

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA

ÚSTAV ZÁKLADNÍHO ZPRACOVÁNÍ DŘEVA

**Konvenční a nové přístupy při výpočtech řezných odporů
rostlého dřeva**

Bakalářská práce

2016

Milan Láník

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Konvenční a nové přístupy při výpočtech řezných odporů rostlého dřeva zpracoval samostatně a veškeré použité parametry a informace uvádím v seznam použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše

V Brně, dne:

podpis studenta

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Zdeňkovi Kopeckému, CSc. za jeho ochotu, se kterou přistupoval k mému tématu a za čas, který mi věnoval při tvorbě této bakalářské práce.

Samozřejmě také velmi děkuji Ing. Lud'ce Hláskové, konzultantce mé bakalářské práce, za její čas, který mi věnovala při kontrole výsledků a za její cenné rady, které mi pomohly při vytváření této práce.

V neposlední řadě bych také velice rád poděkoval, své rodině, za to že mi umožnila studovat tuto univerzitu a za její podporu po celou dobu studia.

Abstrakt

Autor: Milan Láník

Název práce: Konvenční a nové přístupy při výpočtech řezných odporů rostlého dřeva

Tato práce popisuje teorii řezání se zaměřením na řezání kotoučovými pilami. V práci je popsána a rozebrána návaznost teoretických výpočtových metod. Práce porovnává a vyhodnocuje rozdíly mezi teoreticky vypočtenými řeznými odpory podle standardních a nových přístupů s experimentem.

Experiment byl prováděn na zkušebním zařízení pro výzkum řezání pilovými kotouči.

Klíčová slova: kotoučová pila, řezný odpor, řezání

Abstract

Author: Milan Láník

Name of thesis: Conventional and new procedures for the calculation of solid wood cutting resistances

This thesis describes the theory of cutting with a focus on cutting circular saws. The continuity of theoretical calculation methods is described and analyzed in the thesis. The thesis compares and evaluates the differences between theoretically calculated cutting resistances according to standard and new approaches with the experiments.

The experiment was conducted on the test device for research of cutting with saw blades.

Keywords: circular saw, cutting resistance, cutting

Obsah

1	ÚVOD.....	7
2	CÍL PRÁCE.....	8
3	MATERIÁL A METODIKA	9
3.1	Analýza výpočtových metod pro stanovení řezných odporů	9
3.1.1	Kinetika a dynamika řezných procesů	9
3.1.2	Stanovení a význam úhlových prvků pilového kotouče	12
3.1.3	Proces tvorby třísky	13
3.2	Energetické a dynamické prvky při procesu řezání	15
3.2.1	Řezný odpor, řezná síla.....	15
3.2.2	Měrná řezná síla, měrný řezný odpor	16
3.2.3	Řezná práce.....	16
3.2.4	Měrná řezná práce.....	16
3.2.5	Řezný výkon	17
3.3	Metody stanovení řezné síly.....	17
3.3.1	Vývoj teorie řezného procesu	17
3.3.2	Metody.....	18
3.3.3	Základní technologické parametry řezání.....	19
3.3.4	Objemová metoda	20
3.3.5	Metoda tabulkové síly.....	21
3.3.6	Technologicky statistická metoda.....	21
3.3.7	Analytická metoda	24
3.3.8	Nové metody.....	29
3.4	Experimentální měření řezných odporů	32
3.4.1	Popis použité metody měření.....	32
3.4.2	Popis zkušebního Stendu	33

3.4.3	Použitý pilový kotouč	34
3.5	Určení parametrů řezání	35
3.5.1	Model řezání	35
3.5.2	Určení základních parametrů řezání	35
4	VÝSLEDKY	37
4.1	Smrk v suchém stavu	37
4.2	Smrk ve vlhkém stavu	41
4.3	Buk v suchém stavu	44
4.4	Buk ve vlhkém stavu	48
5	DISKUSE	52
6	ZÁVĚR	55
7	SUMMARY	56
8	SEZNAM POŽITÉ LITERATURY	57
9	SEZNAM TABULEK	58
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	59

1 ÚVOD

Dřevo, jakožto přírodní materiál, bylo využíváno po celou historii lidstva až do poloviny 20. století, kdy bylo v hojném počtu nahrazováno plasty či aglomerovanými materiály. V dnešní době se zase pomalu přechází k masivnímu dřevu. K získání finálního produktu je zapotřebí dřevo obrábět. Již z historie je zřejmé, že už ve starém Egyptě byly pily používány k jeho dělení a rozřezávání. Jednalo se o jakousi primitivní formu dnes známé rámové pily. Největší rozvoj byl zaznamenán v roce 1765, kdy J. Watt zdokonalil princip parního stroje, který už vynalezl v 1. století n. l. Hérón Alexandrijský. V této době už nebylo za potřebí tolik lidské síly na práci. V roce 1777 byla patentována první kotoučová pila, k jejíž zkonstruování však došlo až roku 1805 anglickým vědcem M. I. Brunerem. V současné době se jedná o nejvíce používaný nástroj k rozmanipulování dřeva a to nejen při rozřezávání na řezivo, ale i při výrobě finálních výrobků. Z těchto důvodů je tedy velice důležité zabývat se problematikou dělení dřeva kotoučovými pilami. V minulosti se této problematice věnovalo mnoho vědců, kteří na základě experimentů odvodili energetické a dynamické prvky řezného procesu. Jedním z nejdůležitějších parametrů řezání je řezný odpor (řezná síla) a řezný výkon. Řezný odpor je možno zjistit dvěma způsoby: teoreticky a experimentálně. Teoretické zjištění dle empirických vzorců, je z hlediska ekonomiky a času příznivější. Zůstává však otázkou, nakolik se tyto údaje liší od skutečného procesu řezání. Naproti tomu zjišťování pomocí experimentu, je přesnější a však časově a finančně náročné. V současné době se používají pro teoretické určení čtyři metody. Začínají se vyvíjet i nové metody teoretického určování řezných odporů. Z ekonomického hlediska je pro výrobu velice důležité znát odpory vznikající při řezání, aby nedocházelo k zbytečnému přetěžování strojů a nástrojů.

2 CÍL PRÁCE

Cílem předložené bakalářské práce je posouzení standardních výpočetních metod a nově navržené metody pro výpočet řezných odporů s experimentem. Vypočtené výsledky řezného odporu a řezné síly podle standardní Analytické a Technologicky statistické metody budou porovnány s experimentálními daty a současně analyzovány s výsledky nově navrhované metody podle Atkinse. Experimentální část práce bude realizována na zkušebním laboratorním stendu pro řezání pilovými kotouči. Odpory budou zkoumány při řezání rostlého smrku a buku při různých vlhkostech dřeviny a měnící se tloušťce třísky.

3 MATERIÁL A METODIKA

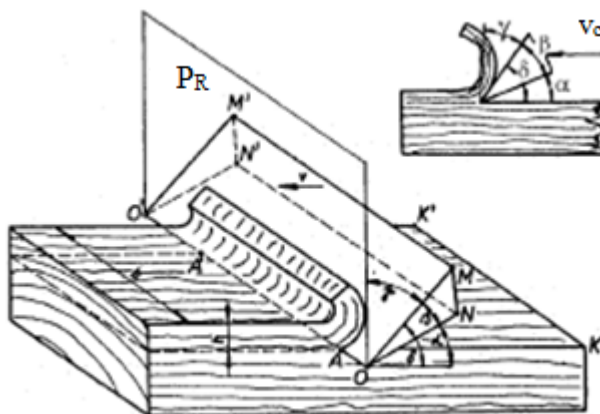
3.1 Analýza výpočtových metod pro stanovení řezných odporů

3.1.1 Kinetika a dynamika řezných procesů

Řezání je takový proces, při kterém se pomocí nástroje (ozubeného plechu) odděluje materiál ve formě třísek či hoblin. Dochází tak ke vnikání řezného klínu do materiálu, s cílem vytvoření požadovaného tvaru obrobku. Při řezání pilami je vytvořena drážka, v takovém případě se pak jedná o tzv. řezání ve spáře, kdy je v záběru jak hlavní tak i vedlejší ostří. (Holopírek, 2000)

Řezný proces je fyzikální jev, který jako každý jiný přírodní jev podléhá určitým zákonitostem. Při řezání jsou tyto zákonitosti poměrně složité, z důvodů působení značného počtu různých činitelů, které působí v různých kombinacích. (Lisičan, 1982)

Řezání se zjednodušeně vyjadřuje, jako vnikání řezného klínu do dřeva s následným porušováním dřevních vláken. Tento klín následně odstraňuje z hmoty materiál ve formě třísek o určitém objemu a tvaru. Třískový proces je tedy uskutečňován řezným nástrojem (klínem), který je ve styku se dřevem. (Varkoček, et al., 2004)

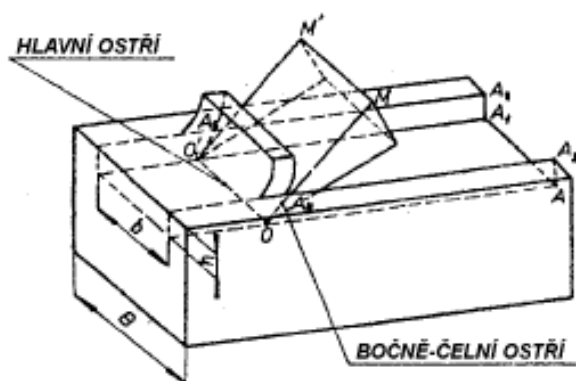


Obr. 1: Otevřené řezání (volné řezání) (Holopírek, 2000)

- AA'K'K - řezná plocha, rovina řezu
- OO' - břít, ostří řezná hrana
- OO'M'M - čelo, plocha čela

$OO'N'N$	- hřbet, plocha hřbetu
P_R	- rovina proložená ostřím kolmá na obráběnou plochu řeznou plochou
α	- úhle hřbetu, tento úhel svírá obrobená plocha s plochou hřbetu
β	- úhel břitu, tento úhel svírá plocha čela s plochou hřbetu
γ	- úhel čela, tento úhel svírá rovina čela a základní rovina

Ovšem při řezání dřeva pilovým kotoučem či listem nepřesahuje nikdy nástroj přes okraj materiálu. Řez probíhá ve spáře, kde je délka řezné hrany také šířkou třísky. (Varkoček, et al., 2004)



Obr. 2: Uzavřené řezání – řezání ve spáře (Holopírek, 2000)

Hlavním rozdílem mezi otevřeným a uzavřeným řezáním je počet řezných hran, které jsou v kontaktu s řezaným materiálem. Při uzavřeném řezání se na procesu oddělování třísky podílejí tři řezné hrany. Které pak vytvářejí tři řezné plochy.

OO_1A_1A	- řezná plocha vytvářená hlavním ostřím
$O'A_1A_3A_5$	- boční řezná plocha 1- boční ostří 1
$O'AA_2A_1$	- boční řezná plocha 2 – boční ostří 2

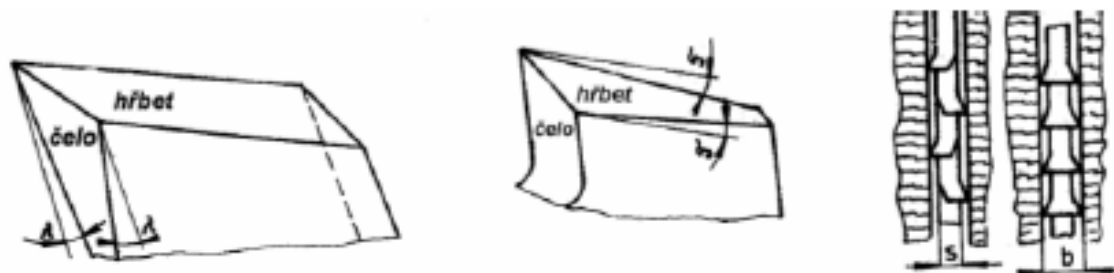
Pokud by však byla řezná hrana nástroje zakřivena, může být při řezání, vytvořen pouze jeden řezný povrch, který bude mít tvar zakřivené hrany.



Obr. 3: Řezání ve spáře s vytvořením jednoho řezného povrchu (Varkoček, et al., 2004).

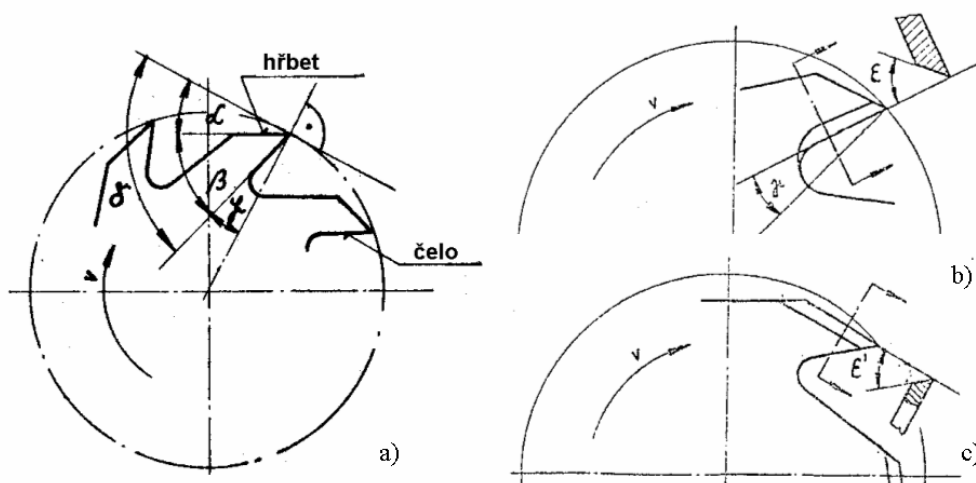
Při řezání ve spáře je zapotřebí provedení ochrany bočních ploch nástroje před důsledky tření. Tření bočních ploch, vede k velkému zahřívání břitu nástroje, čímž by se mohlo stát, že se jeho materiál poškodí, nebo dojde k pálení obráběných ploch. Tomuto se předchází třemi způsoby. (Obr.: 4)

- Zúžením těla zubu směrem ke středu rotace pod úhlem λ
- Zúžením hřbetu zubu směrem dozadu pod úhlem τ
- Pěchováním či rozváděním zubů



Obr. 4: Způsob úpravy zubů pro řezání v drážce (Varkoček, et al., 2004).

