

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**Fakulta lesnická a dřevařská**

**Katedra zpracování dřeva**

**DIPLMOVÁ PRÁCE**

**Vliv vybraných faktorů na granulometrické složení třísky při  
rovinném frézování termicky modifikovaného dřeva.**

**2012**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Štefan Barčík CSc.**

**Autor práce: Bc. Pavel Šimek**

## **Poděkování:**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli k vypracování méjí bakalářské práce. Především bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Štefanu Barčíkovi CSc. za vedení, pomoc a rady při zpracování této diplomové práce. Déle bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Ladislavu Dzurendovi, PhD. za odborné rady a umožnění provést granulometrickou analýzu v laboratoři Technické univerzity ve Zvolenu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Lubomíru Tomkovi v zastoupení firmy TIMLESS TIMBER s.r.o. za poskytnutí a tepelnou úpravu dřeva potřebného pro tuto práci.

## **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vliv vybraných faktorů na granulometrické složení třísky při rovinném frézování termicky modifikovaného dřeva zpracoval sám a uvedl všechny použité prameny.

-----  
podpis

## **Obsah**

<b>Abstrakt .....</b>	<b>5</b>
<b>Klíčová slova.....</b>	<b>5</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>Key words .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Úvod .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Cíl práce .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Popis problematiky.....</b>	<b>8</b>
<b>3.1. Termicky modifikované dřevo .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.1. Modifikace dřeva .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.2. Změny ve struktuře dřeva.....</b>	<b>9</b>
<b>3.1.3. Dřeviny.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1.4. Vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.5. Odolnost dřeva .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.6. Obrábění.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.7. Technologie výroby tepelně modifikovaného dřeva .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2. Teorie frézování dřeva .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1. Pojem a druhy frézování .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.2. Kinematika frézování .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3. Dezintegrovaná dřevní hmota .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.1. Vznik třísky při podélném frézování .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.2. Rozměry a tvar třísky .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.3. Druhy třísek.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.4. Vlastnosti dezintegrované dřevní hmoty .....</b>	<b>43</b>
<b>4. Metodika práce .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1. Výběr a příprava vzorků .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.1. Tepelné ošetření materiálu.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2. Popis strojního zařízení a frézovací hlavy, .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.1. Popis strojního zařízení.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.2. Popis frézovací hlavy .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3. Řezné podmínky a odběr vzorků .....</b>	<b>59</b>
<b>4.4. Granulometrická analýza.....</b>	<b>61</b>
<b>4.5. Stanovení fyzikálních a mechanických vlastností .....</b>	<b>62</b>
<b>4.5.1. Stanovení hustoty .....</b>	<b>63</b>
<b>4.5.2. Stanovení vlhkosti.....</b>	<b>63</b>

4.5.3.	Stanovení ohybové pevnosti .....	64
4.5.4.	Stanovení rázové houževnatosti.....	64
5.	Experimentální část a zhodnocení .....	66
5.1.	Fyzikální a mechanické vlastnosti .....	66
5.1.2.	Mechanické vlastnosti bukového dřeva .....	69
5.2.	Granulometrická analýza .....	71
5.2.1.	Vliv technicko-technologických parametrů.....	82
6.	Výsledky .....	86
7.	Závěr .....	87
8.	Použitá literatura .....	89
8.1.	Elektronické dokumenty: .....	90
9.	Seznam obrázků.....	91
10.	Seznam tabulek .....	96
11.	Seznam zkratk .....	96
12.	Přílohy .....	97

## **Abstrakt**

S rostoucím trendem spotřeby tepelně modifikovaného dřeva a jeho využitím ve všech oblastech dřevařských výrobků roste i potřeba seznámení se s jeho vlastnostmi obrábění a možnostmi využití vzniklého drobného odpadu.

Tato diplomová práce je zaměřena na vznik a složení dezintegrovaného (sypkého) dřevního odpadu vzniklého v procesu rovinného frézování tepelně modifikovaného dřeva. Práce porovnává granulometrické složení třísky, vzniklé za různých technicko-technologických podmínek frézování u tepelně ošetřeného a rostlého dřeva.

