horší flexibilita
- rezerva při poruše



| <b>Sušárna</b>  | <b>Komorová</b> | <b>Kanálová</b> |
|---|-----------------|-----------------|
| Doba sušení [hod]   | 36 – 100        | 15 – 36         |
| Spotřeba tepla [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ]    | 4200 – 7500     | 3500 – 4600     |
| Měrný výkon sušárny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ ] | 1,5 – 3         | 10 – 30         |
| Hustota zavážky sušárny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]               | 150 – 300       | 200 – 600       |
| Rychlost proudění vzduchu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]              | 0,5 – 1,0       | 1,0 – 5         |

Teoretická potřeba tepla při 0 °C a normálním tlaku je  $2345 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$

| <b>Příjem tepla v MJ.h<sup>-1</sup></b> |             | <b>Odvod tepla v MJ.h<sup>-1</sup></b> |             |
|---|-------------|--|-------------|
| Sušina výlisků                          | 51          | Výsušky                                | 221         |
| Vlhkost výlisků                         | 60          | Dopravní zařízení                      | 56          |
| Dopravní zařízení                       | 12          | Odcházející vzduch                     | 3835        |
| Venkovní vzduch                         | 754         | Ztráty sušárnou                        | 736         |
| Ohřívač vzduchu                         | 1285        |  |             |
| Tepelné registry v sušárně              | 2706        |  |             |
| <b>Celkem</b>                           | <b>4848</b> | <b>Celkem</b>                          | <b>4848</b> |

# 5.5 Urychlování nezávadného sušení

- cíl: dosáhnout maximální dovolené rychlosti sušení.








Sušící proces lze urychlit :

1. úpravou *parametrů sušícího média* = **urychlení vnější difuze** - rychlostí proudění vzduchu  $v$ , teplotou  $t$ , relativní vlhkostí  $\varphi$ ,
2. úpravou *vlastností surovinové směsi* výlisku = **urychlení vnitřní difuze** - snížení citlivosti k sušení (obecně technologií výroby, příměsemi, omezením textury atd.).

# 5.5.1 Ovlivnění vnitřní difuze

**Zvýšení koeficientu vnitřní difuze  $D \Rightarrow$  urychlení procesu sušení.**

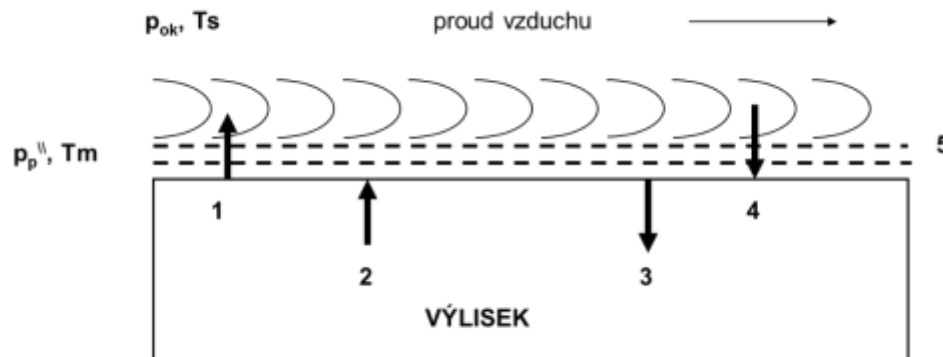
Vnitřní difuzi ( $D$ ) ovlivňuje:

- **Ostření** - snižuje  $w_r$ ,  $DS$  a **zvýší se  $D$** . Platí: 10 - 20 % ostřiva zkrátí dobu sušení cca o 20 - 40 % x výsledné vlastnosti střepu. 
- **Odvzdušnění** - **snižuje  $D$**   $\Rightarrow$  větší odpor výlisku proti pronikání vlhkosti  $\Rightarrow$  snížení rychlosti sušení x vyšší pevnost výlisku. 
- **Přídavek koagulátorů** - opačný jev ztekucování - koagulace zrn jíloviny  $\Rightarrow$  zvýšení kapilarity výlisku ( $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_2$ ). 
- **Ztekucením** – snížení obsahu rozdělovací vody, hutný výlisek.  
- **Proteplování** - sníží se  $w_r$  a omezí se vliv termodifuze. 
- **Jemnost mletí** - zvýšení měrného povrchu  $\Rightarrow$  klesá  $D$ . 

# 5.5.2 Ovlivnění vnější difuze

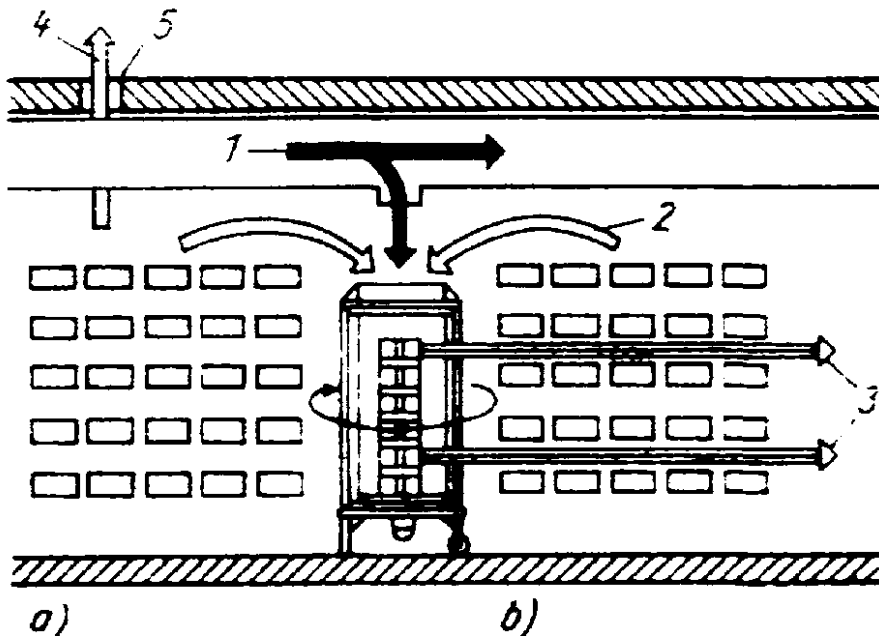
Vnější difuze - dána rozdílem koncentrací vodních par u povrchu výlisku a v okolním prostředí.

- zvýšením teploty sušícího média  $t$ ,
- snížením relativní vlhkosti sušícího média  $\varphi$ ,
- zvýšením rychlosti proudění sušícího média  $v$  - tzv. intenzifikace sušícího procesu.



# 5.5.3 Intenzifikace sušení

- zvýšení rychlosti proudění vzduchu z 1 na 5 m.s<sup>-1</sup> ⇒ zvýší rychlost sušení až o 50 %,
- rovnoměrné vysoušení v podélném i v příčném směru ⇒ **reverzace proudění** - každých cca 5 minut se změní směr proudění vzduchu.
- **Impulzivní rytmické sušení** - střídání intenzivního turbulentního proudění vzduchu (2 – 3 min) s obdobím relativně pomalého laminárního proudění (1:70) – **aeromixery (rotomixery)**.



Zvýšení rychlosti odpařování vody asi o 30 % (tj. asi 2,5 kg H<sub>2</sub>O.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> při měrné spotřebě tepla 3700 až 4200 kJ.kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O.