3.1.2 Stanovení a význam úhlových prvků pilového kotouče



Obr. 5: Rovné ozubení, b) Zešikmení čela zubu, c) zešikmení hřbetu zubu

Podle zbrošení čela a hřbetu rozeznáváme ozubení: (Varkoček 2001)

- *Rovné ozubení nemá žádné šikmé zbrošení*
- *Pološikmé ozubení už má zbrošené buďto čelo nebo hřbet*
- *Šikmé ozubení má zbrošené čelo i hřbet*

α	- úhel hřbetu	δ	- úhel řezu
β	- úhel břitu	ϵ	- úhel zbrošení čela
γ	- úhel čela	ϵ'	- úhel zbrošení hřbetu

Úhel hřbetu α

Velikost úhlu α zcela zásadním stylem ovlivňuje tření mezi obrobenou plochou a hřbetem. Čím větší je úhel α tím menší je tření. To způsobuje menší kontakt mezi hřbetem a obrobeným povrchem. Oproti tomu malý úhel α zvyšuje tření. To má za následek větší zahřívání nástroje a rychlejšímu otupování. Úhel hřbetu se pohybuje v rozmezí 10° až 30° . (Peršín, 2007).

Úhel břitu β

Čím je úhel břitu menší, tím snadněji proniká nástroj do materiálu. Oproti tomu velice malý úhel břitu způsobí výrazný pokles pevnosti břitu a tím i jeho rychlejší otupení. To má za následek zvýšení odporu proti vniknutí nástroje do materiálu. Na úhel břitu tedy klade velký důraz materiál, ze kterého je nástroj vyroben, nejvíce to pak ovlivňuje křehkost materiálu. (Peršin, 2007)

Úhel čela γ a úhel řezu

Řezný úhel vychází z úhlu čela, jelikož platí vztah $\gamma = 90^\circ - \delta$. Pokud bychom zmenšovali úhel čela γ vzroste nám, jak už je patrné ze vztahu, úhel řezu, což má za následek i vzrůst odporu proti vnikání řezného klínu do materiálu. Naproti tomu zmenšení úhlu řezu sice sníží řezný odpor, ale pouze pokud bude dosaženo konstantního úhlu hřbetu, čímž ale bude docházet k rychlejšímu otupování břitu a následnému zvyšování odporu. (Peršin, 2007)

3.1.3 Proces tvorby třísky

Jedním z hlavních faktorů ovlivňující tvorbu třísky je stříhová pevnost materiálu. Protože při pronikání břitu nástroje do materiálu dojde nejprve k plastické deformaci materiálu. Intenzita plasticity je, jak už je uvedeno výše, závislá na stříhové pevnosti materiálu. Pokud je překonána stříhová pevnost začne se tvořit tříska. Tato tříska je odkloňována čelní plochou nástroje, přičemž odklon je velice závislý na pevnosti obráběného materiálu. Také zde hraje významnou roli stupeň otupení břitu nástroje ρ , velikost řezného úhlu δ atd. (Holopírek, 2001)

Celý proces doprovází tření vznikající mezi:

a) třískou a čelem nástroje

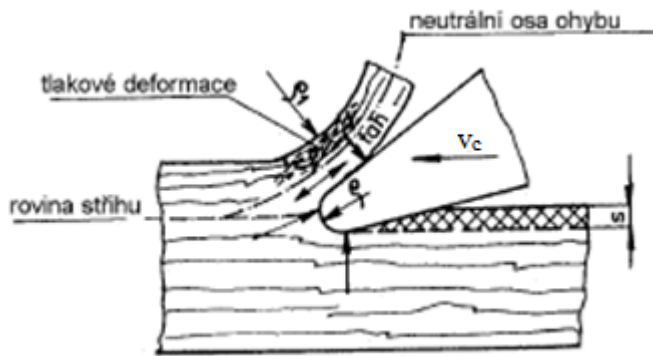
- Toto tření se zvyšuje se zvyšující se tloušťkou třísky, objemem třísky, drsností čela, směru vláken, klesá pak při vyšší vlhkosti řezaného materiálu a dále je závislé na řezné rychlosti, hustotě materiálu, teplotě atd.

b) hřbetu a obrobenou plochou

- Toto tření je závislé na velikosti úhlu hřbetu, modelu řezání, otupení ostří, plastické deformaci řezaného materiálu.

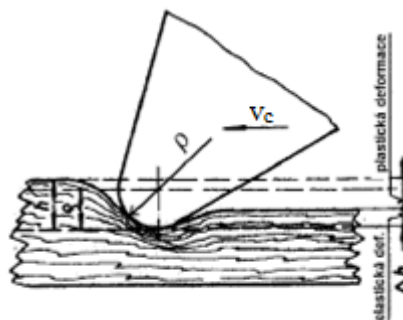
c) **Bočním ostřím a bočními plochami v řezné drážce**

- Platí zde stejné závislosti jako u bodů a) a b)



Obr. 6: Tvorba třísky při vnikání nástroje do materiálu (Varkoček, et al., 2004).

Z předešlých definic vyplývá, že významnou roli hraje stupeň otupení nástroje. Otupením nástroje se rozumí jeho mechanické opotřebování. Opotřebením se rozumí zvětšení poloměru zaoblení ostří ρ v μm . Zvětšování otupení má zásadní vliv na růst řezného úhlu. Pokud bychom odebírali velmi malou třísku s velkým otupením, mohlo by nastat, že by se neoddělovala tříska, ale pouze docházelo k pěchování. V takovém případě se výsledný rozměr obrobku bude měnit o hodnotu plastické deformace. (Varkoček, et al., 2004)

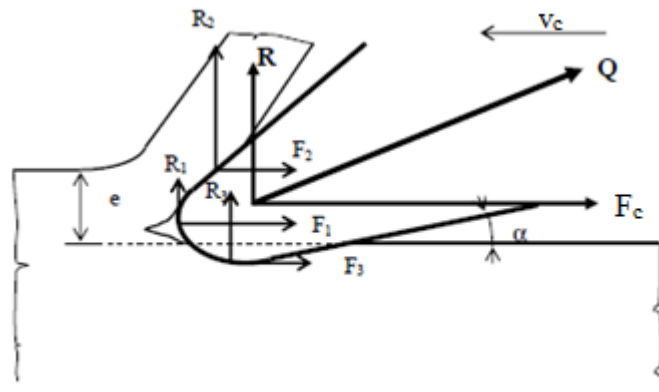


Obr. 7: Pěchování obráběné plochy (Varkoček, et al., 2004).

3.2 Energetické a dynamické prvky při procesu řezání

3.2.1 Řezný odpor, řezná síla

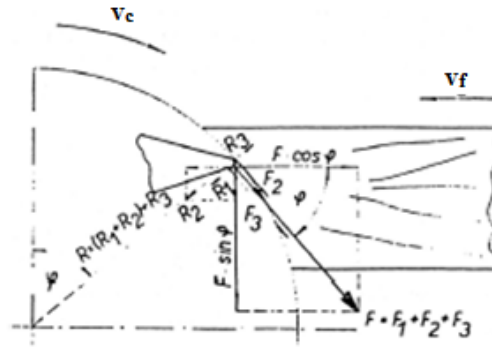
Řezný odpor je síla, kterou klade obráběný materiál proti síle břitu nástroje. Aby mohlo docházet k tvorbě třísky, je za potřebí aby, byla síla nástroje větší než síla, kterou klade řezaný materiál. Obdobně jako tomu bylo při tvorbě třísky je řezná síla skládána z jednotlivých složek, potřebných na překonání pevnosti materiálu ve stříhu a deformaci, odklonu hmoty třísek a sil potřebných k překonání tření na plochách nástroje. (Holopírek, 2000)



Obr. 8: Síly působící při řezání na břit nástroje (Holopírek, 2000).

Výsledná síla Q obr.: 8 je považována za součet jednotlivých složek působících na polovinu zaobleného ostří ρ . Lze ji rozložit do dvou základních složek a to na sílu F_c neboli řezný odpor působící proti břitu nástroje a na sílu R , která působí kolmo na řezný odpor. Síla R se potom snaží buďto obráběný materiál přitlačovat nebo oddalovat k řeznému nástroji. (Holopírek, 2000).

Rozklad sil na břitu rotačního nástroje je pak zobrazen na obr.: 9, kde složky řezného odporu P byly nahrazeny silou F_t . Tato síla je v každé poloze tečnou k řezné kružnici. Má také shodný směr s otáčením nástroje. U rotačních nástrojů je řeznou silou moment působící na hnací hřídeli stroje. (Peršín, 2007)



Obr. 9: Rozklad sil působících na břit rotačního nástroje (Holopírek, 2000)

3.2.2 Měrná řezná síla, měrný řezný odpor

Působením síly F_c na nástroj se odebrává třísky o šířce b a tloušťce h . Velikost řezného odporu je pak závislá na ploše průřezu třísky, na kterou působí řezná síla F_c . Vznikne nám tedy měrný řezný odpor k_c , který lze potom vyjádřit takto. (Varkoček, et al., 2004)

$$k_c = \frac{F_c}{b \cdot h} \text{ [MPa]} \quad \text{neboli} \quad F_c = k_c \cdot b \cdot h \quad (1)$$

kde: b - šířka třísky [mm] F_c - řezná síla [N]

h - tloušťka třísky [mm]

Měrný řezný odpor k_c je síla, kterou je zapotřebí vynaložit, na odebrání 1 mm^2 třísky. Zahrnuje v sobě mnoho působících faktorů vznikajících při obrábění dřeva. Tyto faktory budou popsány dále.

3.2.3 Řezná práce

Jedná se o součin dráhy a síly jejíž vektor se pohybuje ve směru dráhy. Za předpokladu konstantního rozměru třísky je pak v případě řezání řezná práce vyjádřena jako součin řezné síly F_t a výšky řezaného materiálu a_e . (Lisišan, 1982)

$$A_{\bar{r}} = k_c \cdot b \cdot h \cdot a_e \quad (2)$$

kde: b - šířka třísky [m] a_e - výška řezu [m]

h - tloušťka třísky [m] k_c - měrný řezný odpor [Pa]

3.2.4 Měrná řezná práce

Jedná se o práci vynaloženou na přeměnu jednotky objemu hmoty na třísku. (Varkoček, et al., 2004)

$$A_{\check{r}sp} = \frac{A_{\check{r}}}{V} = \frac{A_{\check{r}}}{b \cdot h \cdot e} = \frac{k_c \cdot b \cdot h \cdot e}{b \cdot h \cdot e} = k_c \text{ [Pa]} \quad (3)$$

kde: b- šířka třísky [mm] e – výška řezu [mm]
 h – tloušťka třísky [mm] $A_{\check{r}}$ – řezná práce [J]
 V – objem materiálu [mm³]

3.2.5 Řezný výkon

Řezným výkonem se rozumí výkon, který je za potřebí k rozřezání daného materiálu. Řezný výkon je také řezná práce vykonaná za časovou jednotku.

$$P_c = A_{\check{r}sp} \cdot V_s = k_c \cdot b \cdot h \cdot u \text{ [W]} \quad \text{nebo} \quad P_c = F_c \cdot v_c \text{ [W]} \rightarrow F_c = \frac{k_c \cdot b \cdot h \cdot u}{v_c} \quad (4)$$

kde: u- posuv [m/min] v_c – řezná rychlost [m*s⁻¹]

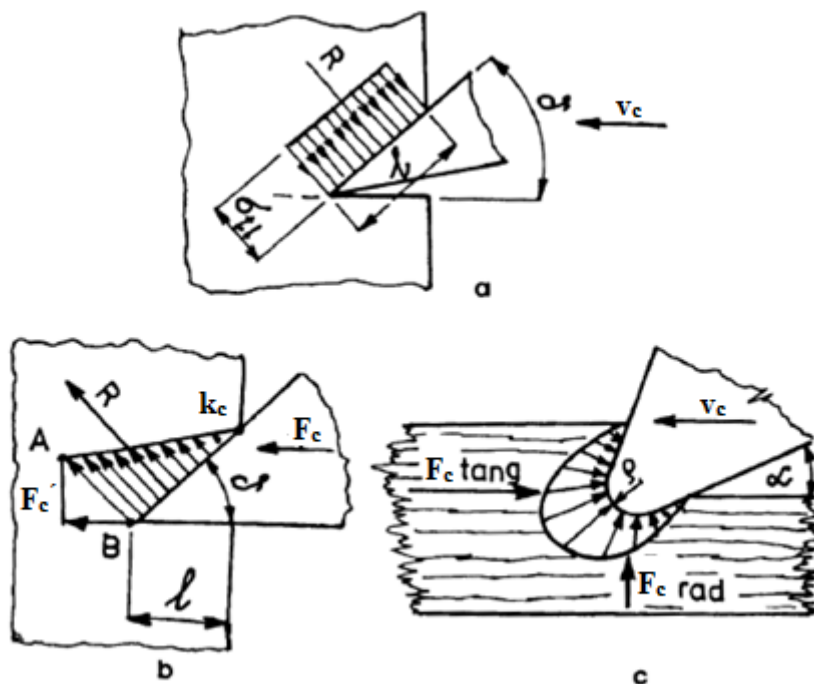
Ze vztahů je patrné, že řezná síla i řezný výkon jsou v přímé úměře se součinem řezného odporu a objemu dřeva přeměněného na třísky za jednu sekundu. (Varkoček, et al., 2004)