Granulometrická analýza je provedena sítovou metodou - prosíváním vzorků sadou laboratorních sít a stanovení podílů jednotlivých frakcí. Výsledky jsou porovnány s ohledem na možnosti odlučování a filtraci dřevního odpadu a možnostech jeho dalšího využívání především ve výrobě aglomerovaných materiálů nebo výrobě briket a pelet.

## **Klíčová slova**

rovinné frézování, granulometrická analýza, termicky modifikované dřevo, řezná rychlost, rychlost posuvu, zrnitost

## **Abstract**

With the growing trend of consumption of *thermally modified wood* and its use in all areas of wood production there is a growing need to become familiar with its character and processing possibilities of using *generated small waste*.

This thesis is focused on the formation and composition of *disintegrated wood waste* generated from the process of *plane milling of thermally modified wood*. The work compares the *granulometric composition* of a chip and heat-treated *solid wood*, formatted from different technical and technological conditions of milling.

*Granulometric analysis* is performed by the *sieve method*, by *sieving* samples through a *set of laboratory sieves* to *determinate the proportions* of individual fractions. The results has been compared with a further regard to a possibility of separating and filtering wood waste and the possibilities of its further use, primarily in the production of *sintered materials* or production of briquettes and pellets.

## **Key words**

face milling, granulometric analysis, thermally modified wood, cutting speed, feed rate, particle size

## 1. Úvod

Dřevo je přírodní obnovitelný materiál lidmi využívaný od pradávna jako zdroj tepla nebo jako stavební materiál, v neposlední řadě bylo dřevo využíváno k výrobě nástrojů, náradí a jiných předmětů. S ohledem na to, že je dřevo obnovitelný materiál, a za předpokladu, že se bude dřevo rozumně využívat a zároveň se bude pečlivě hospodařit s lesy, tedy se zdroji dřeva, lze říci, že je dřevo nevyčerpatelným zdrojem materiálu a energie. Za tohoto předpokladu lze lesy i dřevo dlouhodobě využívat se všemi výhodami, které mají.

I přesto je však snaha možnosti a využití dřeva a výrobků z něj stále zdokonalovat a rozšiřovat tak potenciál dřeva jako výrobního materiálu. Jednou z možností, jak toho dosáhnou, je tepelná modifikace dřeva. Tepelná modifikace dřeva je založena na termických a hydrotermických změnách ve struktuře dřeva, za působení zvýšených teplot, které vedou především ke zlepšení vlastností dřeva, jako jsou snížení hygroskopicity dřeva, tvarová stálost, barevné změny, odolnost proti škůdcům atd. (ThermoWood Handbook 2003, Reinprecht 2008)

V poslední době neustále stoupá spotřeba tepelně upraveného dřeva. Nárůst prodeje tepelně ošetřeného dřeva technologií Thermowood je uveden v příloze obr. 84. Tepelně modifikovaného dřeva se v Evropě podle Boonstra (2008) vyrobilo v roce 2007 přibližně 130 800 m<sup>3</sup>. Přičemž se k tepelné úpravě nejvíce používají nejhojněji rostoucí dřeviny jako je borovice a smrk. Pro tepelnou úpravu se ovšem používají i ostatní druhy dřevin. Zastoupení dřevin používaných k tepelné úpravě je uvedeno v příloze obr. 85. (Kačíková 2011)

Jednou z hlavních ale i následných a stále více používaných operací při druhovýrobním zpracování a opracování dřeva je frézování. Se stále rostoucí spotřebou termodřeva roste i jeho podíl při opracování, a tím i množství vzniklého drobného odpadu. Tento odpad se musí odstraňovat (odsávat) a dále filtrovat, aby nedocházelo k znečišťování pracovního prostředí. Důležitou vlastností pro dokonalé odstranění a filtrování ale i pro jiné možnosti využití drobného dřevěného odpadu vzniklého při obrábění dřeva je znalost složení tohoto dřevního odpadu. Jednou z vlastností, která má vliv na vlastnosti a použití drobného odpadu je granulometrické složení dřevěného drobného odpadu. Tato práce se proto zabývá granulometrickým složením třísky termodřeva.

## 2. Cíl práce

Úkolem této práce je stanovení a seznámení s granulometrickým složením dřevního odpadu vzniklého při rovinném frézování termicky modifikovaného dřeva. Vzorky pro rozbor byly odebrány při rovinném frézování s různými technicko-technologickými parametry a pro porovnání byly odebírány vzorky vzniklé při frézování rostlého, tedy neupraveného dřeva.

