

**Mendelova univerzita v Brně**

*Lesnická a dřevařská fakulta*



# **Metody výpočtu řezných odporů a sil**

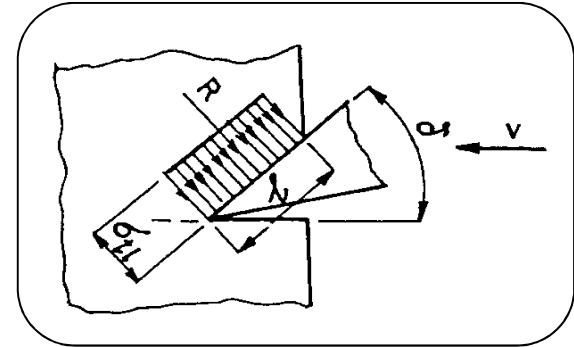
doc. Ing. Zdeněk Kopecký, CSc.

# Úvod

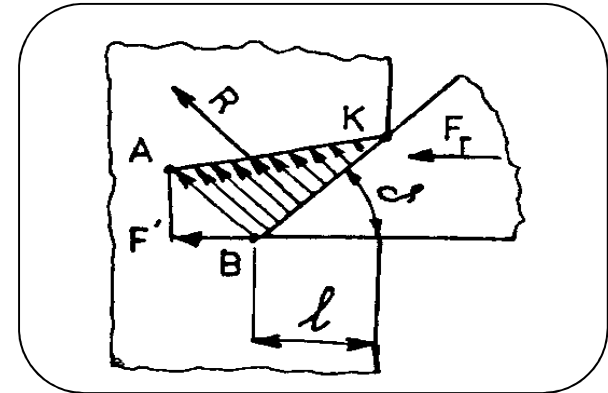
- Kvalitní návrh konstrukce stroje a určení výkonu pohonného motoru není možné bez předběžného výpočtu řezných a podávacích sil.
  - Při znalosti výpočetních metod a jejich správné aplikaci můžeme správně zvolit nástroj pro obrábění, tj. určit nástrojové úhly a pracovní úhly, stanovit velikost zubové mezery, ...
- 
- ❖ *Současně používané modely výpočtu velikosti řezné síly se svými výsledky více či méně přibližují realitě obrábění dřeva.*
  - ❖ *Výpočetní modely nemohou bezezbytku reagovat na anomálie ve dřevě jako jsou suky, odklon vláken, ... ⇒ ovlivnění přesnosti výpočtu řezné síly.*
  - ❖ *Hustota a vlhkost dřeva, vliv teploty, řezné rychlosti jsou v jednotlivých modelech vyjádřeny pomocí opravných koeficientů.*

# Vývoj teorií obrábění dřeva

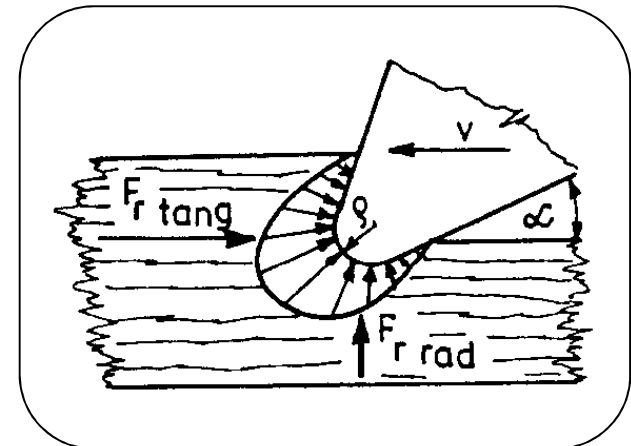
Stanovení velikosti řezné síly se už v minulosti zabývalo mnoho odborníků – např. **I.A. Time v roce 1870** v díle „Soprotivlenie metallov i dereva rezaniu“ (Odpor kovů a dřeva při řezání), předpokládal ideální ostří a rovnoměrné zatížení čela řezného klínu.



S další teorií přišli Deševoj(1934) a Afanasiev (1954), kteří na rozdíl od Timeho předpokládali trojúhelníkové zatížení čela nože. Všichni tři vědci ovšem vycházeli z tzv. „ideálního ostří“ řezného klínu, které vylučuje možnost tření mezi dřevem a hřbetem nástroje.



Profesor Beršadskij (1975) pracoval se „skutečným ostřím“ řezného klínu, které má určitý poloměr zaoblení  $\rho$  (v  $\mu\text{m}$ ). Rovněž počítal se vznikem tření mezi hřbetem nástroje a dřevem. Výrazně napomohl uplatnění teorie řezného odporu v praxi tím, že rozložil řezný odpor na tangenciální a radiální složku, což bylo velkým přínosem pro konstruktéry strojů a nástrojů.



## *Výpočetní metody*

1. Technologicko-statistická metoda
2. Analytická metoda
3. Objemová metoda
4. Metoda tabulkové síly



# **1. Technologicko-statistická metoda**

# Princip

*Matematický model pro stanovení **měrného řezného odporu  $k_c$**  byl navržen na základě mnohonásobně opakovaného experimentu se statistickým vyhodnocením za konkrétních technologických podmínek, při kterých byl nejdříve určen **jednotkový měrný řezný odpor  $k^1$**  pro základní modely řezání a úhel řezu  $\delta$*

## Základní vztah:

$$k_c = k^1 \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_p \cdot k_T \cdot k_h \quad [Nmm^{-2}]$$

## Technologické podmínky zjištění $k^1$ :

dřevina	<b>borovice</b>
řezná rychlost	$v_c = 10 \text{ ms}^{-1}$
tloušťka třísky	$h = 1 \text{ mm}$
vlhkost dřeva	$w = 15 - 20 \%$
řezný úhel	$\delta = 45^\circ$ (změna po $5^\circ$ )
úhel přerézávání vláken	$\varphi_2 = 0 - 90^\circ$
ostrý nástroj	$\rho = 0$
model řezání	$(\parallel), (\perp), (\oplus), \varphi_0 = 0$

## Opravné koeficienty:

$k_d$ ...	vliv dřeviny
$k_w$ ...	vliv vlhkosti
$k_v$ ...	vliv řezné rychlosti
$k_p$ ...	vliv otupení ostří
$k_T$ ...	vliv teploty
$k_h$ ...	vliv tloušťky třísky

# *Jednotkový měrný řezný odpor pro jiné úhly řezu*

Regresní analýzou základního experimentu byly navrženy analytické vztahy, které zohledňují jiný úhel řezu než základní  $\delta = 45^\circ$ .

$$k_{\parallel}^1 = 10 a_1 \cdot \delta^{2,6} \text{ [MPa]}$$

$$k_{\perp}^1 = 10 a_2 \cdot \delta^{1,6} \text{ [MPa]}$$

$$k_{\#}^1 = 10 a_3 \cdot \delta \text{ [MPa]}$$

Dřevina	$a_1$	$a_2$	$a_3$
<i>borovice</i>	$25 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$675 \cdot 10^{-3}$
<i>bříza</i>	$275 \cdot 10^{-6}$	$64 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$
<i>dub</i>	$325 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$13 \cdot 10^{-2}$

# *Jednotkový měrný řezný odpor pro složené modely řezání*

Podobným způsobem byly navrženy analytické vztahy pro  $k^1$ , které zohledňují složené modely řezání.

## Model řezání:

### A) Podélně - čelní ( $\parallel - \perp$ )

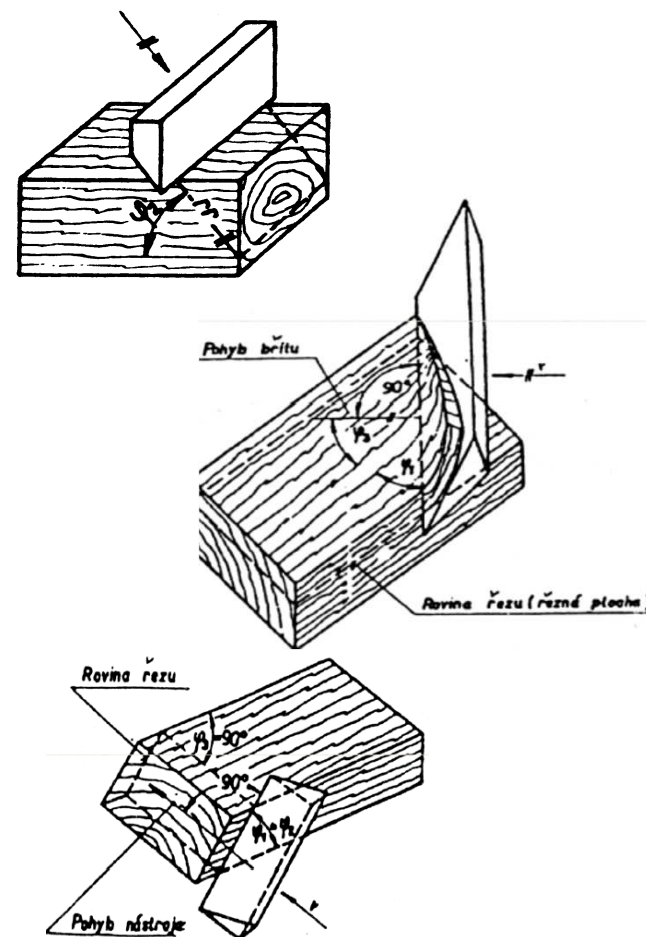
$$k^1_{\parallel - \perp} = [k^1_{\parallel} + (k^1_{\perp} - k^1_{\parallel}) \sin^{1,25} \varphi_2] \quad [\text{MPa}]$$

### B) Podélně - tangenciální ( $\parallel - \parallel$ )

$$k^1_{\parallel - \parallel} = [k^1_{\parallel} + (k^1_{\parallel} - k^1_{\parallel}) \sin^{1,25} (90 - \varphi_1)] \quad [\text{MPa}]$$

### C) Tangenciálně - čelní ( $\parallel - \perp$ )

$$k^1_{\parallel - \perp} = [k^1_{\parallel} + (k^1_{\perp} - k^1_{\parallel}) \sin^{1,25} \varphi_2] \quad [\text{MPa}]$$



# Měrný řezný odpor pro otevřené a uzavřené řezání

*Technologicky statistická metoda je poměrně propracovaný model pro technologické výpočty a výpočet sil působících na nástroj a konstrukci stroje.*

Metoda umožňuje výpočet měrného řezného odporu a řezné síly pro

**otevřené** i **uzavřené řezání**.

## Otevřené řezání

$$k_c = \frac{k_{\varphi_2 \delta}^1 \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_\rho \cdot k_T}{h^\mu} \quad [MPa]$$

## Uzavřené řezání

$$k_c = \frac{(1,1 \div 1,2) \cdot k_{\varphi_2 \delta}^1 \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_\rho \cdot k_T}{h^\mu} + \frac{\xi \cdot e}{b} \quad [MPa]$$

$k_d$  ... vliv dřeviny

$k_w$  ... vliv vlhkosti

$k_v$  ... vliv řezné rychlosti

$k_\rho$  ... vliv otupení ostří

$k_T$  ... vliv teploty

$h$  ... tloušťka třísky

$\mu$  ... součinitel zohledňující vliv tloušťky třísky  $h$  v závislosti na modelu řezání a úhlu  $\varphi_2$

$(1,1 \div 1,2)$  ... konstanta zahrnující vliv zvýšeného tření nástroje v řezné spáře

$\xi$  ... koeficient jednotkového měrného řezného odporu, potřebný k překonání tření bočního ostří (nástroje) v řezné spáře, zahrnuje způsob úpravy řezné části nástroje (např. zuby rozvedené  $\xi = 0,2 \text{ N/mm}^2$ , zuby pěchované, stelliteované nebo ze slinutých karbidů  $\xi = 0,15 \text{ N/mm}^2$ ).

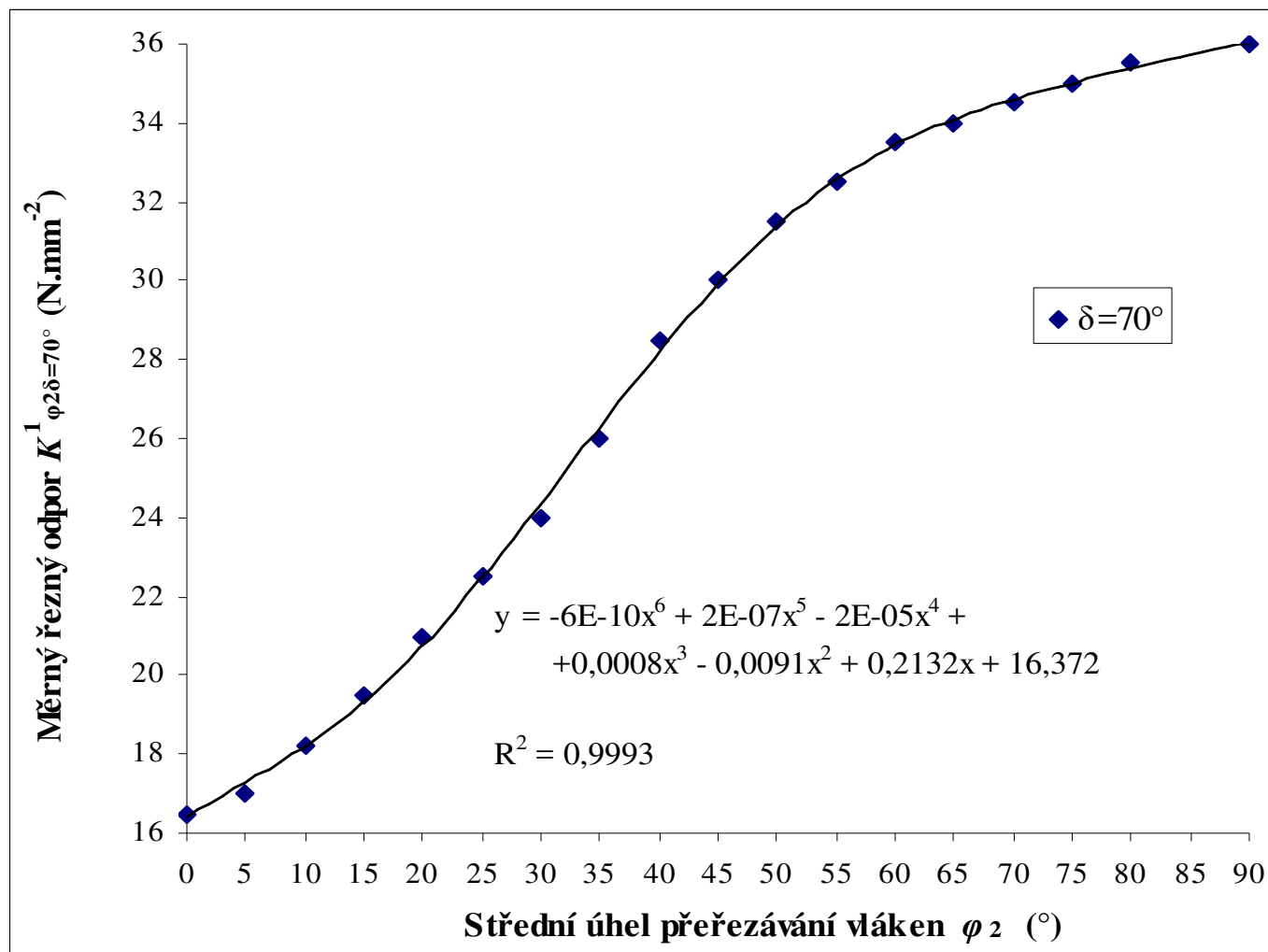
# Tabulkové zpracování $k^1_{\varphi\delta}$

$\parallel$ $\varphi_1=90^\circ$ $\varphi_2=0^\circ$ $\varphi_3=0^\circ$	Hodnoty $k^1_{\varphi\delta}$ [Nmm <sup>-2</sup> ] <b>BOROVICE</b> <i>Model řezání: podélně - čelní</i>									$\perp$ $\varphi_1=90^\circ$ $\varphi_2=90^\circ$ $\varphi_3=90^\circ$
Úhel	Úhel řezu $\delta$ [°]									
$\varphi_2$ [°]	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
0	5,0	6,5	8,5	10,5	13,0	16,5	18,5	22,0	26,0	30,0
5	5,5	7,0	8,5	11,5	13,5	17,0	19,5	23,0	27,0	31,0
10	6,2	8,0	10,0	12,5	15,0	18,2	21,5	24,5	28,5	32,5
15	7,0	9,0	11,5	13,5	16,2	19,5	22,5	26,0	30,0	34,0
20	8,0	10,0	12,5	15,0	17,5	21,0	24,0	28,0	31,5	36,0
25	9,0	11,5	13,5	16,0	19,0	22,5	26,0	30,0	33,0	38,0
30	10,5	12,5	15,0	17,5	21,0	24,0	28,0	31,5	36,0	40,0
35	11,5	13,5	16,0	19,0	22,0	26,0	29,5	33,0	37,5	41,5
40	12,0	14,0	17,5	20,0	23,5	28,5	31,0	35,0	39,0	43,0
45	13,0	15,8	18,0	21,5	24,5	30,0	32,5	36,5	40,8	45,0
50	14,0	16,5	19,5	22,5	26,0	31,5	33,5	38,0	42,0	46,5
55	14,5	17,0	20,8	23,5	27,0	32,5	35,0	39,0	43,5	48,0
60	15,5	18,0	21,2	24,5	28,0	33,5	36,2	41,0	44,5	49,0
65	16,0	19,0	22,0	25,5	29,0	34,2	37,5	42,0	46,0	50,0
70	16,2	19,5	22,5	26,5	30,0	34,2	38,5	42,5	46,5	51,0
75	16,5	20,0	23,0	26,8	30,5	35,0	38,8	43,5	47,5	52,0
80	17,0	20,5	23,5	27,0	31,0	35,5	39,6	44,0	45,0	52,5
90	17,5	21,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0	44,5	48,5	53,0

<div>  </div> <div><math>\varphi_1=90^0</math></div> <div><math>\varphi_2=0^0</math></div> <div><math>\varphi_3=0^0</math></div>	<div>Hodnoty <math>k^1_{\varphi\delta}</math> [Nmm<sup>-2</sup>]</div> <div>BOROVICE</div> <div><i>Model řezání: podélně - tangenciální</i></div>									<div>++</div> <div><math>\varphi_1=0^0</math></div> <div><math>\varphi_2=0^0</math></div> <div><math>\varphi_3=90^0</math></div>
Úhel	Úhel řezu $\delta[^0]$									
$\varphi_1[^0]$	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
0	5,0	6,5	8,5	10,5	13,0	16,5	18,5	22,0	26,0	30,0
5	4,8	6,4	7,5	10,1	12,2	14,8	18,3	21,3	25,0	29,5
10	4,6	6,2	7,4	10,0	12,0	14,5	18,0	21,1	24,5	29,0
15	4,5	6,0	7,3	9,8	11,8	14,2	17,5	20,5	24,0	28,5
20	4,4	5,8	7,2	9,5	11,5	13,9	17,0	19,8	23,0	27,0
25	4,3	5,6	7,0	9,2	11,2	13,5	16,5	18,7	22,0	25,5
30	4,2	5,4	6,7	8,8	10,5	12,8	15,0	17,5	20,5	23,7
35	4,1	5,2	6,3	8,2	9,5	11,8	13,7	16,0	18,5	21,5
40	4,0	5,0	6,0	7,5	8,7	10,5	12,8	14,5	17,0	20,0
45	3,9	4,8	5,8	6,8	8,2	9,6	11,8	13,3	15,6	18,0
50	3,8	4,6	5,5	6,3	7,5	8,5	10,5	12,0	13,7	16,0
55	3,7	4,4	5,2	6,0	7,0	7,8	9,0	10,7	12,0	13,7
60	3,6	4,2	5,0	5,6	6,5	7,0	8,2	9,0	10,5	12,0
65	3,5	4,0	4,7	5,1	6,0	6,4	7,2	7,8	8,8	10,2
70	3,4	3,8	4,5	4,9	5,5	5,8	6,4	6,8	7,5	8,7
75	3,3	3,6	4,3	4,6	5,1	5,4	5,8	6,2	6,8	7,8
80	3,2	3,5	4,1	4,4	4,8	5,0	5,3	5,7	6,3	7,0
85	3,1	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7	5,1	5,5	5,6	6,4
90	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0	5,4	5,7	6,0

$\perp$ $\varphi_1=0^\circ$ $\varphi_2=0^\circ$ $\varphi_3=90^\circ$	Hodnoty $k^1_{\varphi\delta}$ [Nmm <sup>-2</sup> ] BOROVICE <i>Model řezání: tangenciálně - čelní</i>									$\perp$ $\varphi_1=90^\circ$ $\varphi_2=90^\circ$ $\varphi_3=90^\circ$
Úhel	Úhel řezu $\delta[^\circ]$									
$\varphi_2[^\circ]$	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
0	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0	5,4	5,7	6,0
5	4,0	4,2	4,4	4,6	5,0	5,4	5,8	6,5	7,5	8,0
10	4,7	5,3	6,0	6,8	7,5	8,2	8,8	9,5	10,5	11,3
15	5,7	6,7	7,5	8,4	9,1	10,2	11,2	12,0	13,3	14,8
20	6,5	7,6	8,8	10,2	11,3	12,5	14,0	15,5	16,8	18,3
25	7,6	8,5	10,8	12,0	13,7	15,2	16,8	18,3	20,0	22,0
30	8,7	10,7	12,3	13,8	15,8	17,5	19,2	21,2	23,5	26,0
35	10,0	12,0	14,0	16,2	18,2	20,5	22,5	25,0	27,5	30,0
40	11,0	13,0	15,7	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,5	33,3
45	11,8	14,5	16,8	19,2	21,8	24,5	27,5	30,0	33,5	36,3
50	12,6	16,0	18,0	20,0	23,8	26,3	30,0	32,3	36,7	39,5
55	13,6	16,5	19,2	22,5	25,5	28,7	32,0	35,0	39,0	42,5
60	14,5	17,5	20,5	23,5	26,6	30,0	33,7	37,0	41,2	45,5
65	15,4	18,5	21,8	25,0	28,0	31,3	35,5	39,0	43,0	47,5
70	16,0	19,0	22,5	26,0	29,0	32,7	36,8	40,5	45,0	49,5
75	16,5	19,5	23,0	26,5	30,0	34,0	37,5	42,0	46,8	51,2
80	17,0	20,0	23,5	27,0	30,7	35,0	38,5	43,0	47,5	52,3
90	17,5	21,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0	44,5	48,5	53,0

# *Funkční závislost $k^1_{\varphi\delta}$ na $\varphi_2$*



# *Opravný součinitel vlivu dřeviny $k_d$*

Vliv dřeviny je chápán zejména jako **vliv hustoty dřeva** a platí, že s rostoucí hustotou velikost měrného řezného odporu  $k_c$  roste.