3.3 Metody stanovení řezné síly

3.3.1 Vývoj teorie řezného procesu

Stanovením velikostí sil vznikajících při řezání dřeva, se jako první v roce 1870 zabýval I. A. Time, jeho následníky pak byli Afanasiev a Deševoj. Teorie všech tří autorů je založena na tzv. „ideálním ostří“ řezného klínu. Rozdíl však mezi prvním autorem a dvěma dalšími spočívá v zatížení čelní plochy řezného klínu, bez kontaktu hřbetu řezného klínu s materiálem. Podle Timeho je zatížení rovnoměrné, kdežto dle Afanasieva a Deševoje trojúhelníkové. (Lisičan, 1996)

Další kdo se zajímali o řezné síly, byli například Briks, Voskeresenskij, Ivanovskij a Beršadskij. Tito autoři už respektují tzv. „reálné ostří“ řezného klínu (tj. zaoblené, s poloměrem křivosti ρ v μm), s účastí zadní části oblíny ostří na tlakové deformaci vytvářeného řezného povrchu, s dedukcí křivkového zatížení čela ostří i části hřbetu řezného klínu. (Lisičan, 1996)



Obr. 10: Rozklad působících sil na řezný klín (Lisičan 1996)

a) Dle Anitkina b) dle Deševoje c) dle Vaskresenského (Lisičan, 1996)

3.3.2 Metody

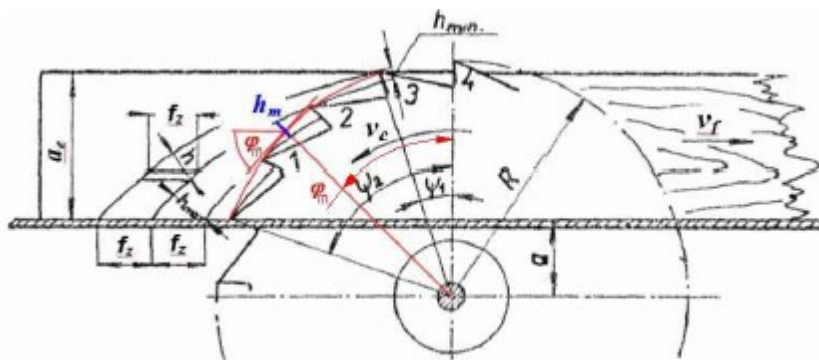
Odborníci, zabývající se stanovením velikostí řezných sil a jejich složek, rozložili proces řezání do několika fází, které se řeší samostatně, z důvodů naznačení sil vznikajících při oddělování třísky. Vzhledem k tomu, že takto rozfázovaný proces ve skutečnosti neexistuje, hledaly se cesty stanovení řešení sil a odporů ve vzájemné závislosti jednotlivých složek na sobě. Hledání optimálních výsledků je výrazně ztíženo vlastnostmi dřeva. Jeho stavbou a výraznou rozlišností mechanických vlastností. (Varkoček, et al. 2004)

V současné době se při výpočtech řezných sil a odporů využívá čtyř základních metod:

- Technologicky statistická metoda
- Analytická metoda
- Objemová
- Tabulkové síly

Dále jsou rozebrány výše uvedené metody výpočtů, vytvořené pro technologii zabývající se podélným řezáním dřeva pilovými kotouči. U všech metod je nejprve nutné určení základních technologických parametrů.

3.3.3 Základní technologické parametry řezání



Obr. 11: Oddělování třísky pilovým kotoučem (Peršín, 2007)

kde: ψ_1 – vstupní úhel pilového kotouče [°] ψ_2 – výstupní úhel pilového kotouče [°]

φ_m - střední úhel přerézávání vláken [°] v_f – podávací rychlost [m/s]

v_c – řezná rychlost [m/s] f_z – posuv na zub [m]

h_m – střední tloušťka třísky [mm] a_e – řezná výška [m]

Vztahy pro výpočet důležitých parametrů k dalším výpočtovým metodám. (Holopírek, 2001)

$$\psi_1 = \arccos\left(\frac{a+a_e}{R}\right), \psi_2 = \arccos\frac{a}{R}, \Rightarrow \varphi_m = \frac{\psi_1+\psi_2}{2} [^\circ] \quad (5)$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot 2 \cdot R \cdot n}{60} [m/s] \quad (6)$$

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} [m] \quad (7)$$

$$h_m = f_z \cdot \sin\varphi_m [m] \quad (8)$$

kde: a – vzdálenost osy hřídele od stolu [m] z – počet zubů [ks]

n – otáčky hřídele [min^{-1}] R – poloměr kotouče [m] a_e – řezná výška [m]

3.3.4 Objemová metoda

Ve všeobecnosti vyjadřuje tato metoda proporcionalitu výkonu řezání P_c [W] k objemu dřeva přeměněného na třísky za 1s V_1 . [$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Dle vztahu. (Holopírek, 2000)

$$P_c = A_{r1} \cdot V_1 \quad [\text{W}] \quad (9)$$

Měrná práce A_{r1} se určí z jednotkové měrné řezné práce A_{r1}^1 (tabulková hodnota) a opravných součinitelů pro jednotlivé podmínky řezání ze vztahu. (Holopírek, 2000)

$$A_{r1} = A_{r1}^1 \cdot k_{c0} \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

Kde součinitel k_{c0} je součinem opravných koeficientů pro jednotlivé podmínky řezání.

Měrnou řeznou práci A_{r1} vypočítáme následovně:

$$A_{r1} = A_{r1}^1 \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_\rho \cdot k_\delta \cdot k_i \cdot k_c = A_{r1}^1 \cdot k_i \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}] \quad (11)$$

- kde:
- k_d koeficient dřeviny
 - k_w koeficient vlhkosti
 - k_p koeficient otupení ostří
 - k_δ koeficient řezného úhlu
 - k_v koeficient řezné rychlosti
 - k_e koeficient řezné výšky
 - A_{r1}^1 jednotková měrná řezná práce
 - k_t koeficient teploty

Řeznou sílu poté spočítám dle vzorce:

$$F_c = \frac{P_c}{v_c} \quad [\text{N}] \quad (12)$$

Hodnota K_d^1 byla experimentálně zjištěna řezáním za konkrétních podmínek.

Tab. 1: Konkrétní podmínky experimentálního zjišťování

Užitý druh dřeva	borovice,buk,jasan
Užitá řezná rychlost	$v = 10 \text{ m.s}^{-1}$
Užitá tloušťka třísky	$h = 1 \text{ mm}$
Užitá vlhkost dřeva	$w = 15 - 20 \%$
Užitý řezný úhel	$\delta = 45 - 90^\circ$
Užitý úhel přerezávání vláken	$\varphi_2 = 0 \div 90^\circ$
Užitý ostrý nástroj	
Model řezání	, ⊥, II

Ostatní technologické a mechanické vlivy jsou do výpočtu zahrnuty ve formě různých opravných koeficientů. Zejména se jedná o následující vlivy. (Varkoček et.al, 2004)

Tab. 2: Významy koeficientů u Technologicky statistické metody

Významy koeficientů	Příloha 1
$K_{\delta\varphi 2}^1$ - tzv. jednotkový měrný řezný odpor	- tab.: 1-3
K_d - součinitel dřeviny	- tab.: 4
k_w - součinitel vlhkosti	- tab.: 5
k_t - součinitel teploty	- tab.: 6
k_v - součinitel řezné rychlosti	- tab.: 7
k_p - součinitel vlivu otupení ostří	- tab.: 8
m - součinitel vlivu tloušťky třísky v závislosti na modelu řezání a na úhlu φ_2	- tab.: 9 - tab.: 10 - tab.: 11
k_h - součinitel vlivu tloušťky třísky	- tab.: 12
k_f - součinitel vlivu tření	
k_δ - součinitel vlivu řezného úhlu	

Vzorec pro určení řezného odporu při otevřeném řezání po zahrnutí všech výše uvedených vlivů je potom součin všech uvedených vlivů.

$$k_c = K_d^1 \cdot k_\delta \cdot k_{\varphi 2} \cdot k_d \cdot k_w \cdot k_v \cdot k_p \cdot k_t \cdot k_h \text{ [MPa]} \quad (16)$$

Tento vzoreček musí být dále upraven protože, kromě jiného experimenty prokázali skutečnost, že velikost řezné síly není konstantou, což se ve výpočtu řezného odporu vyjadřuje druhým členem, ve kterém je pro uzavřené řezání zohledněn vliv: (Varkoček, et al. 2004)

- způsobu úpravy ostří (pěchované, rozváděné)
- výška rozřezávaného materiálu
- šířka třísky

Předchozí výpočet je možno aplikovat na model otevřeného řezání. Pro řezání uzavřené však musíme zohlednit výše uvedené faktory ovlivňující řezný odpor. Proto je nutné výsledný odpor vynásobit číselným koeficientem 1,1 – 1,2. Výsledný výpočet řezného odporu je pak dán rovnicí. (Varkoček, et al. 2004)

$$k_c = \frac{(1,1-1,2).K_d^1.k_\delta.k_{\varphi 2}.k_d.k_w.k_v.k_\rho.k_t}{h^\mu} + \frac{\xi.e}{b} \quad [\text{MPa}] \quad (17)$$

kde: ξ – 0,20 pro pěchované zuby μ - ukazatel změny řezného odporu

ξ – 0,25 pro rozváděné zuby v závislosti na úhlu φ_2

Pro vypočtení velikosti řezné síly F_c je za potřeby použití tohoto vzorce:

$$F_c = \frac{k_c.b.a_e.v_f}{v_c} \quad [\text{N}] \quad (17)$$

kde: b – šířka třísky [mm] a_e – řezná výška [mm]

v_f – podávací rychlost [m/s] v_c – řezná rychlost [m/s]

Potom pro určení velikosti výkonu P_c platí vztah:

$$P_c = F_c.v_c \quad [\text{W}] \quad (18)$$

3.3.7 Analytická metoda

Jako první se o analytickou metodu zajímal ruský vědec prof. Beršadskij, ten stanovil základní vztahy. Dále se pak na vývoji podílelo mnoho autorů. Níže popisovanou analytickou metodou, bude používána modifikace od „Prokeše“ (Prokeš 1982). Zásadním rozdílem od technologicky statistické metody je, že pomocí vztahů určíme základní složky působících sil na hřbet a čelo nástroje. Dalším odlišným prvkem je výpočet měrného řezného odporu pro tloušťky třísky do 0,1 mm a nad 0,1 mm. Dalším důležitým faktorem je, že analytická metoda používá při výpočtu otupení nástroje skutečnou řeznou dráhu, kterou nástroj urazí a druh materiálu, ze kterého je nástroj vyroben. Kdežto technologicky statistická metoda hodnotí pouze otupení dle doby řezání. Stanovení měrného řezného odporu pro podélné řezání pilami.

Tloušťka třísky do 0,1 mm neboli řezání s malou tloušťkou třísky

Pěchované zuby:

$$k_{cm} = k_m + \frac{(a_p - 0,8) \cdot p}{h_m} + \frac{k_f \cdot a_e}{b} \text{ [MPa]} \quad (19)$$

Rozváděné zuby:

$$k_{cm} = k_m + \frac{(a_p - 0,8) \cdot p}{h_m \cdot \frac{b}{s_1}} + \frac{k_f \cdot a_e}{b} \text{ [MPa]} \quad (20)$$

Tloušťka třísky nad 0,1 mm neboli řezání s velkou tloušťkou třísky

Pěchované zuby:

$$k_c = k + \frac{a_p \cdot p}{h_m} + \frac{k_t \cdot a_e}{b} \text{ [MPa]} \quad (21)$$

Rozváděné zuby:

$$k_c = k + \frac{a_p \cdot p}{h_m \cdot \frac{b}{s_1}} + \frac{k_t \cdot a_e}{b} \text{ [MPa]} \quad (22)$$

kde: k_{cm} – měrný řezný odpor pro třísku do 0,1 mm [MPa]

k_c - měrný řezný odpor pro třísku nad 0,1 mm [MPa]

k_m - základní měrný řezný odpor pro třísku do 0,1 mm [MPa]

k - základní měrný řezný odpor pro třísku nad 0,1 mm [MPa]

a_p - koeficient otupení [-]

p - parametr p určený z nomogramů viz obr.:12

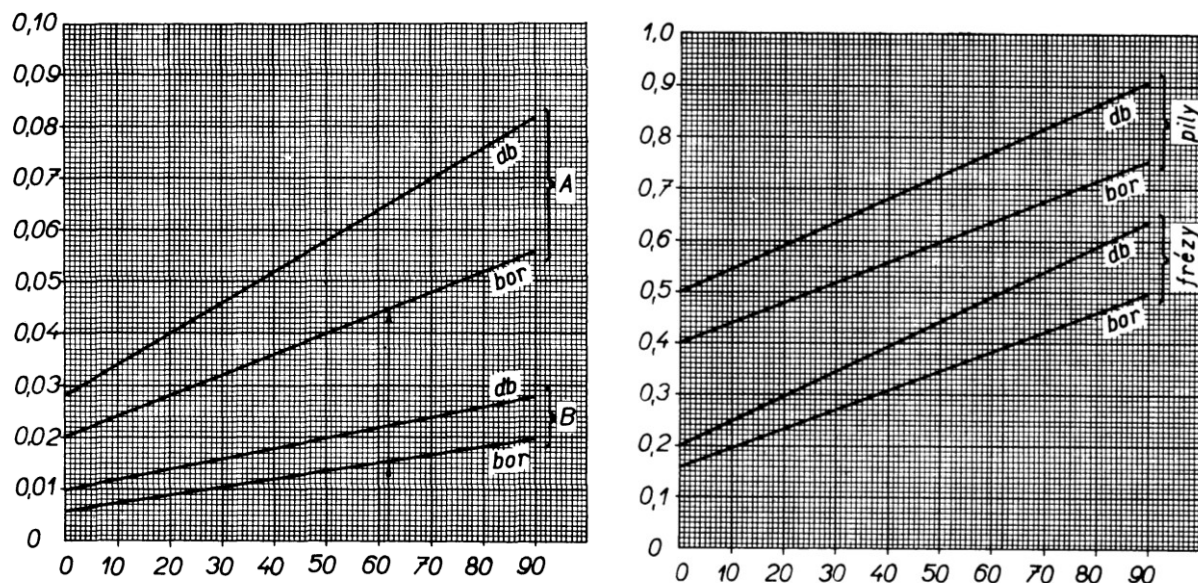
h_m – střední tloušťka třísky [mm]

b - šířka řezné spáry [mm]

s_1 – tloušťka řezného nástroje [mm]

k_t – koeficient tření ve spáře [-]

a_e – výška řezné spáry [mm]



Obr. 12: Nomogramy pro stanovení koeficientů A, B a p (Varkoček, et al. 2004).

