



Fakulta lesnická
a dřevařská



V jednoduchosti je síla?! *(vztah dřeva, vody a tepla)*

Přednáška (verze 11/2023)

doc. Ing. Vlastimil Borůvka, PhD., Dipl. Mgmt.





Voda jednoduše ...

Dřevo jako hygroskopický materiál

- ✓ dřevo je hygroskopický materiál
- ✓ je schopno přijímat nebo odevzdávat vodu
- ✓ mění vlhkost podle okolního prostředí
- ✓ dané chemickou stavbou
(celulóza + hemicelulózy)
- ✓ buňky diferencovány v plně nasyceném prostředí

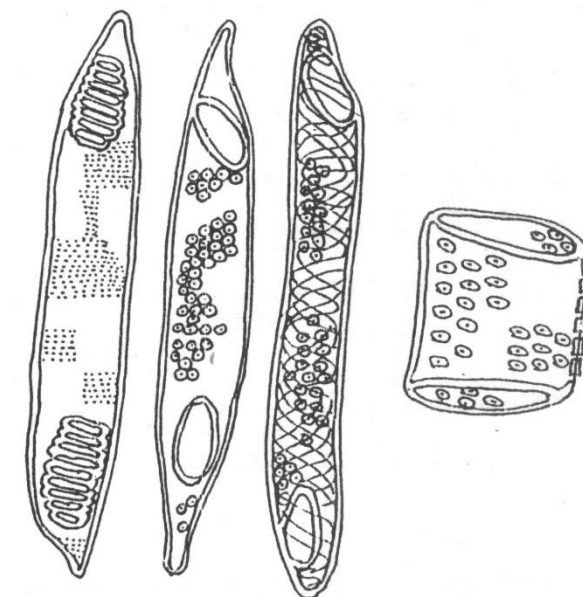
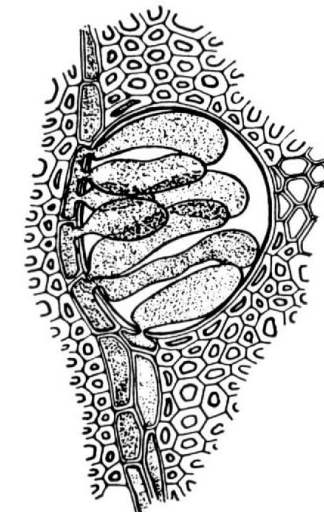
Dřevo jako hygroskopický materiál

- ✓ dřevo může přijímat i jiné kapaliny
- ✓ voda je nejčastější a z praktického hlediska nejvýznamnější
- ✓ rostoucí strom obsahuje velké množství vody (nezbytná pro jeho existenci)
- ✓ po skácení se obsah vody snižuje nebo ale i dále zvyšuje

Vzhledem k hygroskopicitě se ale vždy ve dřevě voda vyskytuje!!!

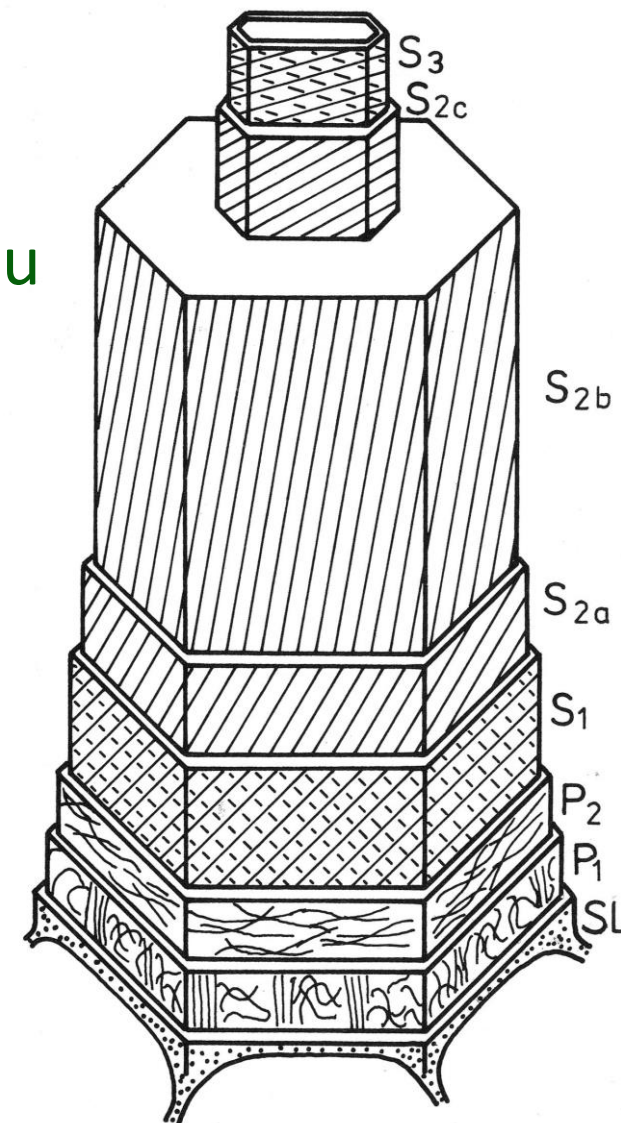
Dřevo jako hygroskopický materiál

- ✓ voda ovlivňuje většinu vlastností dřeva, často negativně
- ✓ změna obsahu vody = změna hustoty, rozměrů, fyzikálních a mechanických vlastností, odolnosti proti škůdcům, technologického postupu
- ✓ pohyb vody ve dřevě = výsledek evolučních procesů vodivých drah
- ✓ problematika tracheidy x cévy, jádro x běl, reakce na poškození (uzavření dvojteček, thyly)



Dřevo jako kapilární systém

- ✓ rostlinné pletivo = nehomogenní látka s pórovitou stavbou (různé anatomické elementy)
- ✓ příjem a vedení vody = děje se přes buňku, představuje mikro a makrokapilární systém
- ✓ **mikrokapilární systém**
= fibrilární struktura buněčné stěny
=> poutání vodní páry (vody vázané)
- ✓ **makrokapilární systém**
= lumeny a mezibuněčné prostory
=> voda volná



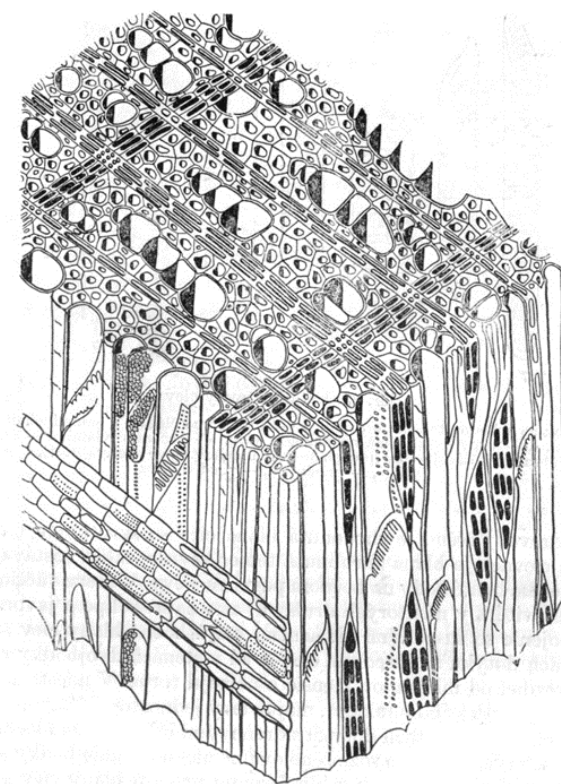
Dřevo jako kapilární systém

- ✓ pohyb v podélném směru
= hlavně makrokapiláry
- ✓ napříč jak makrokapiláry (ztenčeniny + lumeny
dřeňových paprsků), tak mikrokapiláry
- ✓ makrokapiláry (voda volná) = hybnou silou je
gradient tlaků (fyzikální síla)
- ✓ mikrokapiláry (voda vázaná) = hybnou silou je
gradient koncentrací (síla chemického charakteru)

Rovnovážná vlhkost

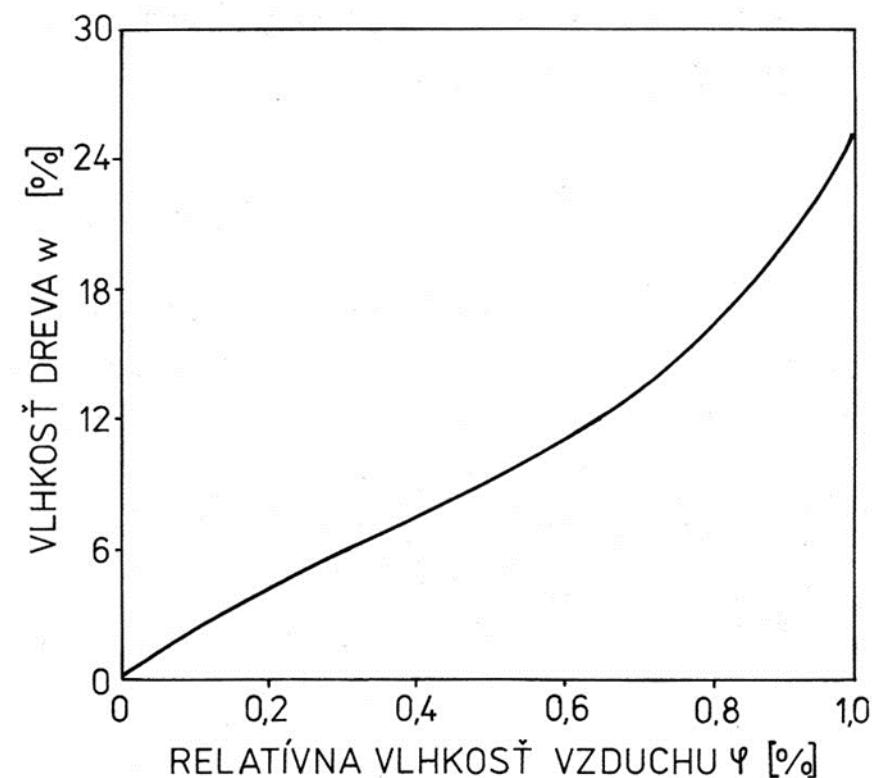
- ✓ dřevo = navlhavý hygroskopický materiál
- ✓ mění vlhkost podle svého okolí díky **adsorpci**
- ✓ = poutání plynné látky na měrném vnitřním povrchu dřeva
- ✓ dřevo = porézní materiál
(průměrná pórovitost cca 50 – 60 % v závislosti na hustotě)
- ✓ vnitřní povrch dřeva v závislosti na hustotě = 20 až 300 m²·cm⁻³

Adsorpce je separační proces, jehož principem je hromadění plynné látky ze směsi plynů nebo rozpuštěné látky v kapalině (adsorbátu) na povrchu pevné látky (adsorbentu) účinkem mezi-povrchových přitažlivých sil.

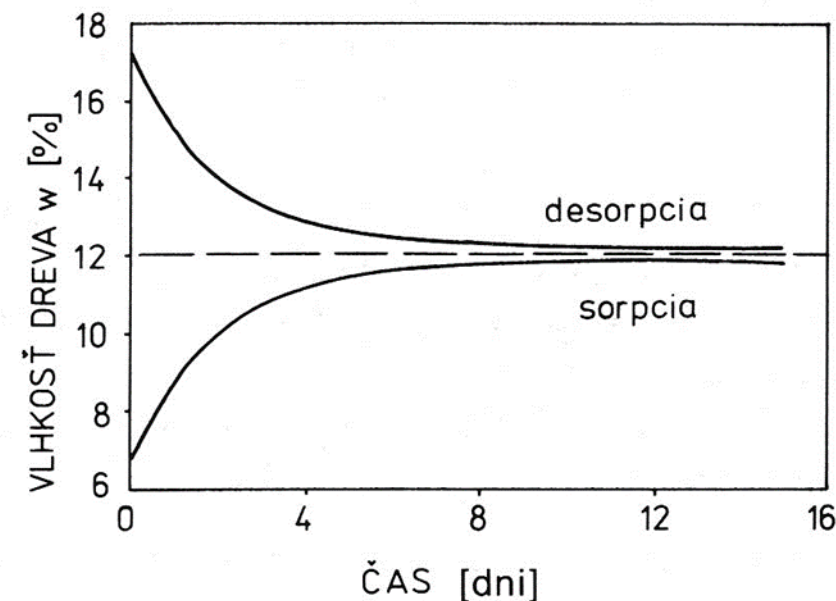


Sorpční izoterma

- ✓ množství adsorbované látky závisí na jejích chemických a fyzikálních vlastnostech (molekulová hmotnost, povrchové napětí) a na prostředí (teplota, tlak, relativní vlhkost vzduchu)
- ✓ závislost množství adsorbované látky na faktorech prostředí udávají **adsorpční izotermy**



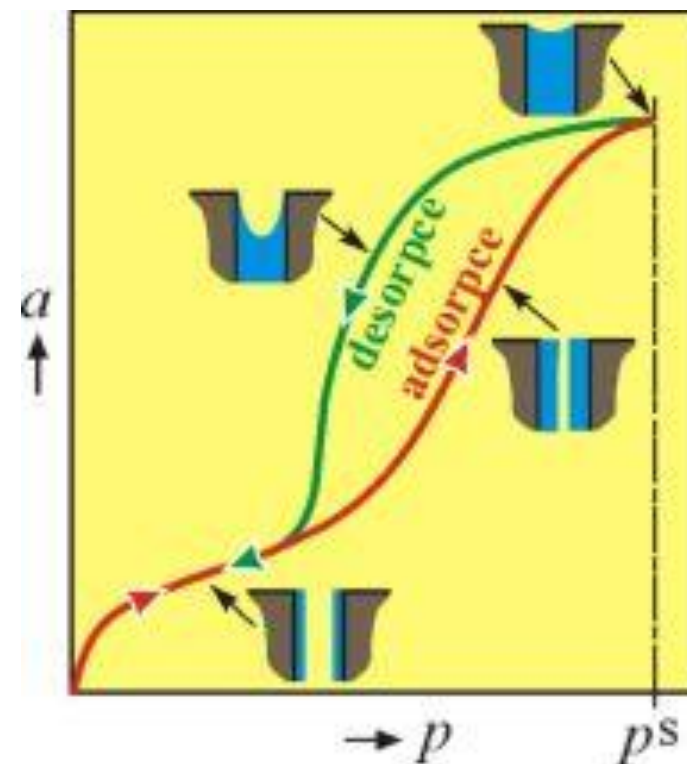
- ✓ rovnovážná vlhkost dřeva (RVD) = vlhkost dřeva, která se ustálí při daných podmínkách prostředí (relativní vzdušná vlhkost + teplota)
- ✓ stav = stav vlhkovostní rovnováhy (SVR)
- ✓ s každou změnou relativní vlhkosti a teploty vzduchu => změna RVD
- ✓ vlhkost dřeva < SVR = dřevo přijímá vodu ve formě páry z okolního ovzduší (dokud nedosáhne SVR)
- ✓ vlhkost dřeva > SVR = dřevo vodu ztrácí (desorpce)



Hystereze sorpce

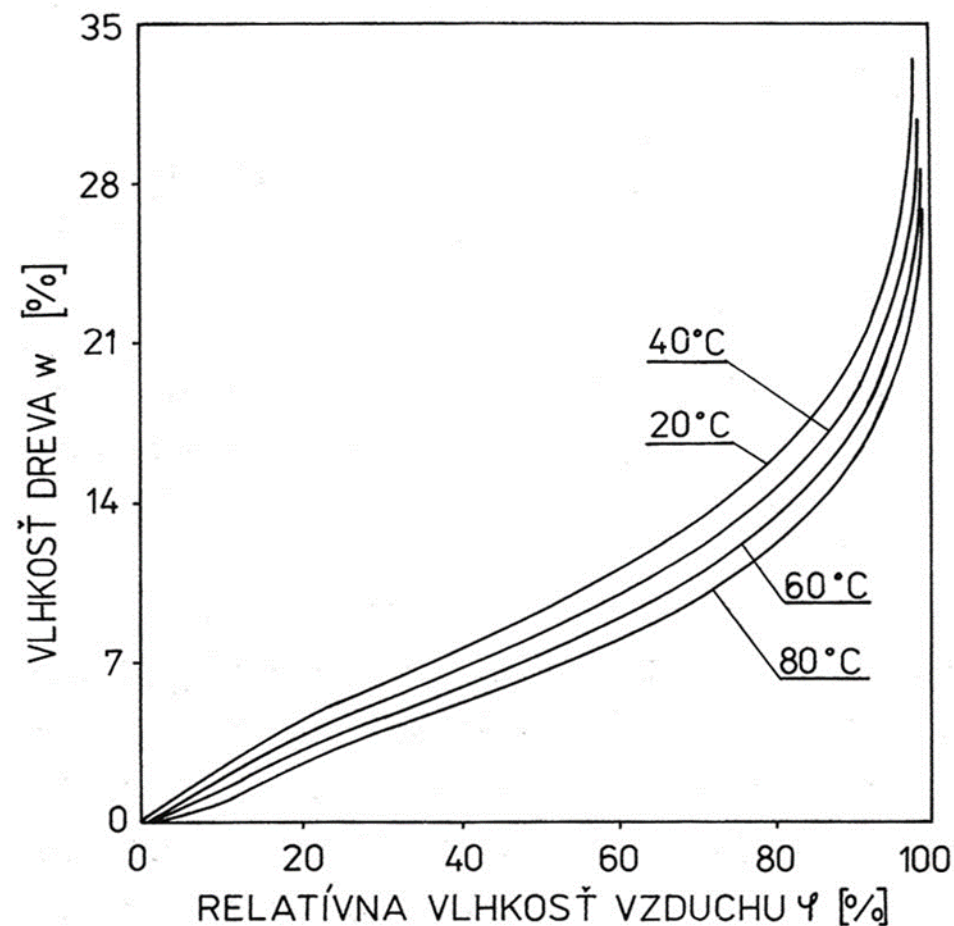
- ✓ proces změny vlhkosti dřeva v závislosti na prostředí je vratný, ale ne po stejné křivce = **hystereze sorpce**

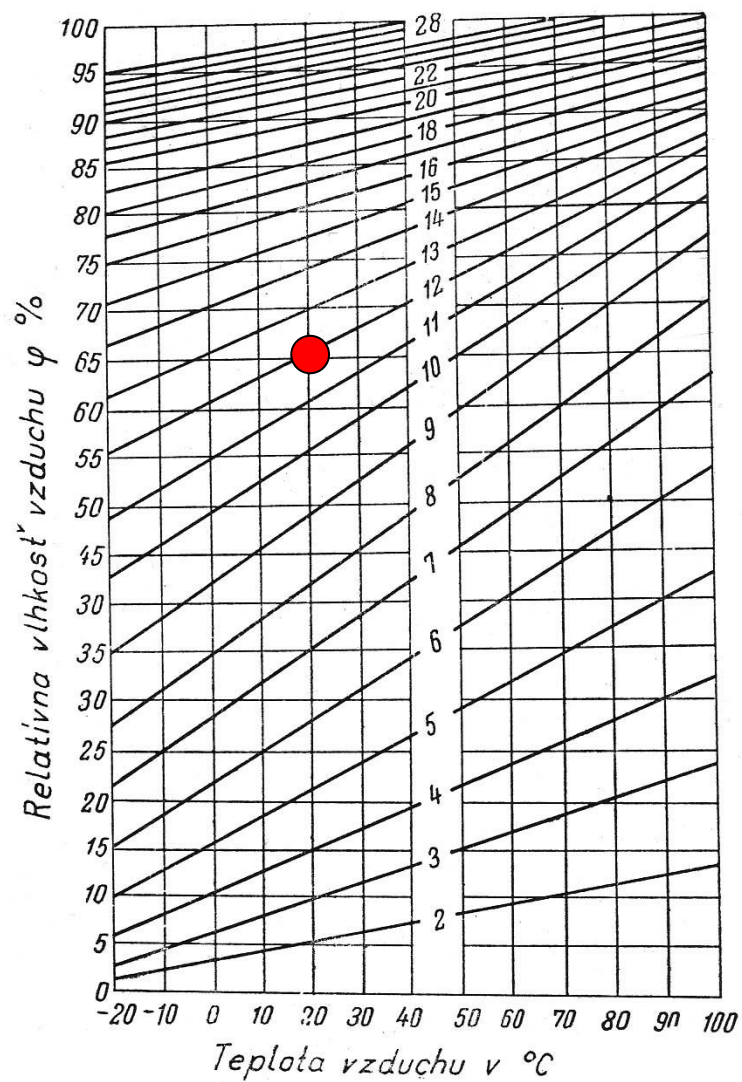
Adsorpční izoterma s hysterezní smyčkou, kde p^s je rovnovážný tlak nasycené páry.