**„Jednotkovou dřevinou“ je v tomto případě borovice ( $k_d = 1$ ).**

Dřevina	$k_d$	Dřevina	$k_d$
Borovice	1,00	Modřín	1,10
Lípa	0,80	Bříza	1,25
Smrk	0,90	Buk	1,40
Osika	0,95	Dub	1,55
Jedle	0,95	Habr	1,60
Olše	1,05	Jasan	1,75

# Opravný součinitel vlivu vlhkosti dřeva $k_w$

*Vliv vlhkosti dřeva je nutné posuzovat zvlášť pro otevřené (volné) řezání  
a zvlášť pro řezání ve spáře:*

- A. Obecně lze říci, že u *otevřeného řezání s rostoucí vlhkostí dřeva hodnota opravného součinitele  $k_w$  klesá*, tedy i *řezného odporu*, protože *stříhová pevnost dřeva klesá s obsahem vody ve dřevě*.
- B. Při *řezání ve spáře* vzniká *problém se třením na bočních řezných plochách*. S vyšší vlhkostí dřeva dochází k větší elastické deformaci obrobeného povrchu a následnému svírání nástroje. *Hodnota opravného součinitele  $k_w$  roste*.

Vlhkostní stav dřeva	vlhkost  w [%]	Součinitel $k_w$	
		volné řezání	řezání ve spáře
Velmi suché dřevo	5 - 8	1,10	0,90
Suché	10-15	1,00	1,00
Na vzduchu vyschnuté	20-30	0,95	1,05
Čerstvě poražené	50-70	0,90	1,10
Plavené	nad 70	0,80	1,12

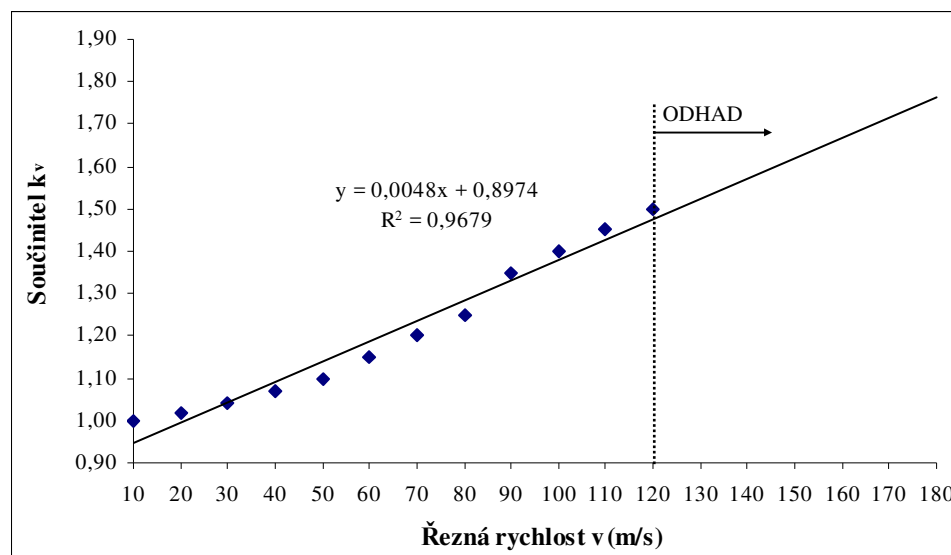
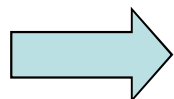
# Opravný součinitel vlivu řezné rychlosti $k_v$

**Z teoretického hlediska nelze vliv řezné rychlosti  $v_c$  zanedbat.**

**Při oddělení třísky od materiálu je nutné třísku uvést z klidu do pohybu, což je závislé na:**

- hmotnosti třísky,
- čtverci rychlosti,
- geometrii nástroje.

Názory na vliv řezné rychlosti se u jednotlivých autorů různí, převládá názor lineární závislosti podle Afanasieva.



**Platí lineární závislost podle Afanasieva**



$v_c$ [ms <sup>-1</sup> ]	<b>10</b>	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$k_v$	<b>1,00</b>	1,02	1,04	1,07	1,10	1,15	1,20	1,25	1,35	1,40	1,45	1,50

# *Opravný součinitel vlivu otupení ostří $k_p$*

- Otupení ostří nástroje má významný vliv na hodnotu měrného řezného odporu  $k_c$ .
- Intenzita otupování je ovlivňována celou řadou faktorů: materiál břitu, obráběný materiál, geometrie nástroje, doba řezání, technologické podmínky obrábění, aj.

	Součinitel $k_p$							
Čas řezání	Řezání				Frézování	Soustružení a vrtání	Dlabání řetězovou dlabáčkou	
t[h <sup>-1</sup> ]	rámová pila	pásová pila	kotoučová - podélně	kotoučová - příčně			při osovém posuvu	při bočním posuvu
<b>0</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>1</b>	1,17	1,20	1,20	1,10	1,20	1,20	1,24	1,30
<b>2</b>	1,32	1,40	1,50	1,15	1,30	1,30	1,40	1,50
<b>3</b>	1,42	1,60	1,80	1,20	1,42	1,35	1,55	1,73
<b>4</b>	1,50	1,80	2,20	1,30	1,50	1,40	1,65	1,88
<b>5</b>	-	2,00	2,50	1,40	1,57	1,45	1,78	2,00
<b>6</b>	-	2,20	2,80	1,50	1,60	1,50	1,86	2,10

**Poznámka:** V tabulce se jedná o orientační hodnoty  $k_p$  (podle L'ubčenka). Tyto hodnoty zohledňují pouze čas řezání. Nejsou zohledněny faktory mající vliv na intenzitu otupování (obráběná dřevina, materiál a geometrie nástroje, řezné podmínky).

# *Opravný součinitel vlivu teploty dřeva $k_T$*

S rostoucí teplotou, podobně jako s rostoucí vlhkostí, klesá stříhová pevnost dřeva a proto klesá i měrný řezný odpor  $k_c$ . Toho se využívá v některých technologických procesech (krájení a loupání dýh, ohýbání, apod.).

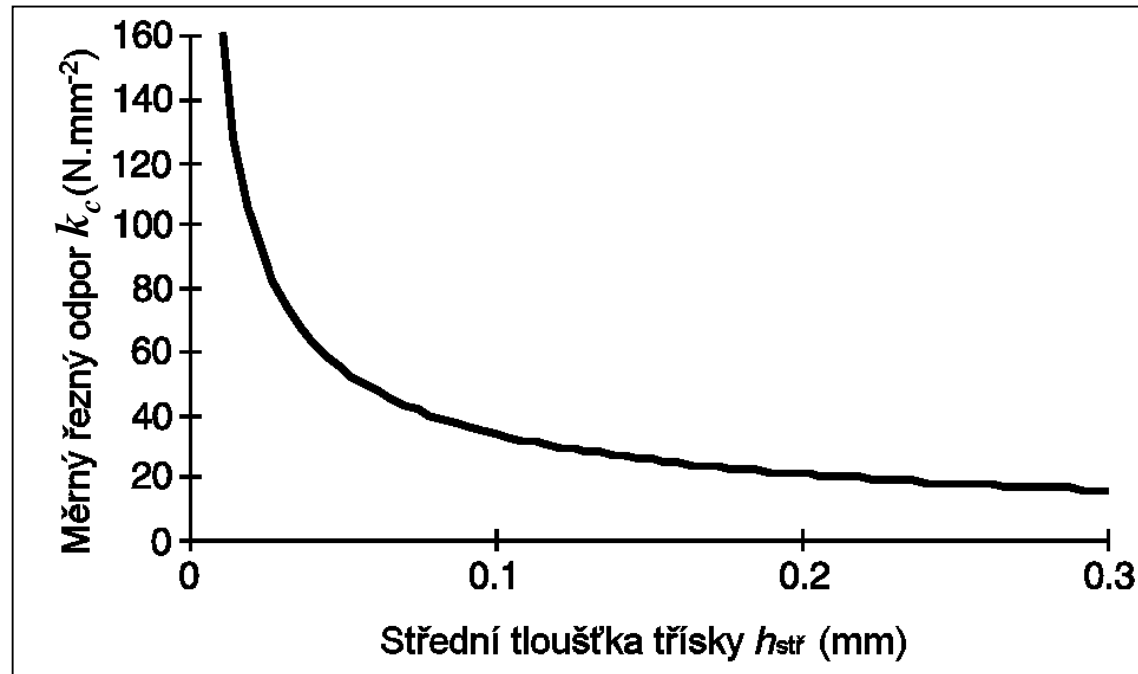
*Opravný součinitel vlivu teploty  $k_T$  (podle Manžose)*

Teplota $T$ [°C]	10	20	30	40	50	60
Součinitel $k_T$	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

# *Vliv tloušťky třísky*


*Experimenty bylo potvrzeno, že měrný řezný odpor  $k_c$  (měrná řezná síla) jsou hyperbolicky nepřímo úměrné tloušťce třísky.*

Pokud se bude velikost poloměru zaoblení ostří blížit tloušťce třísky, pak velikost měrného řezného odporu (měrné řezné síly)  $k_c$  se bude blížit nekonečnu.



**Poznámka:** Velká hodnota měrného řezného odporu  $k_c$  má za následek rychlejší průběh otupování ostří nástroje. Tomu je třeba předejít vhodným nastavením technologických podmínek procesu obrábění.

***Opravný součinitel  $\mu$  - zohledňující vliv  
tloušťky třísky  $h$  v závislosti na modelu řezání  
a úhlu  $\varphi_2$***

Úhel $\varphi_2$	Hodnoty $\mu$ pro modely řezání		
	$\parallel$ - $\perp$	$\nparallel$ - $\perp$	
<b>0</b>	$\parallel = 0,55$	$\nparallel = 0,50$	
<b>10</b>	0,47	0,46	
<b>20</b>	0,44	0,43	
<b>30</b>	0,42	0,40	
<b>40</b>	0,39	0,38	
<b>50</b>	0,37	0,36	
<b>60</b>	0,36	0,35	
<b>70</b>	0,35	0,35	
<b>80</b>	0,34	0,34	
<b>90</b>	$\perp = 0,33$	$\perp = 0,33$	
			<b>vliv se snižuje</b>

# *Výpočet řezné síly a výkonu pro protahovací frézku*



1 – stojan stroje, 2 – pracovní stůl, 3 – protihlukový kryt, 4 –  
obslužný pult stroje, 5 – digitální ukazatel výškového nastavení  
pracovního stolu (přesnost 0,1 mm)

**Průměr nožového hřídele závisí na  
jeho délce, obvykle bývá:**

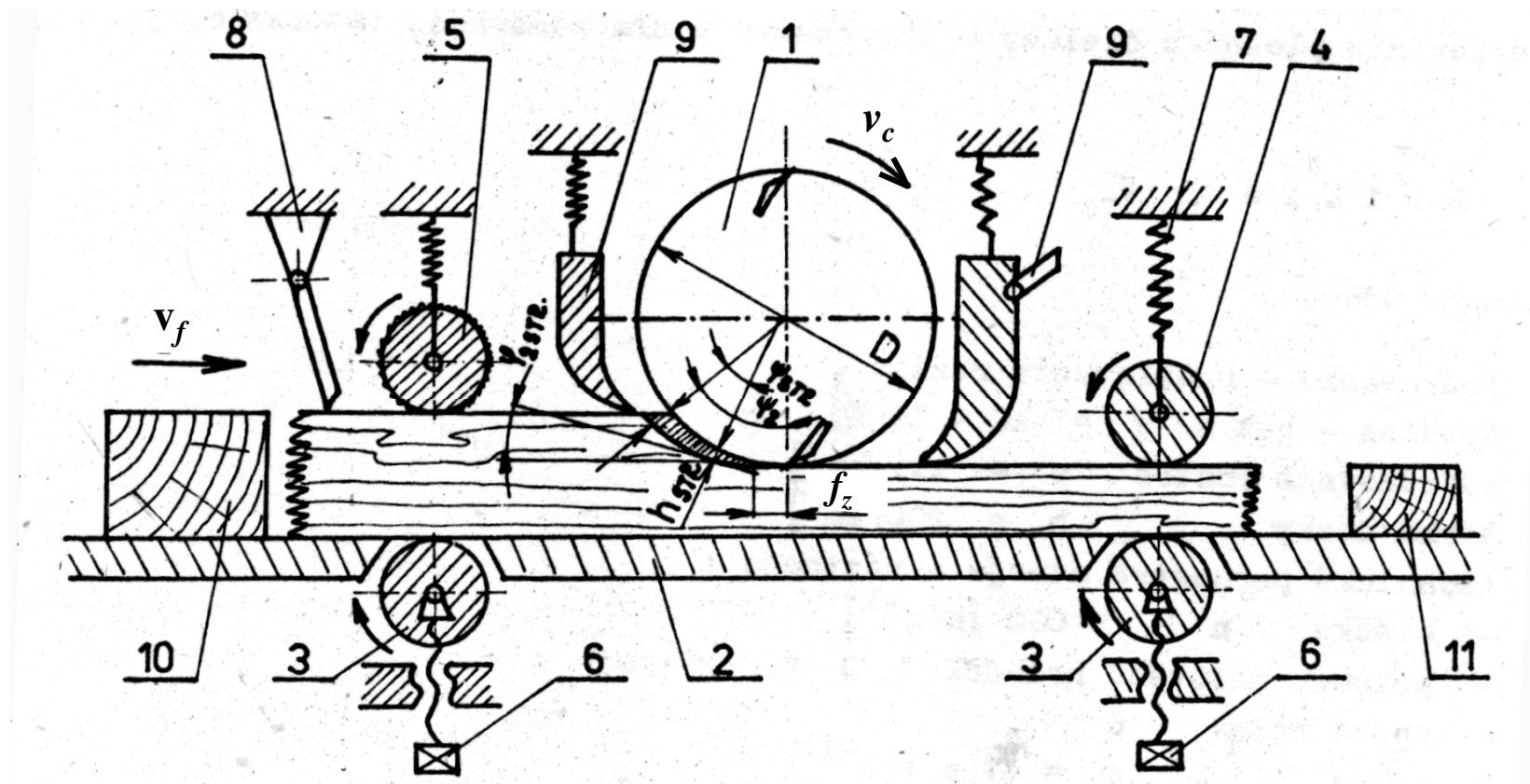
- délka do 600 mm ►  $\phi 80 \div 130$  mm
- délka do 1200 mm ►  $\phi 160$  mm.

Počet nožů - 2 až 6.

Nožový hřídel je uložený ve dvou  
radiálních kuličkových ložiskách,  
pracuje při otáčkách od 3000 do 7500  
 $\text{min}^{-1}$ .