Vztah pro výpočet základního měrného řezného odporu k a k_m

Pro střední tloušťku třísky do 0,1 mm

$$k_m = (A \cdot \delta + B - v + V_m) \cdot 10 \quad [\text{MPa}] \quad (23)$$

Pro střední tloušťku třísky nad 0,1 mm

$$k = (A \cdot \delta + B \cdot v_c - V) \cdot 10 \quad [\text{MPa}] \quad (24)$$

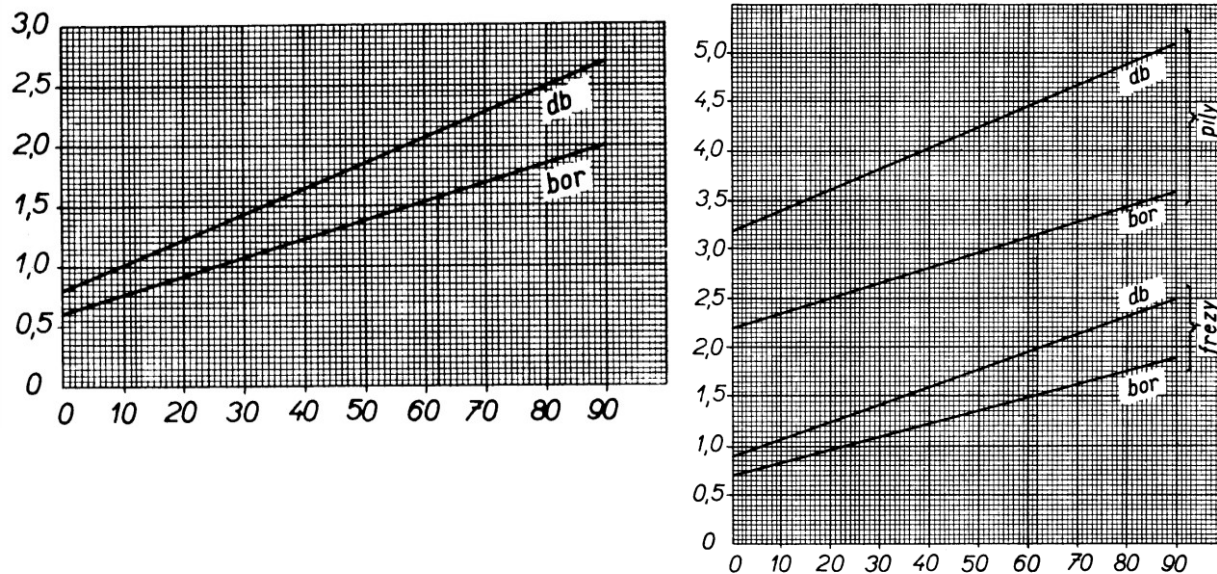
kde: A, B, V, V_m – hodnoty určené z nomogramů viz Obr.:12 a 13

φ_m - střední úhel přerézávání vláken [°]

δ - úhel řezu [°]

v_c - řezná rychlost (pokud je menší než 70 m/s [m/s])

pak je nutné dosadit 90-v)



Obr. 13: Nomogramy pro učení koeficientů V (vlevo) a Vm (vpravo) (Varkoček, et al. 2004).

Koeficient otupení se stanoví z následujícího vztahu:

$$a_{\rho} = 1 + \frac{0,2 \cdot \Delta\rho}{\rho_0} \quad (25)$$

kde: $\Delta\rho$ – zvětšení zaoblení ostří [μm] , ρ_0 – počáteční zaoblení ostří (6-10 μm)

$$\Delta\rho = \varepsilon \cdot L \quad [\mu\text{m}] \quad (26)$$

kde: ε – opotřebení břitu na 1 m řezu L- celková délka řezu [m]

Tab. 3: Opotřebení břitu ε [$\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$] na 1 m délky řezu (Varkoček, et al. 2004)

Typ řezného nástroje	Dřevo měkké	Dřevo tvrdé
Pilové listy a kotouče	0,0010	0,0013

Hodnoty v tabulce je nutné vynásobit 0,5-0,3, protože údaje jsou stanoveny pro oceli dle ČSN 19 423 a 19 712. Norma uvádí hodnoty pro nástrojové oceli, jelikož se dnes používají víceméně SK plátky, je nutný přepočet.

Výpočty řezné síly F_c a řezného výkonu P_f jsou pro podélné řezání kotoučovými pilami stejné jako u technologicky statistické metody.

$$F_c = \frac{k_c \cdot b \cdot a_e \cdot v_f}{v_c} \text{ [N]} \quad (27)$$

kde: b – šířka třísky [mm] a_e – řezná výška [mm]

v_f – podávací rychlost [m/s] v_c – řezná rychlost [m/s]

$$P_c = F_c \cdot v_c \text{ [W]} \quad (28)$$

Jak již bylo uvedeno v úvodu, analytická metoda kromě výpočtu řezného odporu stanovuje i velikost sil působících na nástroj.

Sílu působící na hřbet nástroje lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\text{Pro pýchované zuby } P_2 = (a_p - 0,8) \cdot p \cdot b \cdot \frac{l}{t} \text{ [N]} \quad (29)$$

$$\text{Pro rozváděné zuby } P_2 = (a_p - 0,8) \cdot p \cdot S_1 \cdot \frac{l}{t} \text{ [N]} \quad (30)$$

kde: a_p - koeficient otupení [-]

p - koeficient p viz obr.:12

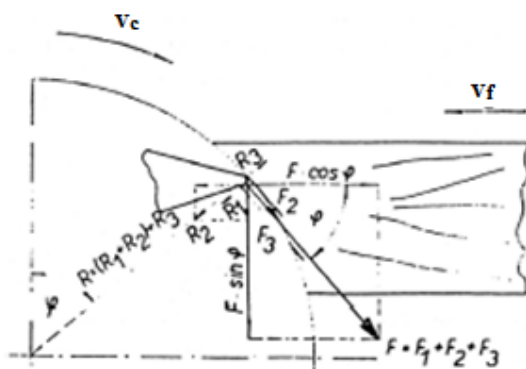
b – šířka řezné spáry[mm]

S_1 – tloušťka pilového nástroje [mm]

l – délka třísky (záběru) [mm]

t – rozteč zubů [mm]

Dle Obr.:9 lze složky sil P_1 a P_3 , které působí na čelo nástroje nahradit výslednicí P_c , přičemž platí vztah:



$$P_c = P - P_2 \text{ [N]} \quad (31)$$

Vertikální sílu potom vypočítáme podle vztahu:

$$R = \frac{P_2}{f} - P_c \cdot \operatorname{tg}(90 - \psi - \delta) \text{ [N]} \quad (32)$$

kde: ψ – úhel tření [$\approx 20^\circ$] δ – úhel řezu [$^\circ$]
 f - koeficient tření viz tab.: 2

Tab. 4: Závislost koeficientu tření na otupení nástroje (Varkoček, et al. 2004)

a_p	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,4
f	2,0	1,5	1,25	1,1	1,0	0,9	0,8	0,75	0,7	0,65	0,5

Vztah pro výpočet podávací síly F_f

$$F_f = P \cdot \cos\varphi_m + R \cdot \sin\varphi_m \text{ [N]} \quad (33)$$

a síly S , která je kolmá na směr posuvu

$$S = P \cdot \sin\varphi_m \pm R \cdot \cos\varphi_m \text{ [N]} \quad (34)$$

Zjišťování jednotlivých složek sil, které působí při řezání dřeva, využívají zejména konstruktéři strojů a nástrojů. Ti pak mohou přesně určit velikosti podávajících sil a následné namáhání hřídele stroje. Nebo při navrhování nástroje se řídit dle sil působících na zubu nástroje.

3.3.8 Nové metody

Podle nových teoretických poznatků, kdy bylo využito metod lomové mechaniky (Atkins 2003, 2009) a (Orlowski 2010, Orlowski et al. 2012) je možné výpočet výkonu při řezání kotoučovými pilami vyjádřit matematicky následovně.

$$\bar{P}_{cw} = F_c \cdot v_c + P_{ac} = \left[z_a \cdot \frac{\tau_\gamma \cdot b \cdot \gamma}{Q_{shear}} \cdot h_m \cdot v_c + z_a \cdot \frac{R \cdot b}{Q_{shear}} \cdot v_c \right] + \dot{m} \cdot v_c^2 \text{ [W]} \quad (35)$$

Kde první člen je potřebný výkon pro ohnutí a následné odříznutí třísky, druhý člen je výkon potřebný k překonání tření, které vzniká mezi obrobkem a nástrojem. Třetí člen neovlivňuje řezný odpor jako takový, ale je to výkon potřebný, k vymetení třísky nástrojem z řezné spáry. To má za následek ovlivnění celkového výkonu pily. (Orlowski et al. 2012)

Hmotnostní tok třísek se pak spočítá dle následujícího vztahu.

$$\dot{m} = \frac{b \cdot l \cdot v_f \cdot \rho}{2} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (36)$$

Řezná síla na jeden zub je vyjádřena směrnici přímky ve tvaru $y=(k) \cdot x+(q)$. A vypočítá se dle následujícího vztahu.

$$F_c^{Iz} = \left(\frac{\tau_\gamma \cdot b \cdot \gamma}{Q_{shear}} \right) \cdot h_m + \left(\frac{R \cdot b}{Q_{shear}} \right) [\text{N}] \quad (37)$$

kde: τ_γ – mez kluzu [Pa]

R – lomová houževnatost [J/m²]

b – šířka řezné spáry [mm]

Q_{shear} – koeficient tření [-]

γ – zkos ve stříhové rovině [-]

Zkos, ve stříhové rovině, se vypočítá dle vztahu:

$$\gamma = \frac{\cos \gamma_f}{\cos(\Phi_c - \gamma_f) \cdot \sin \Phi_c} \quad [-] \quad (38)$$

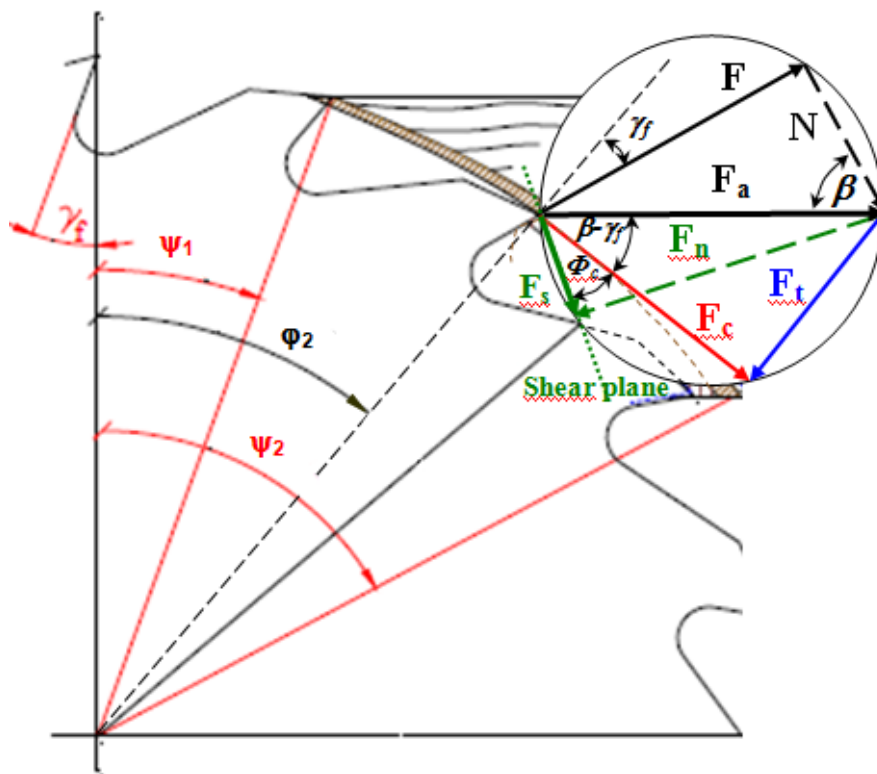
kde: γ_f – úhel čela zubu [°]

Φ_c – stříhový úhel [°]

Stříhový úhel se vypočítá dle Ernst-Merchantova diagramu a vztahu:

$$\phi_c = \left(\frac{\pi}{4} \right) - \left(\frac{1}{2} \right) \cdot (\beta - \gamma_f) \quad [^\circ] \quad (39)$$

kde: β třecí úhel získaný z $\tan^{-1} \mu = \beta$ (μ je koeficient tření)
 π [rad] ... 180°



Obr. 14: Rozklad sil pomocí Ernst-Marchantova diagramu. (Orlowski 2010)

Z Atkinsonova modelu výpočtu se dá odvodit vztah pro výpočet měrného řezného odporu:

$$k_c = \frac{1}{Q_{shear}} \left(\tau_\gamma \cdot \gamma + \frac{R}{h_m} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (40)$$