Parametry frézování ovlivňující vznik a složení třísky jsou především úhlová geometrie frézy, podávací a řezná rychlost obrábění. K odebrání vzorků bylo použito vždy po třech hodnotách: úhlová geometrie frézy s úhlem čela  $\gamma = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ , podávací rychlost  $v_f = 4, 8, 11$  m/min a řezná rychlost  $v_c = 20, 30, 40$  m/s. Těmito hodnotami bylo obráběno bukové dřevo (*Fagus sylvatica*) jak v přírodním stavu tak i tepelně upravené.

Rozdělení do jednotlivých frakcí podle velikosti a určení granulometrického složení odebraných vzorků bylo uskutečněno sítovou analýzou. Sítová analýza je pro účely stanovení granulometrického složení nejběžnější, jednoduchá a dostatečně přesná.

Vyhodnocení a výsledky analýzy byly znázorněny graficky pomocí distribučních křivek a podle jednotlivých parametrů uspořádány do tabulek. Vyhodnocování jednotlivých vzorků bylo prováděno s ohledem na jednotlivé technicko-technologické parametry použité při frézování. Jednotlivé výsledky analýz byly porovnávány u přírodního i tepelně ošetřeného buku.

V průběhu jednotlivých analýz byly odebírány vzorky jednotlivých frakcí, pro možné další zkoumání, především pro stanovení rozměrů a tvarů jednotlivých třísek.

### **3. Popis problematiky**

V této části je popsána problematika související s tématem této diplomové práce. Popis je rozdělen do tří základních částí, z kterých se skládá problematika granulometrického složení třísky vzniklé rovinným frézováním tepelně upraveného dřeva.

První část se zabývá seznámením s termicky modifikovaným dřevem, popsáním změn probíhajících ve dřevě za působení vysokých teplot a vlivem těchto teplot na konečné vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva. Dále jsou zde popsány hlavní technologie výroby tepelně modifikovaného dřeva.

V druhé části je popsána problematika teorie frézování dřeva a vznik třísky při obrábění dřeva.

Třetí část charakterizuje dezintegrovanou dřevní hmotu, její vlastnosti a popis měření a zjišťování těchto vlastností.

#### **3.1. Termicky modifikované dřevo**

##### **3.1.1. Modifikace dřeva**

Dřevo má široké možnosti využití, zejména při výrobě nářadí, dopravních prostředků (lodí), papíru a celulózy. Používá se ve stavebnictví jako konstrukční nebo obkladový materiál, také v nábytkářství a při výrobě materiálů na bázi dřeva. Při využívání výrobků ze dřeva požadujeme co možná nejdelší dobu životnosti. Proto je jednou z velmi důležitých vlastností dřeva jeho přirozená trvanlivost v různých exteriérových a náročných interiérových expozicích, která se týká zejména jeho odolnosti vůči biotickým škůdcům. Trvanlivost dřeva považujeme za dostatečnou, nebo nedostatečnou a podle toho se snažíme dřevo chránit. Trvanlivost dřeva se dá zvýšit metodami chemické ochrany a dnes také metodami modifikační úpravy dřeva. Přitom si dřevo musí zachovat své výhodné vlastnosti, pro které je ceněno a využíváno, jako je pevnost a další mechanické vlastnosti: barva, opracovatelnost, ekologická nezávadnost atd. (Reinprecht 2008)

##### **3.1.1.1. Tepelná modifikace dřeva**

Tepelné úpravě dřeva se věnovala pozornost již před cca 100 lety, v třicátých a čtyřicátých letech minulého století se touto problematikou zabývali odborníci v Německu



a Spojených Státech. V dalších letech se touto problematikou zabývali především v Německu. Novější práce (devadesátá léta) na toto téma byli publikovány především ve Francii, Nizozemsku a Finsku, kde byly vypracovány různé postupy a technologie pro tepelnou úpravu dřeva. (ThermoWood Handbook 2003)