Sorpční izoterma

- ✓ závislost RVD na relativní vlhkosti vzduchu při konstantní teplotě = sorpční izoterma
- ✓ závislost RVD na teplotě => zvýšení teploty o 10 °C = pokles RVD o cca 1 %





Vlhkost dřeva

= přítomnost vody ve dřevě

✓ vlhkost absolutní

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_{vody}}{m_0} \cdot 100 [\%]$$

✓ vlhkost relativní

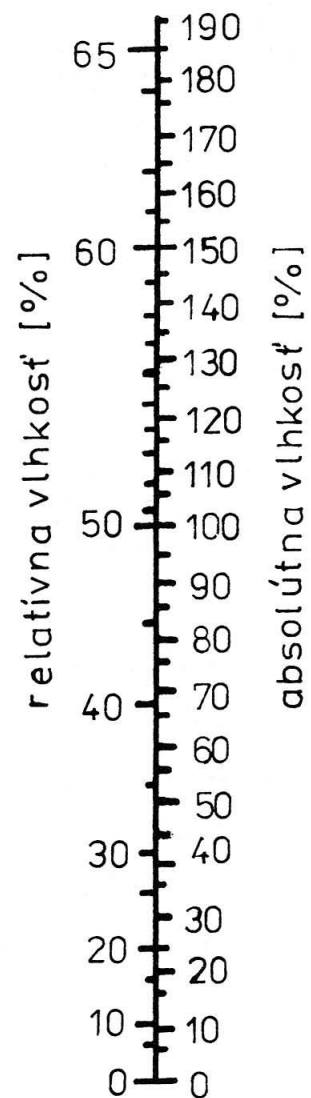
$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_{vody}}{m_w} \cdot 100 [\%]$$

- ✓ **absolutní vlhkost**
= využití při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností
- ✓ **relativní vlhkost**
= využití při prodeji nebo nákupu dřeva podle jeho hmotnosti (tam, kde je nezbytné znát procentické zastoupení vody z celkové hmotnosti mokrého dřeva)
- ✓ **přepočty mezi vlhkostmi**

$$w_{rel} = \frac{100 \cdot w_{abs}}{100 + w_{abs}}$$

$$w_{abs} = \frac{100 \cdot w_{rel}}{100 - w_{rel}}$$

Nomogram pro převod vlhkostí



Hraniční hodnoty v závislosti na podílu vody ve dřevě ve vztahu k sušině:

1. vlhkost suchého dřeva

= vysušení při 103 ± 2 °C, žádná voda vázaná ani volná;
absolutně suché dřevo $w_{\text{abs}} = 0$ %

2. vlhkost při nasycení buněčných stěn

= mikrokapilární systém v buněčné stěně je zaplněn vodou;
vyjadřuje se MNBS nebo MH (22 až 35 %)

3. vlhkost při nasycení dřeva

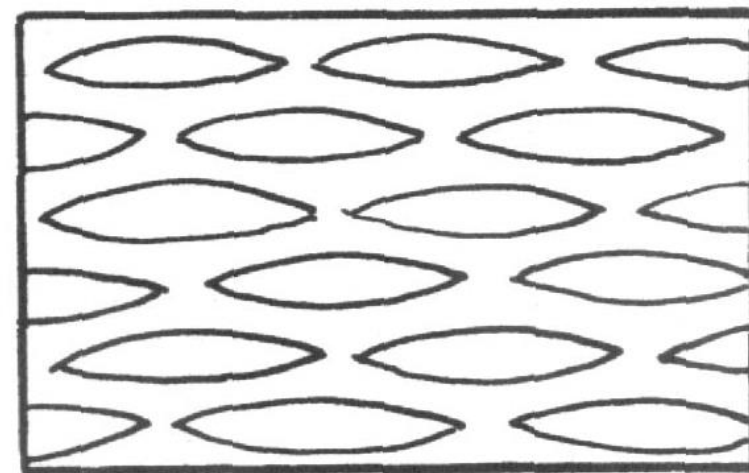
= mikro i makrokapilární systém je nasycen vodou, dřevo obsahuje max. množství vody; vyjadřuje se maximální vlhkostí dřeva ($w_{\text{max}} = 80$ až 400 %)

Rozdělení vody ve dřevě (*dle uložení*)

- chemicky vázaná voda
- voda vázaná
- voda volná

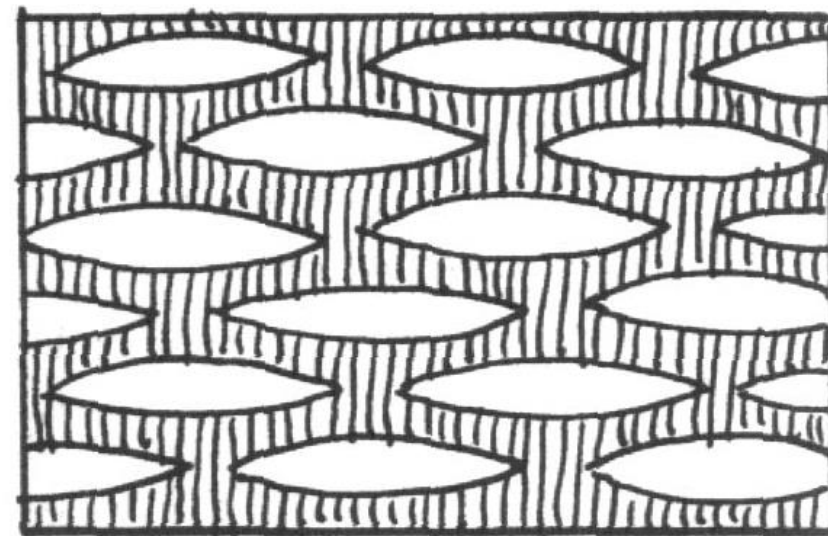
Chemicky vázaná voda

- ✓ součást chemických sloučenin
- ✓ nelze odstranit sušením (pouze spálením)
- ✓ 1 – 2 % sušiny dřeva
- ✓ nemá vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti



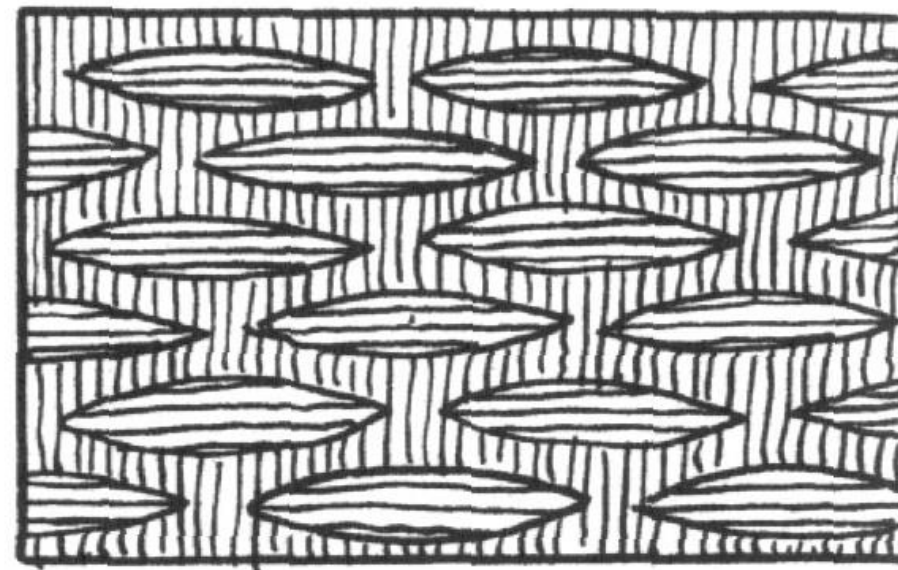
Voda vázaná

- ✓ v buněčných stěnách
- ✓ vodíkové můstky na OH skupinách amorfni části celulózy a hemicelulóz
- ✓ při vlhkosti dřeva 0 až 30 %
- ✓ zásadní vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti

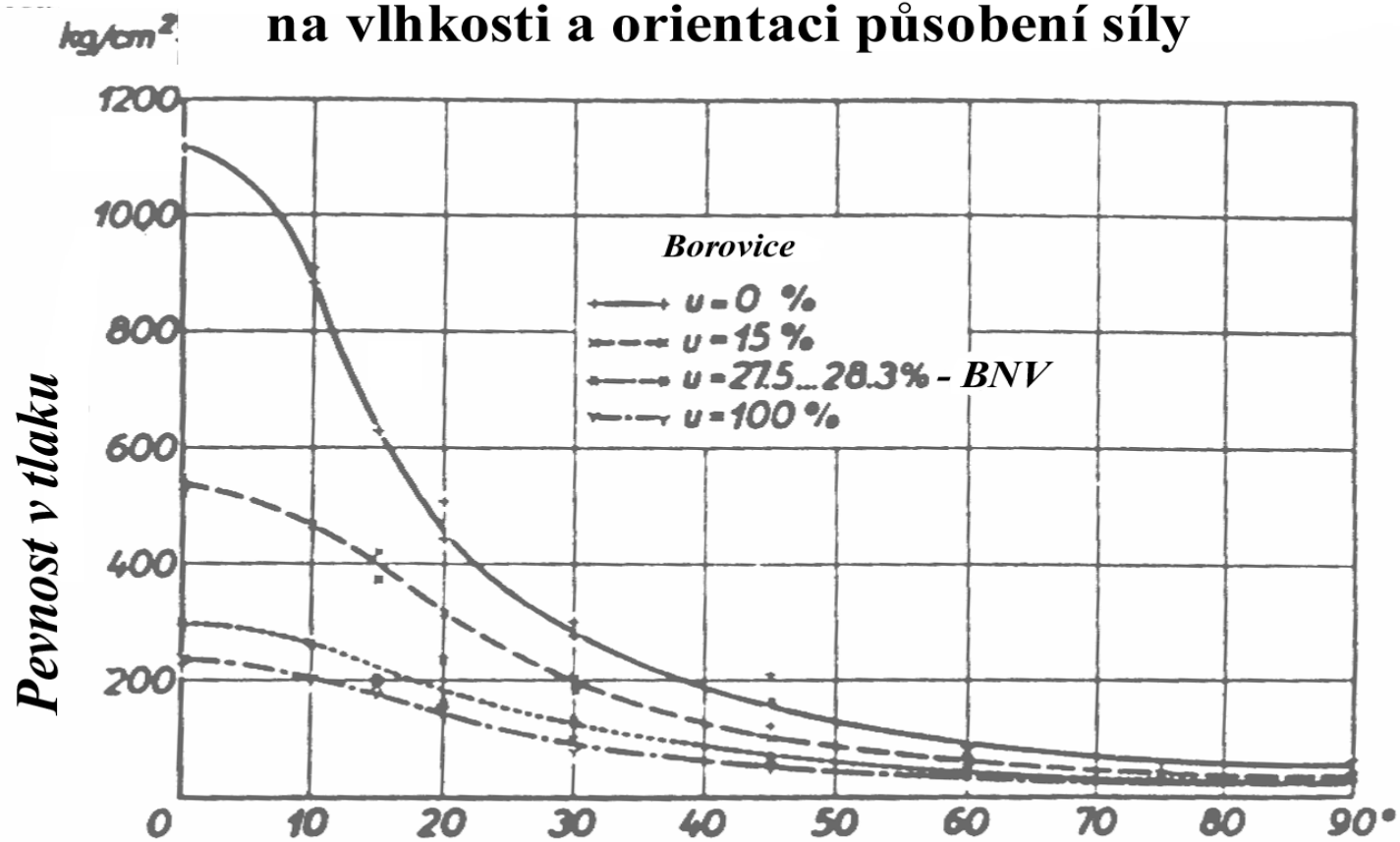


Voda volná

- ✓ vyplňuje lumeny a mezibuněčné prostory
- ✓ menší vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti

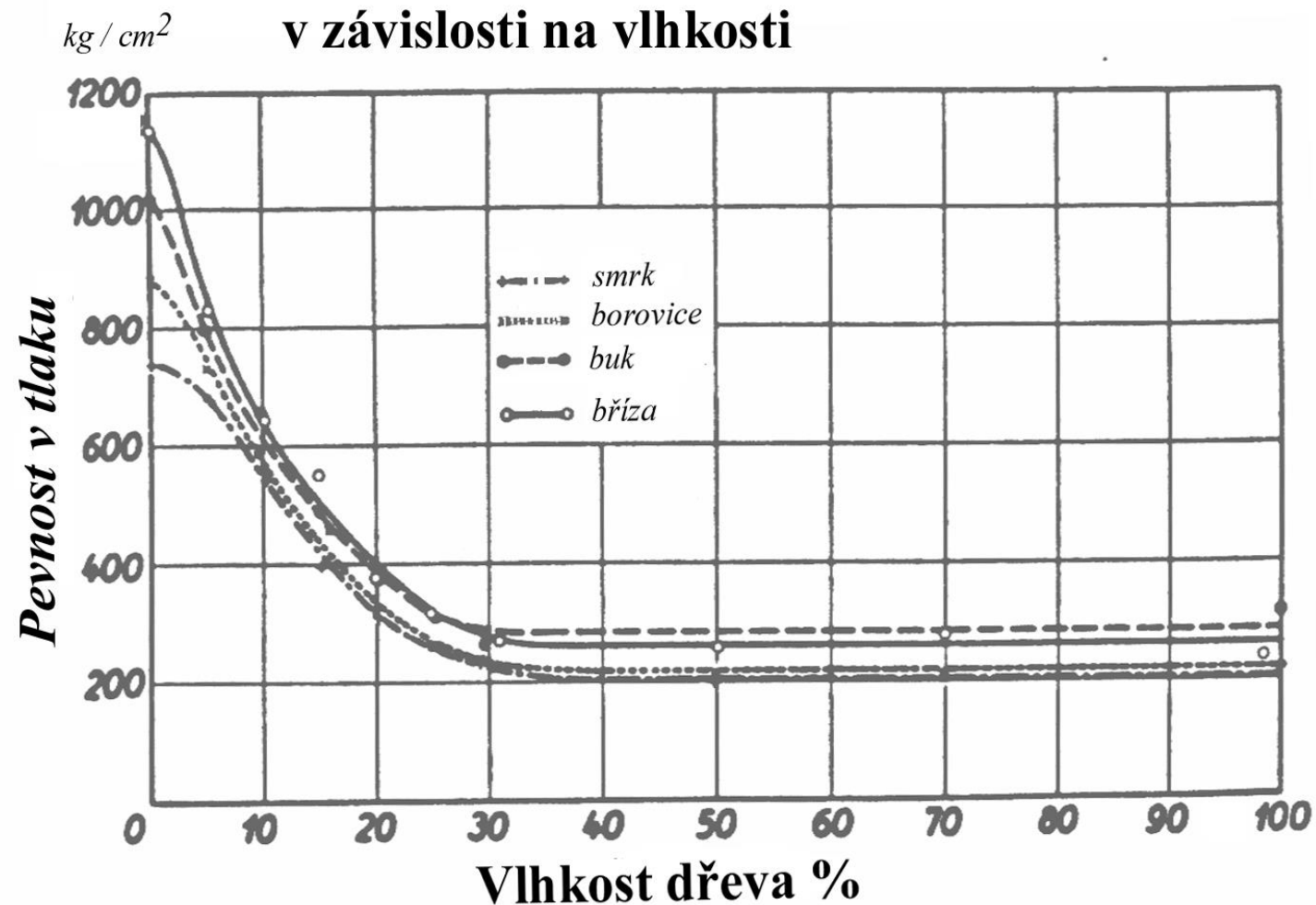


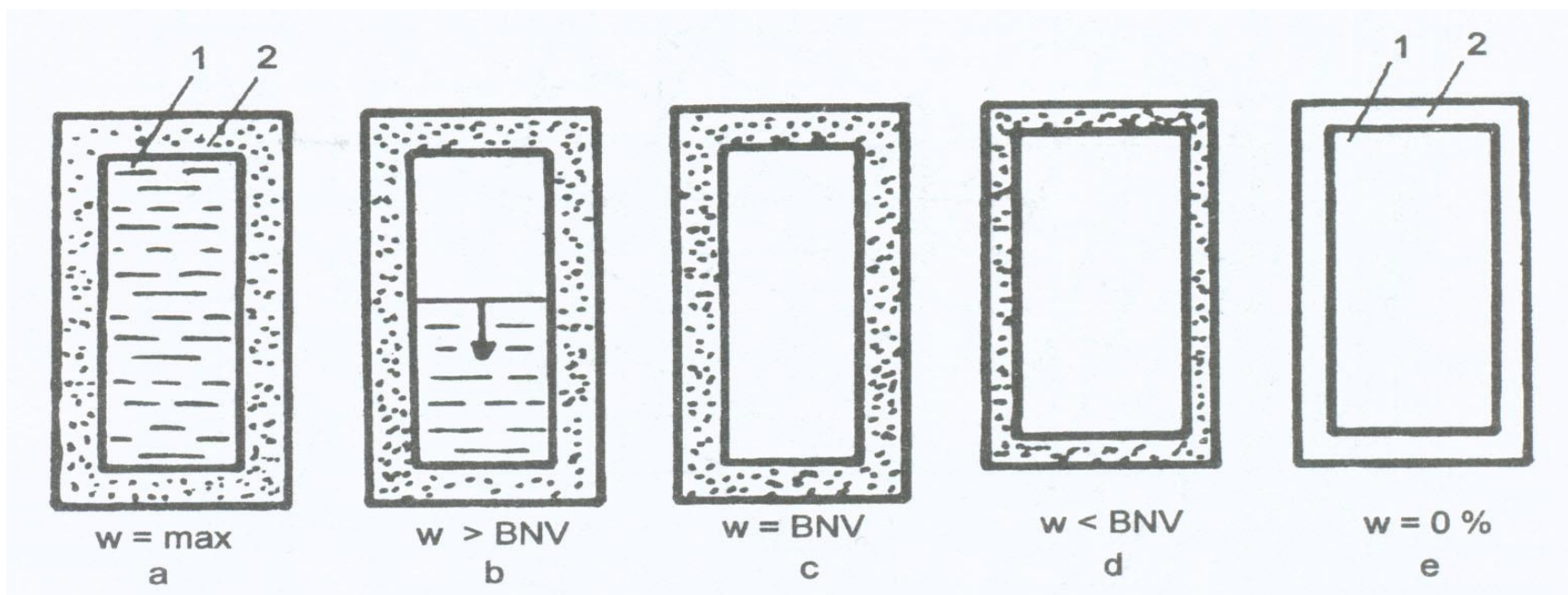
Závislost pevnosti v tlaku na vlhkosti a orientaci působení síly



Úhel vláken ke směru tlaku

Pevnost v tlaku různých dřevin v závislosti na vlhkosti





**Bod nasycení vláken =
Mez nasycení buněčných stěn =
Mez hygroskopicity
(BNV = MH = MNBS)**

MNBS

- ✓ stav buňky, kdy je stěna plně nasycena vodou, ale lumen žádnou v kapalném stavu neobsahuje
- ✓ maximální vlhkost buněčných stěn u dřeva uloženého dlouhodobě ve vodě
- ✓ teplota nemá vliv
- ✓ pro naše dřeviny 22 až 35 % (průměr 30 %)
- ✓ záleží na dřevině (anatomická a chemická stavba)
- ✓ obtížné stanovení MNBS => MH

MH

- ✓ rovnovážná vlhkost, kterou dřevo dosáhne při dlouhodobém vystavení prostředí s relativní vlhkostí vzduchu blízko nasycení
- ✓ MNBS = dřevo vystaveno vodě kapalně
- ✓ MH = vystaveno vodě v plynném skupenství
- ✓ při teplotě 15 až 20 °C platí, že $MH \cong MNBS$, ale MH je na rozdíl od MNBS závislá na teplotě (s rostoucí klesá)
- ✓ většinou se MH a MNBS nerozlišuje

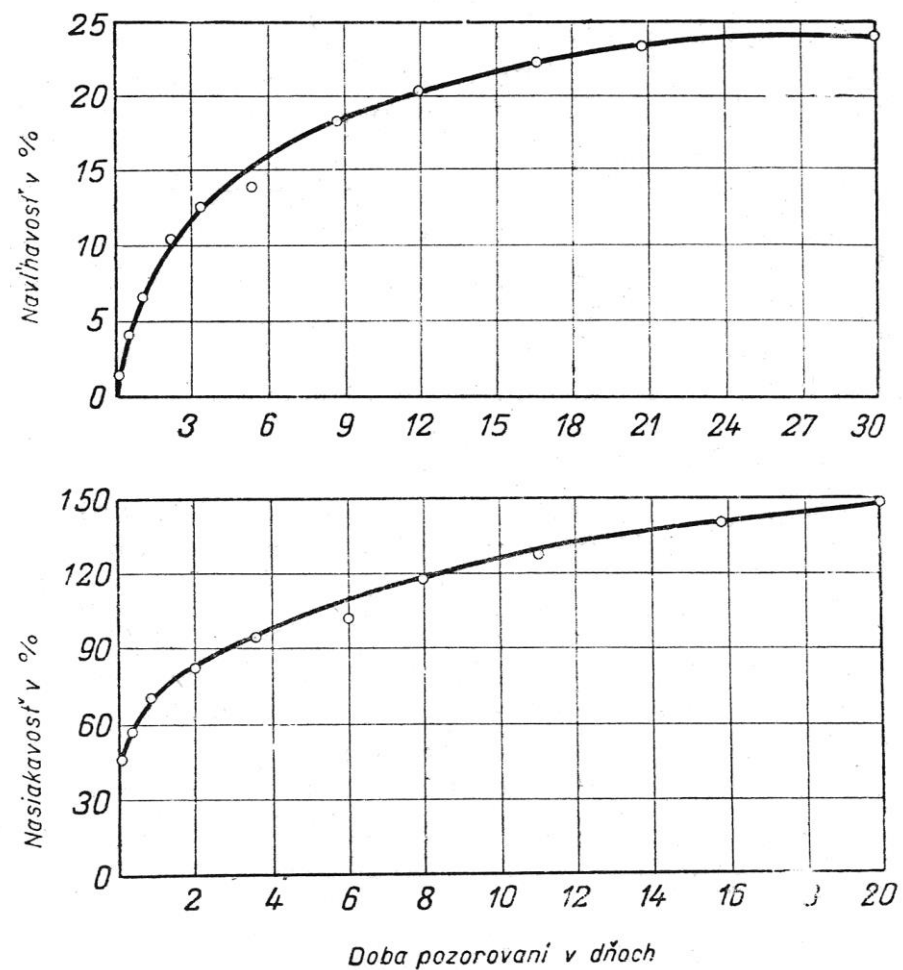
MH podle jednotlivých dřevin

MH (%)	Druh dřeva
22 - 24	jádrové dřevo jehličnanů s vysokým obsahem pryskyřice: borovice, modřín, douglaska, vejmutovka, limba
23 - 25	jádrové dřevo listnáčů s kruhovitě a polokruhovitě pórovitou stavbou dřeva: akát, kaštanovník, dub, jasan, ořešák, třešeň
26 - 28	jádrové dřevo jehličnanů s nižším obsahem pryskyřice: borovice, modřín, douglaska
30 - 34	jehličnatá dřeva s bělí a vyzrálým dřevem: smrk, jedle bělové dřevo jehličnatých dřevin s výrazným jádrem: vejmutovka, borovice, modřín
32 - 35 a více	listnatá dřeva s roztroušeně pórovitou stavbou: lípa, vrba, topol, olše, bříza, buk, habr bělové dřevo listnáčů s kruhovitě a polokruhovitě pórovitou stavbou: akát, kaštanovník, dub, jasan, ořešák, třešeň

Tab.4.1: Mez hygroscopicity u různých druhů dřev (podle Trendelenburga a Mayer-Wegelina 1955
upraveno Matovičem 1993)