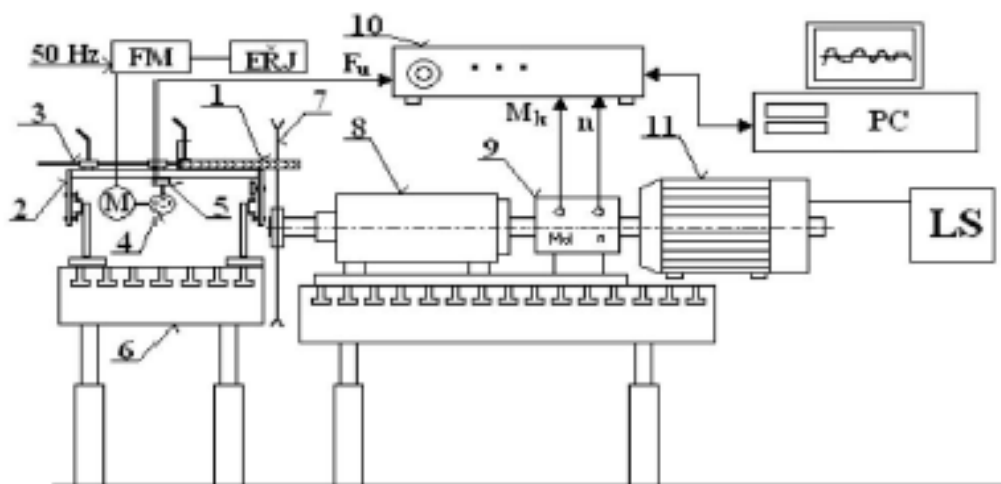
3.4 Experimentální měření řezných odporů

3.4.1 Popis použité metody měření

Abychom mohli provádět experimentální měření tak jsme využívali stávající zkušební stend na Ústavu základního zpracování dřeva. Tento stend simuluje podmínky při řezání materiálu kotoučovými pilami. Stend je osazen snímači, které snímají jak velikost momentu působícího na hřídeli, na které je upnut pilový kotouč, tak snímají otáčky, které jsou plynule regulovatelné. Následně je stend vybaven stolem, na který se mechanicky upíná materiál. Tento stůl je přes kuličkový šroub poháněn pomocí elektromotoru. Motor je vybaven frekvenčním měničem, díky kterému se mohou plynule měnit otáčky elektromotoru. Tím se mění podávající rychlost, se kterou je úzce spojena tloušťka třísky. Stůl je vybaven měřičem síly působící proti směru posuvu. Hodnoty těchto naměřených veličin zaznamenává jednotka Spider 8 a ty jsou následně exportovány do počítače, kde přes program Commes Spider jsou zpracována do grafu a dat. (Peršin, 2007)

Průběh experimentálního měření byl následovný. Zkušební vzorky byly upínány vždy mechanicky pravou stranou na podávací stůl. Ten byl v poloze před řezem, tedy připraven na podání do řezu. Poté byla nastavena potřebná frekvence napájecího proudu elektromotoru, který zajišťuje rychlost posuvu. Frekvenčním měničem elektromotoru, který pohání hřídel pily, byl roztočen kotouč na rychlost 3 800 ot/min. Když se otáčky ustálily tak byl spuštěn v programu Commes Spider záznam a následně byl proveden řez. Tento řez byl proveden při určité podávající rychlosti. Poté byla naměřená data vyexportována do tabulkového souboru k lepší přehlednosti pro další zpracovávání. Takto byl experiment opakován pro pětadvacetkrát pro každé měření.

3.4.2 Popis zkušební Stendu



Obr. 15: Schéma zkušební stendu (Svatoš, et al., 2011)

kde: 1 – Obráběný materiál, 2 – podávací stůl, 3 – mechanické úchyty materiálu, 4 – kuličkový šroub, 5 – siloměr, 6 – základový stůl, 7 – pilový kotouč, 8 – ložisko, 9- senzor otáček a momentu, 10 – Spider 8, 11 – dynamometr, FM – frekvenční měnič, EŘJ – elektronická řídicí jednotka, PC – počítač, LS – Leonardovo ústrojí



Obr. 16: Zkušební stend

3.4.3 Použitý pilový kotouč

Při experimentu byl použit pilový kotouč firmy Flury systems AG

Tab. 5: Parametry použitého pilového kotouče

Výrobce	Flury systems
Označení	K3
Průměr pilového kotouče D [mm]	350
Průměr upínací díry d_u [mm]	30
Počet zubů z [ks]	28
Šířka těla kotouče [mm]	2,5
Šířka zubů [mm]	3,5
Výška zubů [mm]	10,5
Rozteč zubů t [mm]	39,27
Radiální kompenzační drážky [ks]	4
Měděné nýty v ukončení radiálních drážek	ano
Odhlučňovací drážky	ne
Kompenzační válcování	0,63R
Úhel hřbetu α [°]	15
Úhel břitu β [°]	55
Úhel řezu δ [°]	70
Úhel čela γ [°]	20
Tvar zubů	FZ
Poloměr zaoblení ostří ρ_0 [μm]	10

3.5 Určení parametrů řezání

3.5.1 Model řezání

Pokud budeme chtít stanovit velikosti řezných odporů pomocí Analytické, Technologicky statistické a novými metodami, tak je za potřebí stanovení modelu řezání. Ten se určuje z technologie řezání a z jednotlivých úhlů mezi průběhem dřevních vláken, rovinami nástroje a pohybových vektorů, které jsou součástí procesu obrábění. V našem případě se jedná o podélné řezání kotoučovou pilou, a tudíž jde o zjednodušený model řezání podélně-čelní.

3.5.2 Určení základních parametrů řezání

Řezná rychlost

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n = 69,6 [m \cdot s^{-1}]$$

Úhel φ_2

$$\psi_1 = \arccos\left(\frac{a + a_e}{R}\right), \psi_2 = \arccos\frac{a}{R}, \Rightarrow \varphi_2 = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} = 41,78 [^\circ]$$

Posuv na zub

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} [m]$$

Tab. 6: Velikost posuvu na zub

$v_f [m \cdot \min^{-1}]$	2	6	10	16	22
$f_z [mm]$	0,01879	0,05639	0,09398	0,1503	0,2067

Tloušťka třísky

$$h_{stř} = f_z \cdot \sin \varphi_2$$

Tab. 7: Velikost střední tloušťky třísky

v_f [$m \cdot min^{-1}$]	2	6	10	16	22
$h_{stř}$ [mm]	0,01252	0,03757	0,06262	0,1002	0,1378

Počet zubů v záběru

$$z_a = \frac{\pi * D * (\psi_2 - \psi_1)}{360 * t_p} = 0,7644 \text{ [ks]}$$

4 VÝSLEDKY

4.1 Smrk v suchém stavu

Tab. 8: Použité koeficienty a výsledky technologicky statistické metody, pro řezání smrku v suchém stavu.

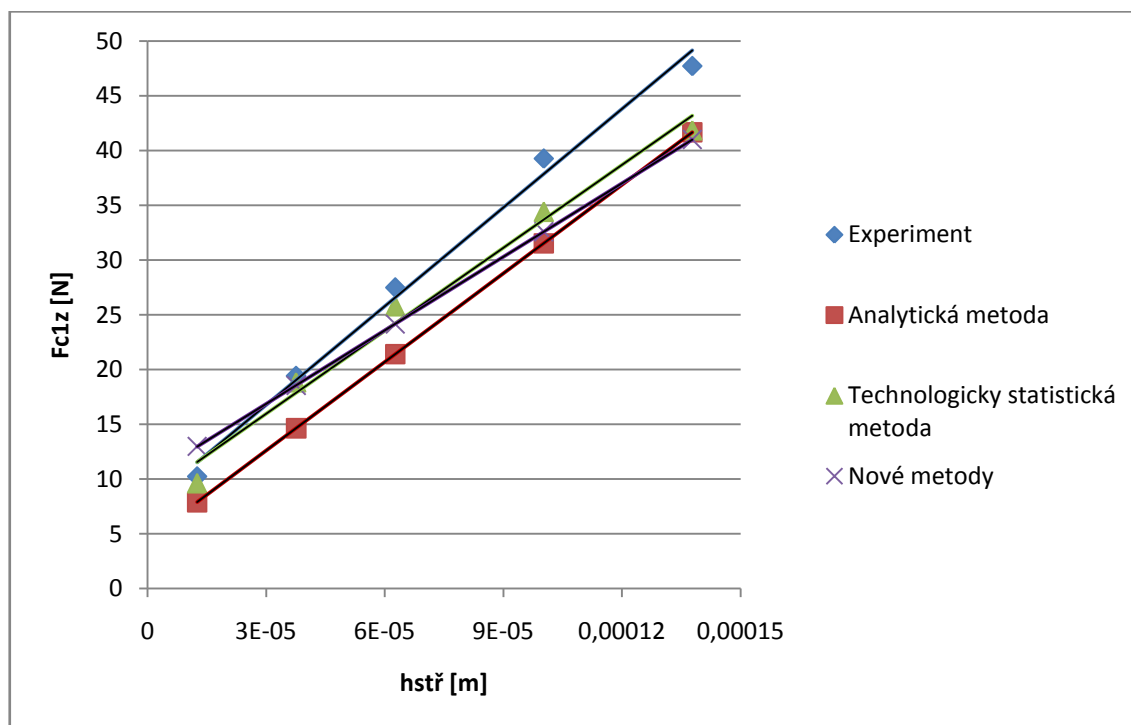
v_f [m/min]	2	6	10	16	22
$K_{\text{bor},\varphi_2,\delta}^1$	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
k_d	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
k_w	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
k_v	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175
k_p	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
m	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
ξ	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
k_c [MPa]	219,21	143,22	117,56	98,06	86,74
F_c^{1z} [N]	9,61	18,84	25,77	34,4	41,84

Tab. 9: Použité koeficienty a výsledky analytické metody, pro řezání smrku v suchém stavu.

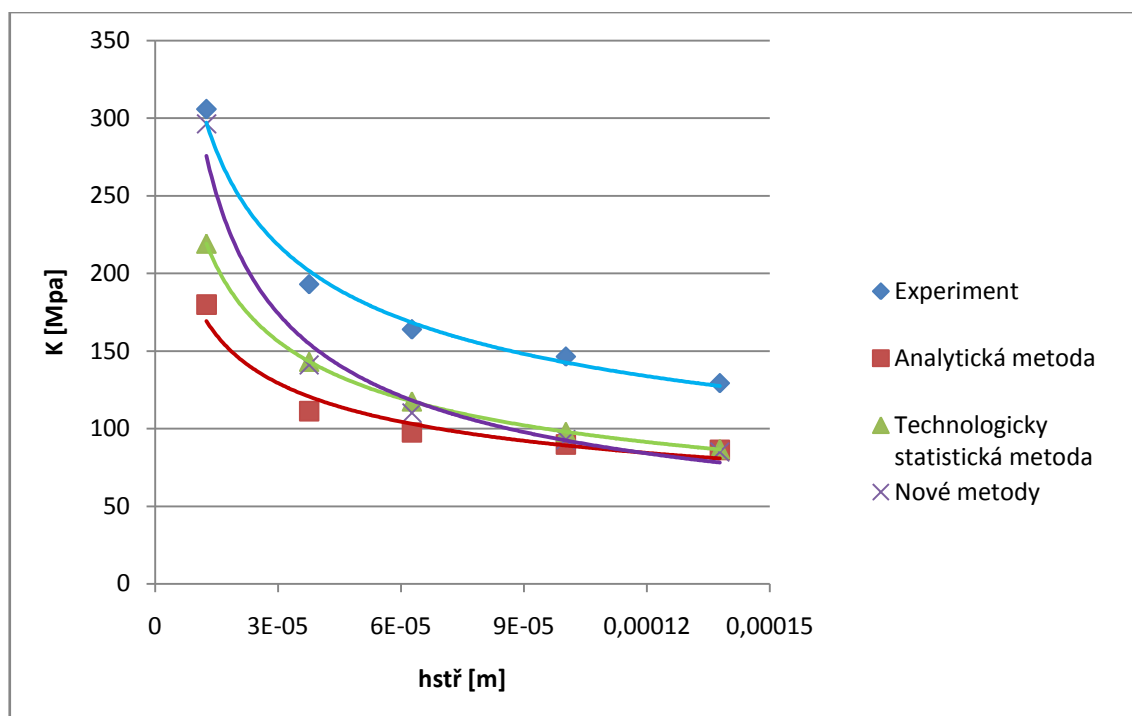
v_f [m/min]	2	6	10	16	22
A	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
B	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
P	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
V	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225
V_m	2,785	2,785	2,785	2,785	2,785
Δp	1,344	1,344	1,344	1,344	1,344
k_t	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
ε	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
L [m]	4479,916	4479,916	4479,916	4479,916	4479,916
a_p	1,033	1,033	1,033	1,033	1,033
k_c [MPa]	179,95	111,325	97,6	89,88	86,37
F_c^{1z} [N]	7,89	14,65	21,4	31,53	41,66

Tab. 10: Použité koeficienty a výsledky nových metod, pro řezání smrku v suchém stavu.

v_f [m/min]	2	6	10	16	22
τ_Y [MPa]	18,7	19,2	18,9	18,7	18,7
R [J*m ⁻²]	1646,94	1646,94	1646,94	1646,94	1646,94
μ	1,04	1,03	1,04	1,05	1,06
β	46,25	45,81	45,98	46,49	46,8
Q_{shear}	0,565	0,567	0,566	0,564	0,563
k_c [MPa]	296,3	141,1	110,2	92,9	85,1
F_c^{1z} [N]	12,99	18,55	24,16	32,59	41



Obr. 17: Porovnání experimentu s výsledky řezných sil, působících na jeden zub, v závislosti na střední tloušťce třísky.



Obr. 18: Porovnání experimentu s výsledky, měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky.

4.2 Smrk ve vlhkém stavu

Tab. 11: Použité koeficienty a výsledky technologicky statistické metody, pro řezání smrku ve vlhkém stavu.