Tepelná modifikace dřeva je založena na termických a hydrotermických úpravách dřeva při vysokých teplotách v rozmezí 150° – 220° – 260 °C. Vysokými teplotami se rozkládají některé stavební polymery dřeva a tvoří se nové ve vodě nerozpustné látky a také látky s toxickým nebo odpuzujícím účinkem proti biologickým škůdcům dřeva, jako jsou plísňe a houby. Pevnost a některé mechanické vlastnosti se u termicky upraveného dřeva snižují. Podstatně méně se mechanické vlastnosti snižují, pokud se tepelná úprava dřeva provádí v inertním prostředí bez přístupu kyslíku - například ve vakuu, v dusíku nebo v olejích. (Reinprecht 2008)

Při teplotách nad 150° až 170 °C se kromě plastifikačních procesů začíná výrazně měnit i chemická struktura v upravovaném dřevě. Ve strukturách polysacharidů, ligninu a průvodních látek zanikají hydrofilní – OH funkční skupiny a provádějí se depolymerizační a kondenzační reakce ve spojení s částečnou karbonizací dřeva a s uvolňováním hořlavých plynů. Tepelně upravené dřevo je díky těmto změnám odolnější vůči biologickým škůdcům a klesá jeho hygroskopicitata. (Reinprecht 2008)

### **3.1.2. Změny ve struktuře dřeva**

Tepelná úprava vyvolává změny v chemické a následně i anatomické struktuře dřeva. K mírným změnám ve struktuře dřeva začíná docházet při teplotách nad 100 °C. Výrazné změny se začínají objevovat při teplotách přesahujících 150 °C a se stoupající teplotou už nepřestávají. Chemické změny se projevují v anatomické struktuře dřeva, kde vznikají trhliny ve ztenčeninách a v buněčných stěnách.

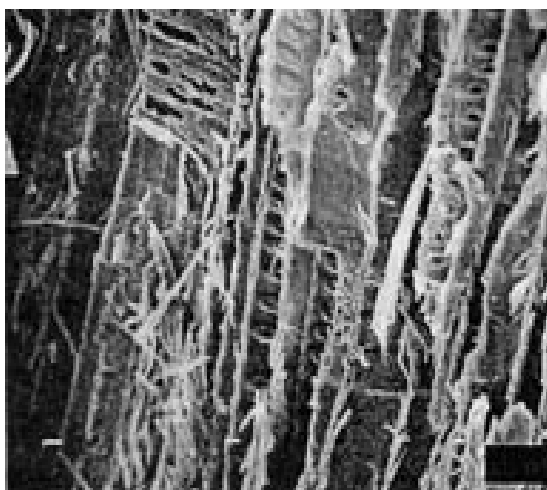
Zkřehnutí a trhliny v buňkách se ve dřevě projeví snížením pevnosti dřeva, hlavně ohybové pevnosti a houževnatosti dřeva. (Reinprecht 2008)

Technologický proces při výrobě termicky modifikovaného dřeva je potřebné provádět takovým způsobem, aby se při minimálních ekonomických nákladech dosáhlo cílené změny a na minimum byly potlačeny nežádoucí změny dřeva. (Kačíková 2011)

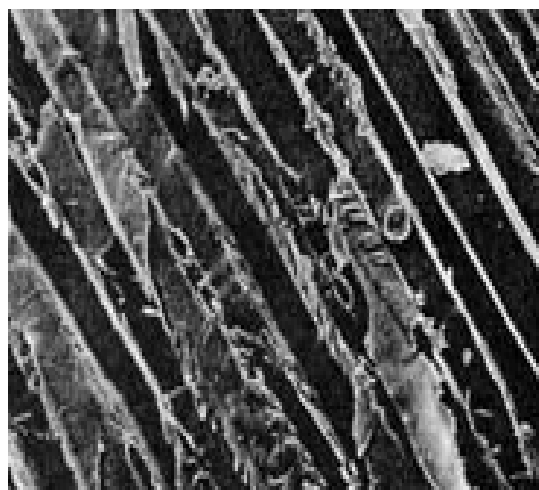
### 3.1.2.1. Anatomická struktura

V důsledku tepelného zpracování dřeva se mění jeho anatomická struktura a vlastnosti. Změny v anatomické struktuře mají vliv na konečné vlastnosti upraveného materiálu. Tyto změny jsou způsobeny především změnami v buňce dřeva, a to především ve vrstvách buněčných stěn.