Nasáklivost dřeva

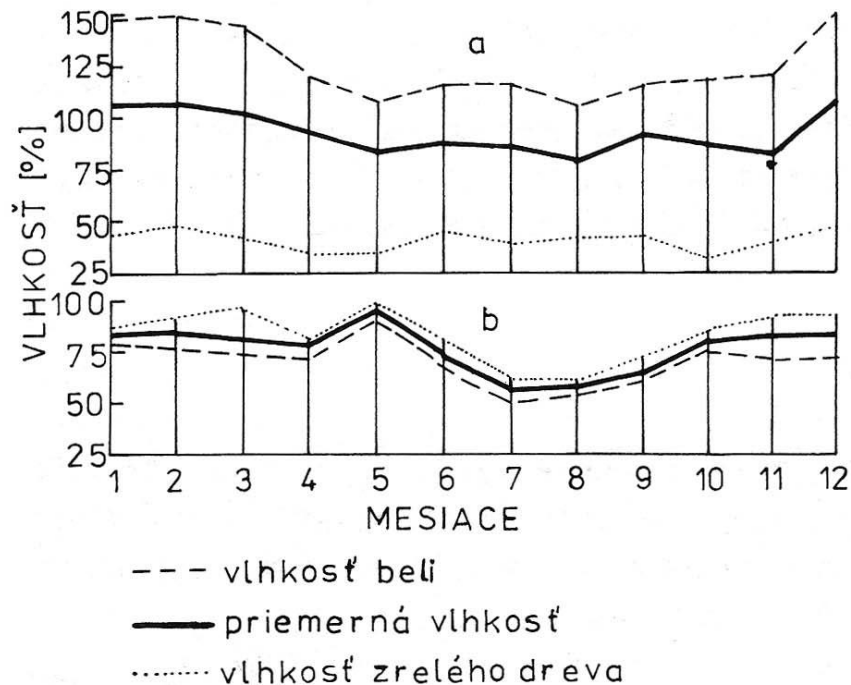
- ✓ schopnost v důsledku pórovité stavby nasávat vodu ve formě kapaliny
- ✓ užitečné pro posouzení maximální vlhkosti dřeva
- ✓ maximálně nasáklé dřevo
= plně nasyceno vodou vázanou + maximální množství vody volné
- ✓ množství vody závisí na objemu pórů
= nepřímo úměrné hustotě



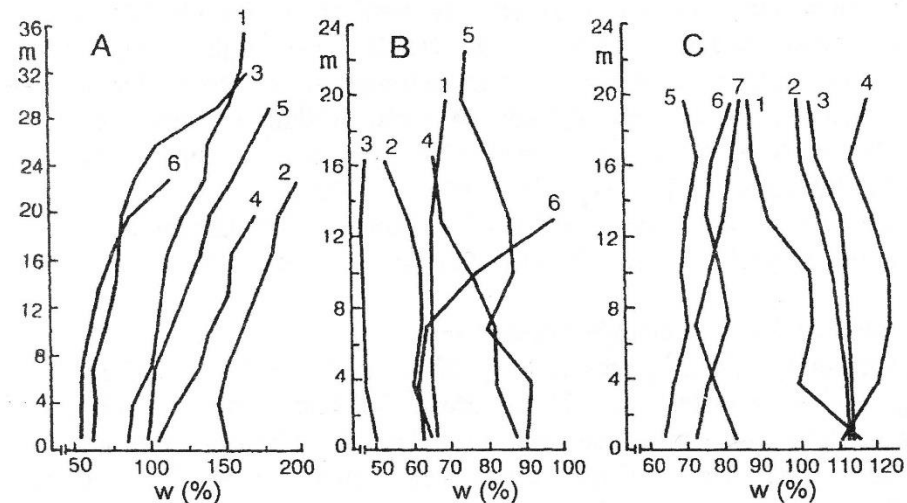
Obr. 45. Hore — krivka navlhavosti borovicového dřeva, dole — krivka nasiakavosti borovicového dřeva

Faktory ovlivňující vlhkost dřeva

- ✓ největší vliv = stavba, hustota, teplota
- ✓ rozložení v kmeni je nepravidelné
= mění se z výškou a po průměru
- ✓ rozdíl jádro x běl
(jehličnany jádro 3-4x menší, listnáče minimální rozdíl)
- ✓ jehličnany = s výškou vlhkost roste (ne jádro)
- ✓ mladší stromy > starší (vliv běle)
- ✓ mění se v průběhu roku (max. zima, min. léto)
- ✓ kolísá i v průběhu dne

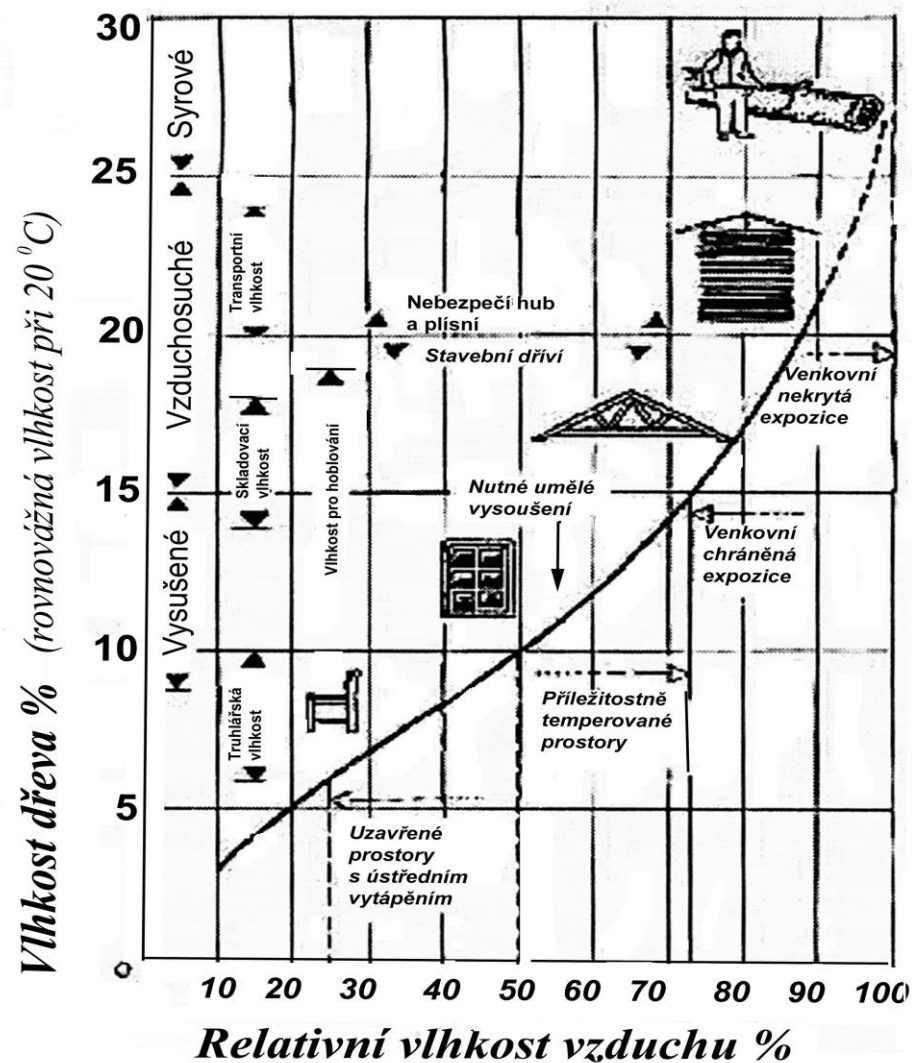


Obr. 10.4 Zmeny vlhkosti v kmeňoch rastúcich stromov smreka a brezy počas roka: a — smrek; b — breza (PERELYGIN 1965).



Obr. 4.4: Rozloženie vlhkosti po výške kmene. *A* jehličnany - 1 smrek, 2 jedle, 3-5 borovice, 6 douglaska. *B* kruhovitě pórovité listnáče - 1, 2 dub, 3 jasan, 4 kaštanovník, 5 jilm, 6 akát. *C* roztroušeně pórovité listnáče - 1 vrba, 2 topol, 3 osika, 4 olše, 5 buk, 6 bříza, 7 platan (Tsoumis 1991).

- ✓ vliv vlhkosti při zpracování a používání dřevěných výrobků
= **technická vlhkost**
- ✓ technická vlhkost
= výrobní + provozní vlhkost
- ✓ doporučeno výrobní vlhkost = provozní vlhkost, resp. u některých druhů výrobků má být o 1 – 2% nižší
- ✓ předejdeme nežádoucím deformacím v důsledku kolísání teploty a vlhkosti vzduchu





Fakulta lesnická
a dřevařská

Měření vlhkosti

Volba metody měření vlhkosti podle:

- ✓ přesnosti
- ✓ rozsahu
- ✓ spolehlivosti
- ✓ nákladů
- ✓ časové náročnosti

2 hlavní metody měření vlhkosti

- ✓ přímé = zjišťují skutečný obsah vody
 - hmotnostní (gravimetrická)
 - destilační
- ✓ nepřímé = měří jinou fyzikální veličinu, jejíž hodnota závisí od obsahu vody
 - elektrofyzikální
 - radiometrické
 - akustické
 - optické

Nevýhody a omezení váhové metody

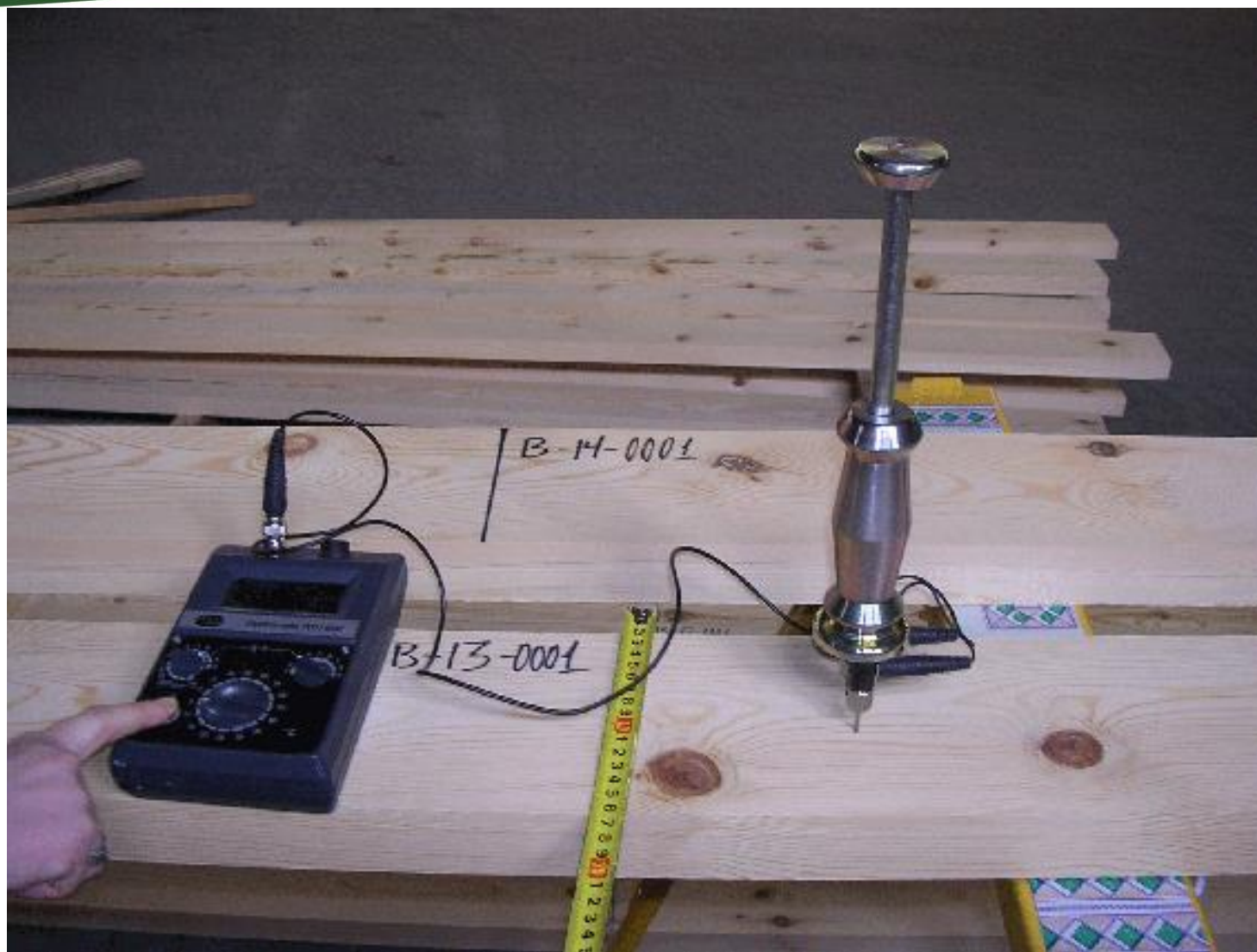
- ✓ pracná, náročná na čas, není kontinuální měření
- ✓ ne pro dřevo ošetřené chemickými látkami
- ✓ přesnost závisí na vyloučení chyb:
 - ztráta vody před 1. sušením
 - neúplné vysušení
 - vypaření těkavých složek
 - termický rozklad
 - přijmutí vlhkosti po vysušení
 - chyba vážení
 - obsah pryskyřic

Nepřímé metody

- ✓ rychlé
- ✓ nedestruktivní
- ✓ hlediska výběru:
 - rozsah měření
 - požadovaná přesnost
 - ručně x automaticky
 - diskrétně x kontinuálně
 - druh materiálu
 - destruktivně x nedestruktivně
 - rovnoměrné x nerovnoměrné rozložení vlhkosti
 - cena, údržba, životnost, výstup na PC, rychlost měření, ...
 - možnost kalibrace
 - náročnost na obsluhu

Přehled měřených elektrických veličin používaných u elektrických vlhkoměrů (podle Makovíny, 1995)

Zjišťovaná veličina	Elektrofyzikální charakteristika dřeva	Měřená elektrická veličina
vlhkost dřeva	měrný odpor, resp. měrná vodivost	odpor R
	relativní permitivita	kapacita C
	ztrátové číslo	vodivost G
	ztrátový úhel	fázový posun
	komplexní permitivita	admitance Y



Pohyb vody ve dřevě (difúze, propustnost)

- ✓ zajímá nás při sušení dřeva
- ✓ pomalé sušení = energetická náročnost
- ✓ příliš rychlé sušení = snižuje kvalitu materiálu
- ✓ pohyb vody ve dřevě = funkce jak prostorových souřadnic, tak i času
- ✓ ačkoliv považujeme vlhké dřevo za kontinuum, dělíme pohyb vody na pohyb vody vázané (difusi) a pohyb vody volné (kapilární elevace, propustnost)

Difúze

- ✓ pohyb vody vázané
- ✓ je vyvolána nerovnoměrně rozloženou vlhkostí
=> snaha o vyrovnaní vlhkosti
- ✓ je-li difúze konstantní v čase a mění se pouze se vzdáleností, tak popisuje proces **I. Fickův zákon**:

$$\frac{m}{S \cdot t} = D \cdot \frac{dc}{dl}$$

kde D je koeficient difúze ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), m – hmotnost pře-difundované kapaliny, t – čas, S – plocha difúze, dl – vzdálenost rozdílných koncentrací, dc – rozdíl koncentrací

✓ rozdíl koncentrací: $dc = dw \cdot \rho_r \cdot \rho_{H_2O}$

kde ρ_r je redukovaná hustota dřeva, ρ_{H_2O} – hustota vody

✓ $D_L : D_R : D_T = 35 : 3 : 2$

✓ význam zejména z pohledu stavební fyziky při výpočtech dlouhodobých klimatických podmínek v budovách

smrkové dřevo ve směru $10^{16} D (m^2 \cdot s^{-1})$			
teplota °C	příčném	radiálním	tangenciálním
20	40,73	2,49	1,96
40	115,48	8,32	6,52
60	281,14	13,92	12,73

Tab.14: Hodnoty koeficientu difuze D pro smrkové dřevo (podle Kurjatka 1989 upraveno autorem)

- ✓ při sušení se však mění koncentrace vlhkosti nejen v prostoru, ale i v čase
- ✓ proces popisujeme jako nestálý (nestacionární) a odvozujeme ho derivací stacionárního vztahu podle času:

$$\frac{dm}{dt} = D \cdot S \cdot \left(\frac{dc}{dl} \right)$$

- ✓ úpravou dostáváme zápis **II. Fickova zákona** ve tvaru:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial l^2}$$

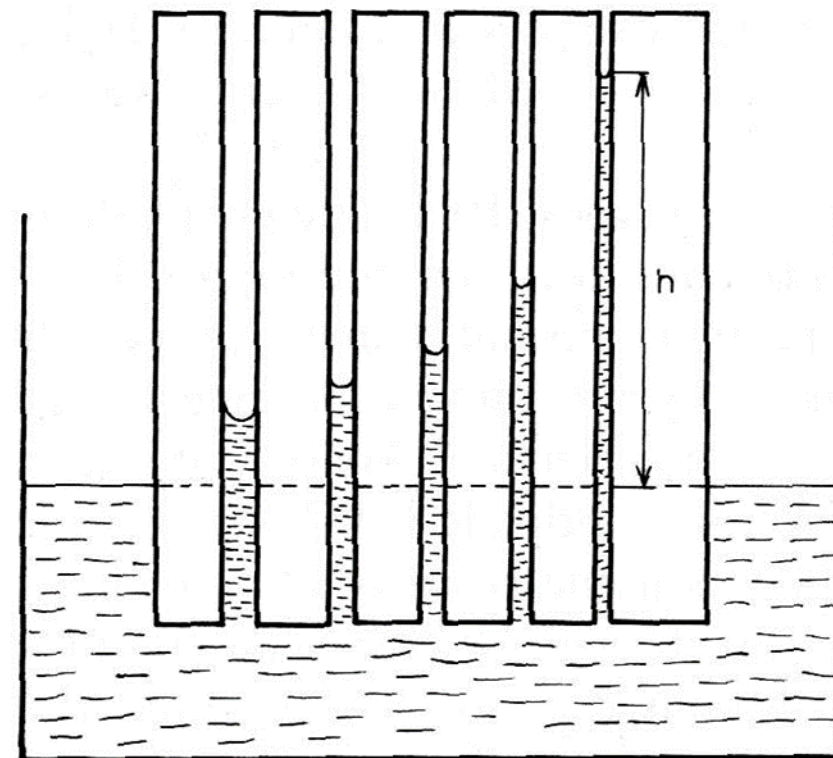
Kapilární elevace

- ✓ volná voda v kapilární struktuře dřeva o poloměru větším než 10^{-7} m se může pohybovat dvěma základními druhy pohybu:
 - vzlínáním po stěnách kapilár,
 - hydrodynamickým pohybem, vyvolaným gradientem vnějšího tlaku.
- ✓ kapilární elevace = vzlínání volné vody v kapilární struktuře dřeva

- ✓ ve dřevě ponořeném do vody vystoupí hladina v každé kapiláře do výšky h nad vodní hladinu dle vztahu:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot r \cdot g}$$

kde σ je povrchové napětí vody,
 ρ – hustota vody, r – poloměr
kapiláry, g – tíhové zrychlení



- ✓ gradient vnějšího tlaku je v tomto případě dán rozdílem tlaků nad volnou hladinou p_0 a nad meniskem v kapiláře p_r podle všeobecného tvaru LaPlaceovy rovnice:

$$p_0 - p_r = \frac{2 \cdot \sigma}{r}$$

- ✓ a tlak nad volnou hladinou je dán:

$$p_0 = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \ln \varphi$$

kde R je plynová konstanta ($8,1441 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$), T – absolutní teplota,
 M – molekulová hmotnost vody, φ – relativní vzdušná vlhkost

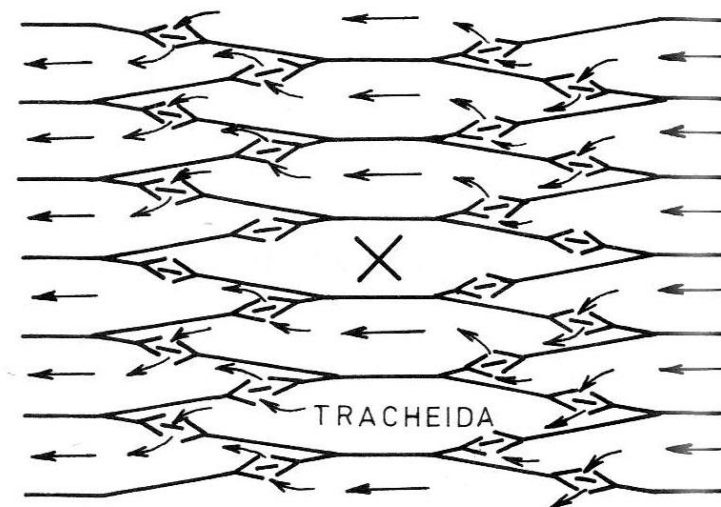
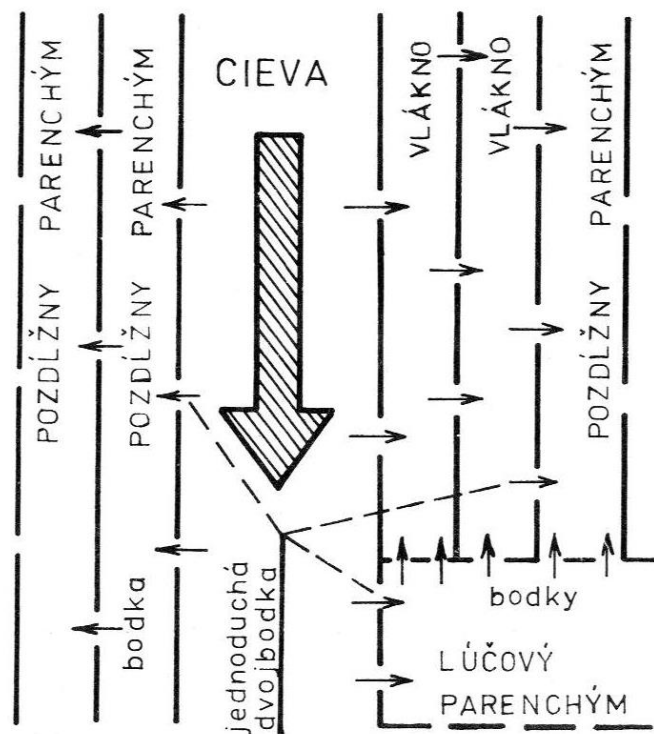
Propustnost