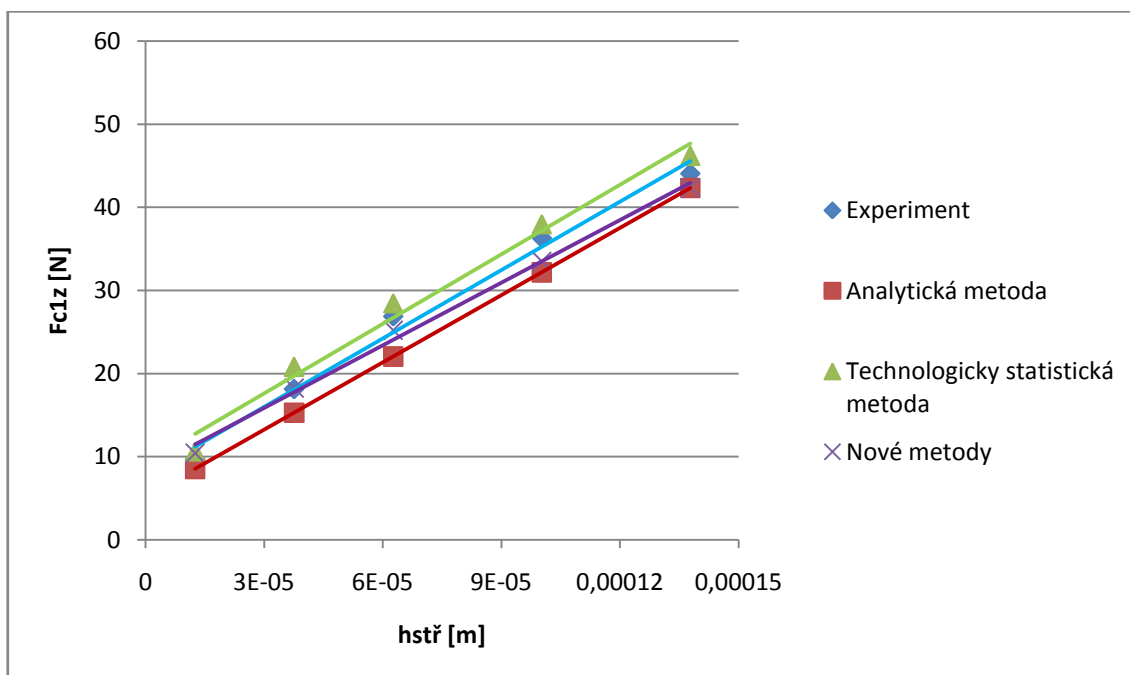
v_f [m/min]	2	6	10	16	22
$K_{bor,\varphi_2,\delta}^1$	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
k_d	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
k_w	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
k_v	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175
k_p	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
m	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
ξ	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
k_c [MPa]	242,17	158,17	129,81	108,26	95,75
F_c^{1z} [N]	10,62	20,81	28,46	38	46,19

Tab. 12: Použité koeficienty a výsledky analytické metody, pro řezání smrku ve vlhkém stavu.

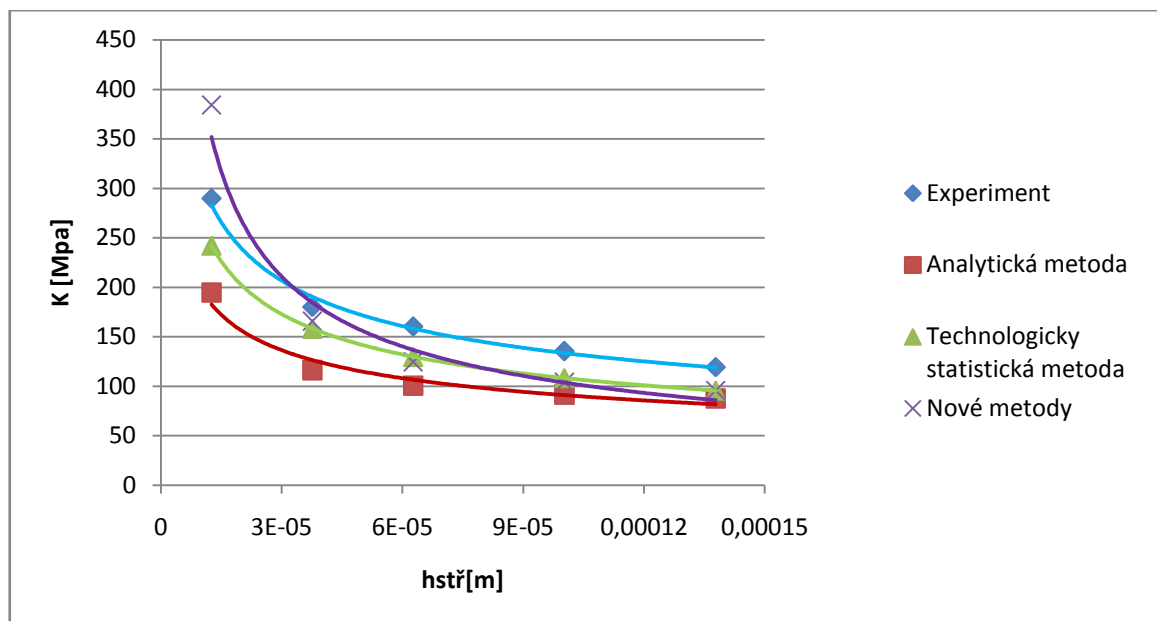
v_f [m/min]	2	6	10	16	22
A	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
B	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
P	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
V	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225
V_m	2,785	2,785	2,785	2,785	2,785
Δp	1,344	1,344	1,344	1,344	1,344
k_t	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
ε	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
L [m]	4479,916	4479,916	4479,916	4479,916	4479,916
a_p	1,033	1,033	1,033	1,033	1,033
k_c [MPa]	194,73	116,25	100,55	91,72	87,71
F_c^{1z} [N]	8,54	15,29	22,05	32,18	42,31

Tab. 11: Použité koeficienty a výsledky nových metod, pro řezání smrku ve vlhkém stavu.

v_f [m/min]	2	6	10	16	22
τ_γ [MPa]	21,98	29,18	34	37,82	39,3
R [J*m ⁻²]	2161,11	2161,11	2161,11	2161,11	2161,11
μ	1,09	0,62	0,42	0,53	0,57
β	47,56	31,60	22,44	27,58	30,42
Q_{shear}	0,56	0,642	0,711	0,682	0,701
k_c [MPa]	384,2	165,8	124,7	104,1	95,8
F_c^{1z} [N]	10,42	18,24	25,20	33,51	42,34



Obr. 19: Porovnání experimentu s výsledky řezné síly, působící na jeden zub, v závislosti na střední tloušťce třísky.



Obr. 20: Porovnání experimentu s výsledky měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky.

4.3 Buk v suchém stavu

Tab. 14: Použité koeficienty a výsledky technologicky statistické metody, pro řezání buku v suchém stavu.

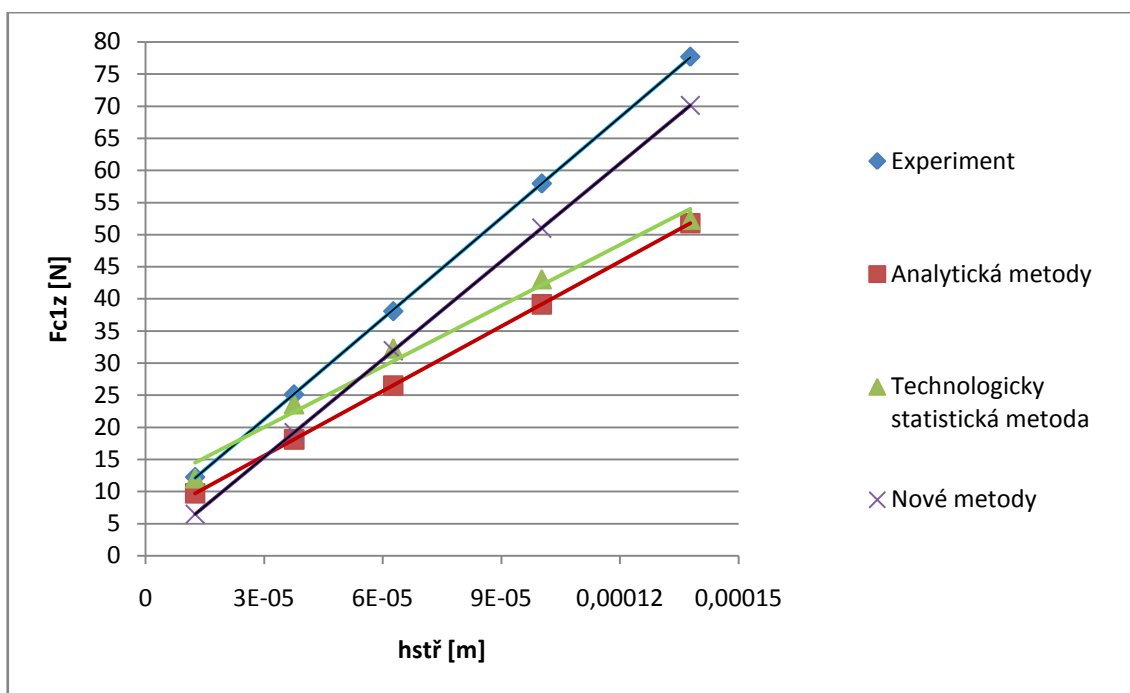
v_f [m/min]	2	6	10	16	22
$K_{bor, \varphi_2, \delta}^1$	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
k_d	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
k_w	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
k_v	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175
k_p	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
m	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
ξ	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
k_c [MPa]	274,65	179,34	147,15	122,7	108,45
F_c^{1z} [N]	12,04	23,6	32,26	43,04	52,34

Tab. 15: Použité koeficienty a výsledky analytické metody, pro řezání buku v suchém stavu.

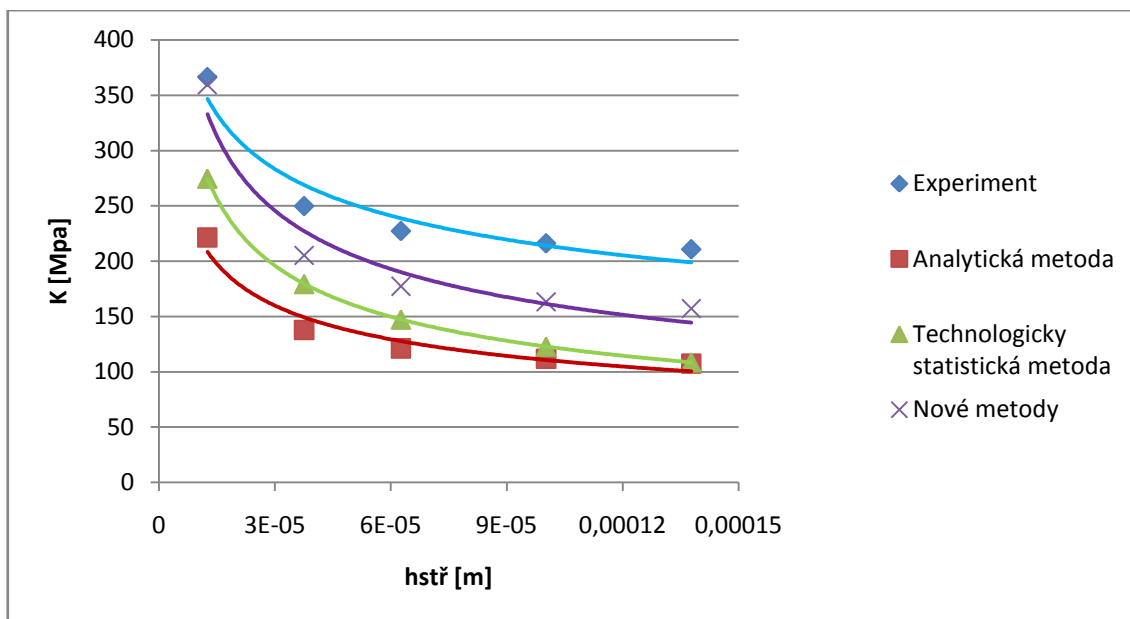
v_f [m/min]	2	6	10	16	22
A	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053
B	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
P	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72
V	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
V_m	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Δp	1,747	1,747	1,747	1,747	1,747
k_t	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
ε	0,00039	0,00039	0,00039	0,00039	0,00039
L [m]	4479,916	4479,916	4479,916	4479,916	4479,916
a_p	1,033	1,033	1,033	1,033	1,033
k_c [MPa]	221,25	137,69	120,98	111,58	107,31
F_c^{1z} [N]	9,7	18,11	26,53	39,14	51,76

Tab. 12: Použité koeficienty a výsledky nových metod, pro řezání buku v suchém stavu.

v_f [m/min]	2	6	10	16	22
τ_r [MPa]	44,47	61,46	71,69	81,13	89,32
R [J*m ⁻²]	1537,22	1537,22	1537,22	1537,22	1537,22
μ	0,979	0,481	0,294	0,157	0,056
β	44,38	25,69	16,36	8,9	3,2
Q_{shear}	0,57	0,684	0,769	0,859	0,944
k_c [MPa]	359,4	205,1	177,2	163,1	157,1
F_c^{1z} [N]	6,46	19,18	31,91	51	70,1



Obr. 21: Porovnání experimentu s výsledky řezných sil, působících na jeden zub, v závislosti na střední tloušťce třísky.



Obr. 21: Porovnání experimentu s výsledky měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky.

4.4 Buk ve vlhkém stavu

Tab. 17: Použité koeficienty a výsledky technologicky statistické metody, pro řezání buku ve vlhkém stavu.