<http://www.youtube.com/watch?v=JwpvyMNigK4>

# Technologické schéma

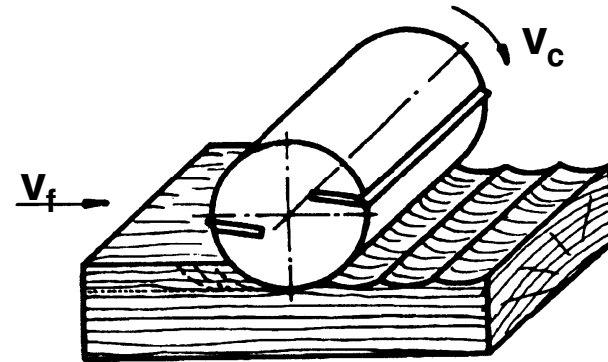


1-nožový hřídel, 2-pracovní stůl, 3-spodní podávací válec, 4-horní podávací válec – zadní, 5-přední rýhovaný podávací válec, 6-mechanismus zdvihu stolu, 7-tlačné pružiny, 8- ochranná páka proti zpětnému vrhu obrobku, 9-přítlačné lišty, 10-materiál před opracováním, 11-materiál po opracování

# Řezné podmínky

- dřevina
- vlhkost
- teplota dřeva
- odfrézovaná vrstva
- šířka desky
- otáčky nožového hřídele
- průměr nožového hřídele
- počet nožů
- úhel řezu
- posuvná (podávací) rychlost obrobku
- doba řezání

bříza (BR)  
 $w = 12 \%$   
 $T = 20^\circ$   
 $e = 3 \text{ mm}$   
 $b = 150 \text{ mm}$   
 $n = 5100 \text{ min}^{-1}$   
 $D = 128 \text{ mm}$   
 $z = 2$   
 $\delta = 60^\circ$   
 $v_f = 12 \text{ mm min}^{-1}$   
 $t = 2 \text{ h}$



# Řešení

Protahovací frézka pracuje  
v režimu otevřeného řezání

Model řezání (hl.o.) ( $\parallel$ - $\perp$ )

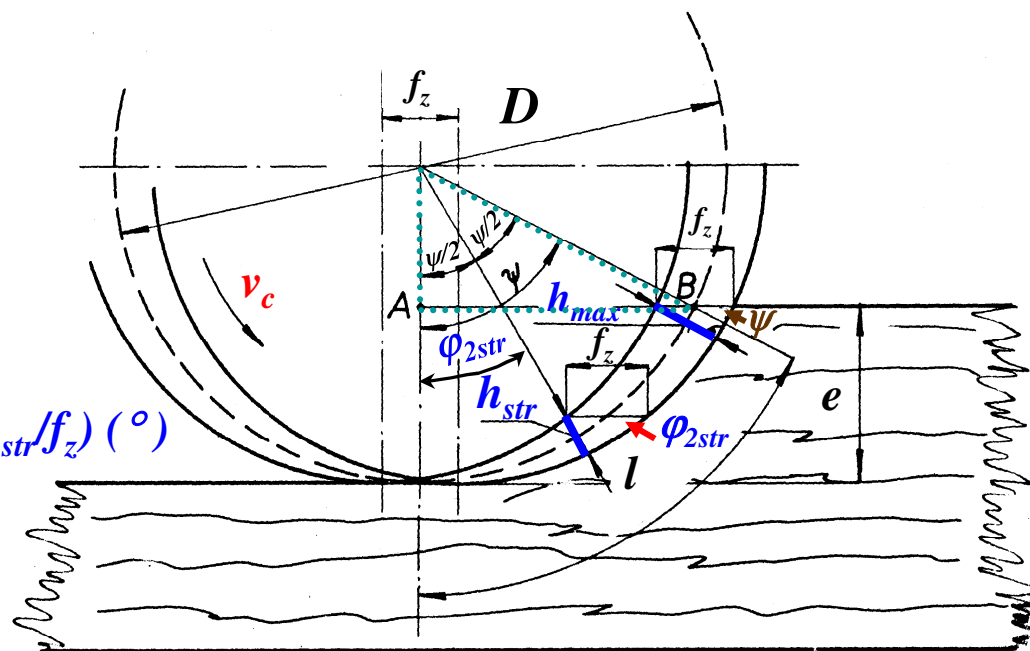
$$\varphi_0 = 0^\circ \quad \varphi_1 = 90^\circ \quad \varphi_{2str} = \arcsin(h_{str}/f_z) (^\circ)$$

Řezný odpor:

$$k_c = \frac{k_{\varphi_2 \delta}^I \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_\rho \cdot k_T}{h_{str}^\mu} \quad [Nmm^{-2}]$$

*Střední úhel přerézávání vláken  $\varphi_{2str}$ :*

$$\varphi_{2str} = \frac{1}{2} \cdot \psi = \frac{1}{2} \cdot \arccos\left(\frac{D/2 - e}{D/2}\right) = \frac{1}{2} \cdot \arccos\left(\frac{64 - 3}{64}\right) = 8,8^\circ$$



$h_{str}$  ... střední tloušťka třísky

$\psi$  ... úhel záběru

$D$  – průměr nožového hřídele 128 mm

$e$  – tloušťka frézované vrstvy 3 mm

# Jednotkový měrný řezný odpor $k^1_{\phi 2\delta}$

<div>   φ<sub>1</sub>=90<sup>0</sup> φ<sub>2</sub>= 0<sup>0</sup> φ<sub>3</sub>= 0<sup>0</sup></div>		<div>Hodnoty <math>k^1_{\phi\delta}</math> [Nmm<sup>-2</sup>] <b>BOROVICE</b> <i>Model řezání: podélně - čelní</i></div>									<div>⊥ φ<sub>1</sub>=90<sup>0</sup> φ<sub>2</sub>=90<sup>0</sup> φ<sub>3</sub>=90<sup>0</sup></div>
Úhel	Úhel řezu δ [°]										
φ <sub>2</sub> [°]	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	
0	5,0	6,5	8,5	10,5	13,0	16,5	18,5	22,0	26,0	30,0	
5	5,5	7,0	8,5	11,5	13,5	17,0	19,5	23,0	27,0	31,0	
10 <i>8,8</i>	6,2	8,0	10,0	12,5	15,0	18,2	21,5	24,5	28,5	32,5	
15	7,0	9,0	11,5	13,5	16,2	19,5	22,5	26,0	30,0	34,0	
20	8,0	10,0	12,5	15,0	17,5	21,0	24,0	28,0	31,5	36,0	
25	9,0	11,5	13,5	16,0	19,0	22,5	26,0	30,0	33,0	38,0	
30	10,5	12,5	15,0	17,5	21,0	24,0	28,0	31,5	36,0	40,0	
35	11,5	13,5	16,0	19,0	22,0	26,0	29,5	33,0	37,5	41,5	
40	12,0	14,0	17,5	20,0	23,5	28,5	31,0	35,0	39,0	43,0	
45	13,0	15,8	18,0	21,5	24,5	30,0	32,5	36,5	40,8	45,0	
50	14,0	16,5	19,5	22,5	26,0	31,5	33,5	38,0	42,0	46,5	
55	14,5	17,0	20,8	23,5	27,0	32,5	35,0	39,0	43,5	48,0	
60	15,5	18,0	21,2	24,5	28,0	33,5	36,2	41,0	44,5	49,0	
65	16,0	19,0	22,0	25,5	29,0	34,2	37,5	42,0	46,0	50,0	
70	16,2	19,5	22,5	26,5	30,0	34,2	38,5	42,5	46,5	51,0	
75	16,5	20,0	23,0	26,8	30,5	35,0	38,8	43,5	47,5	52,0	
80	17,0	20,5	23,5	27,0	31,0	35,5	39,6	44,0	45,0	52,5	
90	17,5	21,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0	44,5	48,5	53,0	

# *Opravný součinitel vlivu dřeviny $k_d$*

Vliv dřeviny je chápán zejména jako vliv hustoty dřeva a platí, že s rostoucí hustotou velikost měrného řezného odporu  $k_c$  roste.

„Jednotkovou dřevinou“ je v tomto případě **borovice** ( $k_d = 1$ ).

Dřevina	$k_d$	Dřevina	$k_d$
Borovice	1,00	Modřín	1,10
Lípa	0,80	<b>Bříza</b>	<b>1,25</b>
Smrk	0,90	Buk	1,40
Osika	0,95	Dub	1,55
Jedle	0,95	Habr	1,60
Olše	1,05	Jasan	1,75

# *Opravný součinitel vlivu vlhkosti dřeva $k_w$*

Obecně lze říci, že *u otevřeného řezání s rostoucí vlhkostí dřeva hodnota opravného součinitele  $k_w$  klesá* a tedy i *řezného odporu*, protože stříhová pevnost dřeva klesá s obsahem vody ve dřevě.

Vlhkostní stav dřeva	vlhkost	Součinitel $k_w$	
		volné řezání	řezání ve spáře
Velmi suché dřevo	5 - 8	1,10	0,90
Suché	10-15	1,00	1,00
Na vzduchu vyschnuté	20-30	0,95	1,05
Čerstvě poražené	50-70	0,90	1,10
Plavené	nad 70	0,80	1,12

# *Opravný součinitel vlivu řezné rychlosti $k_v$*

Z teoretického hlediska nelze vliv řezné rychlosti  $v_c$  zanedbat.

Po oddělení třísky od materiálu je nutné třísku uvést z klidu do pohybu, což je závislé na:

- hmotnosti třísky,
- čtverci rychlosti,
- geometrii nástroje.


Řezná rychlost:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot 128 \cdot 5100}{60 \cdot 1000} \cong 34 \text{ ms}^{-1}$$

$v_c \text{ [ms}^{-1}\text{]}$	10	20	30 ↔ 40	50	60	70	80	90	100	110	120
$k_v$	1,00	1,02	1,04 ↔ 1,07	1,10	1,15	1,20	1,25	1,35	1,40	1,45	1,50

*volíme  $k_v = 1,052$*

# *Opravný součinitel vlivu otupení ostří $k_p$*

	Součinitel $k_p$							
Čas řezání	Řezání				Frézování	Soustruže ní a vrtání	Dlabání řetězovou dlabačkou	
$t[h^{-1}]$	rámová pila	pásová pila	kotoučová - podélně	kotoučová - příčně			při osovém posuvu	při bočním posuvu
<b>0</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>1</b>	1,17	1,20	1,20	1,10	1,20	1,20	1,24	1,30
<b>2</b>	1,32	1,40	1,50	1,15	 1,30	1,30	1,40	1,50
<b>3</b>	1,42	1,60	1,80	1,20	1,42	1,35	1,55	1,73
<b>4</b>	1,50	1,80	2,20	1,30	1,50	1,40	1,65	1,88
<b>5</b>	-	2,00	2,50	1,40	1,57	1,45	1,78	2,00
<b>6</b>	-	2,20	2,80	1,50	1,60	1,50	1,86	2,10

**Poznámka:** V tabulce se jedná o orientační hodnoty  $k_p$  (podle L'ubčenka), protože otupení podle doby řezání není příliš přesné, neboť nezohledňuje faktory mající vliv na intenzitu otupování (obráběná dřevina, materiál a geometrie nástroje, řezné podmínky).

# *Opravný součinitel vlivu teploty dřeva $k_T$*

S rostoucí teplotou klesá stříhová pevnost dřeva a proto klesá i měrný řezný odpor  $k_c$ . Toho se využívá v některých technologických procesech (krájení a loupání dýh, ohýbání, apod.).

*Opravný součinitel vlivu teploty  $k_T$  (podle Manžose)*

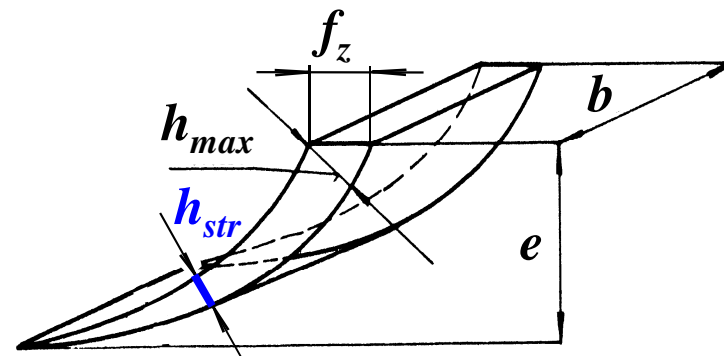
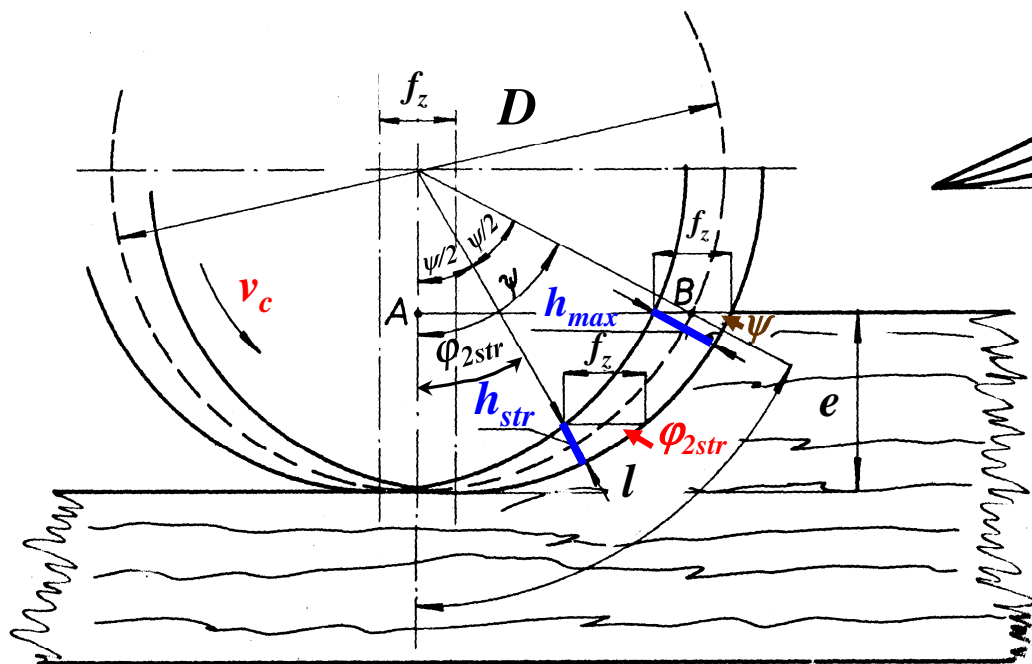
Teplota $T$ [°C]	10	20	30	40	50	60
Součinitel $k_T$	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7

***Opravný součinitel  $\mu$  - zohledňující vliv  
tloušťky třísky  $h$  v závislosti na modelu řezání  
a úhlu  $\varphi_2$***

Úhel $\varphi_2$	Hodnoty $\mu$ pro modely řezání		
	$\parallel \perp$	$\nparallel \perp$	
0	$\parallel = 0,55$	$\nparallel = 0,50$	
10	0,47	0,46	
20	0,44	0,43	
30	0,42	0,40	
40	0,39	0,38	
50	0,37	0,36	
60	0,36	0,35	
70	0,35	0,35	
80	0,34	0,34	
90	$\perp = 0,33$	$\perp = 0,33$	

8,8 → 0,48

# Střední tloušťka třísky



$$\cos \psi = \frac{D/2 - e}{D/2} = 1 - \frac{e}{R}$$

z teorie goniometrické funkce poloviny úhlu platí vztah

$$\sin(\psi/2) = \sqrt{\frac{1 - \cos \psi}{2}} = \sqrt{\frac{e}{D}}$$

$$h_{str} = f_z \cdot \sin(\psi / 2) = f_z \cdot \sin(\phi_{2str}) = f_z \cdot \sqrt{\frac{e}{D}} = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{e}{D}} = \frac{12 \cdot 1000}{5100 \cdot 2} \cdot \sqrt{\frac{3}{128}} = 0,18mm$$

# ***Řezná síla a řezný výkon***

***Měrný řezný odpor:***

$$k_c = \frac{k_{\varphi_2\delta}^I \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_\rho \cdot k_T}{h_{str}^\mu} = \frac{12,26 \cdot 1,25 \cdot 1,00 \cdot 1,052 \cdot 1,3 \cdot 1,0}{0,18^{0,48}} = 47,7 \text{ MPa}$$

***Řezná síla:***

$$F_c = k_c \cdot b \cdot e \cdot \frac{v_f}{v_c} = 47,7 \cdot 10^6 \cdot 0,15 \cdot 0,003 \cdot \frac{12}{60 \cdot 34} = 126,3 \text{ N}$$

***Řezný výkon:***

$$P_c = F_c \cdot v_c = 126,3 \cdot 34 = 4294 \text{ W}$$



## **2. Analytická metoda**

[illegible]

**Princip** analytické metody je založen na současném působení sil na čelo i hřbet nástroje – proto se také někdy tato metoda nazývá „Všeobecný zákon řezání“.

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{F}_{c\alpha} + \mathbf{F}_{c\gamma}$$

**Zahrnuje** vliv otupení nástroje → vychází z **celkové skutečné dráhy**, kterou nástroj urazí a dále zohledňuje i **vliv materiálu nástroje**.

## 2.1 Analytická teorie pro volné řezání

### Měrný řezný odpor $k_c$ :

Pro „mikrotřísku“  
( $h < 0,1\text{mm}$ ):

$$k_c = k_{<0,1}^1 + k_{<0,1}^\rho = (A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c + C_{<0,1}) + \frac{(a_\rho - 0,8) \cdot p}{h_{str}}$$

Pro „makrotřísku“  
( $h > 0,1\text{mm}$ ):

$$k_c = k_{>0,1}^1 + k_{>0,1}^\rho = (A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c - C_{>0,1}) + \frac{a_\rho \cdot p}{h_{str}}$$

$k^1$  ... základní měrný řezný odpor,

$k^\rho$  ... přírůstek měrného řezného odporu vlivem otupení nástroje,

$h_{str}$  ... střední tloušťka třísky,

A ... parametr vyjadřující vliv úhlu řezu a modelu řezání,

B ... parametr vyjadřující vliv řezné rychlosti,

C ... parametr vyjadřující vliv tloušťky třísky,

$p$  ... parametr vyjadřující měrnou řeznou sílu tření a plastických deformací na hřbetu nástroje,

$a_\rho$  ... koeficient otupení ostří.

$$a_\rho = 1 + \frac{0,2 \Delta \rho}{\rho_0}$$

**Poznámka:** Parametry  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $p$  byly původně stanoveny pro obrábění borovice a dubu - pro jiné dřeviny je nutno násobit výsledné odpory koeficientem dřeviny.

**Poznámka:** Optimum řezné rychlosti bylo při experimentu stanoveno  $v_c = 30 \div 40 \text{ ms}^{-1}$  pro řezání, pro frézování  $v_c = 40 \text{ ms}^{-1}$ . Při rychlostech nad  $50 \text{ ms}^{-1}$  (měřeno vysokorychlostní kamerou) je rychlost odřezávané třísky (i nárůst řezné síly) v důsledku jejího prvotního stlačení a následného vypružení o 50÷60% vyšší. Při nižších rychlostech řezání je proto nutné ve vzorcích použít opravnou konstantu ( $90-v_c$ ).

# *Analytické vztahy ze základního experimentu pro určení $k^I$*

Hodnoty základního měrného řezného odporu  $k^I_{>0,1}$  (pro  $h > 0,1mm$ ) v závislosti na ( $\delta$ ,  $v_c$ ,  $\varphi_2$ ) byly sestavny na základě rozsáhlého statistického vyhodnocení experimentálních dat:

Základní experiment:

Řezání borovice, dub

Úhel řezu  $\delta = 45^\circ$

Úhel přerézávání vláken  $\varphi_2 = 45^\circ$

Pro borovici platí:

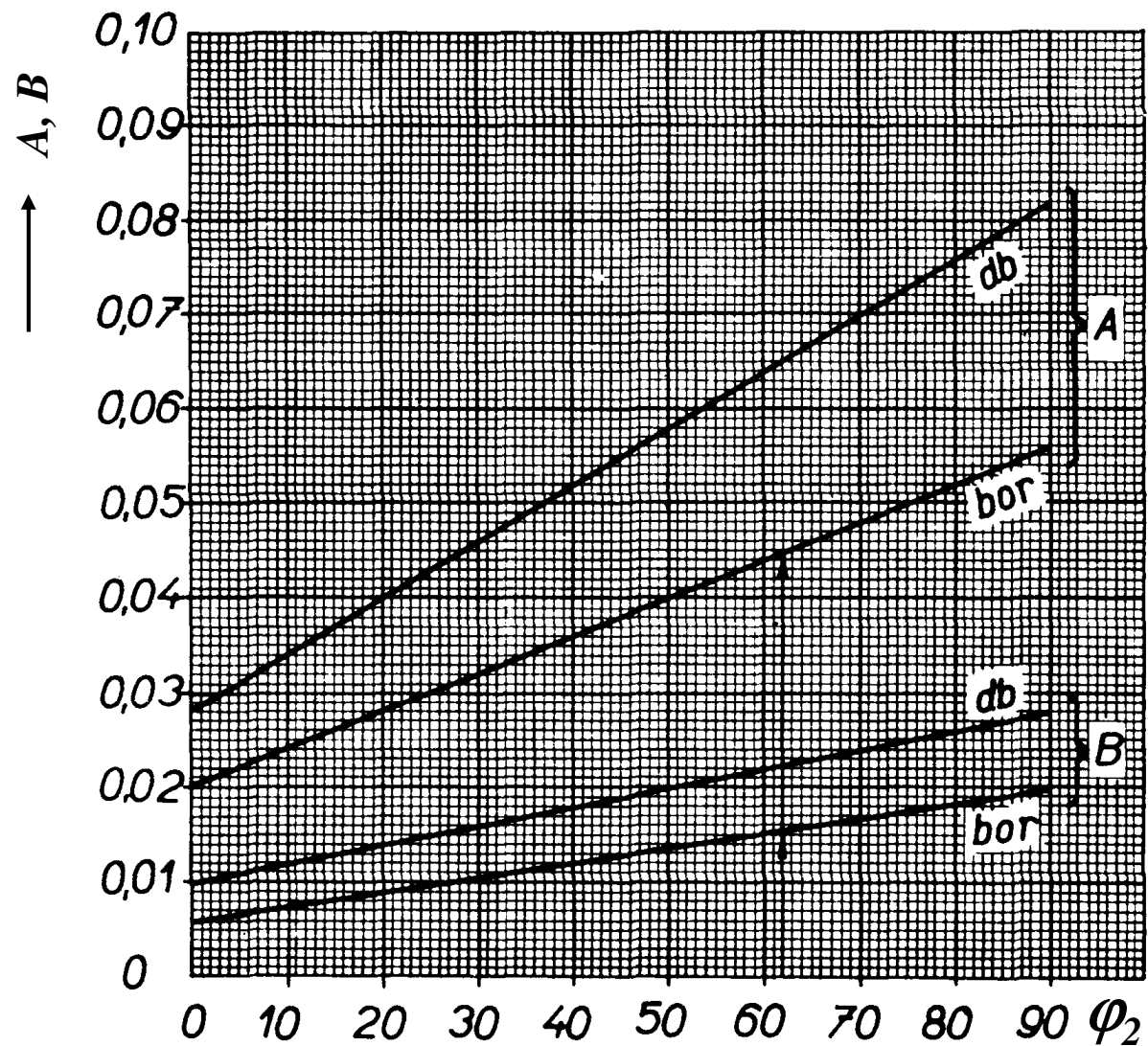
$$k^I_{>0,1} = A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c - C_{\varphi_2} = (0,02 + 0,0004\varphi_2) \cdot \delta + (0,007 + 0,00015\varphi_2) \cdot v_c - (0,7 + 0,018\varphi_2)$$