- ✓ fyzikální vlastnost, při které dochází k pohybu kapaliny (volné vody) v důsledku gradientu vnějšího tlaku
- ✓ ustálené podmínky objemového toku kapalin (konstantní rychlost toku v čase) se popisují **Darcyho zákonem** v integrálním tvaru:

$$\frac{V}{S \cdot t} = k \cdot \frac{dp}{dl}$$

kde k je koeficient propustnosti (m^2), V – objem protlačené kapaliny,
 t – doba trvání toku, S – plocha toku, dp – rozdíl tlaků na koncích
zkušebního tělesa, dl – vzdálenost rozdílných tlaků

- ✓ koeficient propustnosti k poskytuje informace o počtu a stavu vodivých cest ve struktuře dřeva



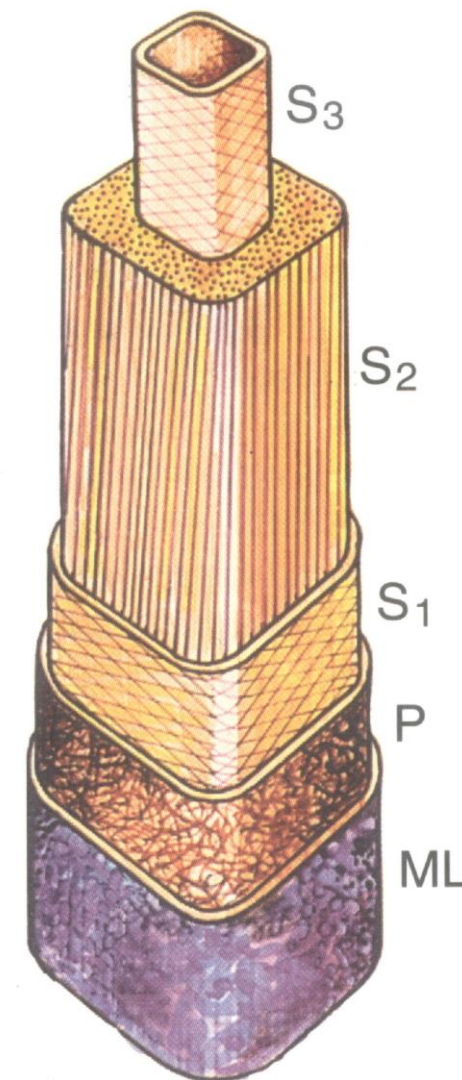
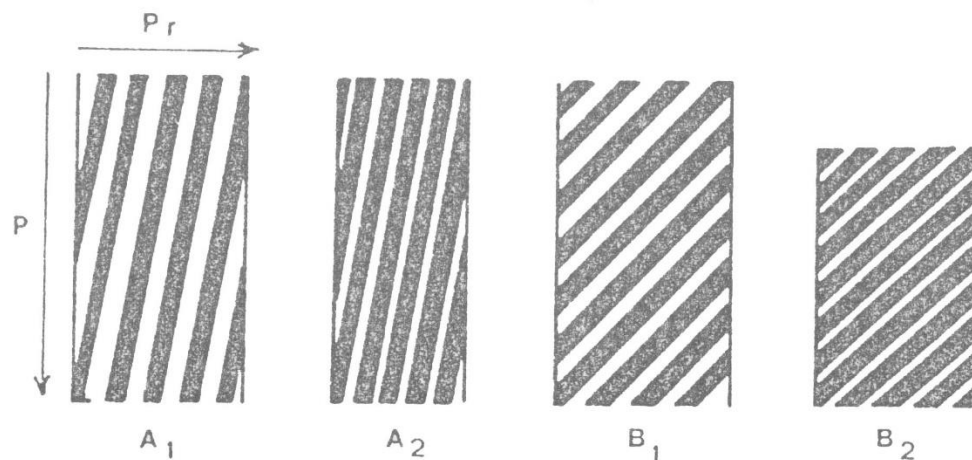
Obr. 10.21 Vodivé cesty pre hydrodynamický tok v dreve ihličnanov.

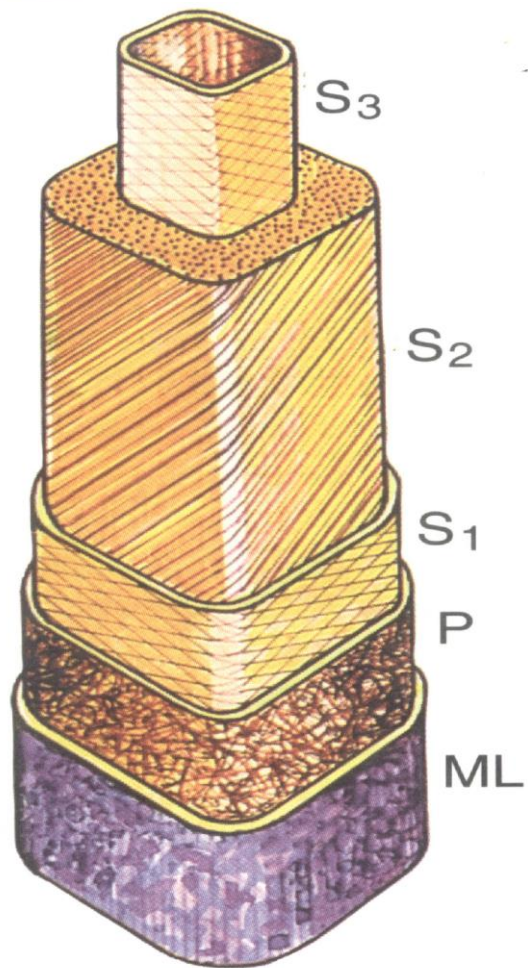
Obr. 10.20 Vodivé cesty pre priepustnosť listnatých drevín (podľa Siaua 1971).

Bobtnání a sesychání dřeva

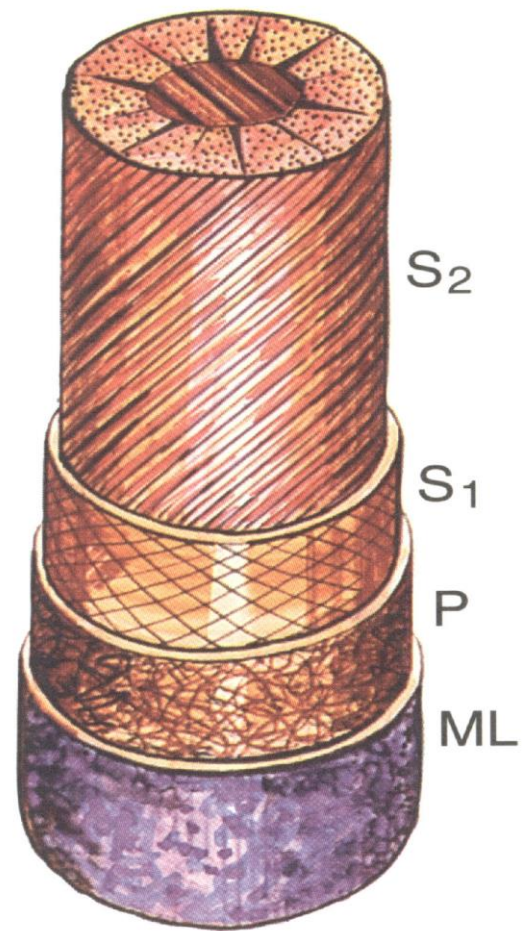
- ✓ při změnách vlhkosti dřeva v **rozsahu vody vázané** podléhá dřevo rozměrovým změnám
- ✓ změny obsahu volné vody nad mezí hygroskopicity **nemají** vliv na změnu rozměrů
- ✓ sesychání a bobtnání je lokalizováno v buněčné stěně, kde dochází k přibližování a oddalování fibrilární struktury
- ✓ velký vliv má orientace fibril

- ✓ vliv S_2 (90%) = orientace fibril (odklon od podélné osy)
- ✓ v podélném směru = minimální změny
- ✓ maximální sesychání a bobtnání je napříč vláken





juvenilní dřevo



reakční dřevo

- ✓ jedná se o reverzibilní proces, který probíhá po jedné trajektorii
- ✓ odlišné hodnoty vyplývají pouze z definice a matematického vyjádření procesu
- ✓ při bobtnání a sesychání se mění lineární, plošné nebo objemové rozměry tělesa
- ✓ definují se jako podíl příslušné rozměrové změny a původní hodnoty rozměru

Bobtnání dřeva

- ✓ bobtnání (α) – schopnost dřeva zvětšovat svoje rozměry (lineární, plochu nebo objem při přijímání vázané vody v rozsahu 0% až MH)
- ✓ **celkové (maximální) bobtnání $\alpha_{\max}$**
- ✓ **bobtnání částečné α_i**
- ✓ vyjadřuje se podílem změny rozměru k původní hodnotě
- ✓ uvádí se nejčastěji v %

$$\alpha_i = \frac{a_{iw_2} - a_{iw_1}}{a_{iw_1}} \cdot 100 = \frac{da_{iw}}{a_{iw_1}} \cdot 100 [\%]$$

- ✓ **koeficient bobtnání K_{α}**
= udává procentickou změnu rozměrů, plochy
nebo objemu, při změně vlhkosti o 1 %

$$K_{\alpha} = \frac{\alpha_i}{w_2 - w_1} = \frac{\alpha_i}{dw} \quad [\% / 1\%]$$

- ✓ nebo známe-li celkové bobtnání:

$$K_{\alpha} = \frac{\alpha_{max}}{MH} [\% / 1\%]$$

- ✓ celkové objemové bobtnání: $\alpha_{Vmax} = w_{MH} \cdot \rho_0$
- ✓ celkové objemové, tangenciální a radiální bobtnání:

$$\alpha_V = 28 \cdot \rho_0$$

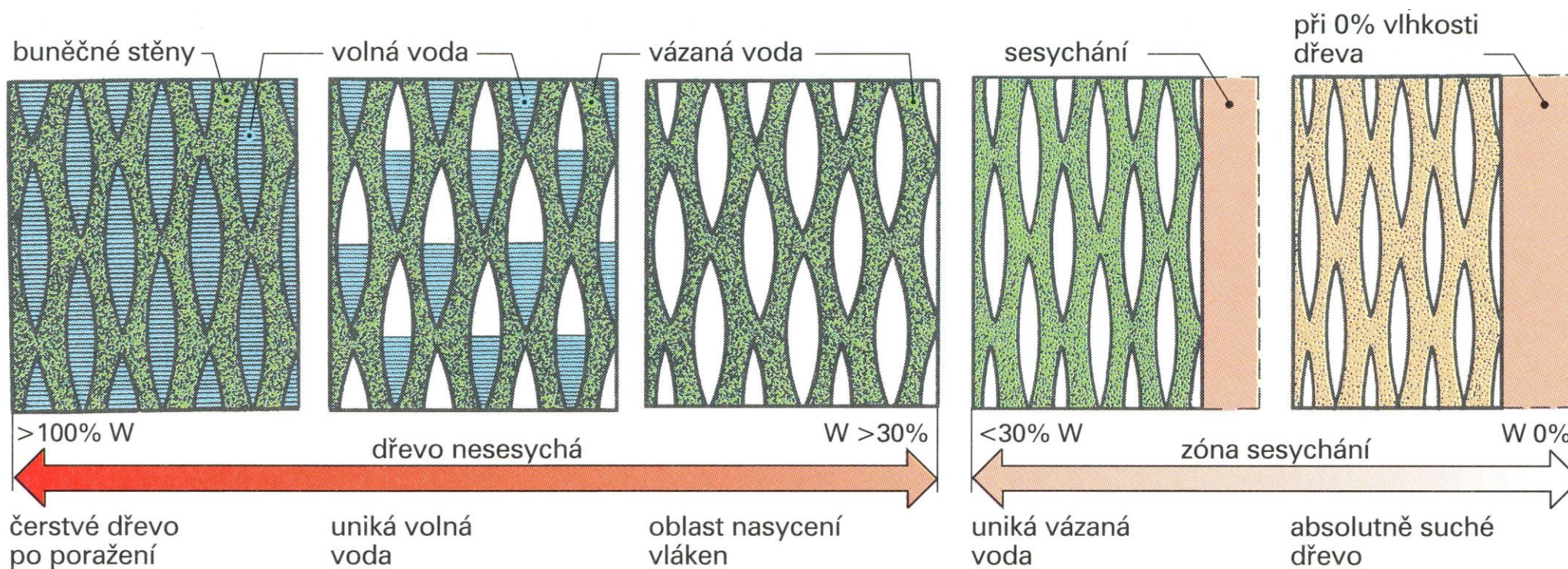
$$\alpha_t = 17 \cdot \rho_0$$

$$\alpha_r = 9,1 \cdot \rho_0$$

✓ Bobtnání má anizotropní charakter!

- v podélném směru 0,1 – 0,4%
 - v radiálním směru 3 – 6%
 - v tangenciálním směru 6 – 12%
-
- celkové objemové bobtnání je dáno součtem výše uvedených bobtnání (plus i jejich vzájemných součinů)
 - bobtnání v jednotlivých směrech udává poměr:
$$\alpha_t : \alpha_r : \alpha_l = 20 : 10 : 1$$

- ✓ **diferenciální bobtnání** udává poměr radiálního a tangenciálního bobtnání:
$$\alpha_{\text{dif}} = \alpha_t / \alpha_r$$
- ✓ hodnota diferenciálního bobtnání závisí na hustotě dřeva (s rostoucí hodnotou se snižuje)
- ✓ jehličnaté dřeviny > listnaté dřeviny
- ✓ průměrná hodnota = 2
- ✓ běžně se pohybuje v intervalu 1 až 3,5



Sesychání dřeva

- ✓ sesychání (β) – proces, při kterém se zmenšují lineární rozměry, plocha nebo objem tělesa při ztrátě vody vázané
- ✓ podobně jako bobtnání můžeme sesychání vyjádřit vztahem:

$$\beta_i = \frac{a_{iw_1} - a_{iw_2}}{a_{iw_1}} \cdot 100 = \frac{da_{iw}}{a_{iw_1}} \cdot 100 [\%]$$

- ✓ sesychání se řídí podobnými zákonitostmi, jako bobtnání a rozeznáváme stejně definované další charakteristiky, tj. koeficient sesychání K_{β_i} a diferenciální sesychání β_{dif} :

$$K_{\beta_i} = \frac{\beta_i}{w_2 - w_1} = \frac{\beta_i}{dw} \quad [\% / 1\%]$$

$$\beta_{\text{dif}} = \beta_t / \beta_r$$

- ✓ hodnoty sesychání β_i a bobtnání α_i
(lineárního, plošného a objemového)
lze navzájem přepočítat podle
následujících vztahů:

$$\alpha_i = \frac{100 \cdot \beta_i}{100 - \beta_i}$$

$$\beta_i = \frac{100 \cdot \alpha_i}{100 + \alpha_i}$$

Na základě hodnot koeficientů objemového sesychání můžeme rozdělit dřeva do následujících skupin:

- ✓ dřeva málo sesychavá – koeficient objemového sesychání je menší než 0,4 (tis, olše, vrba, topol, kaštanovník, limba, akát)
- ✓ dřeva středně sesychavá – koeficient objemového sesychání je 0,4 – 0,47 (borovice, smrk, jedle, dub, jilm, jasan, javor, osika)
- ✓ dřeva hodně sesychavá – koeficient objemového sesychání je větší než 0,47 (modřín, bříza, buk, habr, líska, lípa)

Vnitřní napětí při vysychání dřeva

- ✓ při vysychání dřeva vznikají ve dřevě vnitřní napětí, která jsou dány nerovnoměrným sesycháním
- ✓ skládají se ze dvou složek, a to vlhkostního a zbytkového napětí
- ✓ dřevo nevysychá rovnoměrně => objevují se gradienty vlhkosti => vznik vlhkostních napětí
- ✓ pokládají se za pružná, mají dočasný charakter a po vyrovnání vlhkosti zanikají

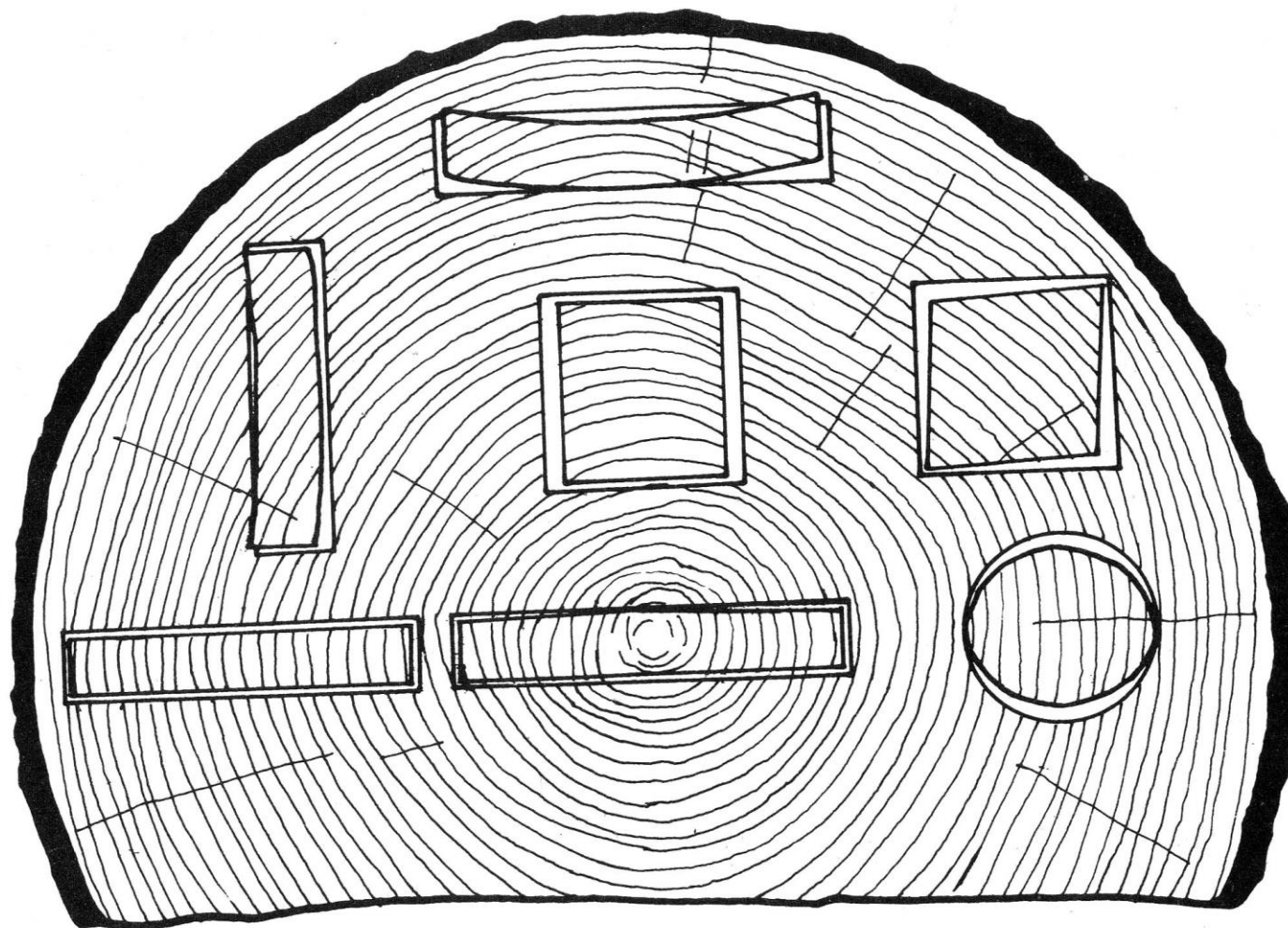
- ✓ zbytková napětí jsou trvalá a při příliš rychlém sušení jim nelze zabránit
- ✓ na počátku sušení se v povrchových vrstvách vyskytuje tahové napětí a ve středových tlakové napětí => povrchové trhliny
- ✓ při dalším vysychání se charakter mění, tj. v povrchových vrstvách tlakové napětí a ve středových tahové napětí => vnitřní trhliny
- ✓ povrchové i vnitřní trhliny vznikají v radiálním směru a k roztržení pletiv dochází především podél dřeňových paprsků

Správná rychlost sušení!!!



Borcení dřeva

- ✓ v důsledku anizotropního charakteru dochází při bobtnání nebo sesychání ke změnám tvaru sortimentu
 - **příčné borcení**
 - **podélné borcení**
- ✓ příčné borcení = rozdílné radiální a tangenciální sesycháním sortimentu
- ✓ tím větší, čím větší je jeho vzdálenost od dřeně k obvodu kmene



Kollmann (1968)

- ✓ **podélné borcení**
= nerovnoměrné podélné
sesycháním dřeva, které
způsobí prohnutí nebo
stočení řeziva
= rozdílné podélné seschnutí
jádra a běli, přítomnost
reakčního dřeva
- ✓ **stočení** = točivý průběh
vláken v kmeni

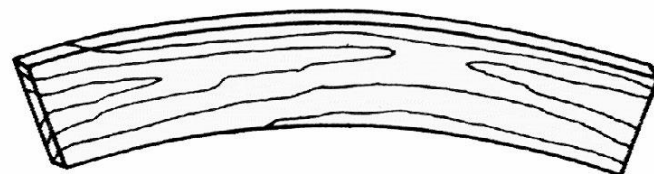
Podélné plošné jednoduché



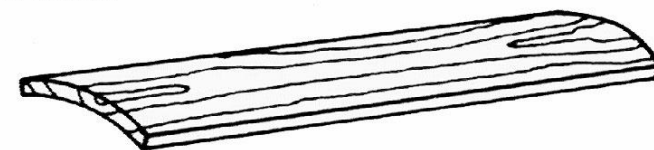
Podélné plošné složené



Podélné plošné boční



Příčné



Šroubovitě





Teplo jednoduše ...

Podstata modifikace dřeva

Omezení rozměrových a tvarových změn dřeva při změnách vlhkosti v rozsahu hygroskopicity.