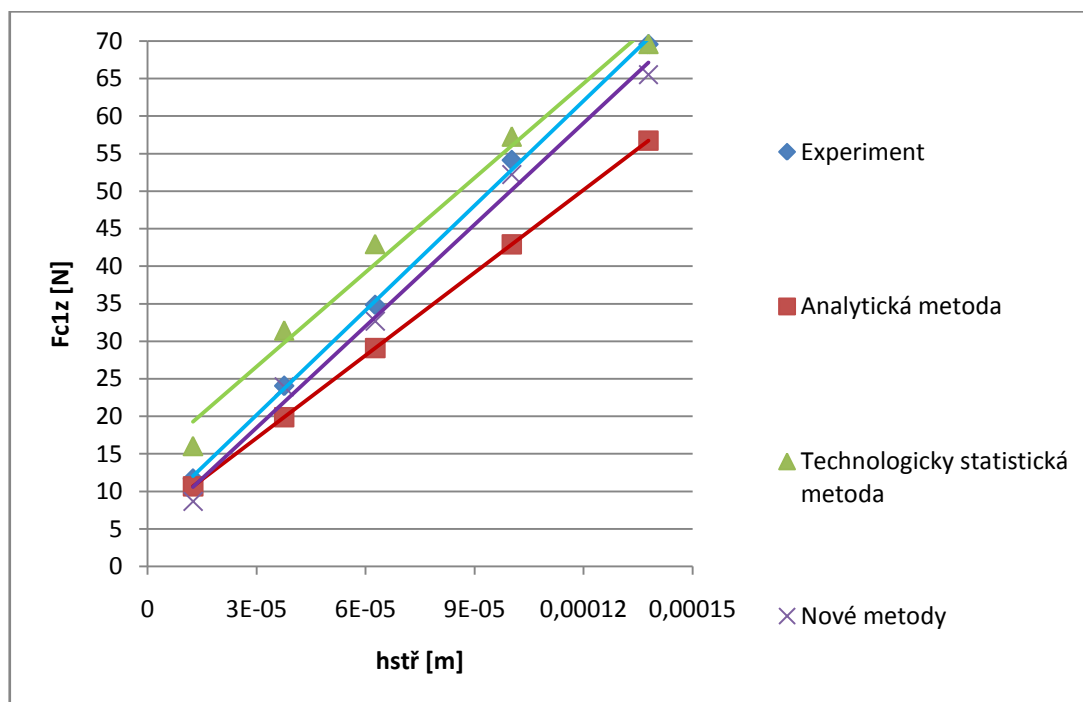
v_f [m/min]	2	6	10	16	22
$K_{\text{bor}, \varphi_2, \delta}^1$	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
k_d	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
k_w	1	1	1	1	1
k_v	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175
k_p	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
m	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
ξ	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
k_c [MPa]	365,82	238,73	195,82	163,21	144,28
F_c^{1z} [N]	16,04	31,4	42,93	57,25	69,6

Tab. 18: Použité koeficienty a výsledky analytické metody, pro řezání buku ve vlhkém stavu.

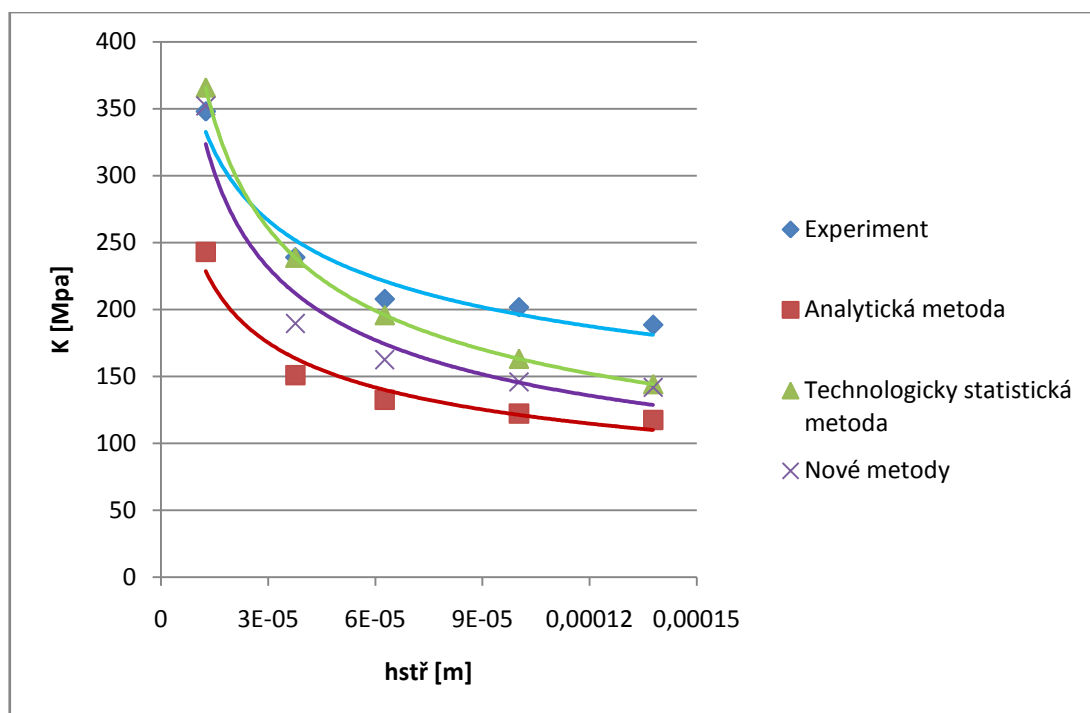
v_f [m/min]	2	6	10	16	22
A	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053
B	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
P	6,72	6,72	6,72	6,72	6,72
V	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
V_m	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Δp	1,747	1,747	1,747	1,747	1,747
k_t	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
ε	0,00039	0,00039	0,00039	0,00039	0,00039
L [m]	4479,916	4479,916	4479,916	4479,916	4479,916
a_p	1,033	1,033	1,033	1,033	1,033
k_c [MPa]	242,91	151	132,62	122,28	117,58
$F_c^{1/2}$ [N]	10,65	19,86	29,08	42,9	56,72

Tab. 139: Použité koeficienty a výsledky nových metod, pro řezání buku ve vlhkém stavu.

v_f [m/min]	2	6	10	16	22
τ_Y [MPa]	46,18	62,9	69,26	86,52	83,32
R [J*m ⁻²]	1721,39	1721,39	1721,39	1721,39	1721,39
μ	0,719	0,31	0,201	- 0,03	0,46
β	35,7	17,23	11,39	-1,7	0,46
Q_{shear}	0,617	0,76	0,826	1,033	0,992
k_c [MPa]	352,1	189,54	162,6	146	141,9
F_c^{1z} [N]	6,46	19,18	31,91	51	70,1



Obr. 223: Porovnání experimentu s výsledky řezných sil, působících na jeden zub, v závislosti na střední tloušťce třísky.



Obr. 24: Porovnání experimentu s výsledky měrných řezných odporů, v závislosti na střední tloušťce třísky.

5 DISKUSE

Při porovnávání výsledků řezných sil v závislosti na střední tloušťce třísky viz obr. 17, řezání smrku v suchém stavu je zřejmé, že nejbližší experimentu, byly výsledky Technologicky statistické metody a nově navrhovaných výpočetních metod. Až do posuvové rychlosti šestnácti metrů za minutu, vykazovaly výsledky těchto metod velmi malou odchylku od experimentu (rozdíly do 4%). Se zvyšující se rychlostí posuvu byl zaznamenán značný nárůst odchylek (rozdíly do 12%). Tento rozdíl je s největší pravděpodobností způsoben poměrně velkou chybou odhadu střední hodnoty z experimentálních dat. Při velkých posuvných rychlostech totiž vzhledem k omezené délce obrobku nedochází bohužel k ustálení řezného procesu a je poměrně obtížné z vrcholu záznamu zjišťovat střední hodnotu. Největší odchylky od experimentu vykazovaly výsledky Analytické metody (rozdíly do 25%)., avšak proti výsledkům metod zmíněných výše, vykazovaly výsledky Analytické metody téměř rovnoběžný průběh lineární regrese. Velikost odchylek výsledků od experimentu mohla být, také zapříčiněna skutečností, že při základních experimentálních měřeních, ze kterých se dále při výpočtech vychází, nebyla známa vlhkost vzorků, řezná rychlost a tloušťka třísky. U Analytické metody je známo pouze to, že základní experiment byl prováděn na dřevinách dubu a borovice a byly známy úhly řezu a přeřezávání vláken.

Na obr. 18 je porovnáván měrný řezný odpor v závislosti na střední tloušťce třísky. Z grafu je patrné, že s rostoucí tloušťkou třísky exponenciálně klesá měrný řezný odpor. Toto je zapříčiněno oblastí zlomu. Pokud by se snižovala tloušťka třísky, měrný řezný odpor by dále exponenciálně rostl a to do chvíle, kdy by bylo dosaženo stejné hodnoty jakou má poloměr zaoblení nástroje. Pak by ovšem nedocházelo k řezání, ale pouze plastické deformaci řezaného materiálu. Pokud by se zvětšovala velikost třísky, docházelo by k postupnému ustalování, až úplnému ustálení velikosti měrného řezného odporu. Je zřejmé, že se nejbližší experimentu přibližovaly výsledky získané Technologicky statistickou metodou, které měly téměř shodný křivkový průběh. Výsledky získané nově navrhovanými metodami, naopak vykazovaly větší pokles a rozdílný křivkový průběh. Tato skutečnost mohla být u vyšších posuvných rychlostí zapříčiněna tím, že bylo velice obtížné určit ustálený průběh sil, v důsledku čehož mohly vzniknout nepřesnosti při určení směrnice přímky.

Z porovnání výsledků řezných sil v závislosti na střední tloušťce třísky viz obr. 19, kdy byl experiment prováděn u smrku se zvýšenou vlhkostí, je patrné, že výsledky všech metod dosahují minimálních odchylek od experimentu. Výsledky Technologicky statistické metody vykazovaly mírně vyšší hodnoty, než jakých bylo dosaženo experimentem (rozdíly do 4%). Takto malé odchylky jsou způsobeny tím, že základní experimentální měření, které vedlo k vytvoření Technologicky statistické metody, probíhalo na borových vzorcích s vlhkostí pohybující se 15 do 20% tedy vlhkosti, při které probíhal i náš experiment. Výsledky analytické metody vykazovaly mírně nižší hodnoty než výsledky experimentu (odchylky do 5%). Vzniká tedy předpoklad, že experimentální měření, vedoucí k vytvoření analytické metody, probíhalo za podobných podmínek, jako naše experimentální měření.

Na obr. 20 jsou porovnávány výsledky měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky. Jak již tomu bylo u výsledků suchého smrkového obrobku, tak i zde, s rostoucí tloušťkou třísky, měrný řezný odpor exponenciálně klesá. V tomto grafu je patrné, že nejbližších hodnot a také téměř shodné křivky dosahovaly výsledky Technologicky statistické metody v porovnání s výsledky experimentálního měření. Největších rozdílů dosahují výsledky Analytické metody. Ty mají sice podobný křivkový průběh v porovnání s experimentem, ale hodnoty se značně liší. To může být zapříčiněno skutečností, že u Analytické metody nejsou známy hodnoty vlhkosti, při kterých probíhala experimentální měření, z nichž poté Analytická metoda vychází. Výsledky nově navrhovaných metod vykazují sice rozdílný křivkový průběh, ale hodnoty jsou v porovnání s experimentem bližší, než jak tomu bylo u Analytické metody, což je způsobeno převážně faktem, že nově navrhované metody vychází z experimentu.

Při porovnávání výsledků řezných sil v závislosti na střední tloušťce třísky viz obr. 21, při řezání buku v suchém stavu, je zřejmé, že bylo dosaženo velkých odchylek výsledků získaných stávajícími metodami od experimentu, zejména pak při vyšších podávacích rychlostech, což mohlo být způsobeno, jak již bylo zmíněno u výsledků, řezných sil závislých na střední tloušťce třísky, suchého smrku. Příčinou je nedostatek dat získaných při měření, kdy je bohužel příčinou malá délka vzorku. Nejlepší shodu zde proto měly výsledky nově navrhovaných metod, které vychází ovšem z experimentu. Přesto však dosahovaly tyto výsledky značně nižších hodnot (rozdíly do 15%).

Z porovnání výsledků měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky (viz obr. 22), kdy byl řezán buk v suchém stavu, je patrné, že se vzrůstající velikostí třísky exponenciálně klesá měrný řezný odpor. Je to způsobeno totožným dějem, který je již popisován u smrku. V tomto případě výsledky nově navrhovaných metod dosahovaly nejbližších hodnot v porovnání s experimentem. Zaznamenán byl rovněž také téměř shodný křivkový průběh. Výsledky Technologicky statistické metody vykazovaly taktéž téměř shodný křivkový průběh v porovnání s experimentem, avšak dosahovaly značně větších rozdílů dosažených hodnot. Tato skutečnost mohla být zapříčiněna tím, že při základních experimentech byly použity vzorky jiné dřeviny. Výsledky Analytické metody pak opět vykazovaly největší rozdíl hodnot.

Při porovnávání výsledků řezných sil v závislosti na střední tloušťce třísky viz obr. 23, řezání buku za zvýšené vlhkosti, je zřejmé, že výsledky Technologicky statistické metody a nově navrhovaných metod, se příliš nelišily od experimentu (rozdíl do 8%). Výsledky analytické metody vykazovaly nižší hodnoty v porovnání s experimentem (rozdíl do 16%). Tyto rozdílné výsledky mohly být zapříčiněny tím, že při výpočtu analytické metody se nepočítá s opravným koeficientem vlhkosti. Navíc se vychází z dubu, což je diametrálně odlišné proti buku a to ať již svojí stavbou či mechanickými vlastnostmi.

Z porovnání výsledků měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky (viz obr. 24), je zřejmé, že výsledky Technologicky statistické metody a nově navrhovaných metod dosahovaly sice nejmenších rozdílů v porovnání s experimentem, ale nevykazovaly již podobnost křivkového průběhu. V protipólu výsledky Analytické metody dosahovaly větších rozdílů hodnot, ale vykazovaly shodnější křivkový průběh. Rozdíl v hodnotách u Analytické metody mohl být způsoben faktem, že při základních experimentech byl použit dub, kdy výsledky jsou sice posléze upravovány opravným koeficientem dřeviny, avšak již může docházet k nepřesnostem. Rovněž není známo, jakých vlhkostních rozmezí bylo použito při základním experimentu. U Technologicky statistické metody se sice vychází z experimentu, prováděného na borových vzorcích, ale vzorky dosahovaly shodné vlhkosti s experimentem.