Pro dub platí:

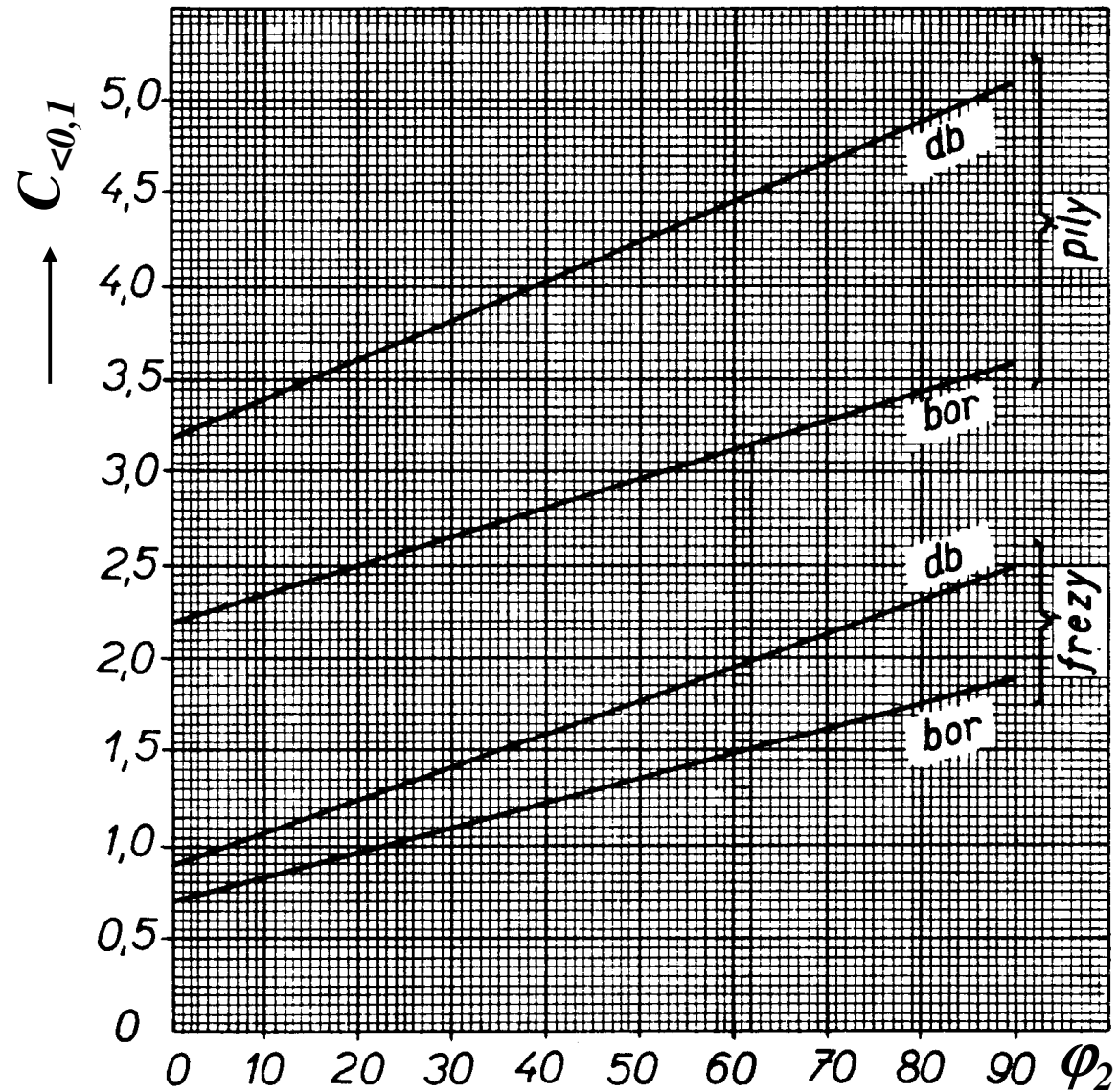
$$k^I_{>0,1} = A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c - C_{\varphi_2} = (0,028 + 0,0006\varphi_2) \cdot \delta + (0,009 + 0,0002\varphi_2) \cdot v_c - (0,76 + 0,02\varphi_2)$$

Poznámka: Pro praktické potřeby výpočtu základního měrného řezného odporu byly sestaveny **nomogramy parametrů  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $p$  jako funkce úhlu přerézávání vláken  $\varphi_2$ .**

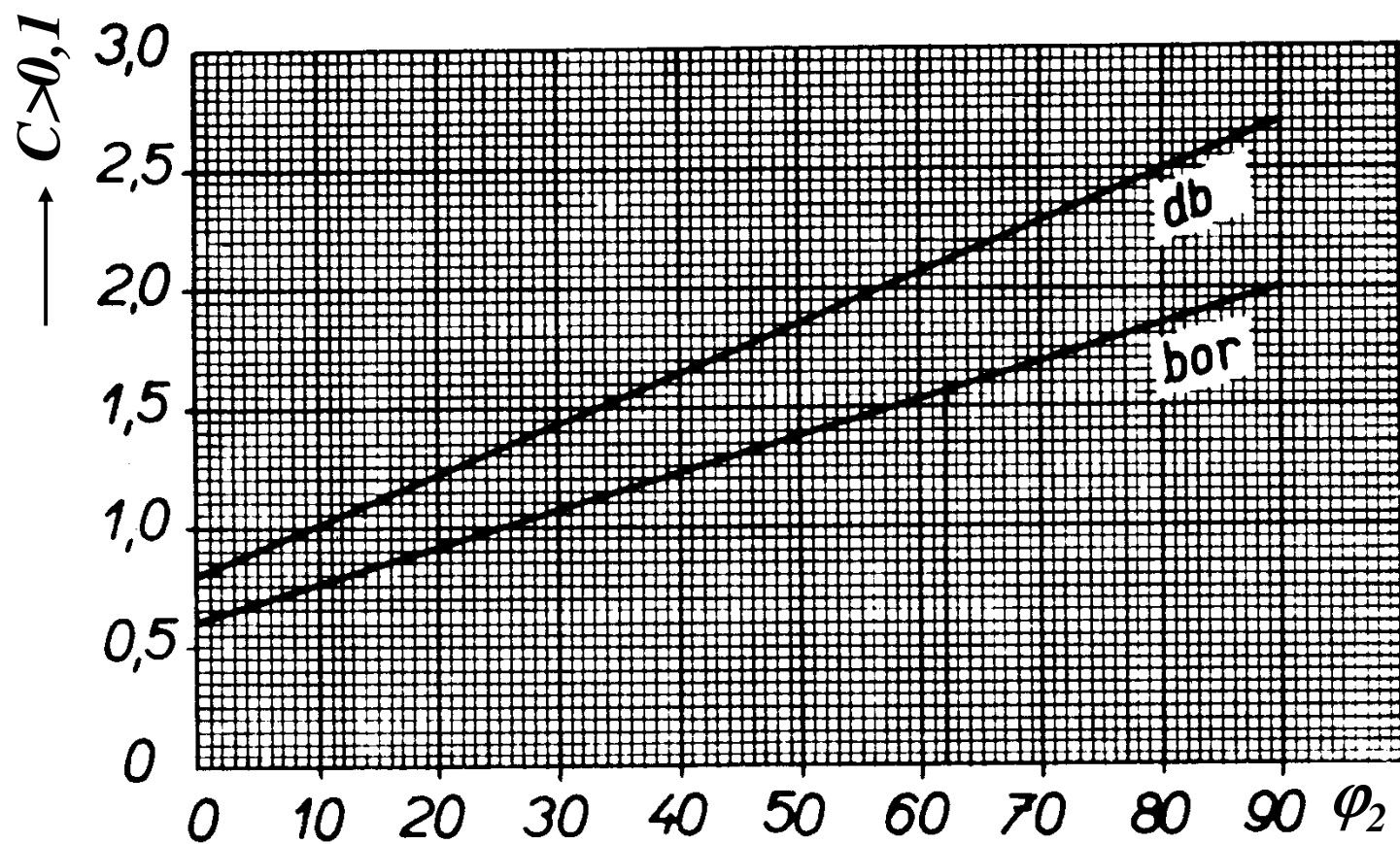
# *Parametry A, B (Prokeš)*



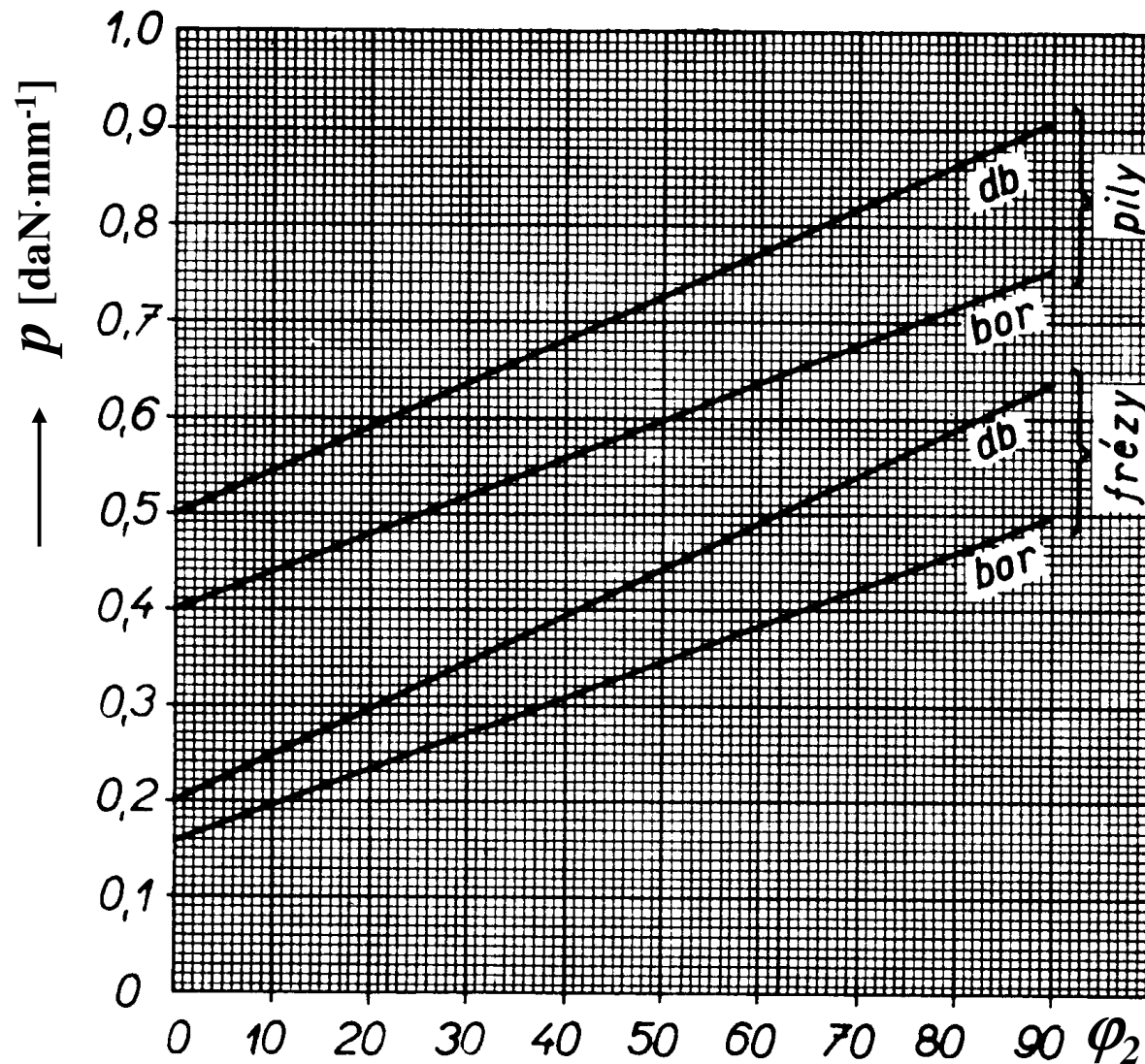
# *Parametr C pro mikrotřísku*



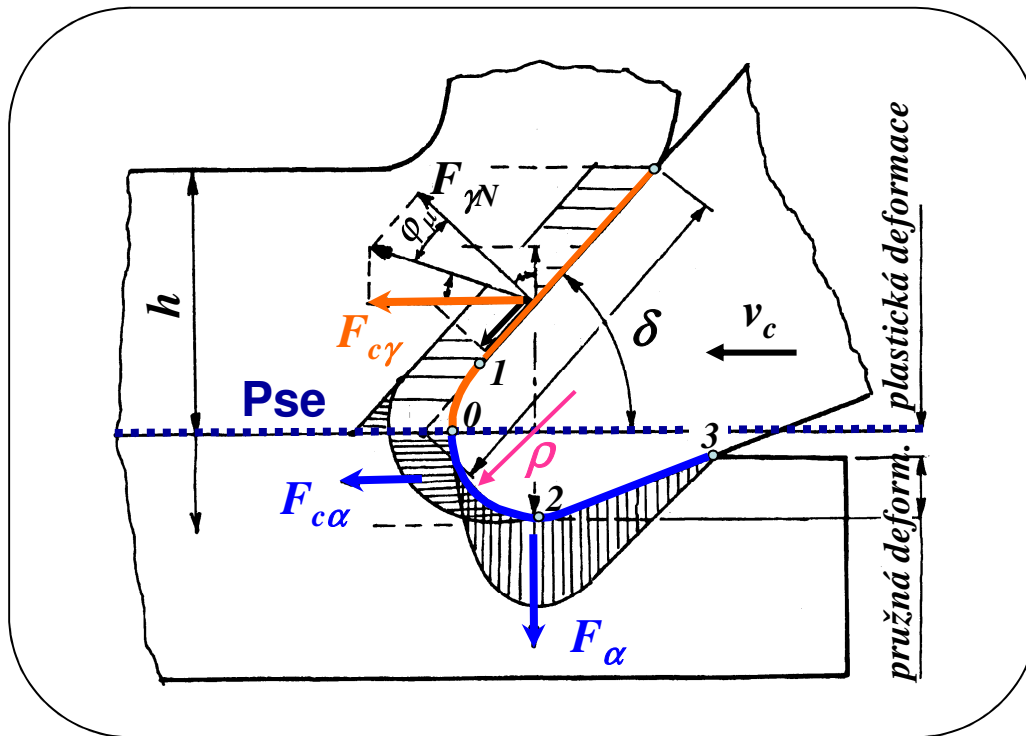
# *Parametr C pro makrotřísku*



# $p$ - parametr zohledňující silové poměry na hřbetu nástroje



# Rozklad sil (podle Beršadského)



Při řezání „reálnou řeznou hranou“ definoval dva systémy působících sil:  
Nad linií pracovní roviny pohybu  
ostří  $P_{se}$  – čelo nástroje:

$$F_{c\gamma} = f(h, \delta, \varphi_2)$$

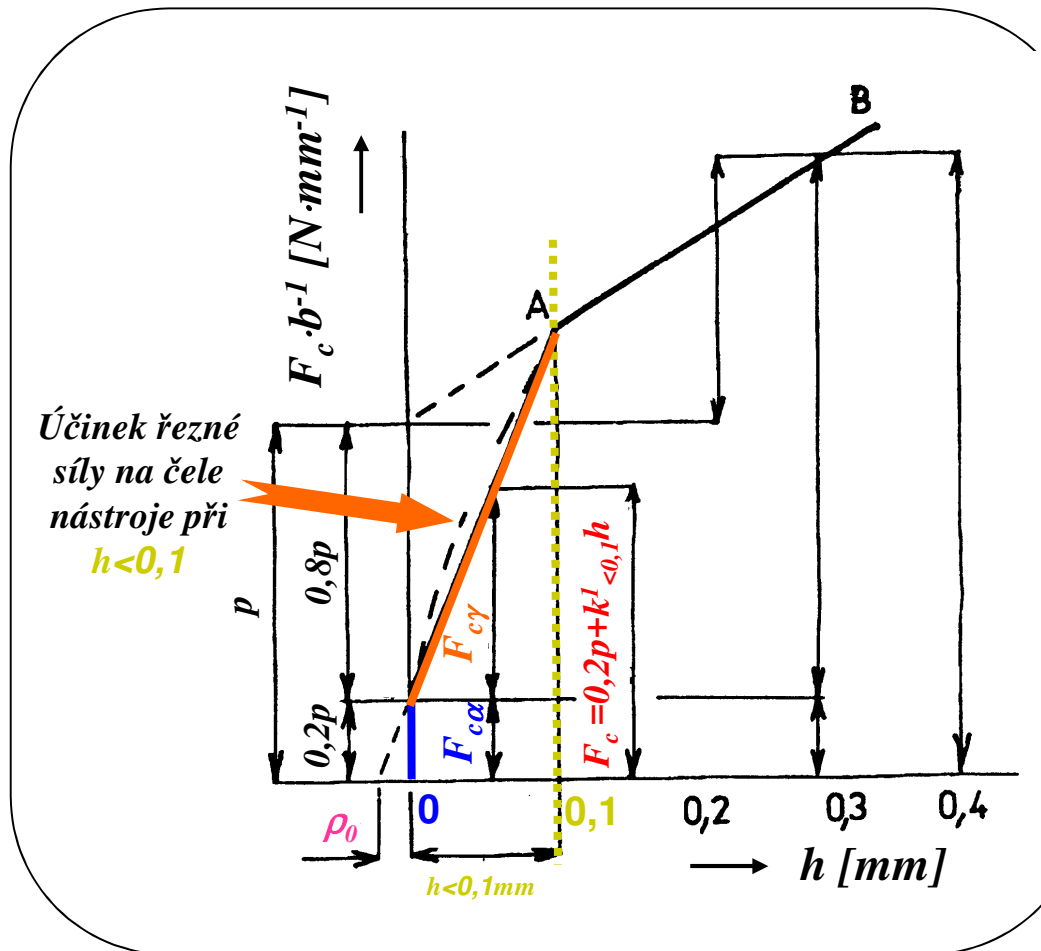
Pod linií pracovní roviny pohybu  
ostří  $P_{se}$  – ostří a hřbet nástroje:

$$F_{c\alpha} = f(F_{\alpha}) = f(p)$$

$F_{\alpha}$  ... síla způsobující pružně plastické deformace dřeva

$F_{c\alpha}$  - složka řezné síly překonávající pružně plastické deformace dřeva (úsek 0-2) a tření na hřbetu nástroje (úsek 2-3)

# Řezání mikrotřísky ostrým nástrojem



Z mnoha experimentálních měření byla stanovena **měrná řezná síla  $p$**  (vztažená na  $b=1$ ), která vyjadřuje fiktivní účinek řezné síly na hřbetu a řezné hraně.