- ✓ laky a nátěry povrchu dřeva
- ✓ impregnace dřeva látkami, které jsou pro vodu neprostupné
- ✓ neutralizace OH skupin
- ✓ **tepelná úprava**



Fakulta lesnická
a dřevařská

Hoření dřeva

Hořlavost

- ✓ samotná hořlavost není fyzikální veličinou, ale veličinou popisnou
- ✓ vyjadřuje chování dřeva při působení vyšších teplot
- ✓ při studiu hořlavosti dřeva vlastně porovnáváme jen změny chemického složení, anatomické stavby a fyzikálních vlastností, ke kterým došlo vlivem proběhnutí termooxidační reakce
- ✓ hoření dřeva představuje termický rozklad vazeb základních chemických komponent dřeva a změnu jeho chemického složení, za vzniku nových produktů
- ✓ zařazení materiálu mezi hořlavé látky závisí na řadě kritérií, která jsou zkoušena podle odpovídajících norem (ČSN, DIN 4102)
- ✓ hořlavost dřeva je určována bodem vzplanutí, bodem hoření, bodem zápalnosti a termickým rozkladem dřeva

Proč dřevo hoří?

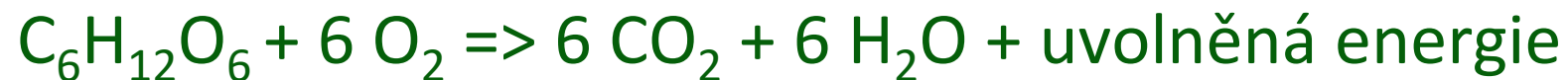
- ✓ dřevo je organická hmota složená z uhlíku (50%), kyslíku (42%) a vodíku (5%) a dalších organických prvků
- ✓ je proto, na rozdíl od většiny ostatních konstrukčních materiálů, hořlavé
- ✓ chování dřeva během hoření (požáru) však lze poměrně přesně odhadnout a jeho požární odolnost patří k nejvyšším

Hoření

Akumulace sluneční energie rostlinami



Ideální proces pálení (tj. okysličování)



Vznikající spaliny, dále obsahují CO, N, CH₄, vodní páry, ...

Proces hoření

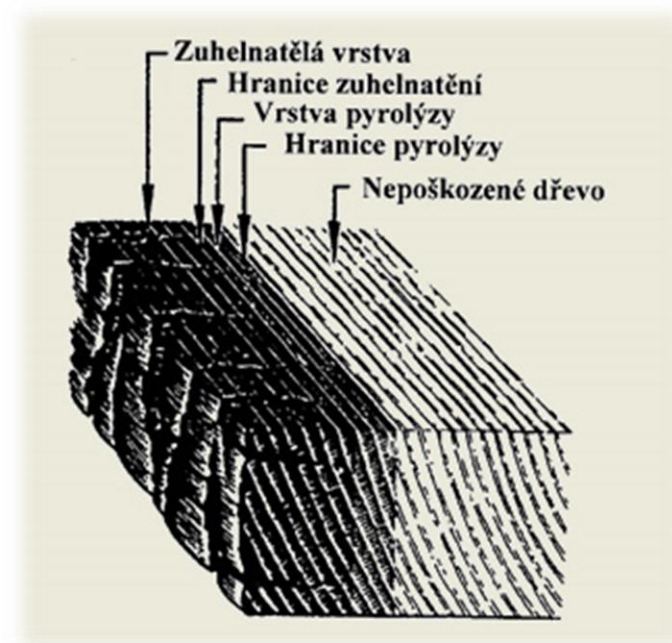
- **1. fáze:** Ohřívání a postupné odpařování vázané vody ve dřevě.
- **2. fáze:** Doba, po kterou se uvolňují ze dřeva hořlavé plyny při cca 200 až 400 °C, tyto plyny představují u dřeva asi 85 % jeho spalitelného objemu.
- **3. fáze:** Nastává a probíhá postupné hoření těchto uvolněných hořlavých plynů.

Další faktory ovlivňující hoření

- **vnitřní struktura dřeva**, tj. jeho pórovitost, hustota, podíl jarního a letního dřeva, anatomická stavba (podíl jednotlivých typů buněk dřeva), propustnost pro plyny a kapaliny, měrné teplo a tepelná vodivost
- **geometrie konstrukce**, tj. velikost, tvar, poměr plochy (povrchu) k objemu, podíl čelních a bočních ploch, ostrost hran, drsnost povrchu, trhliny apod.
- **přítomnost pomocných látek**, tj. lepidel, nátěrových hmot, biocidů, retardérů hoření apod. a jejich požárně technické vlastnosti
- **parametry okolní atmosféry**, tj. teplota a relativní vlhkost vzduchu (a s nimi související vlhkost dřeva), rychlost proudění, skladba vzduchu (obsah kyslíku, oxidu uhličitého atd.)

Výhody dřevěných konstrukcí při požáru

- ✓ zachovává pevnost po dlouhou dobu
- ✓ významný vliv izolační schopnosti dřeva = při zuhelnatění povrchu se vytvoří izolační vrstva a další hoření je zpomaleno
- ✓ vlastnosti dřeva se při požáru, na rozdíl od ocelových profilů, výrazněji nemění
- ✓ hořící dřevěný trámový strop tak, možná paradoxně, přežije déle než keramický strop vložený do ocelových profilů, které se vlivem tepelných deformací a ztráty pevnosti zřítí mnohem dříve
- ✓ hořením nevznikají životu nebezpečné zplodiny v takovém rozsahu jako při požáru stavby z jiných materiálů



Výhřevnost

- ✓ dřevo jako významný zdroj energie
- ✓ = veličina vyjadřující množství tepla získané spálením 1 kg dřeva
- ✓ výhřevnost závisí velmi málo na druhu dřeva (s výjimkou dřevin s vysokým obsahem pryskyřic a zásobních látek)
- ✓ pro většinu druhů dřevin kolísá okolo hodnoty 18,15 MJ/kg
- ✓ kůra je z hlediska výhřevnosti také zajímavým materiálem

Výhřevnost klesá s vlhkostí dřeva !!!

Palivo	Vlastnosti					
	Obsah vody (%)		Výhřevnost (MJ/kg)		Obsah popele (%)	
	rozsah	průměr	rozsah	průměr	rozsah	průměr
Dřevní štěrka	20-55	40	5-13	9	0,5-2	0,8
Kůra čerstvá	40-65	55	4-10	7	0,5-5	1,5
Rašelina surová	45-55	50	8-11	10	0,5-4	1
Dřevo, polena	20-30	25	12-15	13	0,5-2	0,7
smrk (393 kg/m ³)		0		19,13		
jedle (367 kg/m ³)		0		18,91		
Dřevo, obaly, truhlářský odpad	10-15	13	15-17	16	0,5-2	0,7

- ✓ výhřevnost dřeva je dána stupněm jeho vysušení a platí přímá úměra (čím je dřevo sušší, tím má větší (výhřevnost)
- ✓ spalování mokrého dřeva vede navíc k produkci škodlivin ve spalinách, zejména oxidu uhelnatého, dehtových par a sazí
- ✓ spalování dřeva v kotlích (zplynovacích kotlích), důležitá je zejména vlhkost a regulace vzduchu (primární, sekundární vzduch)



Formy přenosu tepla

1. **vedení tepla** (kondukce) – forma přenosu energie hmotným prostředím, jehož objemové elementy zůstávají v klidu
2. **proudění tepla** (konvekce) – forma přenosu energie hmotným prostředím, jehož objemové elementy konají translační pohyb
3. **sálání tepla** (radiace) – schopnost tělesa vyzařovat a přijímat energii formou záření, přičemž na přenos energie mezi tělesy není potřebné hmotné prostředí

U dřeva (hlavně absolutně suchého) se v největší míře uplatňuje vedení tepla!

Vedení tepla

- ✓ obecné vyjádření **Fourierovým zákonem**:

$$\frac{Q}{S \cdot t} = \lambda \cdot \frac{dT}{dl}$$

kde λ je koeficient tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), Q – množství tepla (J), S – plocha vzorku (m^2), t – čas (s), dT – teplotní rozdíl na koncích vzorku (K), dl – měřená délka vzorku (m)

Vedení tepla

✓ rovnice vedení tepla:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \Delta T$$

kde T je teplota (K), t – čas (s), a – koeficient teplotní vodivosti ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

Měrné teplo

- ✓ dřevo má schopnost pohlcovat (akumulovat) teplo
- ✓ veličinou této vlastnosti je měrné teplo (c)
- ✓ udává množství tepla potřebná k ohřátí jednotky hmotnosti dřeva o jednotku teploty

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

kde c je měrné teplo dřeva ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), Q – množství tepla (J),
 m – hmotnost tělesa (kg), ΔT – rozdíl teplot tělesa (K)

- ✓ měrné teplo závisí zejména na teplotě a vlhkosti
- ✓ měrné teplo dřeva v absolutně suchém stavu nezávisí prakticky na hustotě a tedy ani na druhu dřeviny
- ✓ podílí se na něm především dřevní substance, vzduch tvoří nepatrnou část hmotnostního podílu $\Rightarrow$ měrné teplo absolutně suchého dřeva můžeme považovat za měrné teplo dřevní substance
- ✓ pro absolutně suché dřevo při 0 °C udává Ugolev (1975)
 $c = 1,55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- ✓ měrné teplo se se stoupající vlhkostí dřeva zvyšuje

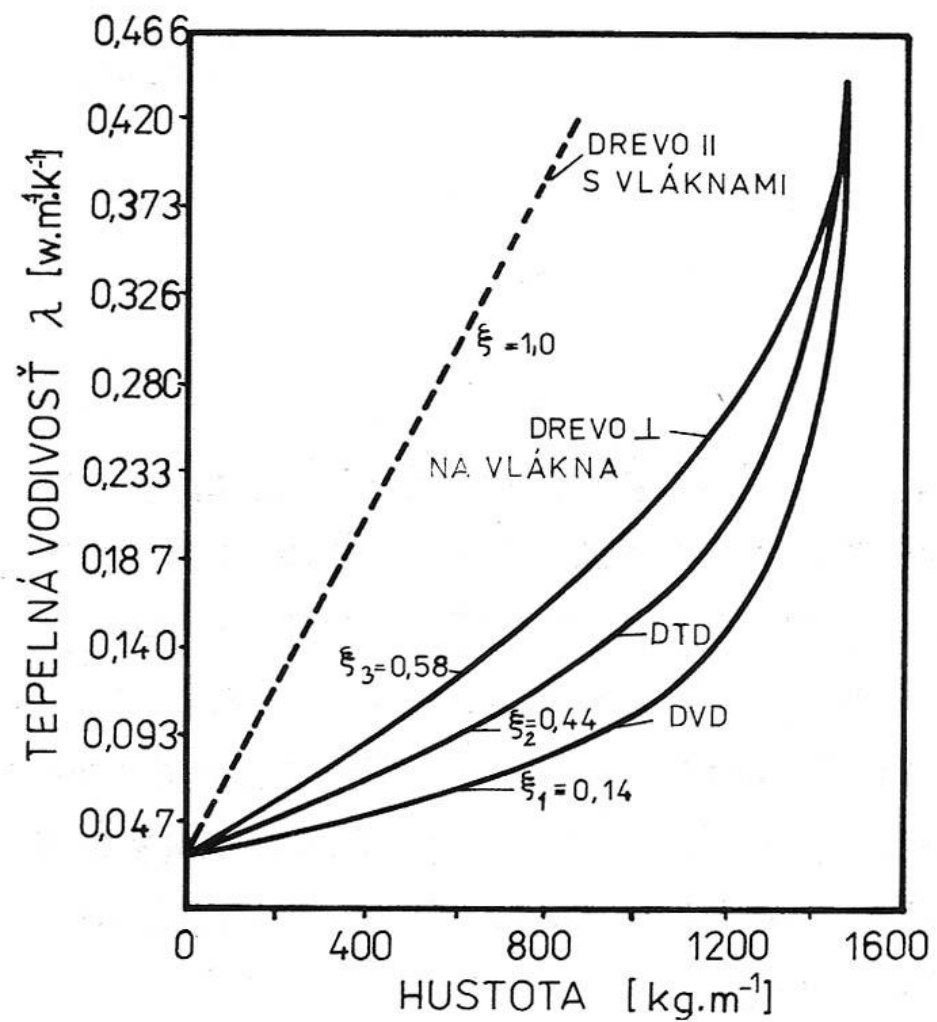
$$c_w = \frac{w \cdot c_v + c_0}{1 + w}$$

kde c_w je měrné teplo dřeva při vlhkosti w ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 c_v – měrné teplo vody ($4,182 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), c_0 – měrné
teplo absolutně suchého dřeva (měrné teplo dřevní
substance v $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), w – absolutní vlhkost dřeva
($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

- ✓ prakticky se jej využívá při ohřevu, paření, sušení, vaření, impregnaci dřeva
- ✓ množství tepla pohlceného dřevem je nutné znát k určení množství spotřeby tepelné energie a na výpočty při technologických procesech

Tepelná vodivost

- ✓ je charakterizována **součinitelem (koeficientem) tepelné vodivosti (λ)**
- ✓ udává množství tepla, které projde za 1 sekundu krychlí o hraně 1 m mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je rozdíl teplot 1 K
- ✓ jednotka = $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- ✓ faktory ovlivňující tepelnou vodivost: anatomická struktura, hustota, teplota, vlhkost dřeva, aj.



Teplotní vodivost

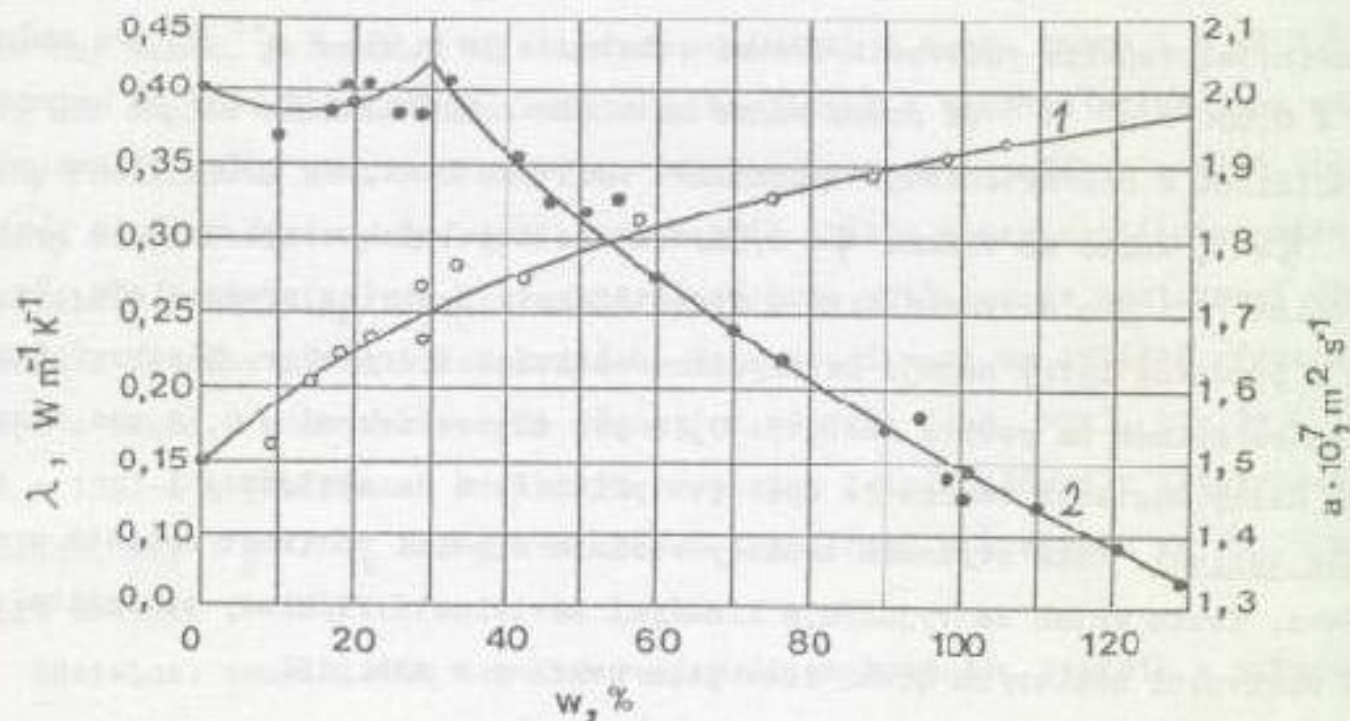
- ✓ schopnost materiálu vyrovnávat teplotní rozdíly
- ✓ je charakterizována **součinitelem (koeficientem) teplotní vodivosti (a)**

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_0}$$

kde a je součinitel teplotní vodivosti ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), λ – součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), c – měrné teplo ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ_0 – hustota dřeva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

- ✓ součinitel teplotní vodivosti absolutně suchého dřeva (stejně jako součinitel tepelné vodivosti) závisí na hustotě dřeva
- ✓ snížením hustoty se součinitel zvyšuje $\Rightarrow$ teplotní vodivost vzduchu je až 100x vyšší než dřevní substance
- ✓ důležitým činitelem je vlhkost $\Rightarrow$ zvýšením vlhkosti nad mez hygroskopie klesá teplotní vodivost (až 150x nižší vodivost vody než vzduchu)
- ✓ teplotní vodivost má význam při zjišťování doby nutné k prohřátí dřeva při sušení, páření, lisování, impregnaci apod.

23).



Obr. 23: Závislost tepelné (λ) a teplotní (a) vodivosti na vlhkosti dřeva
(podle Ugoleva 1975) 1 - tepelná vodivost, 2 - teplotní vodivost

Teplotní roztažnost

- ✓ zahřívání dřeva způsobuje zvětšení jeho rozměrů a tím i objemu
- ✓ vycházíme z lineární závislosti relativního prodloužení na teplotě:

$$l_i = l_0 \cdot (1 + \alpha_i \cdot \Delta T)$$

kde l_i je změna rozměrů v příslušném směru (r, t, l),
 l_0 – počáteční rozměry, α_i – součinitel lineární
teplotní roztažnosti v příslušném směru, ΔT – nárůst
teploty materiálu

THERMOWOOD®

Spočívá v tom, že se působením zvýšené teploty (220 až 260 °C) vytvoří chemické vazby mezi jednotlivými stavebními jednotkami dřeva.

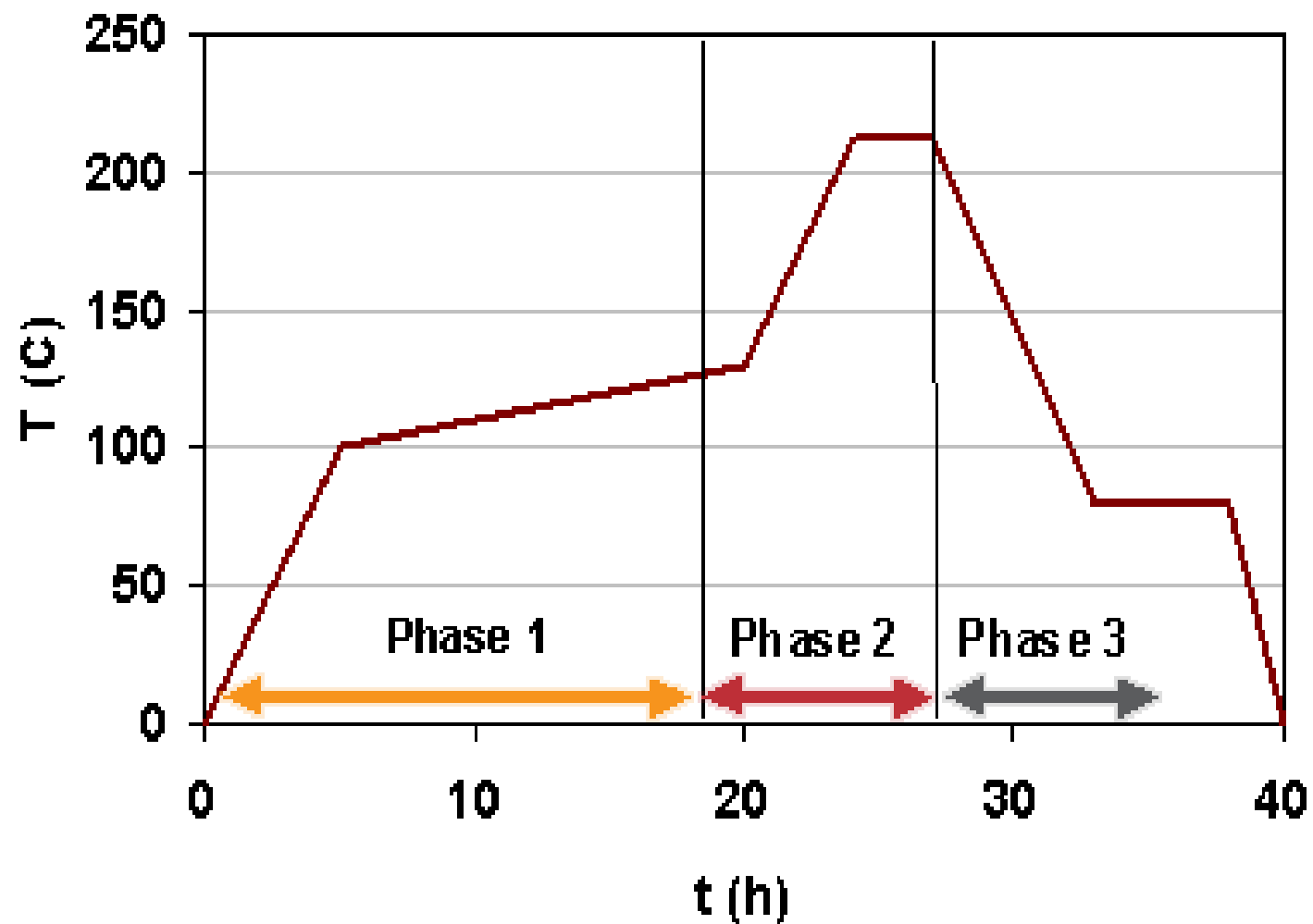
- ✓ Omezení sorpčních vlastností o téměř 50 % (z hodnoty neupraveného dřeva).
- ✓ Pokles pevnosti a tvrdosti přibližně o 25 až 30 %.
- ✓ Změna barvy a hmotnosti.
- ✓ Velký vliv teploty.



1. fáze: Při teplotě 130 °C je ze dřeva úplně odstraněna vlhkost, a aby se zabránilo vznícení, musí se dodávat vodní pára. Do chodu je uvedena chemická přeměna biologického materiálu.

2. fáze: Při teplotě mezi 185 až 215 °C se dřevo za přítomnosti vodní páry stává tvrdším a odolnějším.