Na obrázcích 1 a 2 je viditelný mikroskopický rozdíl mezi přírodní borovicí a tepelně ošetřenou borovicí. (ThermoWood Handbook 2003, Kačíková 2011)



Obr. 1 Neupravená borovice  
(ThermoWood Handbook 2003)

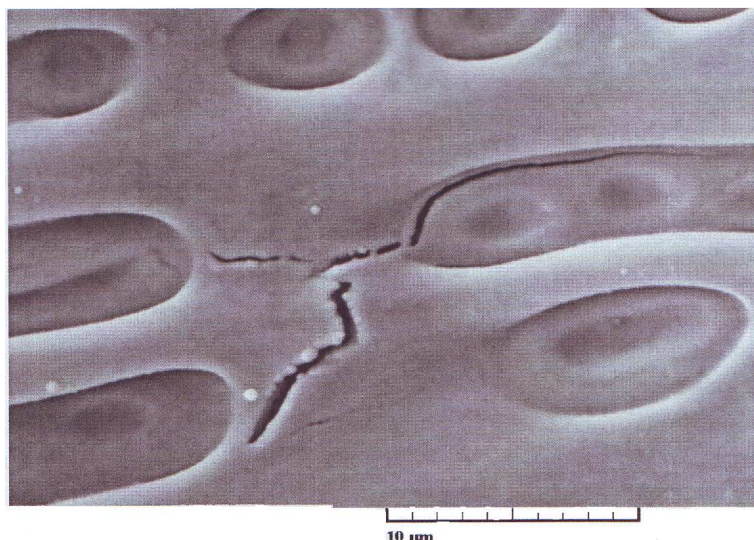


Obr. 2 Tepelně ošetřená borovice  
(ThermoWood Handbook 2003)

#### 3.1.2.1.1. Trhliny

Z důvodu depolymerizace celulózy jsou buněčné stěny křehčí a častěji se v nich tvoří nanotrhliny a mikrotrhliny. Trhliny mezi vrstvami buněčných stěn vznikají již při teplotě 150°C. Podélné trhliny v celulózové kostře buněk se začínají objevovat při teplotách 180 až 220 °C. S dalším nárůstem teploty se buněčné stěny zřetelně zeslabují a vznikají v nich větší trhliny. Při teplotách nad 300 až 500 °C buněčné stěny úplně mizí směrem ke střední lamele, až z nich nakonec zůstane jen popel.

Na obrázku 3 je znázorněna mikrotrhlina v buňce vzorku buku (*Fagus sylvatica*) o vlhkosti 10 %, který byl vystaven působení tepla 205 °C po dobu 6 hodin (Trialová a Mamoňová 2005). (Reinprecht 2008)



Obr. 3 Mikrotrhlina v jarní cévě buku ošetřeného v 205 °C/6h (Reinprecht 2008)

### 3.1.2.2. Chemická struktura

Mezi základní chemické prvky, které jsou obsaženy ve dřevě, patří uhlík C (49 až 50 %), kyslík O (43 až 44 %), vodík H (asi 6%), dusík N (0,1 až 0,3 %), a minerální látky S, Na, Ca, Mg, K (0,1 až 1 %).

Hlavními složkami dřeva jsou celulóza (40 až 50 %), hemicelulóza (25 až 35 %), lignin (20 až 30 %) a ostatní složky (1 až 3 %) jako jsou tuky, cukry, třísloviny.

Celulóza je zastoupena ve dřevě ze 40 až 50 %. Je charakteristická svou stabilitou a podílí se na stavbě buněčných stěn, které vytvářejí kostru dřeva.

Lignin, který je ve dřevě zastoupen 20 až 30 %, se ukládá ve zdřevnatělých buněčných stěnách. Slouží jako pojivo vláken a dává dřevu pevnost. Celulóza a lignin jsou stabilnější a degradují pomaleji a při vyšších teplotách než hemicelulóza.