**Síla na hřbetu velmi dobře naostřeného nástroje při řezání „nulové“  $h \rightarrow 0$  mm se rovná 20% celkové měrné řezné síly  $p$ .**

$$F_{c\alpha} = 0,2 p$$

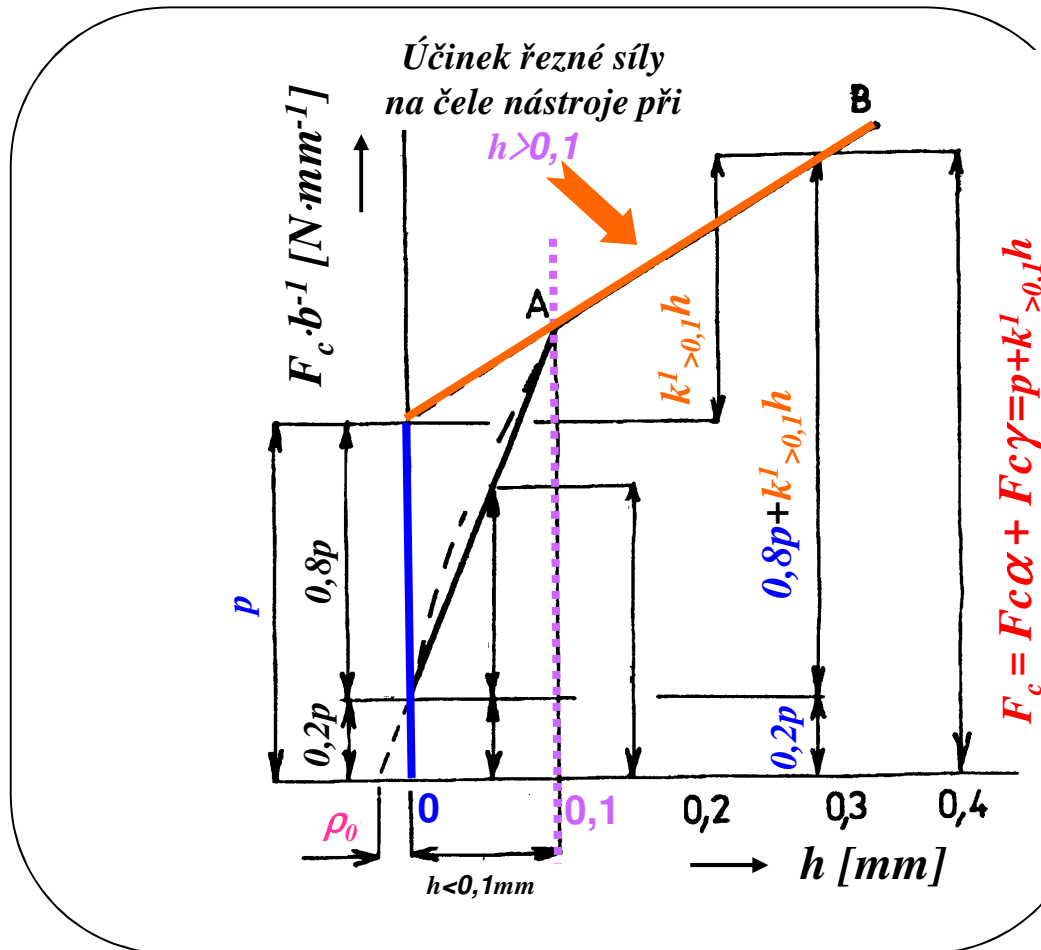
Toto platí až do okamžiku, kdy se začne tvořit minimální mikrotříska. Řezná síla začne lineárně narůstat se zvětšující se tl. třísky  $h$  podle vztahu:

$$F_c = F_{c\alpha} + F_{c\gamma} = 0,2 p + k^1_{<0,1} \cdot h$$

$k^1_{<0,1}$  ... základní měrný řezný odpor pro „mikrotřísku“  $h < 0,1$  mm

$k^1_{>0,1}$  ... základní měrný řezný odpor pro „makrotřísku“  $h > 0,1$  mm

# Řezání makrotřísky ostrým nástrojem



Při větších tloušťkách třísky (nad 0,1 mm) se účinek sil na hřbet nože a ostří zvýší na plnou hodnotu **měrné řezné síly**  $p$ .

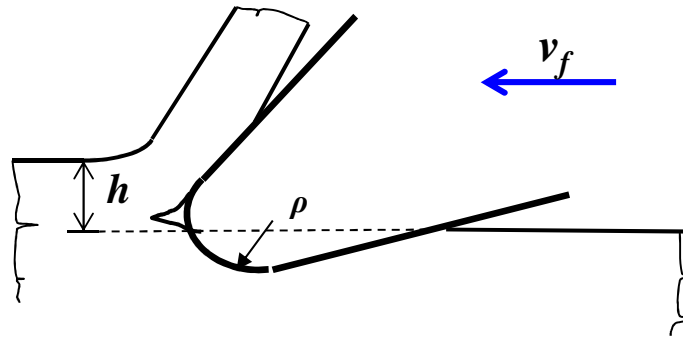
**Řezná síla** dále potom lineárně roste se zvětšující se tloušťkou třísky, ale s menší směrnici podle vztahu:

$$F_c = F_{c\alpha} + F_{c\gamma} = p + k^l_{>0,1} \cdot h$$

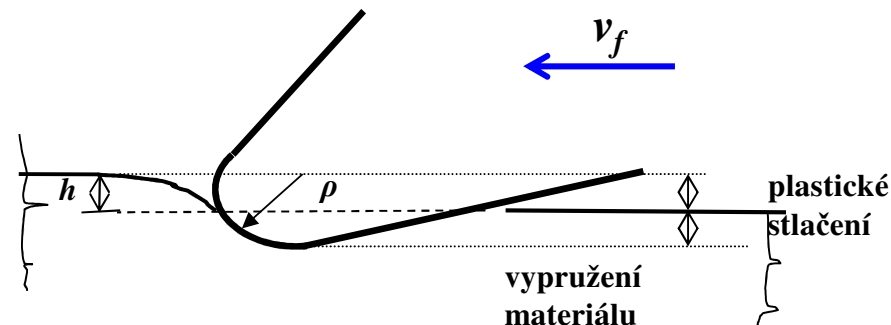
$k^l_{>0,1}$  ... základní měrný řezný odpor pro „makrotřísku“  $h > 0,1 \text{ mm}$

# ***Vliv otupení nástroje na vznik třísky***

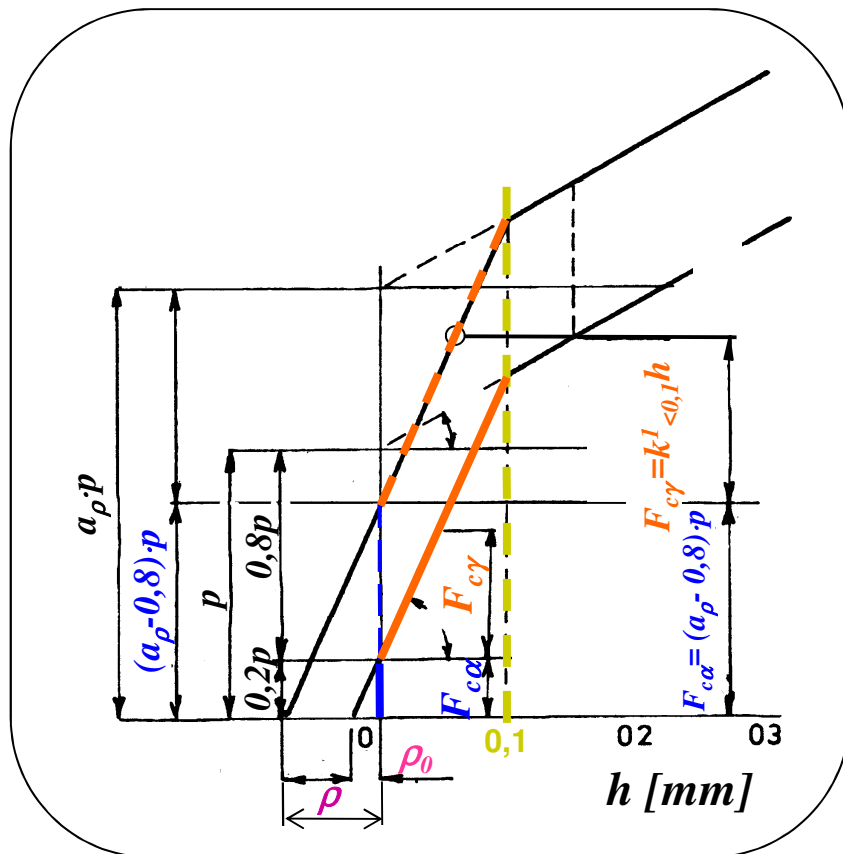
**Tříska vznikne jen tehdy, když poloměr zaoblení břitu nástroje bude  
< než tloušťka vznikající třísky**



**Tříska nevznikne, když poloměr otupení břitu nástroje bude > než  
tloušťka předpokládané třísky**



# Otupený nástroj a složky řezné síly



Síla na hřbetu otupeného nástroje  $F_{c\alpha}$  je podstatně větší než u ostrého. Tento nárůst je vyjadřován součinitelem otupení ostří  $a_\rho$ .

*Síla na hřbetu nástroje se rovná (20%  $a_\rho$ ):*

$$F_{c\alpha} = a_\rho \cdot p - 0,8 \cdot p = (a_\rho - 0,8) \cdot p$$

Řezná síla pro mikrotřísku  $h < 0,1 \text{ mm}$ :

$$F_c = F_{c\alpha} + F_{c\gamma} = (a_\rho - 0,8) \cdot p + k_{<0,1}^I \cdot h$$

*V počátku souřadného systému se  $h \rightarrow 0$  a  $F_c \rightarrow 0$ . Tloušťka třísky nemůže být menší než je poloměr otupení ostří, tedy platí  $h = -\rho$ :*

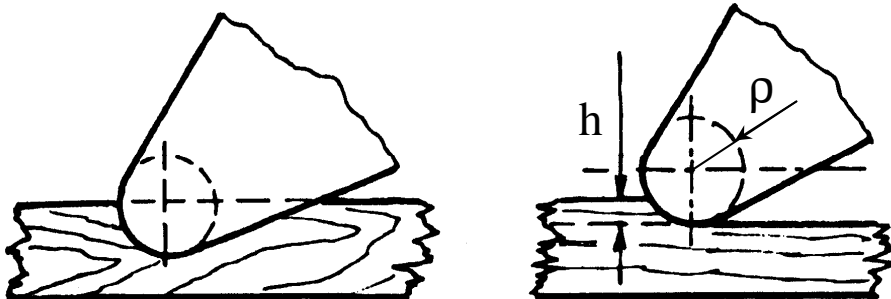
$$h = \frac{(a_\rho - 0,8) \cdot p}{k_{<0,1}^\rho} = -\rho$$

$$k_{<0,1}^\rho = \frac{(a_\rho - 0,8) \cdot p}{h}$$

Tento výraz je používán v analytické teorii pro vyjádření přírůstku měrného řezného odporu  $k_c$  v závislosti na otupení nástroje.

# Součinitel otupení ostří $a_\rho$

*Tříska nevznikne když  $\rho \geq h$*



Z předešlého grafu pro poloměry otupení ostří dostaneme:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{a_\rho - 0,8}{0,2}$$

Odtud koeficient otupení ostří: 
$$a_\rho = 0,2 \cdot \frac{\rho}{\rho_0} + 0,8 = \frac{0,2 \cdot \Delta\rho}{\rho_0} + \frac{0,2 \cdot \rho_0}{\rho_0} + 0,8$$

Za předpokladu, že přírůstek opotřebení ostří je:

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0$$

Dosazením za  $\rho = \Delta\rho + \rho_0$  do rovnice pro  $a_\rho$  dostaneme finální upravený vztah pro výpočet koeficientu otupení ostří  $a_\rho$  v závislosti na zvětšujícím se poloměru zaoblení ostří  $\rho$

$$a_\rho = 1 + \frac{0,2\Delta\rho}{\rho_0}$$

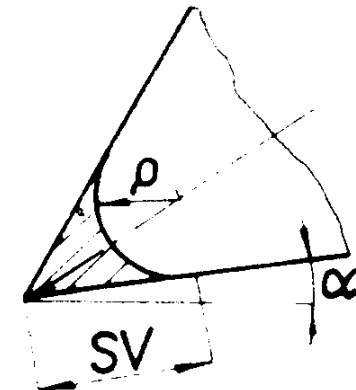
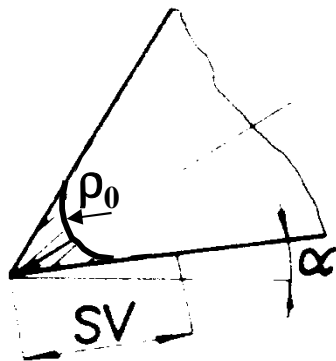
# ***Přírůstek otupení břitu nástroje***

Dobře nabroušené frézovací nože  
(zuby) obvykle mají počáteční  
poloměr ostří  
 $\rho_0 = 4 \text{ až } 10 \mu\text{m}$ .

$$a_\rho = 1 + \frac{0,2\Delta\rho}{\rho_0}$$

Zvětšení zaoblení ostří  $\Delta\rho$   
v závislosti na efektivní délce  
(frézování) řezání  $L$  lze vypočítat  
podle vztahu

$$\Delta\rho = \varepsilon \cdot L$$



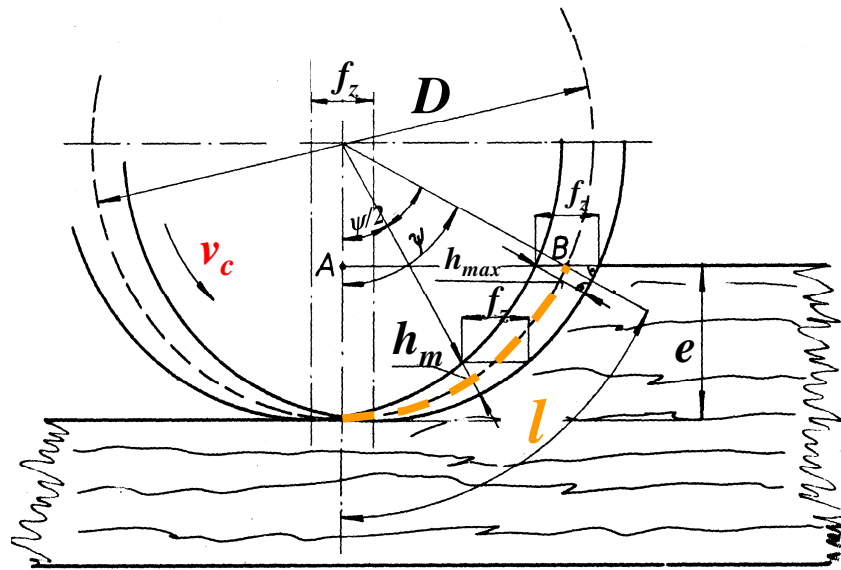
$\varepsilon$  ... opotřebení břitu na 1 m délky řezu (podle Prokeš, 1978:

- pro měkké jehličnaté dřevo  $\varepsilon = 0,0016 \mu\text{m/bm}$ ,
- pro tvrdé listnaté dřevo  $\varepsilon = 0,002 \mu\text{m/bm}$ ,

**Poznámka:** Platí pro nástroje z ocelí 19 423 a 19 712.

- pro rychlořeznou ocel je nutné násobit 0,5
- pro slinuté karbidy je nutné násobit 0,3 až 0,5.

# *Délka třísky a řezná délka*



$l$  – délka záběru jednoho nože během jedné otáčky  
(pro zjednodušení při výpočtu uvažujeme kruhový oblouk)

$\psi$  – úhel záběru

$$\hat{l} = \frac{\pi \cdot D \cdot \psi}{360} = 0,0175 \cdot R \cdot \psi = 0,0175 \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{D/2 - e}{D/2}\right)$$

Celková řezná délka břitu (zubu) za dobu obrábění  $t$ :

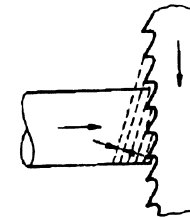
$$L = l \cdot n \cdot t$$

## 2.2 Analytická teorie pro řezání ve spáře

Řezání ve spáře je charakterizováno a nejčastěji realizováno třemi řeznými hranami a dvěma modely řezání a je typické pro pilařské technologie:

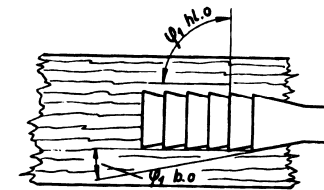
Hlavní ostří:      Řezání podélně - čelní (  $\parallel$  -  $\perp$  )

$$\varphi_0 = 0^\circ \quad \varphi_1 = 90^\circ \quad \varphi_2 = \arctg(t/fz) (^\circ) \quad \varphi_3 = 90^\circ$$



Boční ostří:      Řezání tangenciálně-příčně-podélné (  $\perp$  -  $\perp$  -  $\parallel$  )

$$\varphi_0 \neq 0^\circ \quad \varphi_1 = 6^\circ 50' \quad \varphi_3 = \arctg(t/fz) (^\circ)$$



pěchované zuby

Poznámka: Bočním ostrím je obvykle formován povrch řezné spáry a při jeho utváření zákonitě dochází ke zvyšování řezné síly. Podobně jako u technologicko-statistické metody je nárůst měrného řezného odporu také způsoben zvýšeným třením boku nástroje v řezné spáře.