6 ZÁVĚR

Z výsledků získaných touto studií se zjistilo, jakých rozdílů dosahují jednotlivé výpočetní metody. Při řezání suchých vzorků docházelo k větším rozdílům než při řezání vzorků se zvýšenou vlhkostí. Toto bylo způsobeno především tím, podle kterých experimentálních dat byly jednotlivé metody vyvíjeny. Technologicky statistická metoda vychází z experimentů, kde byly použity borové vzorky o vlhkostrním rozsahu 15-20% a řezné rychlosti $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Podobných podmínek bylo dosaženo při experimentu použitým pro tuto práci, kdy se řezaly vzorky se zvýšenou vlhkostí. Byly však použity jiné dřeviny, což mohlo mít za následek rozdílnost výsledků. Je známo, že smrk má odlišné vlastnosti než borovice. Jedná se například o odlišnou stavbu dřeva, kdy smrk je dřevina bělová, borovice je dřevinou jádrovou, smrk má nižší hustotu než borovice atd. Při porovnání buku a borovice dochází k podobným problémům. Analytická metoda vychází ze základních experimentů, kde byly použity dvě dřeviny a to jedna listnatá a druhá jehličnatá (dub, borovice). Zde však už nebyla řešena vlhkost vzorků a řezná rychlost, jak tomu bylo u Technologicky statistické metody. Lze se tedy pouze domnívat, že byly použity vzorky s vlhkostí v rozmezí 10-20%, což by mohlo mít za následek vyšší rozdíly ve výsledcích. U analytické metody rovněž není počítáno se žádným koeficientem vlhkosti. Nové metody vychází z lomové houževnatosti a stříhové meze kluzu, což má za následek přesnější výsledky proti stávajícím metodám. Je však nutno mít na paměti, že tyto dva parametry není možné určit bez příslušného počtu experimentálních dat, které dle výsledků vykazovaly taktéž odchylky od výsledků získaných experimentem. To mohlo být způsobeno tím, že u nových metod také není počítáno s vlhkostí vzorků. Do budoucna by však nové metody mohly být velkým přínosem a to především vzhledem k přesnosti výsledků jakých dosahují. V současné situaci je však bohužel nadále výhodnější nejen pro technology, ale i pro konstruktéry použití stávajících metod.

7 SUMMARY

From the results achieved by this study the differences between the particular methods of computation were founded. In the process of cutting of waterless samples the differences were higher compared with the samples of increased humidity. This was caused mainly by the selection of experimental data by which particular methods were being developed. Technologically statistic method comes out of the experiments, where the pine samples of the extent of humidity was between 15-20 % and of cutting speed of $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ were used. During the experiment used for this study with cutting of the samples of higher humidity the resembling conditions were achieved. But there were used different woody plants, which could caused the difference of the results. It is known that the spruce has different qualities than the pines. It is given p.e. by the different structure of the wood – the spruce is sapwood while the pine is heartwood, the spruce has lower density etc. Comparing the beech and the pine, we come about the similar problems. The analytical method comes out of the basic experiments, where were two plant woods used, one coniferous and the other broad-leaved (the oak and the pine). But in this case the humidity of the samples and the speed of cutting, where not considered as in case of technologically statistic method. So it is possible just to suppose that the samples of the humidity achieving between 10-20 % were used, which could lead to the higher differences of the results. In the case of the analytical method the coefficient of humidity is not taken into consideration. New methods come out of hardness of the fracture and of the elasticity, which leads to more detailed results compared with the current methods. However it is important not to forget that it is not possible to determine these two parameters without corresponding number of experimental data, which according to the results showed the differences compared to the results achieved by the experiment. This could be caused by the fact that in case of new methods the humidity of the samples is not considered. In the future new methods could contribute mainly in the question of precision of the results achieved by these. In current situation the use of the old methods is unfortunately more advantageous not just for the technologists, but also for the design engineers.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. HOLOPÍREK, J. 2001, Teorie obrábění dřeva: (návody do cvičení). 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 52 s. ISBN 80-7157-503-8
2. LISIČAN, J., 1996. Teória a technika spracovania dreva. Zvolen: Matcentrum
3. VAKOČEK, J. et al., 2004 Dělení, tváření a obrábění materiálů. Vyd. 2. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 123 s. ISBN 80-7157-759-6
4. LISIČAN, J., 1982. Základy obrabania a delenia drevených materiálov. 1. vydanie, Zvolen, skripta VŠLD
5. PERŠIN, M., 2007, Energetické podmínky při řezání materiálů na bázi dřeva. Brno: Diplomová práce, 83 s
6. HOLPÍREK, J. 2000, Teorie řezných odporů při obrábění dřeva. 63 s. Brno, skripta UNOB
7. KOPECKÝ, Z., PERŠIN, M., 2006 Energické poměry při řezání zhutnělého dřeva
8. HORÁČEK, P., 2002. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I, skripta Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 124s, ISBN 80-7157-347-7
9. POŽGAJ, A. 1993, Štruktúra a vlastnosti dreva. 1. Vyd. Bratislava 485 s. ISBN 80-07-00600-1
10. ORLOWSKI, K., et al., 2012 Application of Fracture Mechanics for Energetic Effects Predictions While Wood Sawing. Wood Science and Technology. (a paper accepted for publication)

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Konkrétní podmínky experimentálního zjišťování.....	22
Tab. 2: Významy koeficientů u Technologicky statistické metody.....	23
Tab. 3: Opotřebenění břitu ε [$\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$] na 1 m délky řezu (Varkoček, et al. 2004).....	27
Tab. 4: Závislost koeficientu tření na otupení nástroje (Varkoček, et al. 2004).....	29
Tab. 5: Parametry použitého pilového kotouče	34
Tab. 6: Velikost posuvu na zub	35
Tab. 7: Velikost střední tloušťky třísky	36
Tab. 8: Použité koeficienty a výsledky technologicky statistické metody, pro řezání smrku v suchém stavu.....	37
Tab. 9: Použité koeficienty a výsledky analytické metody, pro řezání smrku v suchém stavu.....	38
Tab. 10: Použité koeficienty a výsledky nových metod, pro řezání smrku v suchém stavu.....	39
Tab. 13: Použité koeficienty a výsledky nových metod, pro řezání smrku ve vlhkém stavu.....	43
Tab. 16: Použité koeficienty a výsledky nových metod, pro řezání buku v suchém stavu.....	46
Tab. 19: Použité koeficienty a výsledky nových metod, pro řezání buku ve vlhkém stavu.....	50

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Otevřené řezání (volné řezání) (Holopírek, 2000)	9
Obr. 2: Uzavřené řezání – řezání ve spáře (Holopírek, 2000)	10
Obr. 3: Řezání ve spáře s vytvořením jednoho řezného povrchu (Varkoček, et al., 2004).	11
Obr. 4: Způsob úpravy zubů pro řezání v drážce (Varkoček, et al., 2004).....	11
Obr. 5: Rovné ozubení, b) Zešikmení čela zubu, c) zešikmení hřbetu zubu	12
Obr. 6: Tvorba třísky při vnikání nástroje do materiálu (Varkoček, et al., 2004).	14
Obr. 7: Pěchování obráběné plochy (Varkoček, et al., 2004).	14
Obr. 8: Síly působící při řezání na břit nástroje (Holopírek, 2000).....	15
Obr. 9: Rozklad sil působících na břit rotačního nástroje (Holopírek, 2000).....	16
Obr. 10: Rozklad působících sil na řezný klín (Lisičan 1996)	18
Obr. 11: Oddělování třísky pilovým kotoučem (Peršín, 2007).....	19
Obr. 12: Nomogramy pro stanovení koeficientů A, B a p (Varkoček, et al. 2004).	26
Obr. 13: Nomogramy pro učení koeficientů V (vlevo) a Vm (napravo) (Varkoček, et al. 2004).	27
Obr. 14: Rozklad sil pomocí Ernst-Marchantova diagramu. (Orlowski 2010)	31
Obr. 15: Schéma zkušebního stendu (Svatoš, et al., 2011).....	33
Obr. 16: Zkušební Stend	33
Obr. 17: Porovnání experimentu s výsledky řezných sil, působících na jeden zub, v závislosti na střední tloušťce třísky.....	39
Obr. 18: Porovnání experimentu s výsledky, měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky.	40
Obr. 19: Porovnání experimentu s výsledky řezné síly, působící na jeden zub, v závislosti na střední tloušťce třísky.....	43
Obr. 20: Porovnání experimentu s výsledky měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky.	44
Obr. 22: Porovnání experimentu s výsledky měrných řezných odporů v závislosti na střední tloušťce třísky.	47
Obr. 23: Porovnání experimentu s výsledky řezných sil, působících na jeden zub, v závislosti na střední tloušťce třísky.....	50

Příloha 1

Tabulky pro určení opravných koeficientů u technologicky statistické metody

Tab.: 1 Jednotkový měrný řezný odpor $K_{\varphi_2 \delta}^1 [N \cdot mm^{-2}]$

 $\varphi_1=90^0$ $\varphi_2=0^0$ $\varphi_3=0^0$		Hodnoty $K_{\varphi_2 \delta}^1 [Nmm^{-2}]$ BOROVICE Model řezání: podélně - čelní									⊥ $\varphi_1=90^0$ $\varphi_2=90^0$ $\varphi_3=90^0$
Úhel $\varphi_m [^0]$	Úhel řezu $\delta [^0]$										
	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	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	

Tab.: 2 Jednotkový měrný řezný odpor $K^1_{\varphi_2 \delta}$ [N · mm⁻²]

 $\varphi_1=90^0$ $\varphi_2=0^0$ $\varphi_3=0^0$		Hodnoty $K^1_{\varphi_2 \delta}$ [Nmm ⁻²] BOROVICE Model řezání: podélně - tangenciální									 $\varphi_1=0^0$ $\varphi_2=0^0$ $\varphi_3=90^0$	
Úhel φ_2 [°]	Úhel řezu δ [°]											
	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		

Tab.: 3 Jednotkový měrný řezný odpor $K_{\varphi_2 \delta}^1 [N \cdot mm^{-2}]$

++ $\varphi_1=0^0$ $\varphi_2=0^0$ $\varphi_3=90^0$		Hodnoty $K_{\varphi_2 \delta}^1 [Nmm^{-2}]$ BOROVICE Model řezání: tangenciálně - čelní									⊥ $\varphi_1=90^0$ $\varphi_2=90^0$ $\varphi_3=90^0$
		Úhel řezu $\delta [^0]$									
Úhel $\varphi_2 [^0]$	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	

Tab.: 4 opravný součinitel vlivu dřeviny k_a

Dřevina	k_a	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

Tab.: 5 opravný součinitel vlivu vlhkosti

Vlhkostní stav dřeva	vlhkost $w [^0]$	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

Tab.: 6 opravný součinitel teploty

Teplota dřeva t [°C]	Model řezání	Dřevo bělové			Dřevo jádrové		
		Řezný úhel δ [°]					
		45	60	75	45	60	75
Opravný součinitel k_t							
15	⊥ : ⊥	1					
0	⊥	1,13	1,14	1,16	1,12	1,14	1,15
	⊥	1,20	1,27	1,62	1,01	1,02	1,02
-15	⊥	1,28	1,42	1,60	1,18	1,22	1,23
	⊥	1,50	1,65	2,15	1,16	1,19	1,22
-30	⊥	1,47	1,48	2,30	1,19	1,24	1,24
	⊥	1,88	2,12	2,59	1,47	1,50	1,52

Tab.: 7 opravný součinitel řezné rychlosti k_v

v [ms ⁻¹]	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

Tab.: 8 opravný součinitel otupení ostří k_p

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

Tab.: 9 opravný součinitel vlivu tloušťky třísky v závislosti na modelu řezání a úhlu φ_2

Úhel φ_m	Hodnoty μ pro modely řezání		
	$\parallel - \perp$	$\parallel - \parallel$	$\parallel - \perp$
0	$\parallel = 0,55$	$\parallel = 0,55$	$\parallel = 0,50$
10	0,47	0,54	0,46
20	0,44	0,54	0,43
30	0,42	0,53	0,40
40	0,39	0,53	0,38
50	0,37	0,52	0,36
60	0,36	0,515	0,35
70	0,35	0,51	0,35
80	0,34	0,505	0,34
90	$\perp = 0,33$	$\parallel = 0,50$	$\perp = 0,33$

Tab.: 10 součinitel vlivu tloušťky třísky k_h

Dřevina	Tloušťka třísky h [mm]													
	1,00	0,70	0,50	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
	Hodnoty opravného součinitele k_h													
měkká	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,7	1,9	2,2	2,6	2,9	3,1	3,3	3,6	4,2
tvrdá	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,7	2,0	2,5	3,0	3,5	3,9	4,4	5,1	7,0

Tab.: 11 součinitel vlivu tření k_f

Způsob řezání	Opravný součinitel vlivu tření k_f v řezné spáře						
	Řezná výška e [mm]						
Rámovými a pásovými pilami	120-160	180-220	240-280	300-340	360-400	420-500	520-600
	součinitel k_f						
	1,0	1,05	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Kotoučovými a stolními pilami	$k_f = 1,05 - 1,20$						

Tab.: 12 součinitel vlivu řezného úhlu k_δ

Úhel řezu $\delta [^\circ]$	Součinitel k_δ		
	řezání pásovou pilou	podélné frézování a řezání kotoučovou pilou	podélné soustružení
35	-	-	0,93
45	-	-	1,00
50	-	0,78	-
55	-	0,86	1,22
60	0,72	1,00	-
65	0,85	1,16	2,00
70	1,00	1,34	-
75	1,20	1,55	-
80	1,42	1,80	-
85	1,65	2,10	-