Složky dřeva jsou při tepelné úpravě degradovány různým způsobem. Jejich rozsah je závislý na době působení a teplotě použité při tepelné modifikaci dřeva. Změny v hlavních složkách dřeva způsobené působením tepla jsou popsány níže. (Josten 2010, Thermowood Handbook 2003)

Ke změnám ve dřevě dochází již při teplotách 20 až 150 °C, kdy dochází k sušení dřeva. Významné a intenzivní chemické změny jsou realizovány při působení teploty v intervalu 180 až 250 °C. Při působení teplot nad 250 °C začíná proces zuhelnatování, vzniká oxid uhličitý a další produkty hoření. (Kačíková 2011)

### **3.1.2.2.1. Hemicelulóza**

Hemicelulóza je nejméně stabilní stavební složkou při termickém zpracování dřeva. Složky hemicelulózy jsou amorfni heteropolysacharidy, které se skládají z více typů monosacharidů. Z tohoto důvodu jejich termický rozklad probíhá v širším rozsahu teplot, intenzivněji od 170 do 280 °C. Termickým rozkladem při teplotách nad 150 °C vznikají různé depolymerizační a dehydratační reakce, při kterých vzniká kyselina octová, metanol, furán a jiné monomerní látky. Tyto monomery při vysokých teplotách dokážou vstoupit do kondenzačních reakcí za vzniku hydrofóbnějších substancí vzhledem k původní hemicelulóze, a to se odráží v poklesu hygroskopicity dřeva a zlepšení rozměrové stability. Po tepelném rozkladu hemicelulózy už dřevo neobsahuje dostatečné množství výživných látek podporujících růst hub, které způsobují hnilobu. (Reinprecht 2008)

### **3.1.2.2.2. Celulóza**

Celulóza je nosnou kostrou buněčných stěn dřeva a je odolnější proti termické degradaci než hemicelulóza.

Při teplotách nad 150 °C nastávají depolymerizace celulózy zejména za přítomnosti kyslíku a různých anorganických látek. Krystalická celulóza depolymerizuje výrazněji až při teplotách mírně nad 300 °C. Avšak i depolymerizační procesy v lineárních řetězcích amorfni celulózy vedou k poklesu tahové a ohybové pevnosti a také k poklesu jiných mechanických vlastností dřeva.

Při výrobě tepelně modifikovaného dřeva je tedy nutné co nejvíce omezit všechny depolymerizační reakce v řetězcích celulózy. Omezení depolymerizačních reakcí se docílí při tepelné úpravě dřeva v inertním prostředí dusíku, vakuu a nebo ohřevem v rostlinných olejích. (Reinprecht 2008)

### **3.1.2.2.3. Lignin**

Lignin je termicky nejstabilnější složkou dřeva. Z fyzikálního hlediska přechází snadno při teplotách 100 až 180 °C do plastifikačního stavu, ale z hlediska chemického kovalentní vazby ligninu nejlépe odolávají termolýze a termooxidaci. K chemickým reakcím v molekulách ligninu dochází až při teplotách 180 až 260 °C. Menší odolnost ligninu se pozoruje jen při zahřátí v oxidační atmosféře už při teplotách 150 až 200 °C. Při

těchto teplotách se z ligninu tvoří nízkomolekulární látky typu koniferilalkoholů a syringylalkoholů a k nim odpovídajícím aldehydům a karboxylovým kyselinám.

S postupně narůstající teplotou se vytvářejí podmínky pro odštěpení některých funkčních skupin ligninu ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OCOCH}_3$ ,  $-\text{CHO}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{OCH}_3$ ,  $-\text{CH}_2\text{OH}$ ). Při teplotách nad  $250\text{ }^\circ\text{C}$  se začínají štěpit vazby mezi monomerními ( $\text{C}_9-$ ) jednotkami ligninu a tvoří se monomerní fenolové produkty.

Degradační produkty také ve dřevě kondenzují a tvoří se z nich kondenzované aromatické struktury jako fenantren a jiné struktury s biocidním účinkem proti dřevokazným houbám. (Bučko 1988, Reinprecht 2008)

### 3.1.2.3. Faktory ovlivňující strukturu dřeva při tepelné úpravě

Termická úprava dřeva vyvolává chemické reakce a změny ve struktuře dřeva. Tyto reakce jsou ovlivněny především podmínkami prostředí.

Podmínky nejvíce ovlivňující reakce ve dřevě:

- intenzita působení tepla (výška teploty a čas působení teploty)
- přístup kyslíku k upravovanému dřevu
- tlak prostředí
- druh a počáteční vlhkost dřeviny
- tvar upravovaného materiálu
- aditiva ve dřevě

Intenzita působení tepla je hlavní faktor ovlivňující změny ve struktuře dřeva při tepelném zpracování. Všeobecně lze říct, že čím je teplota vyšší a doba působení delší, jsou reakce a změny ve dřevě intenzivnější.