# ***Měrný řezný odpor pro podélné řezání s makrotřískou $h > 0,1 \text{ mm}$***

**a) pěchované zuby**

$$k_c = k_{>0,1}^I + \frac{a_p \cdot p}{h} + \frac{\xi \cdot e}{b} \quad (\text{daN.mm}^{-2})$$

**b) rozvedené zuby:**

$$k_c = k_{>0,1}^I + \frac{a_p \cdot p}{h \cdot \frac{b}{s_1}} + \frac{\xi \cdot e}{b} \quad (\text{daN.mm}^{-2})$$

$k_{>0,1}^I$  ... základní měrný řezný odpor pro „makrotřísku“  $h > 0,1 \text{ mm}$

$h$  ... tloušťka třísky

$s_1$  ... tloušťka těla pilového listu, kotouče, pásu

$\xi$  ... jednotkový měrný řezný odpor potřebný k překonání tření bočního ostří (nástroje) v řezné spáře, současně je zde zahrnut způsob úpravy řezné části nástroje (např. zuby rozvedené  $\xi = 0,02 \text{ daN/mm}^2$ , zuby pěchované, stelitované nebo ze slinutých karbidů  $\xi = 0,015 \text{ daN/mm}^2$ )

# ***Měrný řezný odpor pro podélné řezání s mikrotřískou $h < 0,1 \text{ mm}$***

**a) pěchované zuby:**

$$k_c = k_{<0,1}^I + k_{<0,1}^\rho + k_{<0,1}^\xi = k_{<0,1}^I + \frac{(a_\rho - 0,8) \cdot p}{h} + \frac{\xi \cdot e}{b} \quad (\text{daN.mm}^{-2})$$

**b) rozvedené zuby:**

$$k_c = k_{<0,1}^I + \frac{(a_\rho - 0,8) \cdot p}{h_{str} \cdot \frac{b}{s_1}} + \frac{\xi \cdot e}{b} \quad (\text{daN.mm}^{-2})$$

$k_{<0,1}^I$  ... základní měrný řezný odpor pro „mikrotřísku“  $h < 0,1 \text{ mm}$

$a_\rho$  ... koeficient otupení ostří

$h$  ... tloušťka třísky

$s_1$  ... tloušťka těla pilového listu (kotouče, pásu)

$\xi$  ... jednotkový měrný řezný odpor potřebný k překonání tření bočního ostří (nástroje) v řezné spáře, současně je zde zahrnut způsob úpravy řezné části nástroje (např. zuby rozvedené  $\xi = 0,02 \text{ daN/mm}^2$ , zuby pěchované, stelitované nebo ze slinutých karbidů  $\xi = 0,015 \text{ daN/mm}^2$ )

# Výpočet řezné síly a výkonu pro tloušťkovací frézku



1 – stojan stroje, 2 – pracovní stůl, 3 – protihlukový kryt, 4 –  
obslužný pult stroje, 5 – digitální ukazatel výškového nastavení  
pracovního stolu (přesnost 0,1 mm)

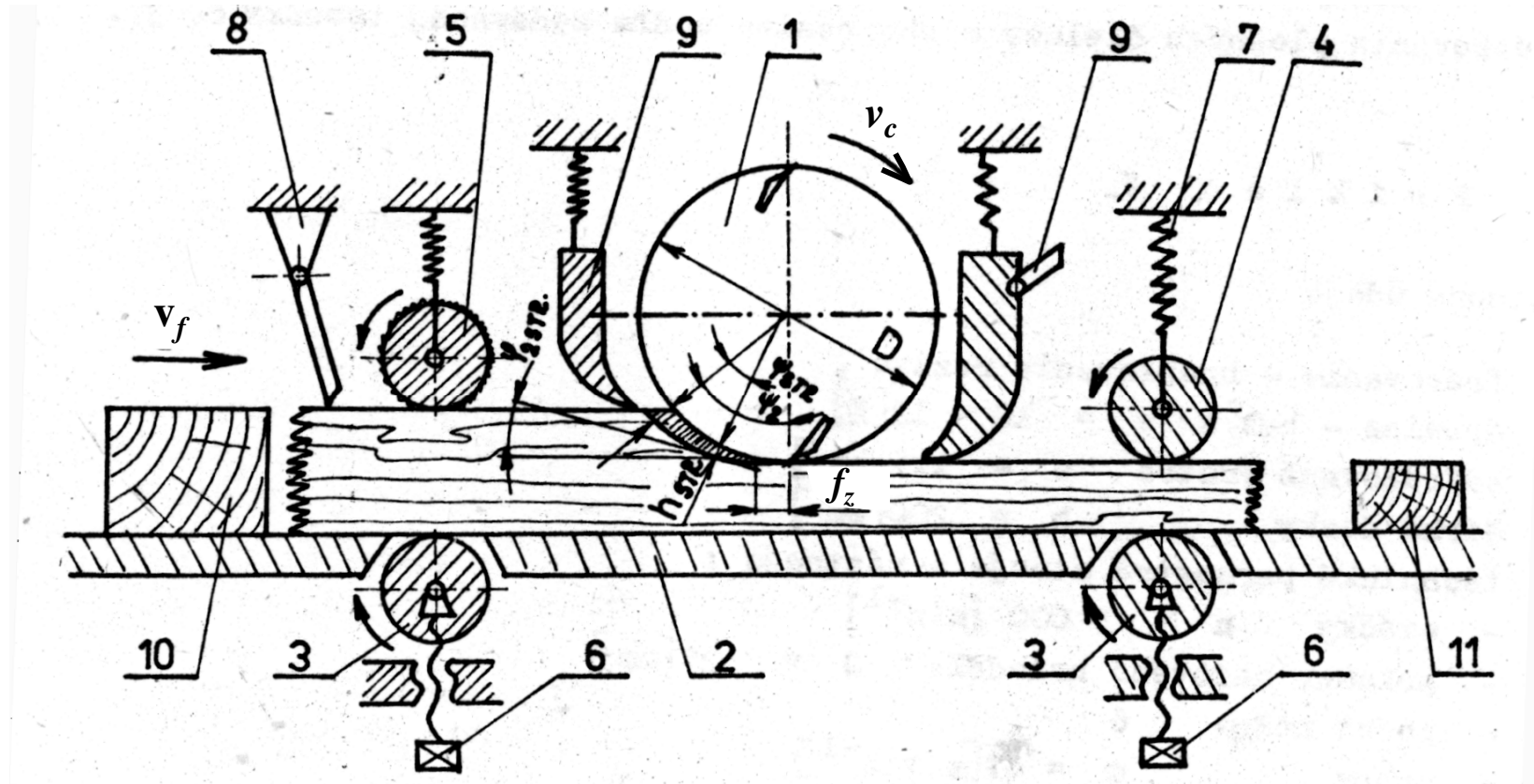
Průměr nožového hřídele závisí na  
jeho délce, obvykle bývá:

- délka do 600 mm ►  $\phi$  80 ÷ 130 mm
- délka do 1200 mm ►  $\phi$  160 mm.

Počet nožů - 2 až 6.

Nožový hřídel je uložený ve dvou  
kuličkových ložiskách, pracuje  
při otáčkách od 3000 do 7500 min<sup>-1</sup>  
Uložený je v dvou radiálních ložiskách.

# Technologické schéma

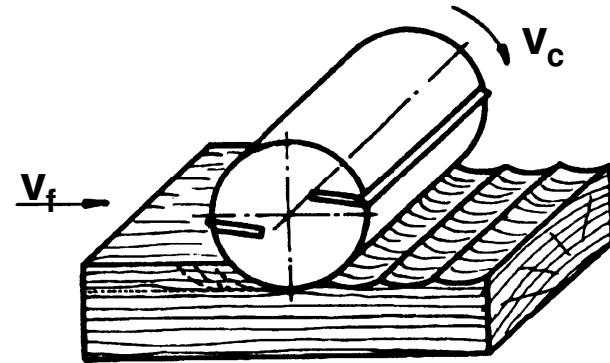


1-nožový hřídel, 2-pracovní stůl, 3-spodní podávací válce, 4-horní podávací válec – zadní, 5-přední podávací válec, 6-mechanismus zdvihu stolu, 7-tlačné pružiny, 8- ochranná páka proti zpětnému vrhu obrobku, 9-přítlačné lišty, 10-materiál před opracováním, 11-materiál po opracování

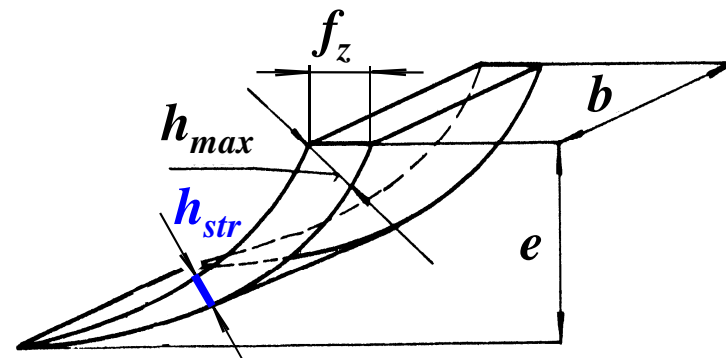
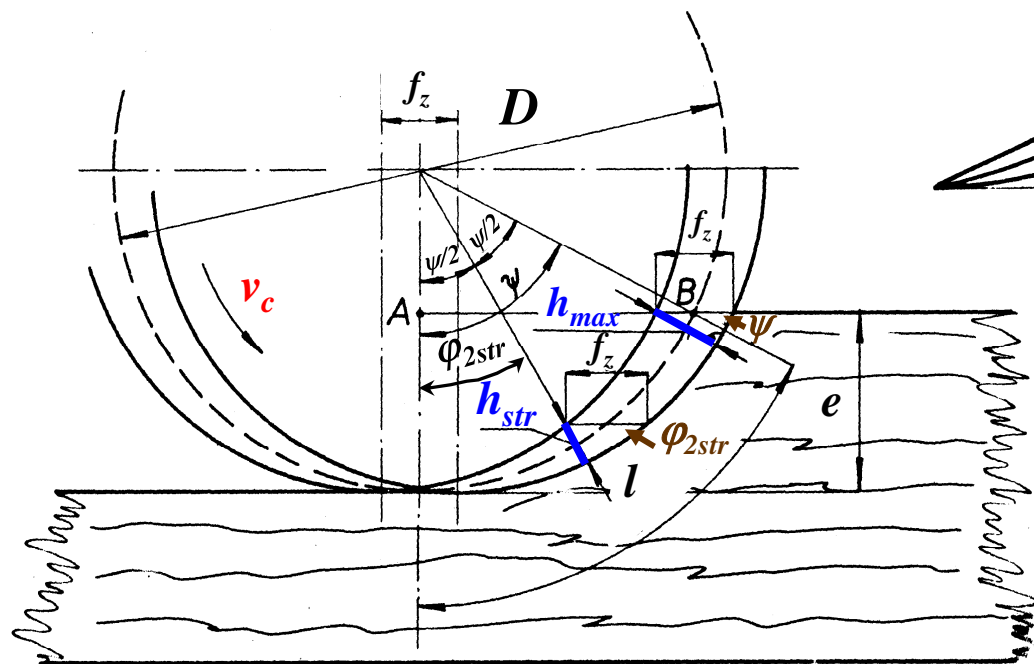
# Řezné podmínky

- dřevina
- vlhkost
- teplota dřeva
- odfrézovaná vrstva
- šířka desky
- otáčky nožového hřídele
- průměr nožového hřídele
- počet nožů
- úhel řezu
- posuvná (podávací) rychlost obrobku
- doba řezání

bříza (BR)  
 $w = 12 \%$   
 $T = 20^\circ$   
 $e = 3 \text{ mm}$   
 $b = 150 \text{ mm}$   
 $n = 5100 \text{ min}^{-1}$   
 $D = 128 \text{ mm}$   
 $z = 2$   
 $\delta = 60^\circ$   
 $v_f = 12 \text{ mm min}^{-1}$   
 $t = 2 \text{ h}$



# Střední tloušťka třísky



$$\cos \psi = \frac{D/2 - e}{D/2} = 1 - \frac{e}{R}$$

z teorie goniometrické funkce poloviny úhlu platí vztah

$$\sin(\psi/2) = \sqrt{\frac{1 - \cos \psi}{2}} = \sqrt{\frac{e}{D}}$$

$$h_{str} = f_z \cdot \sin(\psi / 2) = f_z \cdot \sin(\varphi_{2str}) = f_z \cdot \sqrt{\frac{e}{D}} = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{e}{D}} = \frac{12 \cdot 1000}{5100 \cdot 2} \cdot \sqrt{\frac{3}{128}} = 0,18mm$$

# Měrný řezný odpor

*Pro frézování s tloušťkou třísky větší jak ( $h_{str} = 0,18 \text{ mm}$  - makrotříska) platí vztah:*

$$k_c = k_{>0,1}^I + k_{>0,1}^{\rho} = \left( A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c - C_{\varphi_2} \right) + \frac{a_{\rho} \cdot p}{h_{str}}$$

**Poznámka:** Při řezných rychlostech u frézování, které jsou nižší než  $v_c = 40 \text{ ms}^{-1}$  je nutné ve vzorci použít opravnou konstantu ( **$90 - v_c$** ) – aktuální řezná rychlost je:  **$v_c = 34 \text{ ms}^{-1}$** .  
Pro jinou dřevinu než borovici je nutné měrný řezný odpor násobit koeficientem druhu dřeviny  **$k_d$** .

$$k_c = k_{>0,1}^I + k_{>0,1}^{\rho} = \left[ A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot (90 - v_c) - C_{\varphi_2} \right] \cdot k_d + \frac{a_{\rho} \cdot p}{h_{str}} \cdot k_d$$

$k_c$  ... měrný řezný odpor

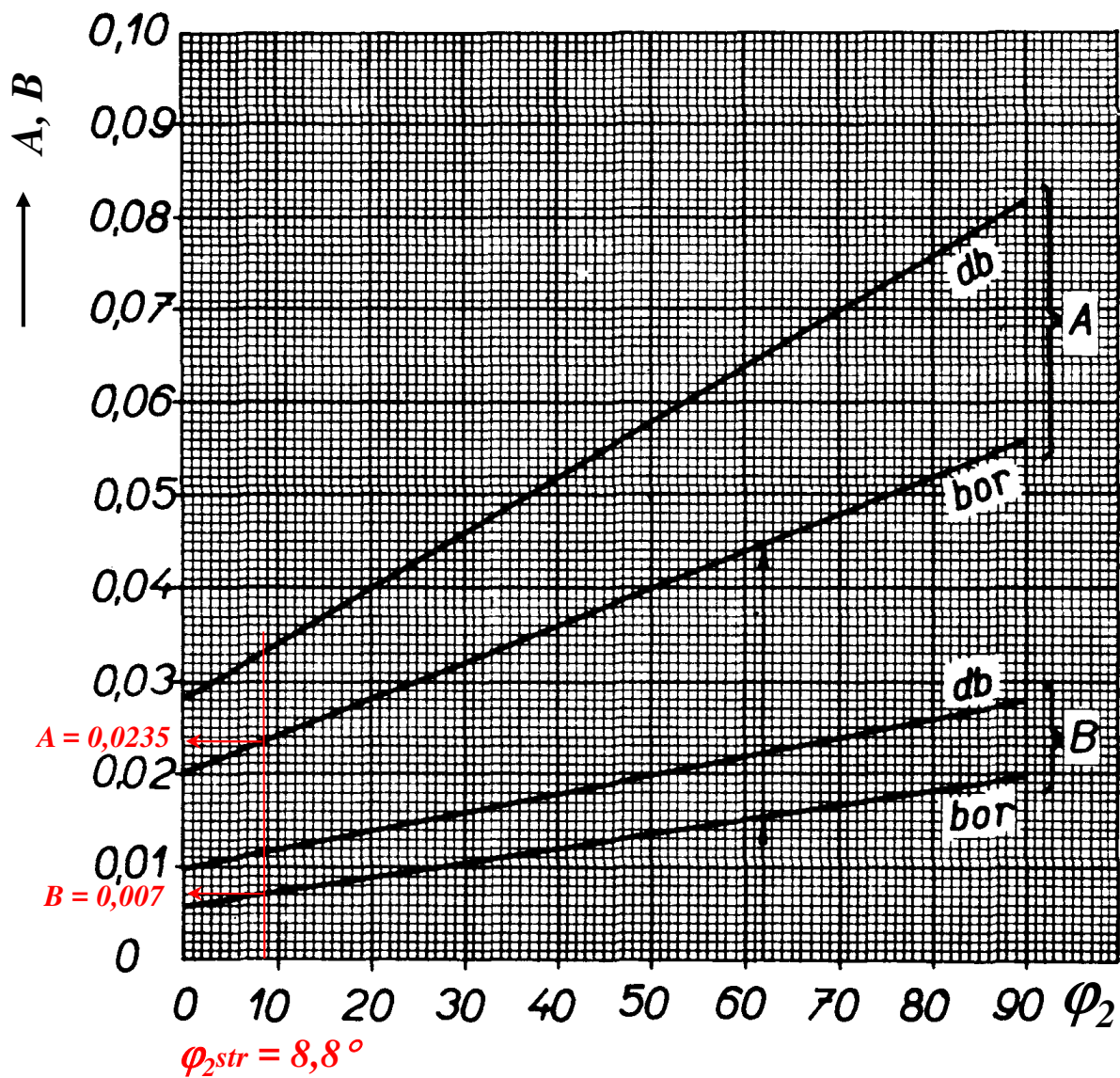
$k_{>0,1}^I$  ... základní měrný řezný odpor pro „makrotřísku“  $h > 0,1 \text{ mm}$

$k_{>0,1}^{\rho}$  ... přírůstek základního měrného řezného odporu vlivem otupení nástroje

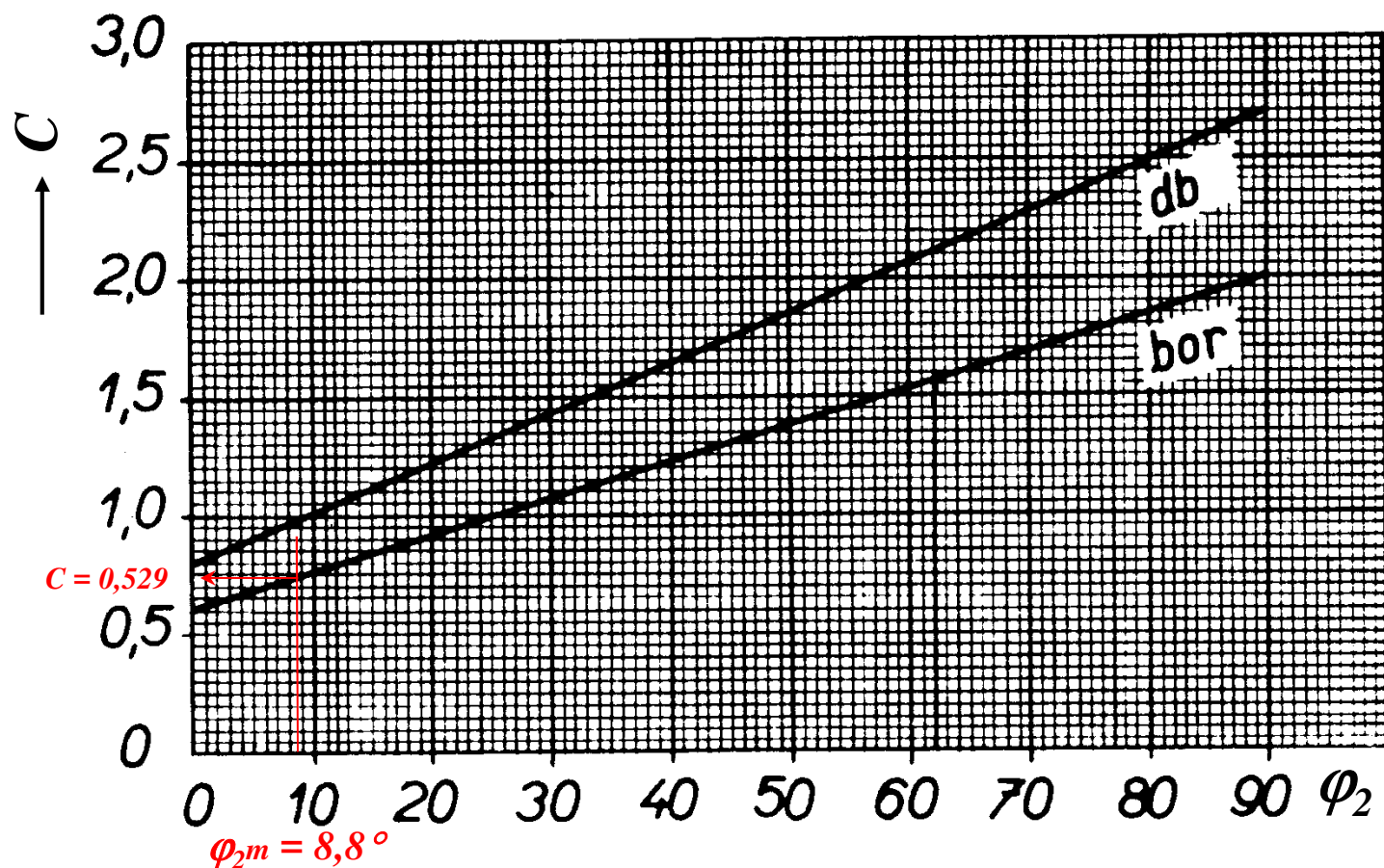
$a_{\rho}$  ... koeficient otupení ostří