3. fáze: Následně se pomocí stříkající vody sníží teplota a vlhkost dřeva se po kolísání ustálí na cca 4 %. Celý proces trvá přes 36 hodin.



Vysokoteplotní komory:

- ✓ velkokapacitní
- ✓ laboratorní



Lokakuu (2017)



foto: Tomáš Holeček – ČZU v Praze, 2018

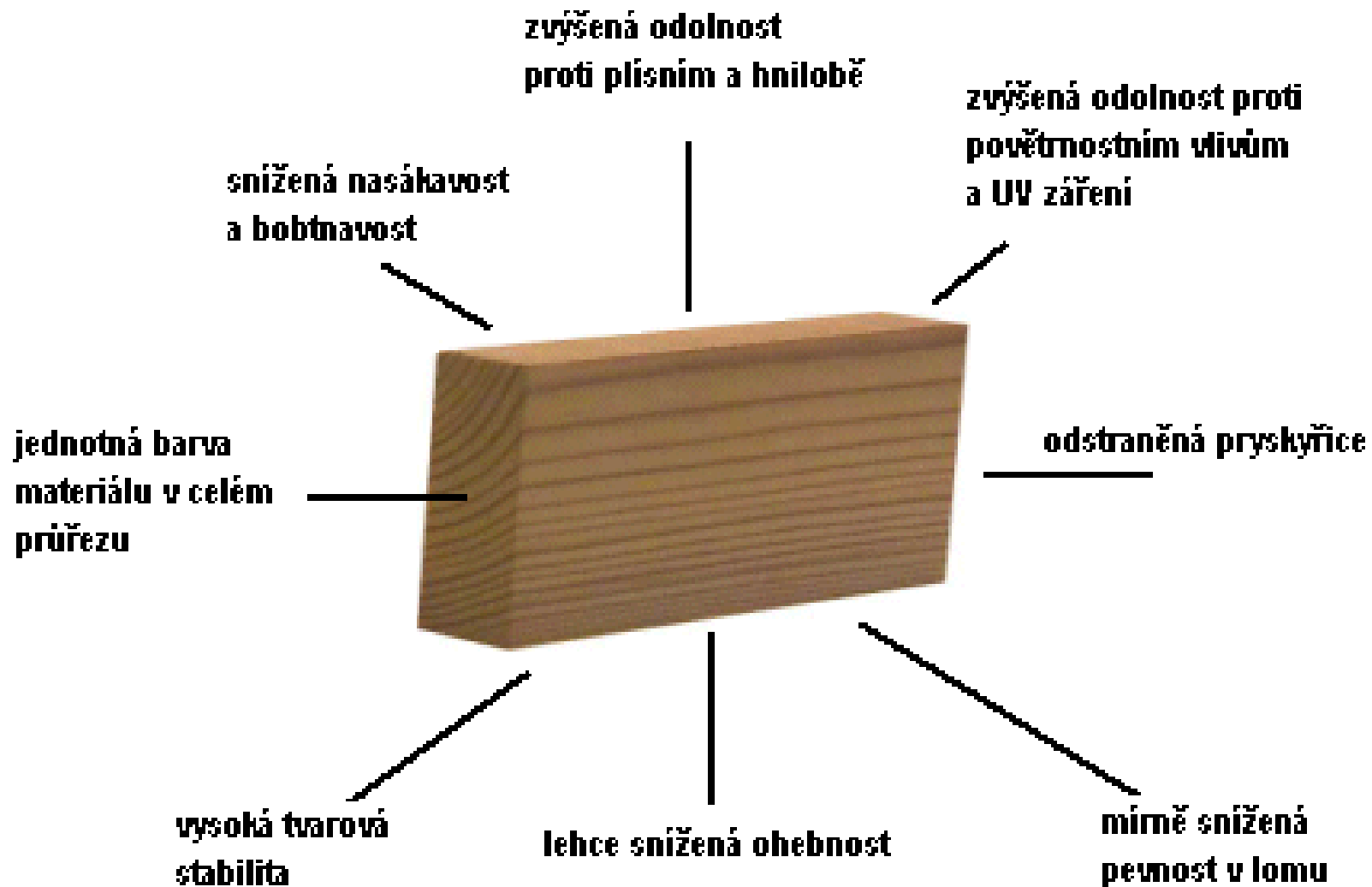


INTERNATIONAL
ThermoWood[®]
ASSOCIATION

ThermoWood[®] Handbook



International ThermoWood Association
Unioninkatu 14, FIN-00130 Helsinki, FINLAND
www.thermowood.fi



Využití

- ✓ fasádní a obkladové palubky
- ✓ podlahové palubky a dílce
- ✓ prkna, latě, řezivo
- ✓ hranoly a hranolky
- ✓ obklady a vybavení saun (nižší povrchová teplota, vyloučení pryskyřice)
- ✓ výplně stavebních otvorů (okna, dveře, vrata)
- ✓ vybavení zahrad, dětských hřišť, ploty a prvky balkonů
- ✓ prvky dřevostaveb
- ✓ protihlukové bariéry





Obr. 1: Závislost odstínu na teplotě



Přechází se k složitějšímu ...

Čisté druhy přenosu vody a tepla ve dřevě (integrální forma, stacionární děj – gradienty nejsou funkcí času)

zákon	vzorec (integrální forma)	hybná síla (gradient) – pohyb	koeficient
Fickův	$\frac{m}{S \cdot t} = D \cdot \frac{dc}{dl}$	koncentrace – vázaná voda	difúze [$m^2 \cdot s^{-1}$]
Darcyho	$\frac{V}{S \cdot t} = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{dp}{dl}$	tlak – volná voda	propustnosti [m^2]
Fourierův	$\frac{Q}{S \cdot t} = \lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dl}$	teplota – teplo	tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Současný přenos tepla a hmoty (diferenciální forma, nestacionární děj)

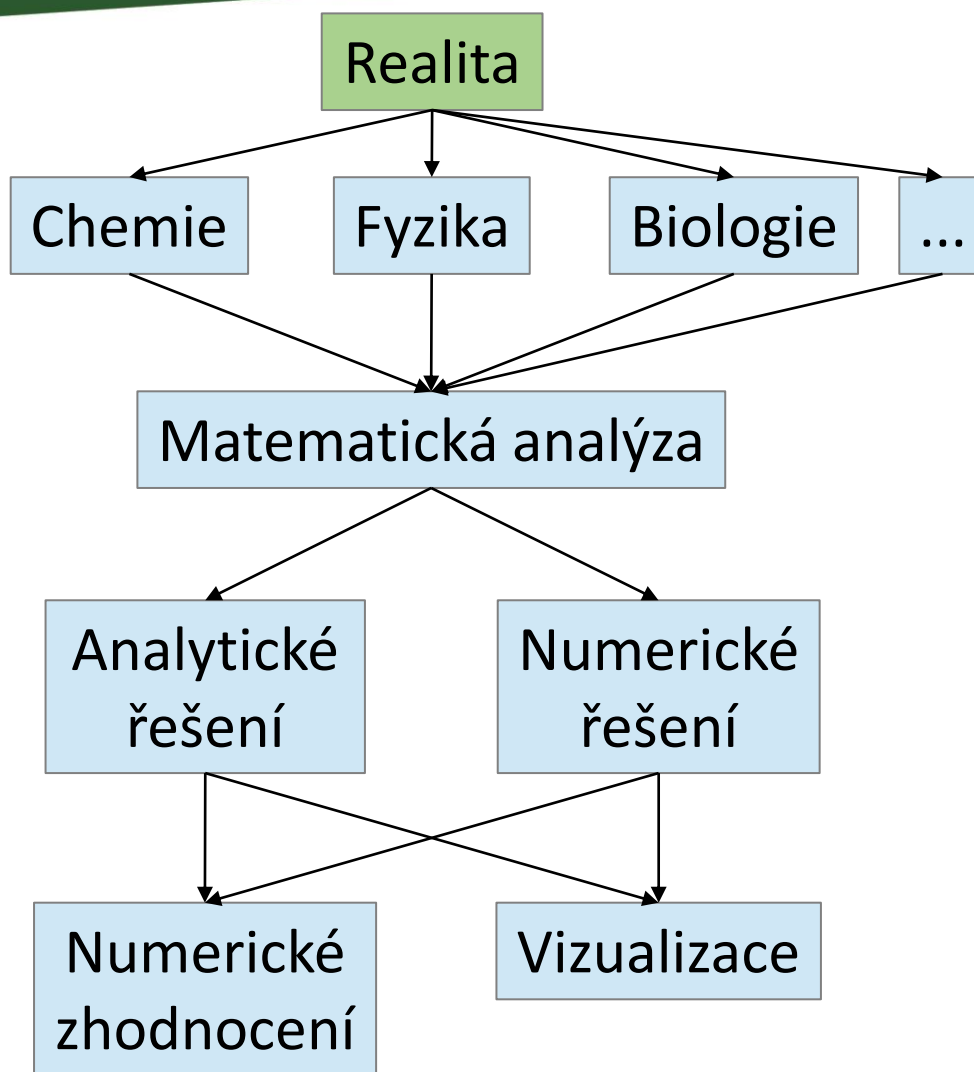
$$\frac{\partial c}{\partial t} = k_{11} \nabla^2 c + k_{12} \nabla^2 \vartheta + k_{13} \nabla^2 p$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = k_{12} \nabla^2 c + k_{22} \nabla^2 \vartheta + k_{23} \nabla^2 p$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = k_{13} \nabla^2 c + k_{23} \nabla^2 \vartheta + k_{33} \nabla^2 p$$

*$i = j$, potom k_{ij} jsou koeficienty „čistých“ druhů přenosu
 $i \neq j$, potom k_{ij} jsou koeficienty, které souvisí s tak
zvanými křížovými jevy, jako je například termodifúze,
barodifúze, atd. (spolehlivé hodnoty smíšených
koeficientů přenosu pro dřevo chybějí...)*

Kroky modelování



Koncepce modelu

Diferenciální rovnice

Řešení

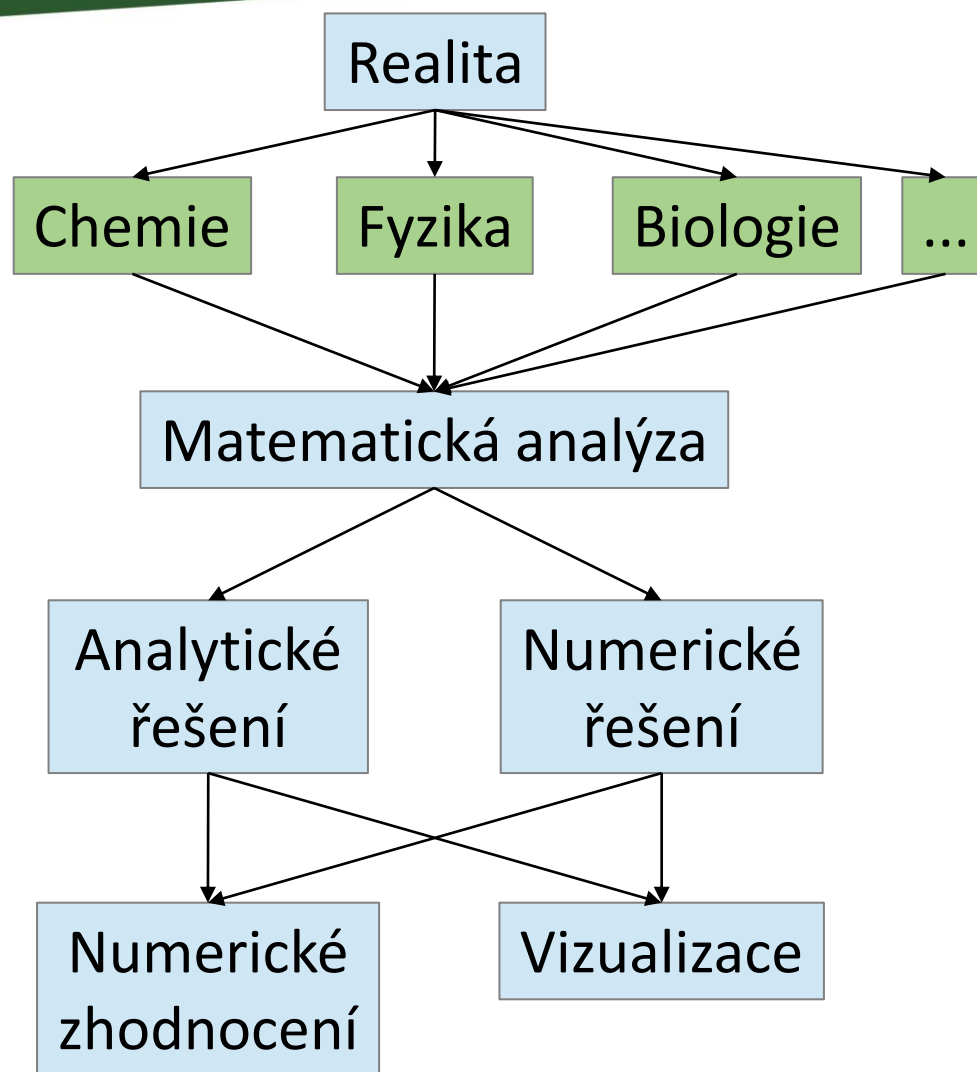
Zpracování
výsledků

Realita

➤ formulování problému

- nemrznoucí hloubka (rozložení teploty v půdě)
- ztráty tepla ve stěně (rozložení teploty ve stěně reaktoru, v izolačních stěnách)
- regulování teploty v kompostu (rozložení teploty v kompostovací jámě)
- bioreakce v buňkách (regulace teploty v organelách buněk)
- sterilizace bioproduktů (rozložení teploty v bioproduktech)
- ... (rozložení teploty v ...)

Kroky modelování



Koncepce modelu

Diferenciální rovnice

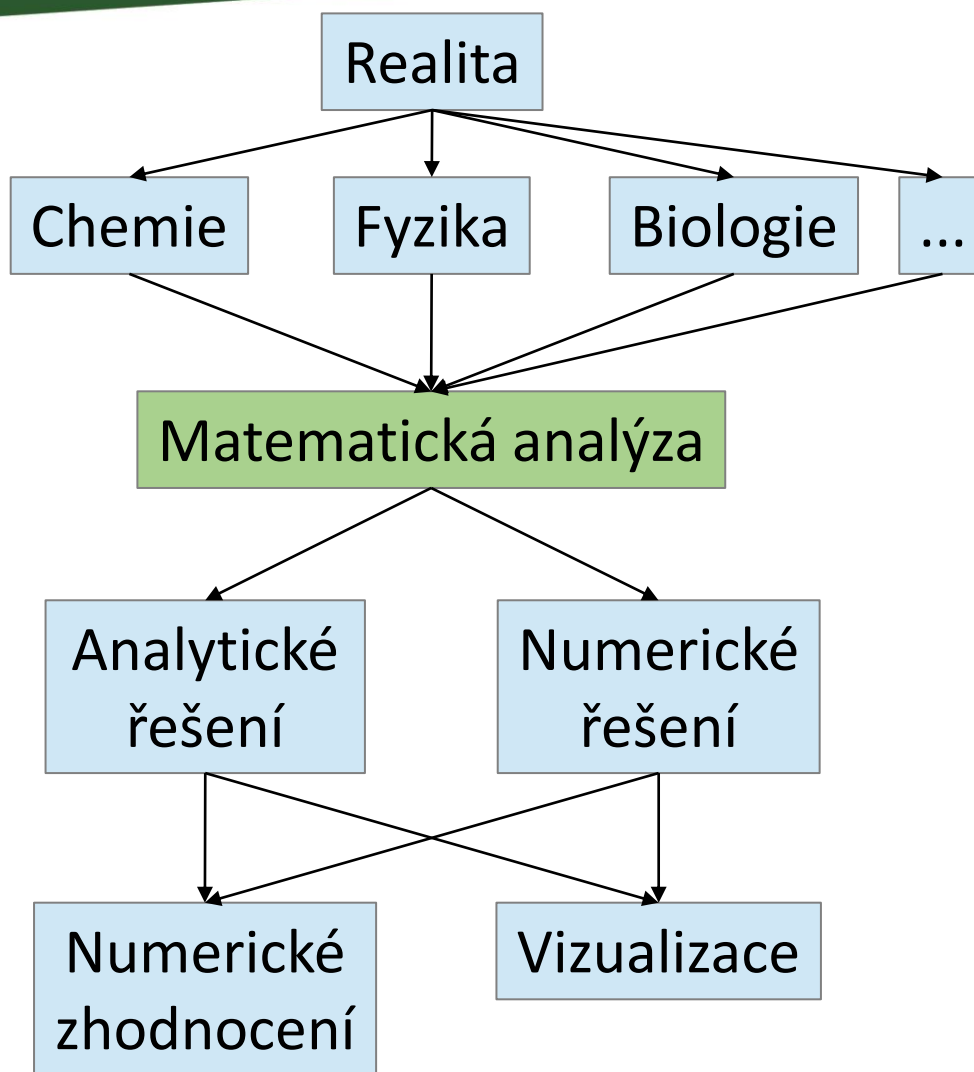
Řešení

Zpracování
výsledků

Koncepce modelu

- Co způsobuje, že se teplota v materiálech mění?
- fyzika, termodynamika
 - přenos energie (ve formě tepla – nastává tok tepla, ohřev materiálu)
 - platí zákon zachování energie (energie nemůže samovolně vzniknout ani zaniknout a ani „teleportovat“)
 - formy přenosu tepla
 - vedení (Fourierův zákon), proudění, radiace

Kroky modelování



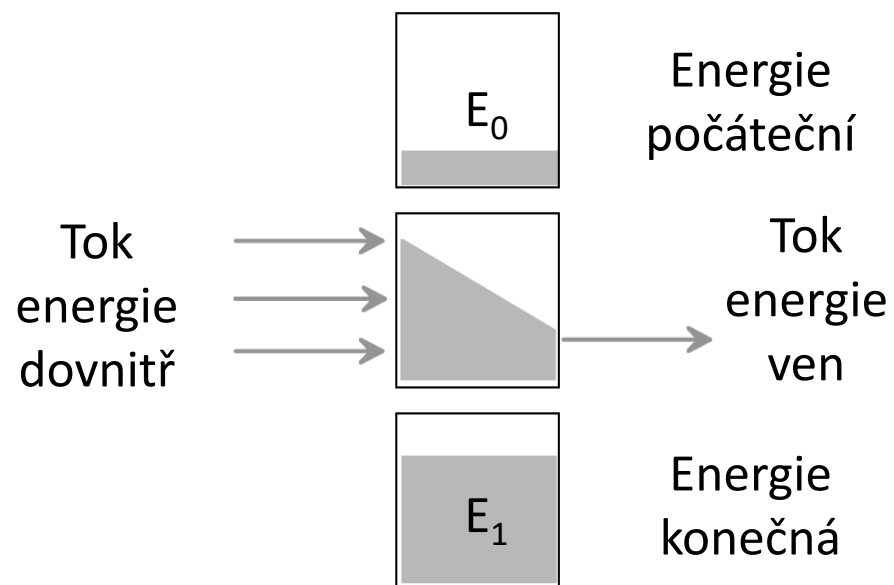
Koncepce modelu

Diferenciální rovnice

Řešení

Zpracování
výsledků

Matematická analýza – rovnice kontinuity



Princip zachování energie

$$E_1 - E_0 = \text{Tok dovnitř} - \text{Tok ven}$$

Matematická analýza – rovnice kontinuity

➤ Hustota energie $[\rho_E]=J/m^3$ ($E = \rho_E \cdot \Delta x \Delta y \Delta z$)

➤ Tok energie (směr x) $[q]=J/(m^2.s)$ ($E = q \cdot \Delta y \Delta z \cdot \Delta t$)

➤ Změna energie za čas pomocí ρ_E

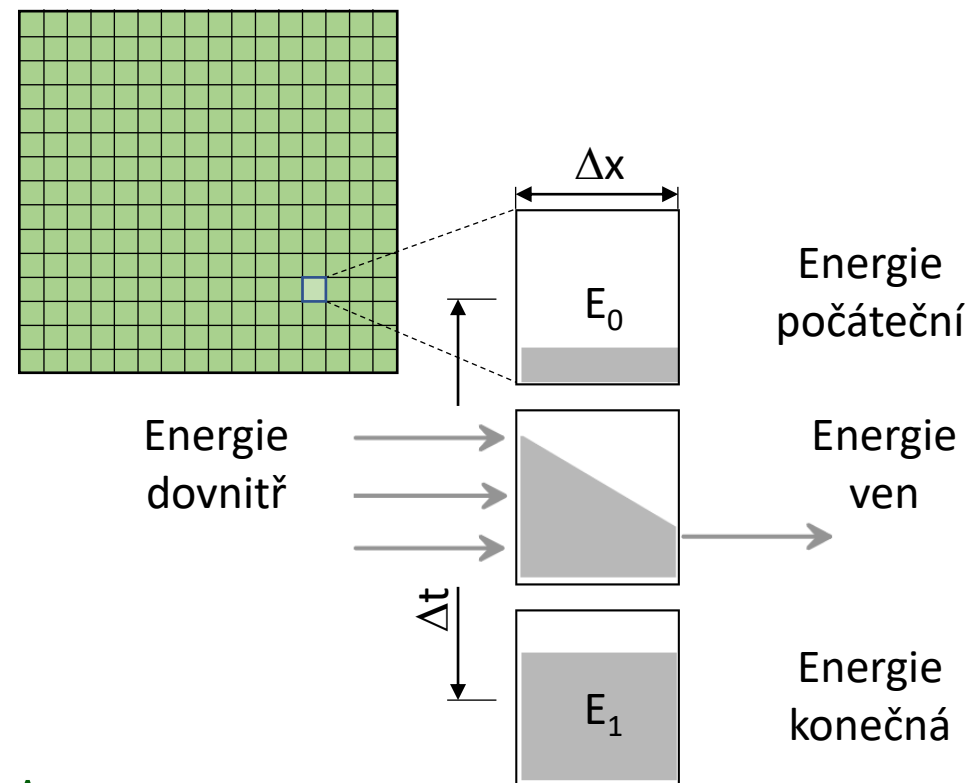
$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E_1 - E_0}{\Delta t} = \frac{\rho_{E1} \Delta x \Delta y \Delta z - \rho_{E0} \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} = \frac{\Delta \rho_E \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t}$$

➤ Změna energie ve směru toku za čas pomocí q

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E_{dovnitř} - E_{ven}}{\Delta t} = \frac{q_{dovnitř} \cdot \Delta y \Delta z \cdot \Delta t - q_{ven} \cdot \Delta y \Delta z \cdot \Delta t}{\Delta t} = -\Delta q \Delta y \Delta z$$

➤ Platí, že změna v čase = změna ve směru toku

$$\frac{\Delta \rho_E \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} = -\Delta q \Delta y \Delta z \quad \text{nebo} \quad \frac{\Delta \rho_E}{\Delta t} = -\frac{\Delta q}{\Delta x}$$



Princip zachování energie

$$E_1 - E_0 = E_{dovnitř} - E_{ven}$$

Matematická analýza – rovnice kontinuity

➤ Rovnice kontinuity

$$\frac{\Delta \rho_E}{\Delta t} = - \frac{\Delta q}{\Delta x}$$

➤ V diferenciálním tvaru

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial x}$$

➤ Trojrozměrný případ

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \text{ nebo zjednodušeně}$$

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} = - \nabla \mathbf{q} \quad (\nabla - \text{Nabla operátor } \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)^T)$$

Matematická analýza – ohřev + vedení tepla

➤ Ohřev

$$\Delta E = c\Delta T [J] \text{ anebo } \Delta\rho_E = \rho c\Delta T$$

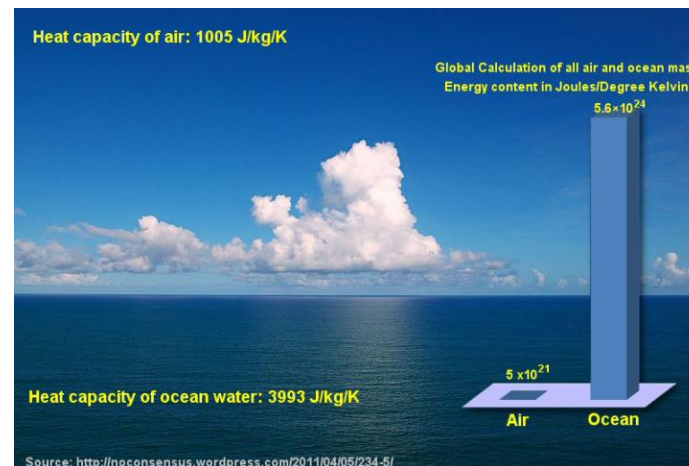
➤ Vedení tepla – Fourierův zákon ve směru x

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

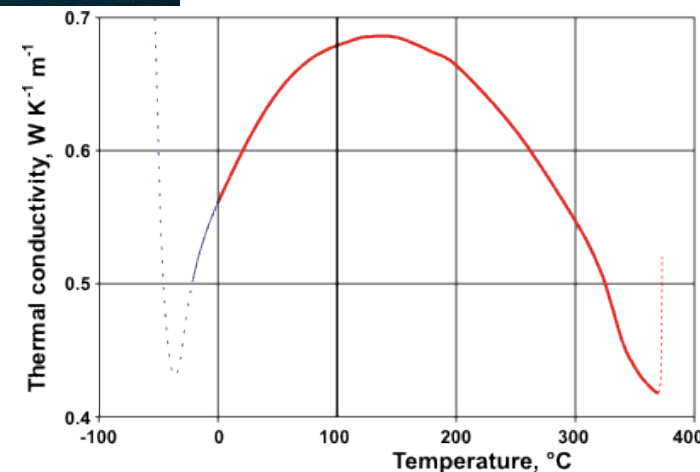
➤ Kontinuita + ohřev + vedení

$$\frac{\rho c \Delta T}{\Delta t} = -\frac{\Delta\left(-\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}\right)}{\Delta x} \text{ nebo po odvození}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = a \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta x^2} \quad \text{kde } a = \frac{\lambda}{\rho c}$$



$$C_{\text{vody}} = 4180 \text{ J/kg/K}$$



Matematická analýza – ohřev + vedení tepla

- V diferenciálním tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{2. Fourierův zákon}$$

- V 3D prostoru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \text{ anebo}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T$$

$$\text{kde } a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$$

$$a_x = \frac{\lambda_x}{\rho c}$$

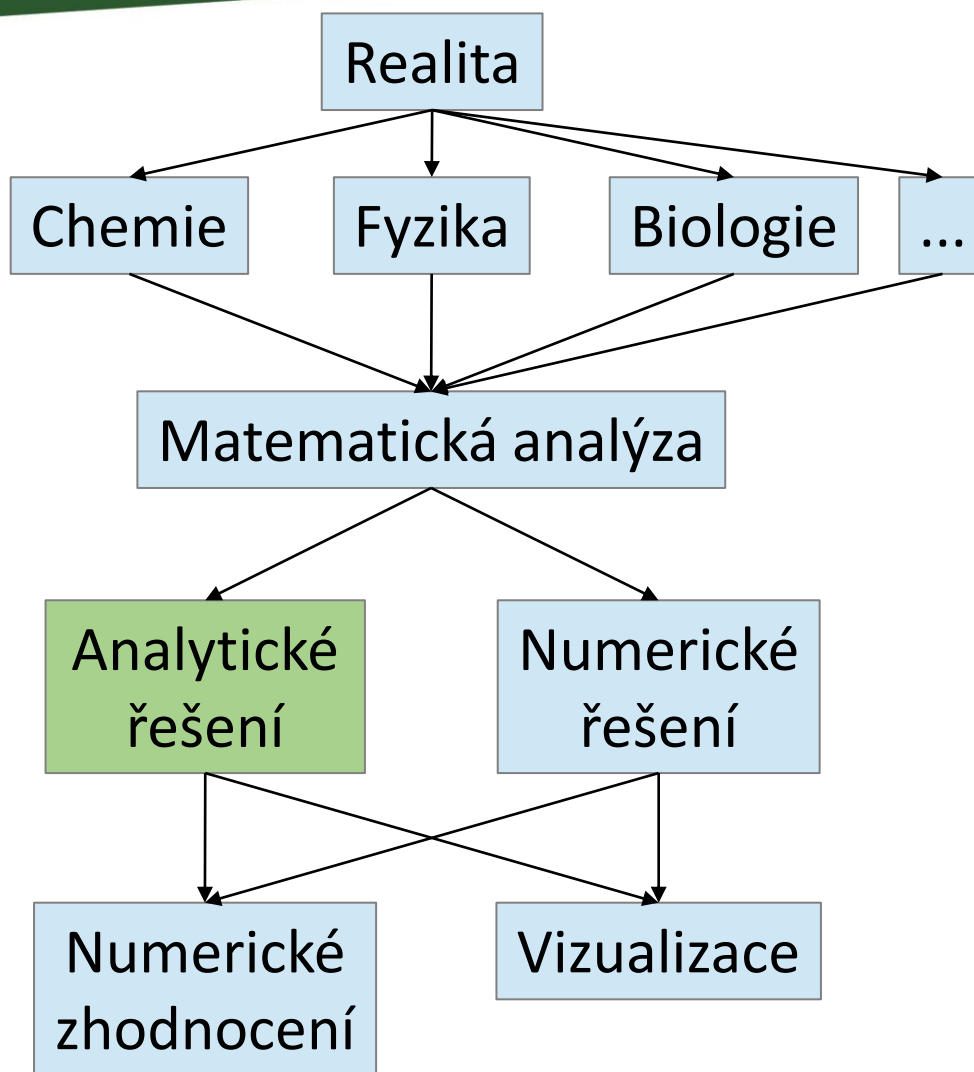
- Dosavadní matematická analýza platí pro libovolnou geometrii nebo podmínky reality !!!

- (jestliže jsou parametry konstantní v čase a prostoru)

- Jestliže $a = f(x, y, z)$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(a_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z}$$

Kroky modelování



Koncepce modelu

Diferenciální rovnice

Řešení

Zpracování
výsledků

Analytické řešení

➤ 2. Fourierův zákon

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

➤ Výsledkem řešení bude funkce $T(x,t) = \dots$

➤ $\Rightarrow$ 1-krát integrace podle času t , 2-krát integrace podle x (ve směru osy x)

➤ výsledkem budou 3 konstanty

➤ určí se z geometrie a reality (počáteční a hraniční podmínky)

➤ Řešení diferenciální rovnice se mění, jestliže se mění geometrie nebo hraniční podmínky

➤ vedení tepla ve stěně $\neq$ vedení tepla ve stěně potrubí (jestliže má tlustou stěnu) $\neq$ vedení tepla v půdě

Analytické řešení

- Počáteční podmínky (1 ks)

$$T(x, t = 0) = f(x)$$

- Hraniční podmínky (stačí 2 ks)

1. druhu

$$\frac{\partial T}{\partial x_{(x=0)}} = 0$$

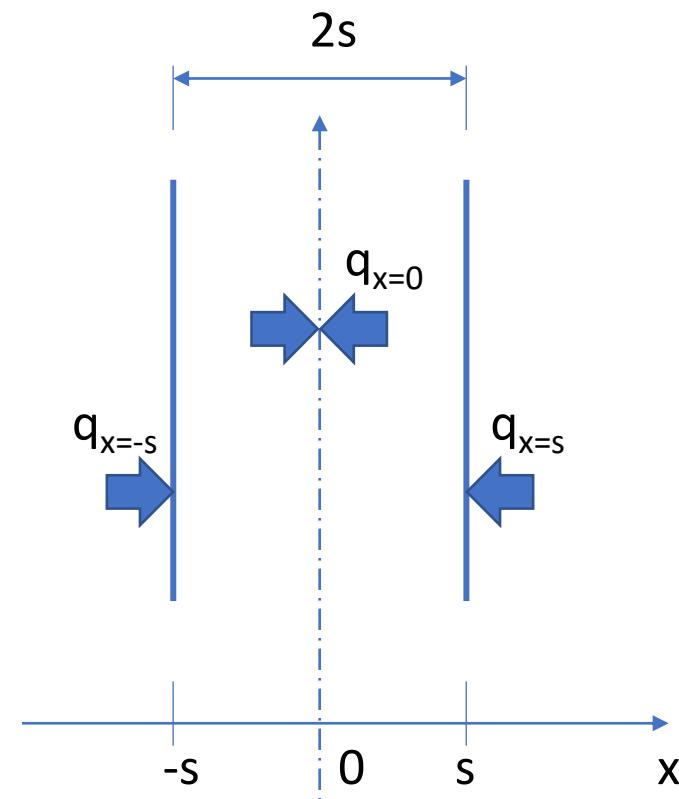
$$T(\pm s, t) = f(t)$$

2. druhu

$$\frac{\partial T}{\partial x_{(x=\pm s)}} = f(t)$$

3. druhu

$$\frac{\partial T}{\partial x_{(x=\pm s)}} = \alpha [T(\pm s, t) - T_{\infty}]$$



Analytické řešení

- Pro hraniční podmínku I. druhu (dvě řešení)

$$\frac{T(x,t)-T_0}{T_s-T_0} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)s-x}{2\sqrt{at}} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)s+x}{2\sqrt{at}} \right]$$

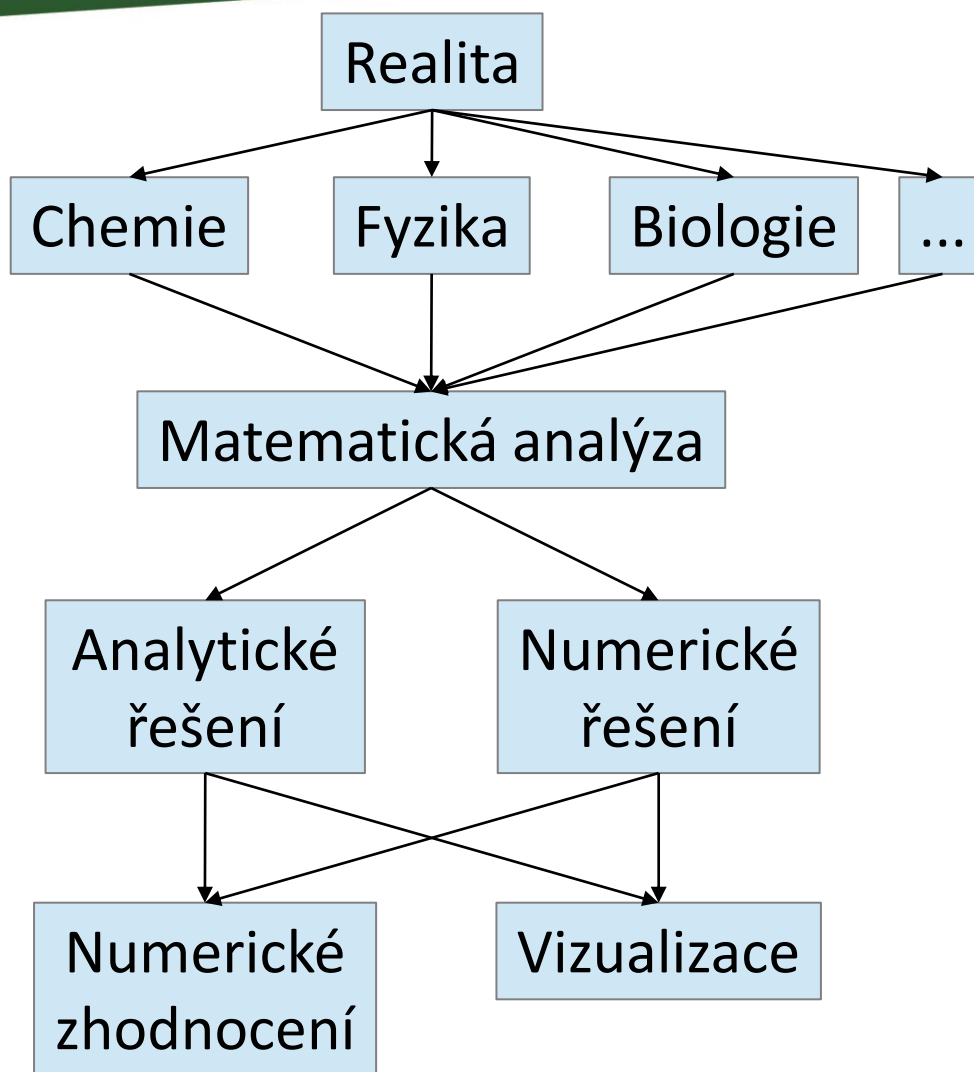
$$\frac{T(x,t)-T_0}{T_s-T_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2 t}{4s^2}} \cos \left(\frac{(2n+1)\pi x}{2s} \right)$$

- Pro hraniční podmínku III. druhu

$$\frac{T(x,t)-T_0}{T_s-T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot Bi \cdot \cos\left(\frac{\beta_n x}{s}\right)}{(\beta_n^2 + Bi^2 + Bi) \cdot \cos(\beta_n)} \cdot e^{-\frac{\beta_n^2 at}{s^2}}$$

kde $\beta \cdot \operatorname{tg} \beta = Bi = s \cdot \alpha / a$

Kroky modelování



Koncepce modelu

Diferenciální rovnice

Řešení

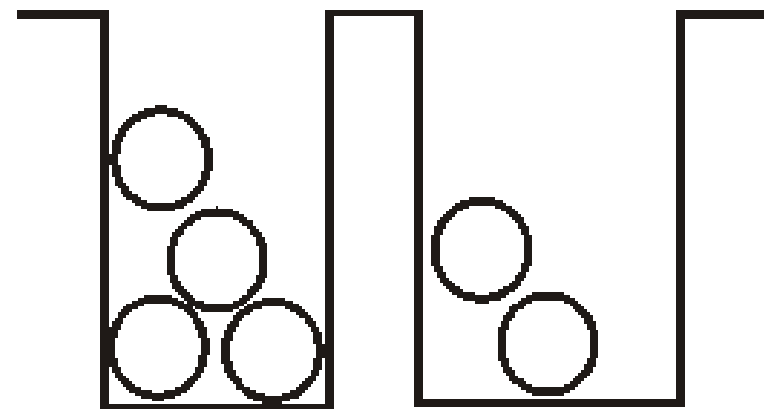
Zpracování
výsledků

Cvičení ???

Mechanismus difúze

Sorpční místo – volná OH skupina v amorfní oblasti celulózy.

Difúze – přeskok molekul vody z jednoho místa na druhé přes potenciálovou bariéru.



Koncentrace vody ve dřevě

$$c = \frac{m_{\text{vody}}}{V_w} = \frac{m_{\text{vody}}}{m_0} \cdot \frac{m_0}{V_w} = w \cdot \rho_{rw} = w \cdot \frac{\rho_0}{1 + \alpha_V \cdot w} \approx w \cdot \rho_0$$

Difúze

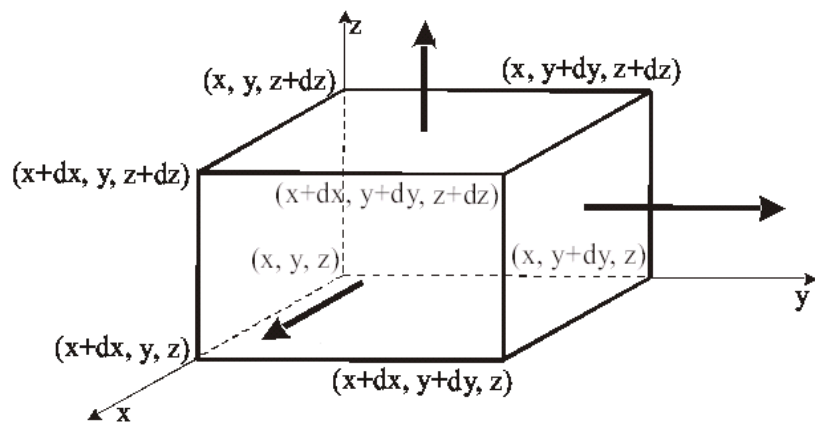
Fickův zákon difúze

$$\frac{m}{S \cdot t} = D \cdot \frac{c_2 - c_1}{x_2 - x_1}$$

nebo $\vec{j} = -D \cdot \text{grad } c$

Smysl koeficientu difúze, který vyplývá z modelu o vícerých vrstvách, spočívá v tom, že je mírou možnosti přeskoků molekul vody mezi jejich jednotlivými vrstvami, sorbovanými na vnitřním povrchu dřeva. Zobrazuje vlastně gradient koncentrace vody ve dřevě do vektoru hustoty toku vody.

Zákon zachování hmoty



$$i_{x+dx} - i_x = i_x + \frac{\partial i_x}{\partial x} \cdot dx = \frac{\partial i_x}{\partial x} \cdot dx$$

$$i_{y+dy} - i_y = i_y + \frac{\partial i_y}{\partial y} \cdot dy = \frac{\partial i_y}{\partial y} \cdot dy$$

$$i_{z+dz} - i_z = i_z + \frac{\partial i_z}{\partial z} \cdot dz = \frac{\partial i_z}{\partial z} \cdot dz$$

$$i_{x+dx} - i_x = \frac{\partial i_x}{\partial x} \cdot dx \quad i_{y+dy} - i_y = \frac{\partial i_y}{\partial y} \cdot dy \quad i_{z+dz} - i_z = \frac{\partial i_z}{\partial z} \cdot dz$$

Součet všech tří dává množství, tj. hmotnost vody, která za jednotku času ujde z objemu $dV = dx \cdot dy \cdot dz$.

Toto vyvolá rychlost poklesu koncentrace $-\frac{\partial c}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$.

Jestliže v prostředí nejsou vnitřní zdroje hmoty a platí zákon zachování hmoty, tak potom:

$$\frac{\partial c}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz + \left(\frac{\partial i_x}{\partial x} + \frac{\partial i_y}{\partial y} + \frac{\partial i_z}{\partial z} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0.$$

To značí: $\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \Delta c.$

Tedy: $\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}.$

Přímá úloha

- Hledání rozložení koncentrace (anebo vlhkosti dřeva) jestliže poznáme přenosové charakteristiky (tedy koeficient difúze D), případně koeficient přestupu, či další charakteristiku (např. relaxační čas).
- Takovouto úlohu řešíme například při modelování procesu sušení dřeva, kdy z rozložení vlhkosti můžeme počítat rozložení napětí ve dřevě.

Nepřímá úloha

- Hledání přenosových charakteristik ze známého průběhu koncentrace anebo jiných měřitelných veličin z průběhu hmotnosti tělesa.
- Jestliže označíme M_t hmotnost vody, kterou deska přijala v čase t , a M_∞ hmotnost vody, kterou přijme po dosáhnutí rovnováhy, tak dostaneme...

Řešit tuto rovnici znamená jednou integrovat podle času a dvakrát podle prostorové souřadnice. Na určení integračních konstant tedy potřebujeme hraniční podmínky.

Definuje koncentraci na povrchu (kontrolního objemu) jako funkci času.

I. druh:

$$c(x, 0) = f(x)$$

$$c(L, t) = f(t)$$

Definuje tok na povrchu (kontrolního objemu) jako funkci času.