$k_d$  ... koeficient dřeviny

# *Hodnoty parametrů $A$ , $B$*

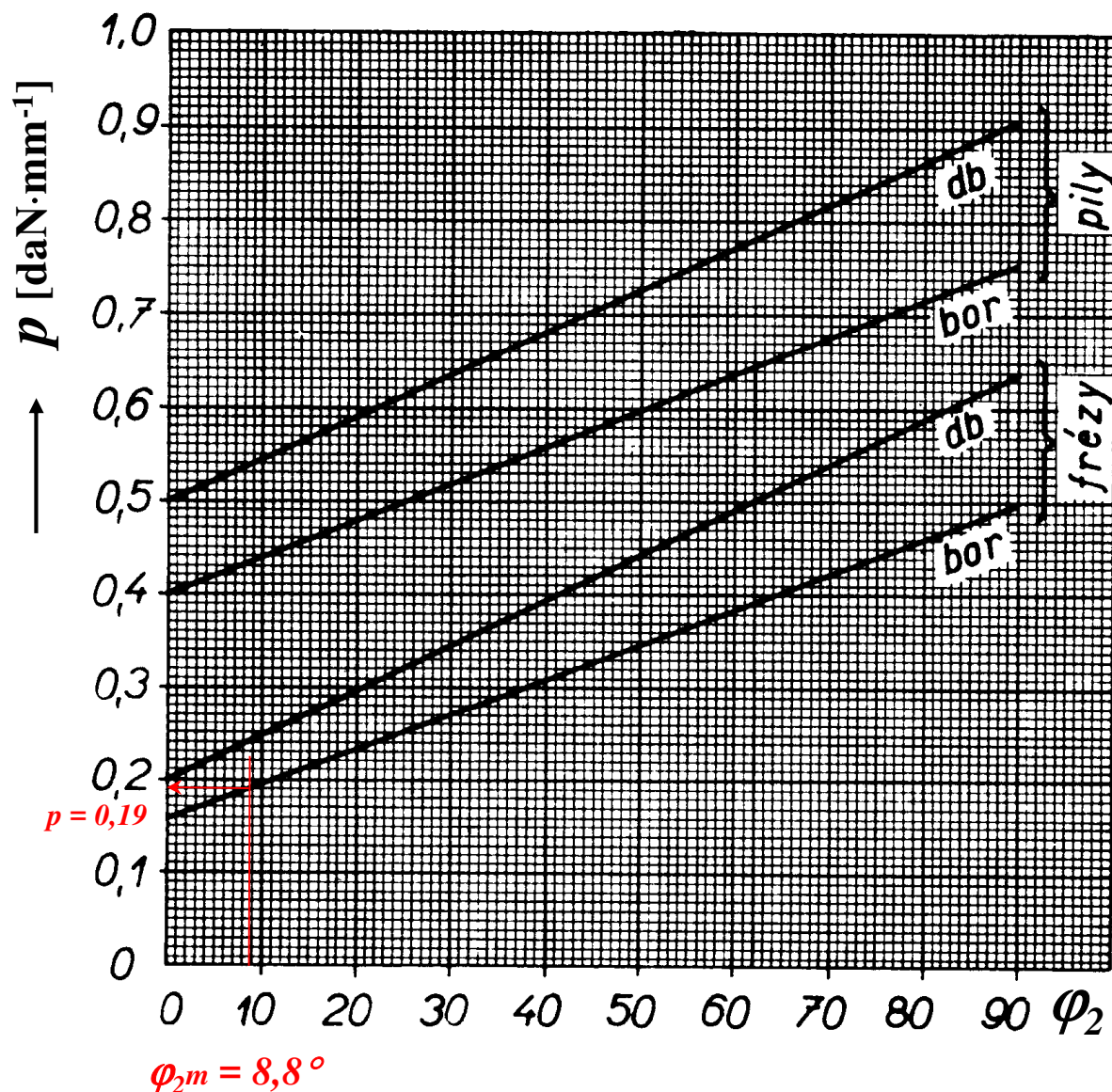


# *Nomogram pro zjištění hodnot $C$ (Prokeš)*

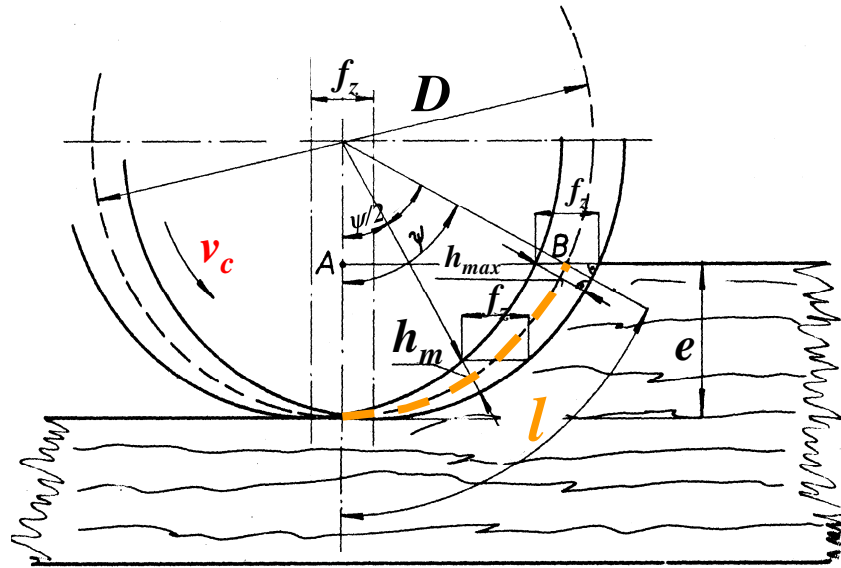


Poznámka: Nomogram platí pro tloušťky třísky větší než  $h > 0,1\text{mm}$

# *Nomogram pro jednotkovou měrnou řeznou sílu - podélné řezání a frézování*



# Délka třísky a řezná délka



$l$  – délka záběru jednoho nože během jedné otáčky  
 $\psi$  – úhel záběru

$$l = \frac{\pi \cdot D \cdot \psi}{360} = 0,0175 \cdot R \cdot \psi = 0,0175 \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{D/2 - e}{D/2}\right) = 0,0175 \cdot 64 \cdot \arccos\left(\frac{64 - 3}{64}\right) = 19,73 \text{ mm}$$

Celková řezná délka nože po dobu frézování  $t = 2 \text{ h}$ :

$$L = l \cdot n \cdot t = 0,01973 \cdot 5100 \cdot 120 = 12075 \text{ m}$$

# *Koeficient otupení ostří*

Dobře nabroušené frézovací nože z rychlořezné oceli 19824 měly počáteční poloměr ostří  $\rho_0 = 5\mu m$ .

$$a_\rho = 1 + \frac{0,2\Delta\rho}{\rho_0}$$

zvětšení zaoblení ostří  $\Delta\rho$  v závislosti na efektivní délce řezání  $L$  (po době frézování  $t = 2$  h) lze vypočítat podle vztahu

$$\Delta\rho = \varepsilon \cdot L = 0,0008 \cdot 12075 = 9,66\mu m$$

Koeficient otupení ostří nožů potom bude:

$$a_\rho = 1 + \frac{0,2\Delta\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{0,2 \cdot \varepsilon \cdot L}{\rho_0} = 1 + \frac{0,2 \cdot 0,0008 \cdot 12075}{5} = 1,386$$

$\varepsilon$ ... opotřebení břitu na 1 m délky řezu (podle Prokeš, 1978 - pro měkké jehličnaté dřevo  $\varepsilon = 0,0016 \mu m/bm$ , pro tvrdé listnaté dřevo  $\varepsilon = 0,002 \mu m/bm$ , platí pro nástroje z ocelí 19 423 a 19 712, pro rychlořeznou ocel je nutné násobit 0,5, pro slinuté karbidy je nutné násobit 0,3 až 0,5.

V našem případě volíme  $\varepsilon = 0,00160,5 = 0,0008$ .

# Výpočet měrného řezného odporu

$k_{>0,1}^I$  ... základní měrný řezný odpor pro „makrotřísku“  $h > 0,1 \text{ mm}$

$$k_{>0,1}^I = [A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot (90 - v_c) - C_{\varphi_2}] \cdot k_d = \\ = [0,0235 \cdot 60 + 0,007 \cdot (90 - 34) - 0,529] \cdot 1,25 = 1,59 \text{ daN} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$k_{>0,1}^P$  ... přírůstek základního měrného řezného odporu vlivem otupení nástroje

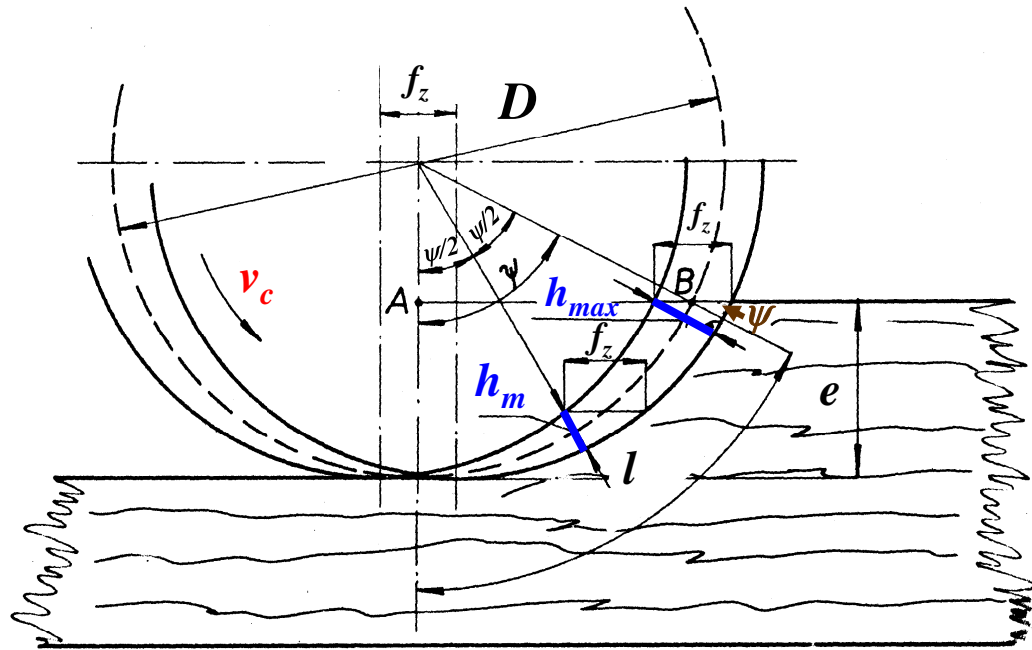
$$k_{>0,1}^P = \frac{a_\rho \cdot p}{h_{str}} \cdot k_d = \frac{1,386 \cdot 0,19}{0,18} \cdot 1,25 = 1,82 \text{ daN} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$k_c$  ... měrný řezný odpor

$$k_c = (k_{>0,1}^I + k_{>0,1}^P) \cdot 10 = (1,59 + 1,82) \cdot 10 = 34,1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

**Poznámka:** Výsledek je nutné vynásobit 10-ti, aby byl měrný řezný odpor vyjádřen v běžně používaných jednotkách  $\text{Nmm}^{-2}$  (MPa)

# Řezná síla a řezný výkon



Řezná síla:

$$F_c = k_c \cdot b \cdot e \cdot \frac{v_f}{v_c} = 34,1 \cdot 10^6 \cdot 0,15 \cdot 0,003 \cdot \frac{12}{60 \cdot 34} = 90,3 \text{ N}$$

Řezný výkon:

$$P_c = F_c \cdot v_c = 90,3 \cdot 34 = 3070 \text{ W}$$

The background of the slide is a close-up photograph of a wood surface, showing a dense pattern of fine, wavy lines and a warm, yellowish-brown color palette. The texture is organic and slightly uneven, with some darker spots and variations in tone.

### **3. Objemová metoda**

# Princip

*Objemová metoda je založena na zjištění měrné řezné práce  $e_c$  ( $J \cdot cm^{-3}$ ) vztažené k objemu dřeva  $V_s$  ( $cm^3 \cdot s^{-1}$ ) přeměněného na třísky za 1s.*

*Velikost řezného výkonu a řezné síly se pak vypočítá podle vztahů:*

$$P_c = e_c \cdot V_s \quad (W) \qquad F_c = \frac{P_c}{v_c} \quad (N)$$

$v_c$  - řezná rychlost (m/s)

*Sekundový objem dřeva přeměněného na třísky:*

$$V_s = S \cdot v_f = b \cdot e \cdot v_f \quad (cm^3 \cdot s^{-1})$$

$b$  - šířka řezné spáry (cm),

$e$  - řezná výška (cm)

$v_f$  - podávací rychlost (cm/s)

*Měrná řezná práce  $e_c$  se vypočítá následovně:*

$$e_c = e_c^1 \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_\rho \cdot k_\delta \cdot k_t \cdot k_e = e_c^1 \cdot k_{co} \quad (J \cdot cm^{-3})$$

*Poznámka:* Jednotlivé technologie obrábění mají rozdílnou skladbu koeficientů, viz. dále.

# ***Základní měrná řezná práce- kotoučová pila***

Jednotková měrná řezná síla  $F_c^1$  a jednotková měrná řezná práce  $e_c^1$  při řezání kotoučovou pilou v podélném směru výřezu (borovice,  $w = 10$  až  $15\%$ ,  $\varphi_2 = 60^\circ$ ,  $v_c = 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D = 600 \text{ mm}$ , ostré zuby)

$h_{\text{str}} [\text{mm}]$	$F_c^1 [\text{Nmm}^{-1}]$	$e_c^1 [\text{Jcm}^{-3}]$	$h_{\text{str}} [\text{mm}]$	$F_c^1 [\text{Nmm}^{-1}]$	$e_c^1 [\text{Jcm}^{-3}]$
<b>0,10</b>	9,5	95,0	<b>0,50</b>	23,8	47,5
<b>0,15</b>	12,0	80,0	<b>0,60</b>	26,4	44,0
<b>0,20</b>	14,2	71,0	<b>0,80</b>	31,2	39,0
<b>0,25</b>	16,0	64,0	<b>1,00</b>	36,0	36,0
<b>0,30</b>	18,0	60,0	<b>1,20</b>	40,8	34,0
<b>0,35</b>	19,3	55,0	<b>1,40</b>	44,8	32,0
<b>0,40</b>	21,0	52,5	<b>1,60</b>	48,8	30,5
<b>0,45</b>	22,5	50,0	<b>2,00</b>	56,0	28,0

**Poznámka:** Pro ostatní technologie je možné tabelované hodnoty nalézt např.v „Holopírek, 2000: Teorie řezných odporů při obrábění dřeva“.

# ***Základní měrná řezná práce - frézování***

Jednotková měrná řezná síla  $F_{c1}^1$  a měrná řezná práce  $e_c^1$  při frézování, podélně-čelní model (borovice,  $w = 10$  až  $15\%$ ,  $\varphi_2 = 60^\circ$ ,  $v_c = 20$  až  $40 \text{ ms}^{-1}$ ,  $\delta = 50^\circ$  až  $60^\circ$ , ostré nože)

$h_{str}$ [mm]	$F_c^1$ [Nmm <sup>-1</sup> ] při úhlu frézování vláken $\varphi_2$ [°]					$e_c^1$ [J·cm <sup>-3</sup> ] při úhlu frézování vláken $\varphi_2$ [°]				
	0	15	30	45	90	0	15	30	45	90
<b>0,025</b>	0,9	1,1	1,4	1,6	2,4	37	43	54	65	97
<b>0,05</b>	1,7	2,0	2,5	2,9	3,5	33	39	50	57	79
<b>0,1</b>	2,5	3,3	4,1	4,6	6,0	25	33	41	46	60
<b>0,2</b>	3,4	4,4	5,6	6,6	8,8	17	22	28	33	44
<b>0,3</b>	3,9	5,1	6,6	8,1	10,8	13	17	22	27	36
<b>0,4</b>	4,6	5,8	7,6	9,6	12,8	11,5	14,5	19	24	32
<b>0,5</b>	5,3	7,0	8,5	10,5	15,0	10,5	14,0	17	21	30
<b>0,6</b>	6,0	7,8	10,2	12,0	16,8	10,0	13,0	17	20	28
<b>0,7</b>	7,0	9,2	11,4	14,0	18,8	10,0	13,0	16	20	27

# *Opravné součinitele*

- $k_d$  - opravný součinitel vlivu dřeviny - tab. 4
- $k_w$  - opravný součinitel vlivu vlhkosti - tab. 5
- $k_t$  - opravný součinitel teploty - tab. 6 - 7
- $k_v$  - opravný součinitel vlivu řezné rychlosti - tab. 8
- $k_p$  - opravný součinitel vlivu otupení ostří - tab. 9
- $\mu$  - ukazatel intenzity změny  $K$  v závislosti na modelu řezání a úhlu  $\varphi_2$  - tab. 10
- $k_h$  - opravný součinitel vlivu tloušťky třísky - tab. 11
- $k_\delta$  - opravný součinitel vlivu řezného úhlu - tab. 13  
modelu řezání a úhlu  $\varphi_2$
- $k_e$  - opravný součinitel vlivu řezné výšky - tab. 15
- $k_{co}$  - celkový opravný součinitel.

**Poznámka:** Tabelované hodnoty viz. „Holopírek, 2000: Teorie řezných odporů při obrábění dřeva“.

# ***Celkový opravný součinitel***

Celkový opravný součinitel  $k_{co}$  lze pro jednotlivé procesy řezání zjednodušeně stanovit :

- řezání rámovou pilou  $k_{co} = k_d \cdot k_p$
- řezání pásovou pilou  $k_{co} = k_d \cdot k_w \cdot k_p \cdot k_\delta$
- řezání kotoučovou pilou  $k_{co} = k_d \cdot k_w \cdot k_p \cdot k_\delta \cdot k_v \cdot k_e$
- frézování otevřené  $k_{co} = k_d \cdot k_w \cdot k_p \cdot k_\delta \cdot k_v$
- frézování v drážce  $k_{co} = k_d \cdot k_w \cdot k_p \cdot k_\delta \cdot k_v \cdot k_e$

# Výpočet řezné síly a výkonu pro tloušťkovací frézku



1 – stojan stroje, 2 – pracovní stůl, 3 – protihlukový kryt, 4 –  
obslužný pult stroje, 5 – digitální ukazatel výškového nastavení  
pracovního stolu (přesnost 0,1 mm)

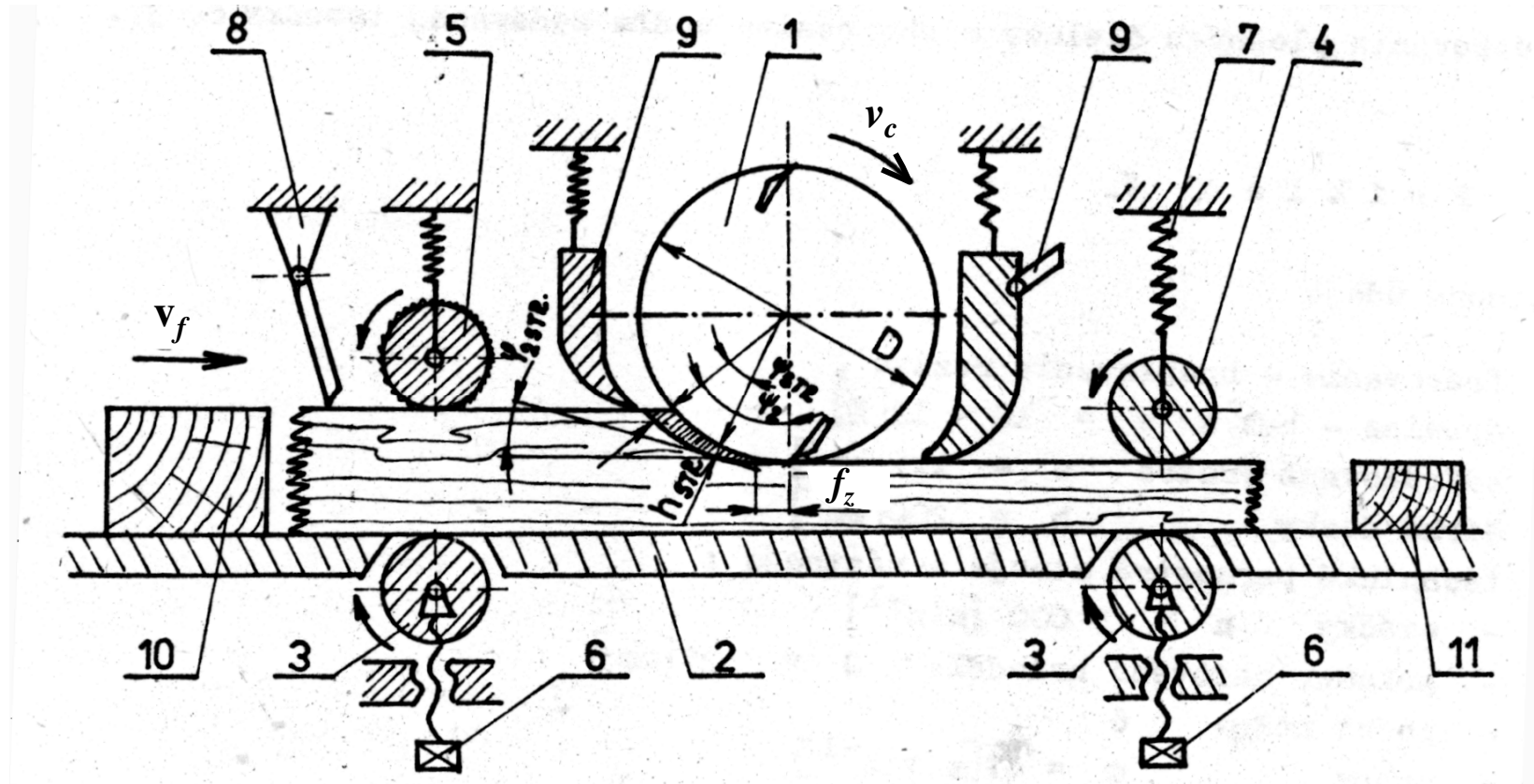
Průměr nožového hřídele závisí na  
jeho délce, obvykle bývá:

- délka do 600 mm ►  $\phi 80 \div 130$  mm
- délka do 1200 mm ►  $\phi 160$  mm.

Počet nožů - 2 až 6.

Nožový hřídel je uložený ve dvou  
kuličkových ložiskách, pracuje  
při otáčkách od 3000 do 7500 min<sup>-1</sup>  
Uložený je v dvou radiálních ložiskách.

# Technologické schéma

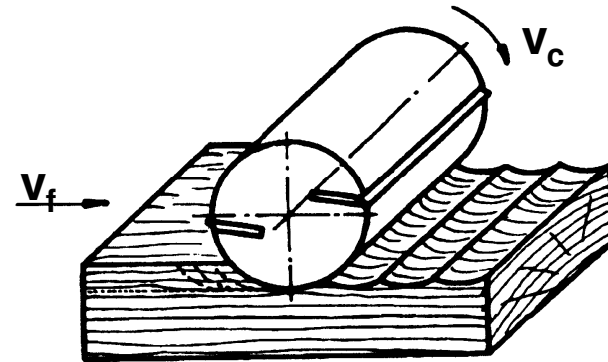


1-nožový hřídel, 2-pracovní stůl, 3-spodní podávací válec, 4-horní podávací válec – zadní, 5-přední podávací válec, 6-mechanismus zdvihu stolu, 7-tlačné pružiny, 8- ochranná páka proti zpětnému vrhu obrobku, 9-přítlačné lišty, 10-materiál před opracováním, 11-materiál po opracování

# Řezné podmínky

- dřevina
- vlhkost
- teplota dřeva
- odfrézovaná vrstva
- šířka desky
- otáčky nožového hřídele
- průměr nožového hřídele
- počet nožů
- úhel řezu
- posuvná (podávací) rychlost obrobku
- doba řezání

bříza (BR)  
 $w = 12 \%$   
 $T = 20^\circ$   
 $e = 3 \text{ mm}$   
 $b = 150 \text{ mm}$   
 $n = 5100 \text{ min}^{-1}$   
 $D = 128 \text{ mm}$   
 $z = 2$   
 $\delta = 60^\circ$   
 $v_f = 12 \text{ mm min}^{-1}$   
 $t = 2 \text{ h}$



# Jednotková měrná řezná práce $e^I_c$

Jednotková měrná řezná síla  $F^I_c$  a jednotková měrná řezná práce  $e^I_c$  při frézování, podélně-čelní model (borovice,  $w = 10$  až  $15\%$ ,  $\varphi_2 = 60^\circ$ ,  $v_c = 20$  až  $40 \text{ ms}^{-1}$ ,  $\delta = 50^\circ$  až  $60^\circ$ , ostré nože)

$h_{str}$ [mm]	$F^I_c$ [Nmm <sup>-1</sup> ] při úhlu frézování vláken $\varphi_2$ [°]					$e^I_c$ [Jcm <sup>-3</sup> ] při úhlu frézování vláken $\varphi_2$ [°]				
	0	15	30	45	90	0	15	30	45	90
						$\varphi_{2str} = 8,8^\circ$				
0,025	0,9	1,1	1,4	1,6	2,4	37	43	54	65	97
0,05	1,7	2,0	2,5	2,9	3,5	33	39	50	57	79
0,1	2,5	3,3	4,1	4,6	6,0	25	33	41	46	60
$h_{str} = 0,18$ 0,2	3,4	4,4	5,6	6,6	8,8	17	22	28	33	44
0,3	3,9	5,1	6,6	8,1	10,8	13	17	22	27	36
0,4	4,6	5,8	7,6	9,6	12,8	11,5	14,5	19	24	32
0,5	5,3	7,0	8,5	10,5	15,0	10,5	14,0	17	21	30
0,6	6,0	7,8	10,2	12,0	16,8	10,0	13,0	17	20	28
0,7	7,0	9,2	11,4	14,0	18,8	10,0	13,0	16	20	27

$e^I_c = 20 \text{ Jcm}^{-3}$

## *Opravné součinitele*

- opravný součinitel vlivu dřeviny  
 $k_d = 1,25$  (bříza)
- opravný součinitel vlivu vlhkosti  
 $k_w = 1$  pro  $w=12\%$
- opravný součinitel vlivu otupení ostří  
 $k_p = 1,3$
- opravný součinitel vlivu řezného úhlu  
 $k_\delta = 1$  pro  $\delta = 60^\circ$
- opravný součinitel vlivu řezné rychlosti  
 $k_v = 1,052$  pro  $v_c = 34 \text{ ms}^{-1}$

**Poznámka:** Tabelované hodnoty viz. „Holopírek, 2000: Teorie řezných odporů při obrábění dřeva“.

# *Řezná síla a řezný výkon*

Měrná řezná práce  $e_c$ :

$$e_c = e_c^I \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_p \cdot k_\delta \cdot k_v = 20 \cdot 1,25 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,052 = 34,2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Sekundový objem dřeva přeměněného na třísky:

$$V_s = S \cdot v_f = b \cdot e \cdot v_f = 15 \cdot 0,3 \cdot 12 \cdot \frac{100}{60} = 90 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Řezný výkon:

$$P_c = e_c \cdot V_s = 34,2 \cdot 90 = 3078 \text{ W}$$

Řezná síla:

$$F_c = \frac{P_c}{v_c} = \frac{3078}{34} = 90,5 \text{ N}$$

A close-up photograph of a light-colored wooden surface, possibly a table or desk. The wood grain is visible, running diagonally from the bottom left towards the top right. A faint, circular, concentric ring pattern is visible on the left side of the image, resembling a ripple in water or a stain. The text "4. Metoda „tabulkové síly“" is overlaid in the center of the image.

## **4. Metoda „tabulkové síly“**

# Princip

Na rozdíl od předcházející metody výpočtu  $P_c$  a  $F_c$  vychází z jednotkové měrné řezné síly  $F_c^1$  [N.mm<sup>-1</sup>], získané na základě mnoha experimentů.

„**Tabulková síla**“  $F_{c1}$  je vztažena na  $b=1\text{mm}$  délky břitu nástroje a experimentálně byla zjištěna pro různou tloušťku třísky  $h$  při konkrétních podmínkách. Vliv různých faktorů na proces řezání je opět zohledněn opravnými součiniteli  $k_i$ .

Tabulková síla  $F_{c1}$ :

$$F_{c1} = F_c^1 \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_\rho \cdot k_\delta \cdot k_t \cdot k_e = F_c^1 \cdot k_{co} \quad (\text{N.mm}^{-1})$$

Celková řezná síla  $F_c$ :

$$F_c = F_{c1} \cdot b \cdot z' \cdot i \quad (\text{N})$$

$b$  - šířka řezné hrany [ mm ]

$z'$  - počet současně řezajících břitů (zubů) v obrobku

$i$  - počet současně řezajících nástrojů (počet pilových listů nebo kotoučů)

Počet současně řezajících zubů v obrobku - pro rotační nástroje platí:

$l$  - délka řezného oblouku, řezná výška [ mm ]

$t_p$  - rozestup ostří nástroje (rozteč zubů) [ mm ]

$$z' = \frac{l}{t_p} \quad (-)$$

# Výpočet řezné síly a výkonu pro tloušťkovací frézku



1 – stojan stroje, 2 – pracovní stůl, 3 – protihlukový kryt, 4 –  
obslužný pult stroje, 5 – digitální ukazatel výškového nastavení  
pracovního stolu (přesnost 0,1 mm)

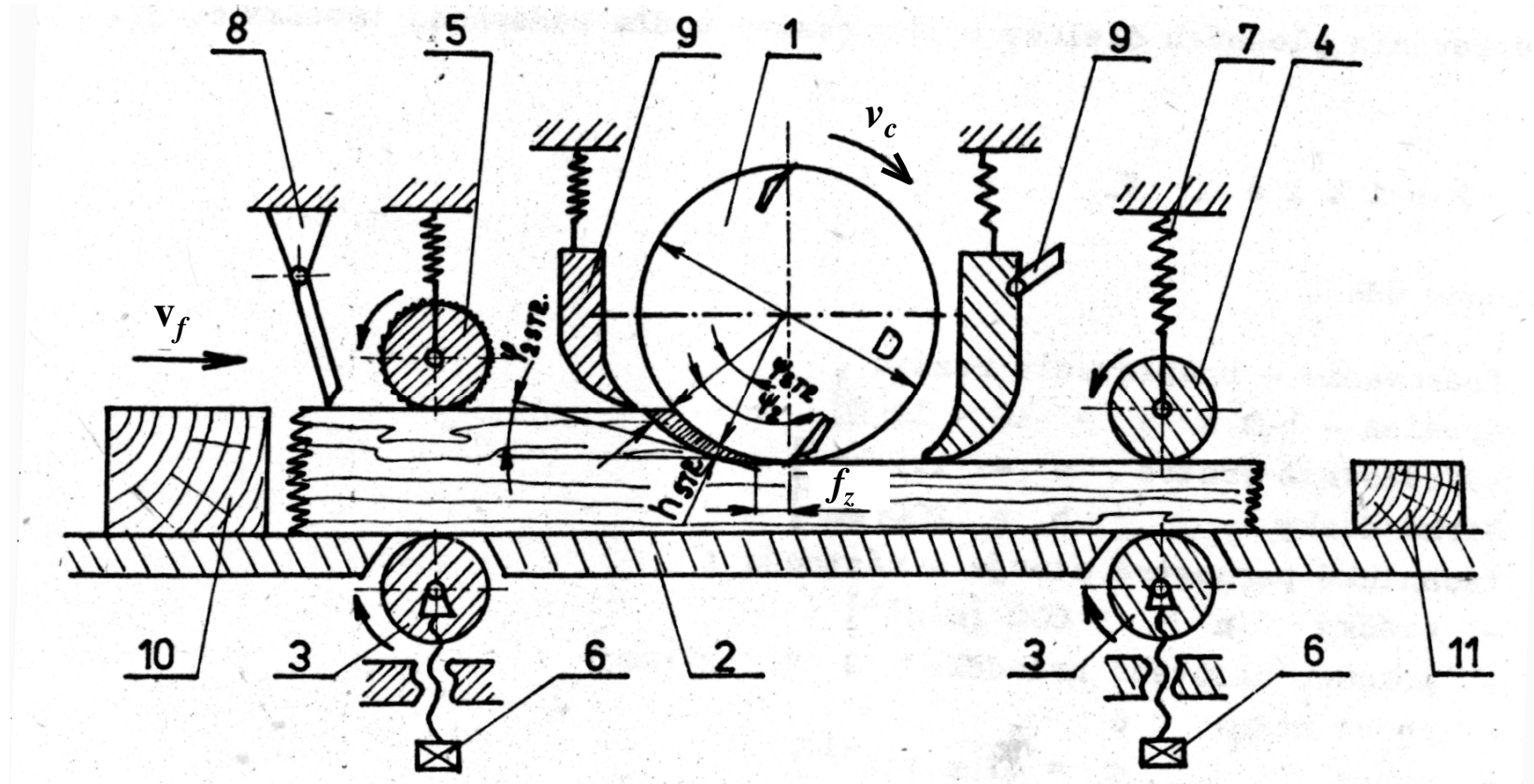
Průměr nožového hřídele závisí na  
jeho délce, obvykle bývá:

- délka do 600 mm ►  $\phi 80 \div 130$  mm
- délka do 1200 mm ►  $\phi 160$  mm.

Počet nožů - 2 až 6.

Nožový hřídel je uložený ve dvou  
kuličkových ložiskách, pracuje  
při otáčkách od 3000 do 7500 min<sup>-1</sup>  
Uložený je v dvou radiálních ložiskách.

# Technologické schéma

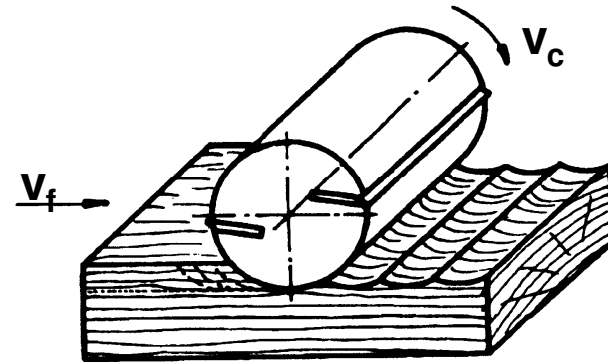


1-nožový hřídel, 2-pracovní stůl, 3-spodní podávací válce, 4-horní podávací válec – zadní, 5-přední podávací válec, 6-mechanismus zdvihu stolu, 7-tlačné pružiny, 8- ochranná páka proti zpětnému vrhu obrobku, 9-přítlačné lišty, 10-materiál před opracováním, 11-materiál po opracování

# Řezné podmínky

- dřevina
- vlhkost
- teplota dřeva
- odfrézovaná vrstva
- šířka desky
- otáčky nožového hřídele
- průměr nožového hřídele
- počet nožů
- úhel řezu
- posuvná (podávací) rychlost obrobku
- doba řezání

bříza (BR)  
 $w = 12 \%$   
 $T = 20^\circ$   
 $e = 3 \text{ mm}$   
 $b = 150 \text{ mm}$   
 $n = 5100 \text{ min}^{-1}$   
 $D = 128 \text{ mm}$   
 $z = 2$   
 $\delta = 60^\circ$   
 $v_f = 12 \text{ mm min}^{-1}$   
 $t = 2 \text{ h}$



„**Tabulková síla**“  $F_{c1}$  je vztažena na  $b=1mm$  délky břitu nástroje a experimentálně byla zjištěna pro různou tloušťku třísky  $h_m$  při konkrétních podmínkách. Vliv různých faktorů na proces řezání je opět zohledněn opravnými součiniteli  $k_i$ .

**Tabulková síla  $F_{c1}$  pro otevřené frézování:**

$$F_{c1} = F_c^1 \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_\rho \cdot k_\delta \cdot k_v = F_c^1 \cdot k_{co} \quad (N.mm^{-1})$$

$k_{co}$  - celkový opravný součinitel je stejný jako u objemové metody

$$k_{co} = k_d \cdot k_w \cdot k_\rho \cdot k_\delta \cdot k_v = 1,25 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,052 = 1,71$$

# Jednotková měrná řezná síla $F_c^1$

Jednotková měrná řezná síla  $F_c^1$  při frézování, podélně-čelní model (borovice,  $w = 10$  až 15%,  $\varphi_2 = 60^\circ$ ,  $v_c = 20$  až 40  $\text{ms}^{-1}$ ,  $\delta = 50^\circ$  až  $60^\circ$ , ostré nože)

$h_m$ [mm]	$F_c^1$ [Nmm <sup>-1</sup> ] při úhlu frézování vláken $\varphi_2$ [°]					$e_c^1$ [Jcm <sup>-3</sup> ] při úhlu frézování vláken $\varphi_2$ [°]				
	0	15	30	45	90	0	15	30	45	90
	$\varphi_{2m} = 8,8^\circ$									
0,025	0,9	1,1	1,4	1,6	2,4	37	43	54	65	97
0,05	1,7	2,0	2,5	2,9	3,5	33	39	50	57	79
0,1	2,5	3,3	4,1	4,6	6,0	25	33	41	46	60
0,2	3,4	4,4	5,6	6,6	8,8	17	22	28	33	44
0,3	3,9	5,1	6,6	8,1	10,8	13	17	22	27	36
0,4	4,6	5,8	7,6	9,6	12,8	11,5	14,5	19	24	32
0,5	5,3	7,0	8,5	10,5	15,0	10,5	14,0	17	21	30
0,6	6,0	7,8	10,2	12,0	16,8	10,0	13,0	17	20	28
0,7	7,0	9,2	11,4	14,0	18,8	10,0	13,0	16	20	27

$h_m = 0,18$

$F_c^1 = 4 \text{ Nmm}^{-1}$

# Řezná síla a řezný výkon

Tabulková síla  $F_{c1}$ :

$$F_{c1} = F_c^I \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_\rho \cdot k_\delta \cdot k_v = F_c^I \cdot k_{co} = 4 \cdot 1,71 = 6,84 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Celková řezná síla  $F_c$ :

$$F_c = F_{c1} \cdot b \cdot z' \cdot i = 6,84 \cdot 150 \cdot 0,098 \cdot 1 = 100,5 \text{ N}$$

$i$  - počet současně řezajících nástrojů (počet pilových listů nebo kotoučů)

$z'$  - počet současně řezajících nožů v obrobku  
 $t_p$  - rozteč nožů

$$z' = \frac{l}{t_p} = \frac{l \cdot z}{\pi D} = \frac{19,7 \cdot 2}{\pi \cdot 128} = 0,098$$

$l$  ... délka řezného oblouku (řezné kružnice)

$\psi$  - úhel záběru

$$l = \frac{\pi D}{360} \cdot \psi = \arccos\left(1 - \frac{e}{R}\right) = \frac{\pi \cdot 128}{360} \cdot \arccos\left(1 - \frac{3}{64}\right) = 19,7 \text{ mm}$$

Řezný výkon:

$$P_c = F_c \cdot v_c = 100,5 \cdot 34 = 3417 \text{ W}$$

# ***Závěr - porovnání výpočetních metod***

<i><b>Výpočetní metoda</b></i>	<i><b>Řezná síla (N)</b></i>	<i><b>Řezný výkon (W)</b></i>	<i><b>Poznámka</b></i>
<b>Technologicky statistická</b>	126,3	4294	Zahrnut model řezání. Modifikace pro aglomerované materiály.
<b>Analytická</b>	90,3	3070	<u><i><b>Předpokládá se, že tato metoda je nejpřesnější, protože velmi podrobně zohledňuje vliv různých faktorů na proces řezání:</b></i></u> A. Uvažuje vliv opotřebení nástroje. C. Jako jediná metoda umožňuje kvalifikovaný výpočet nejen řezné síly, ale i síly k posuvu obrobku. D. Jako jediná metoda umožňuje výpočet pro velmi malé tl. třísky.
<b>Objemová</b>	90,5	3078	Rychlé orientační výpočty pro pilařskou techniku (prvotní zpracování dřeva) Velké úběry a tl. třísky.
<b>Tabulkové síly</b>	100,5	3417	dtto



**Děkuji za pozornost**