II. druh:

$$\frac{\partial c}{\partial x_{x=L}} = f(t)$$

III. druh:

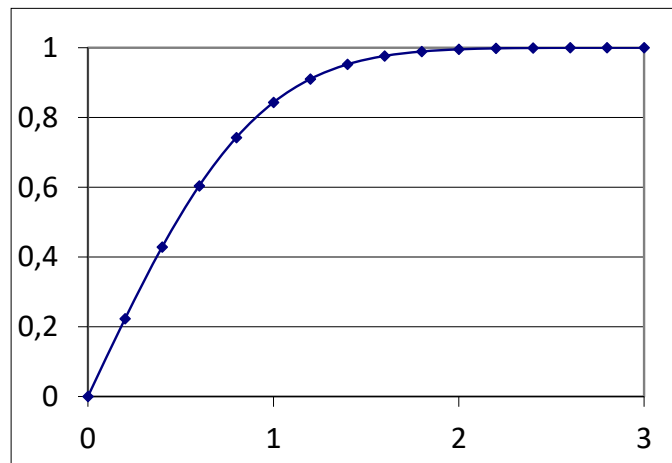
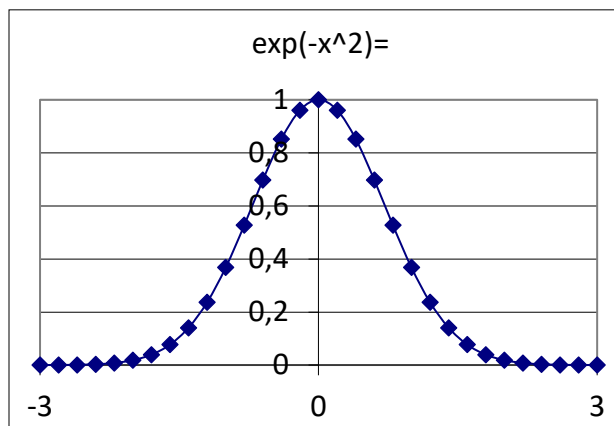
$$\frac{\partial c}{\partial x_{x=L}} = \alpha(c(L, t) - c_{\infty})$$

Definuje koncentraci na povrchu (kontrolního objemu) jako funkci toku na povrchu .

$$\frac{c - c_0}{c_L - c_0} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1) - \xi}{2\sqrt{Fo}} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1) + \xi}{2\sqrt{Fo}} \right]$$

$$\frac{c - c_0}{c_L - c_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cdot \exp \left[\frac{(2n+1)^2 \pi^2 Fo}{4} \right] \cdot \cos \frac{(2n+1)\xi}{2s}$$

bezrozměrný čas



$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2) dx = \sqrt{\pi}$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \int_x^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi$$

Nepřímá úloha - podmínka 1.druhu

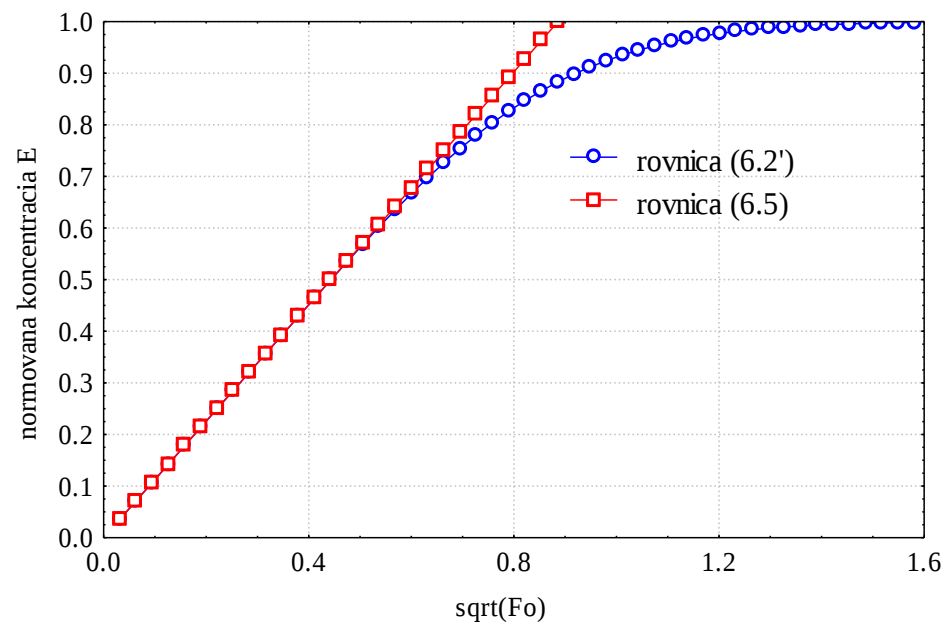
$$\frac{M_t}{M_\infty} = 2 \sqrt{\frac{Dt}{s^2}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \operatorname{ierfc} \frac{ns}{\sqrt{Dt}} \right]$$

$$\operatorname{ierfc}(x) \int \operatorname{erfc}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp(-x^2) - x \cdot \operatorname{erfc}(x)$$

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 2 \sqrt{\frac{Dt}{s^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad D = 0,1964k^2 \cdot s^2$$

Kde k je směrnice lineární závislosti: $\frac{M_t}{M_\infty} = k \cdot \sqrt{t}$.

Průběh normalizované střední koncentrace



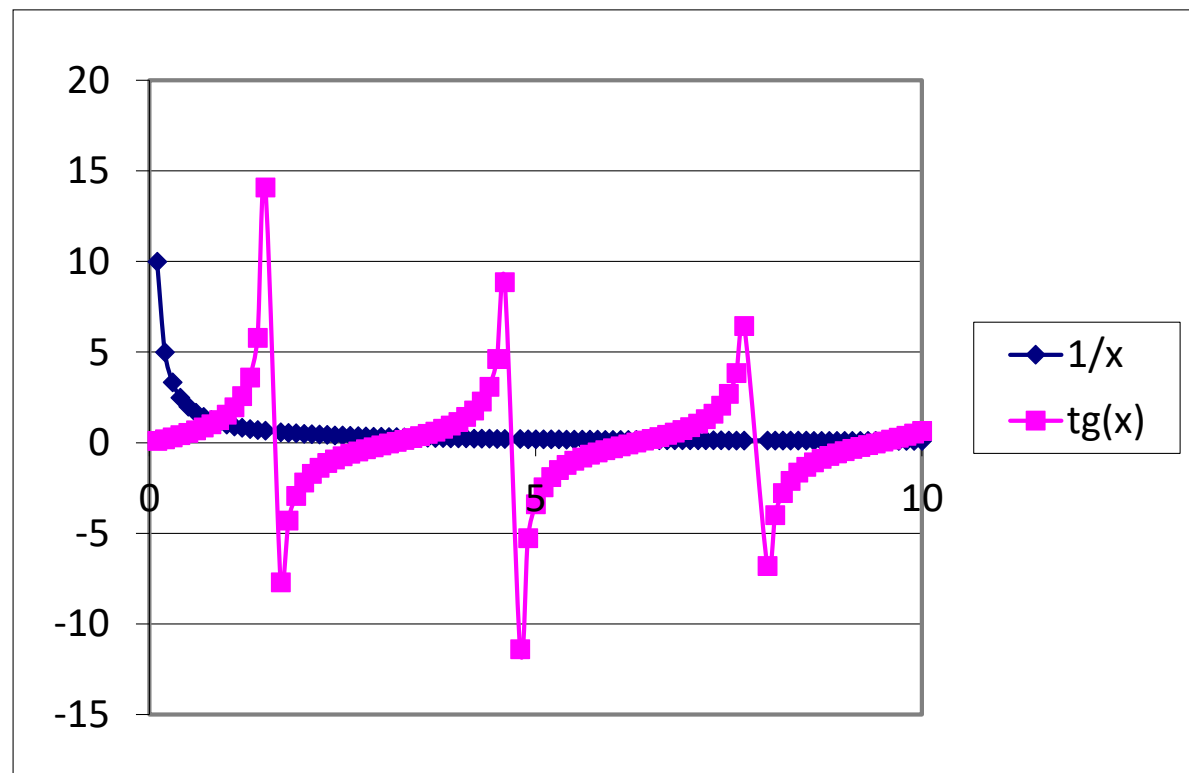
$$\frac{M_t}{M_\infty} = 2\sqrt{Fo} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \text{ierfc} \frac{n}{\sqrt{Fo}} \right]$$

$$\frac{c - c_0}{c_L - c_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi \cdot \cos\left(\frac{\beta_n x}{s}\right)}{(\beta_n^2 + Bi^2 + Bi) \cdot \cos\beta_n} \cdot \exp\left(-\frac{\beta_n^2 \cdot Dt}{s^2}\right)$$

$$\beta \cdot \operatorname{tg}\beta = \frac{L \cdot \alpha}{D}$$

bezrozměrná souřadnice
(udává poměr vnějšího a
vnitřního odporu vůči
tomuto procesu)

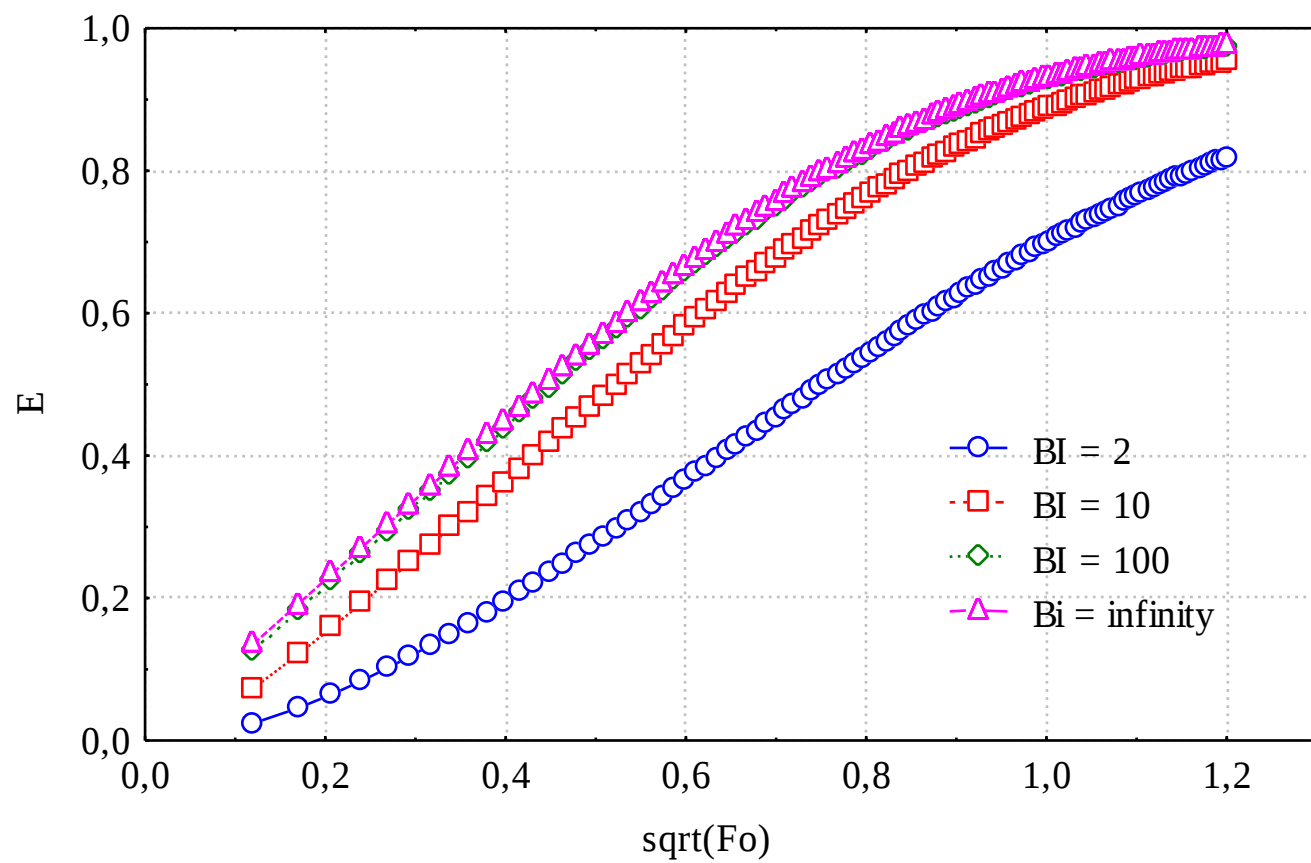
$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad x_{0n} = \sqrt{\frac{Bi}{1 + \frac{4}{\pi^2} \cdot Bi}} + n\pi$$



$$\frac{c - c_0}{c_L - c_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(Bi)^2}{(\beta_n^2 + Bi^2 + Bi) \cdot \beta_n^2} \cdot \exp\left(-\frac{\beta_n^2 \cdot Dt}{s^2}\right)$$

$$\beta \cdot \operatorname{tg} \beta = Bi = \frac{L \cdot \alpha}{D}$$

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad x_{0n} = \sqrt{\frac{Bi}{1 + \frac{4}{\pi^2} \cdot Bi}} + n\pi$$



Přímá úloha – výpočet koncentrace jestliže poznáme D.

Nepřímá úloha – výpočet D jestliže poznáme rozložení koncentrace:

$$F(D) = \sum_{i=1}^N (c_{iexp} - c_{iteor})^2$$

Numerické řešení

Parciální derivace nahradíme diferencemi:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t},$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{c_{i+1}^n - 2c_i^n + c_{i-1}^n}{\Delta x^2}.$$

$$\frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t} = D \frac{c_{i+1}^n - 2c_i^n + c_{i-1}^n}{\Delta x^2}$$

$$r = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$$

$$c_i^{n+1} = r \cdot (c_{i+1}^n + c_{i-1}^n) + c_i^n \cdot (1 - 2 \cdot r)$$

Propustnost dřeva

- Schopnost dřeva umožňovat přenos hybnosti přenosem kapaliny způsobeným gradientem vnějšího tlaku

- **Darcyho zákon**

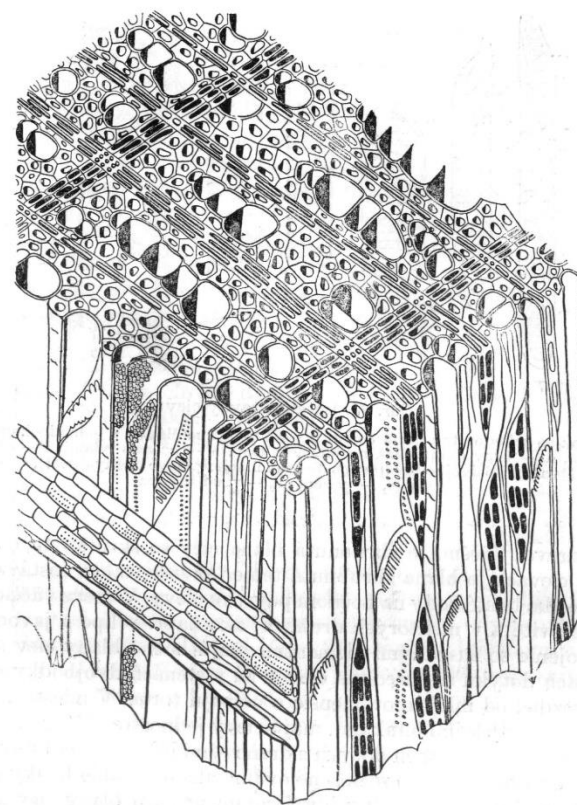
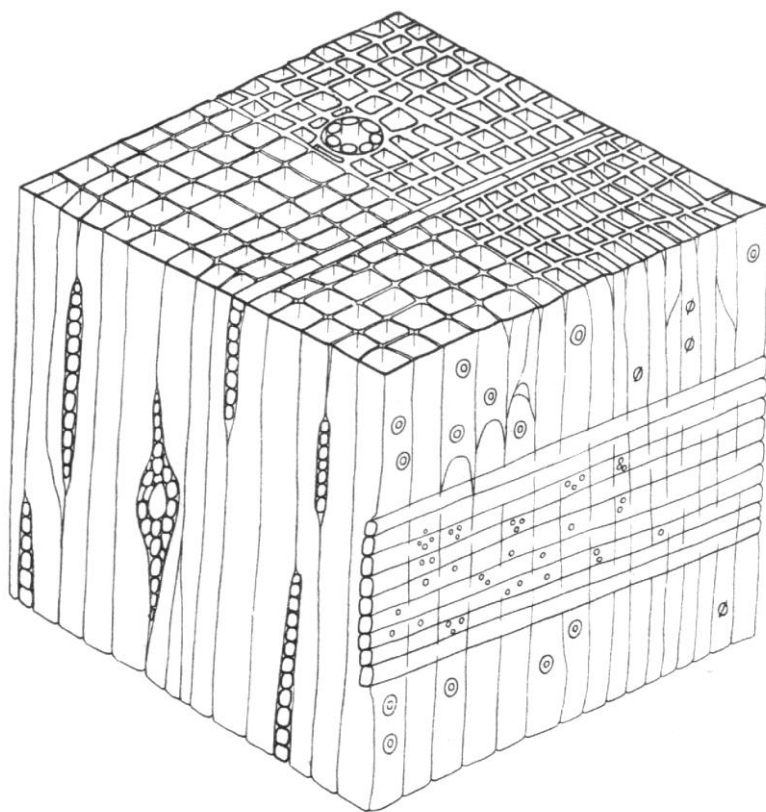
$$\frac{V}{S \cdot t} = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{L}$$

V - objem, S - plocha, t - čas, k - koeficient propustnosti,
η - dynamická viskozita, Δp - rozdíl vnějšího tlaku, L - délka tělesa

Měření propustnosti - kapaliny



Co je propustnější?



Propustnost pro plyny

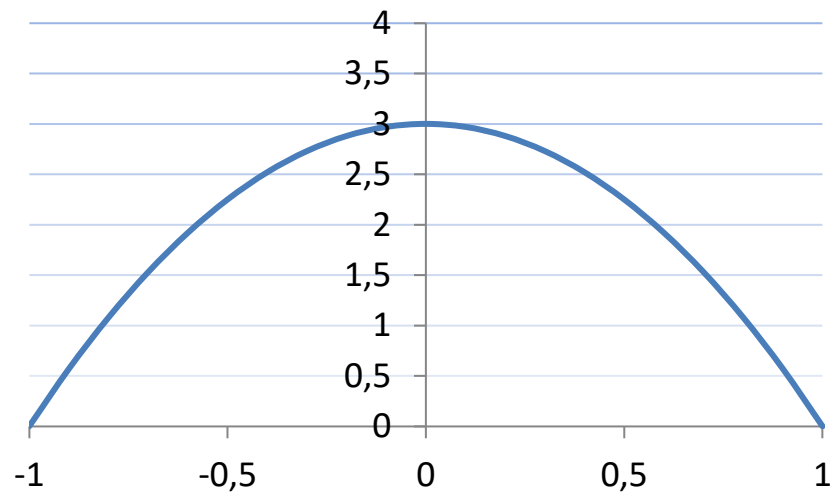
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = D'_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \qquad \frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

$$\frac{S.k}{\mu} = \left[\frac{\partial p}{\partial x} \right]_{x=L} + \frac{M_m \cdot V_0 \cdot \partial p}{R_m \cdot T \cdot \partial t} = 0$$

Měření propustnosti - plyny



Profil rychlostí



$$v_x = \frac{(p - p_0) \cdot R^2}{4\eta L} \left[1 - \frac{r^2}{R^2} \right]$$

$$v_{x \max} = \frac{p - p_0}{4\eta L} \cdot R^2$$

$$\frac{V}{t} = \int_0^{2\pi} \int_0^R v_x r dr d\varphi = \frac{(p - p_0)R^2}{4\eta L} \cdot 2\pi \cdot \int \left[r - \frac{r^3}{R^2} \right] dr = \frac{\pi(p - p_0)R^2}{2\eta L} \cdot \left[\frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4R^2} \right]_0^R$$

Poiseuilleova rovnice

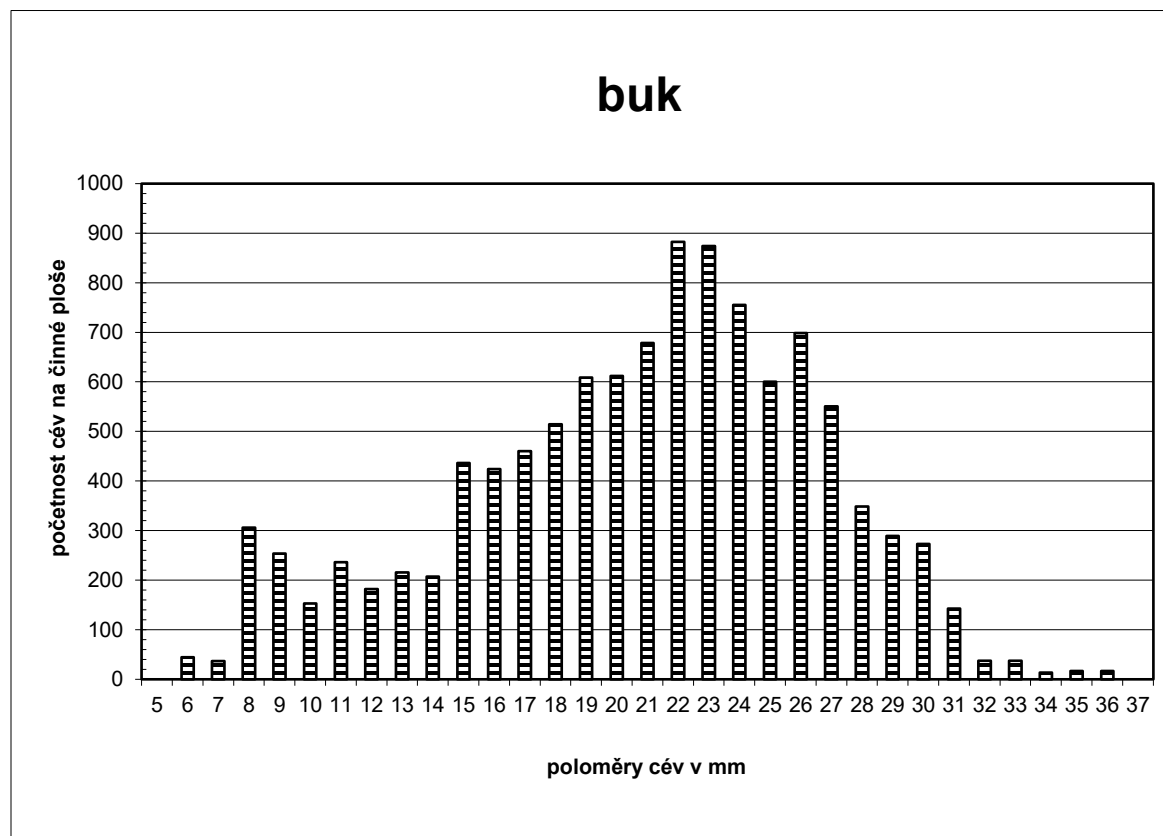
$$\frac{V}{t} = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \frac{p - p_0}{L}$$

Darcyho rovnice

$$\frac{V}{S \cdot t} = \frac{\pi}{8\eta} \cdot N \cdot R^4 \cdot \frac{p - p_0}{L} \quad \frac{V}{S \cdot t} = \frac{\pi}{8\eta} \cdot \sum_{i=1}^N n_i \cdot R_i^4 \cdot \frac{p - p_0}{L}$$

$$\frac{V}{S \cdot t} = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{p - p_0}{L} \quad k = \frac{\pi}{8} \cdot \sum_{i=1}^N n_i \cdot R_i^4$$

Rozložení cév podle poloměrů



Na co je to dobré?



Impregnace dřeva



Bukové podvaly





Fakulta lesnická
a dřevařská





Fakulta lesnická
a dřevařská

Děkuji za pozornost