Přístup kyslíku významně ovlivňuje reakce při tepelném rozkladu dřeva. Kyslík s termicky aktivovanými složkami reaguje formou termooxidace. V přítomnosti kyslíku se snadněji narušují složky dřeva - například rychlejší pokles polymerizačního stupně polysacharidů. Pro omezení termooxidačních reakcí se tepelná úprava provádí v inertní atmosféře.

Listnaté druhy dřeva s nižším podílem ligninu se termicky modifikují intenzivněji než jehličnatá druhy dřev.

Vlhkost dřeva ovlivňuje vedení tepla při tepelné modifikaci dřeva. Vedení tepla v suchém dřevě je nižší než v mokřém dřevě. Přítomností molekul vody ve dřevě se upřednostňují hydrolyzní reakce před termooxidačními reakcemi.

V závislosti na zařízení a technologickém procesu se termická modifikace provádí za sníženého nebo zvýšeného tlaku. Snížený tlak (vakuum) omezuje množství kyslíku v prostředí a se termooxidační reakce je potlačena. Zvýšený tlak se využívá například při úpravě dřeva vodní párou. (Reinprecht 2008)

### 3.1.3. Dřeviny

Tepelné modifikaci mohou být v podstatě podrobeny všechny druhy dřevin. Nicméně každá dřevina má jiné chemické složení, anatomickou strukturu a vlastnosti. Z tohoto důvodu se parametry používané pro technologický proces tepelné úpravy musí optimalizovat pro každý druh dřeviny zvlášť, a proto jsou využívány především nejběžnější druhy dřevin.

Kvalita používaných dřevin pro tepelnou úpravu je důležitá s ohledem na kvalitu konečného výrobku.

#### 3.1.3.1. Druhy dřevin

Každý druh má své charakteristické vlastnosti jako je šířka letokruhů, buněčné složení, pórovitost, množství chemických prvků, délka vláken atd. Pro tepelnou úpravu se nejčastěji využívají nejběžnější druhy dřevin, které rostou v zemích, kde se tepelně upravené dřevo vyrábí. Tepelně modifikované dřevo se vyrábí hlavně ve Finsku, Rakousku, Holandsku, Francii ale i jiných zemích EU, kde se zpracovávají místní dřeviny.

Na tepelnou úpravu dřeva se nejčastěji zpracovává borovice (*Pinus sylvestris*), smrk (*Picea abies*), bříza (*Betula pendula*) a topol (*Populus tremula*). Kromě těchto dřevin se také tepelně upravuje jasan (*Fraxinus excelsiour*), modřín (*Larix sibirica*), olše (*Alnus glutinosa*) a buk (*Fagus silvatika*). (ThermoWood Handbook 2003)

V této diplomové práci jsou zjišťovány vlastnosti a granulometrické složení třísky tepelně upraveného buku (*Fagus silvatika*), proto je v této části věnována větší pozornost této dřevině.

**Borové dřevo** (*Pinus sylvestris*) je jedním z nejpoužívanějších druhů dřevin a je tedy hojně využívána na tepelnou úpravu. Je-li borovicové dřevo vystaveno poměrně nízkým teplotám, získá odstín bukového dřeva. Zatímco při vyšších teplotách se zbarví do tmavě hnědé. Borovicové dřevo se snadno opracovává všemi nástroji. Velké množství

pryskyřice obsažené v běžném neupraveném borovém dřevě je při tepelném zpracování z dřeva odstraněno nebo ve dřevě krystalizuje, čímž se dřevo stává snadněji zpracovatelným a má širší využití - například při výrobě laviček do sauny.

**Smrkové dřevo** (*Picea abies*) je také jedním z nejpoužívanějších druhů dřevin. Tepelnou úpravou se ve smrkovém dřevě stejně jako u borovice eliminuje pryskyřice a rozšíří se jeho možnost použití. Tepelně upravené smrkové dřevo je lehké, barva se podle druhu zpracování liší od odstínů podobných buku po světle hnědou.

**Březové dřevo** (*Betula pendula*) zpracovávané při poměrně nízkých teplotách získává bukový odstín. Při zpracování vyššími teplotami získává sytý, kávově hnědý odstín, který napodobuje vzhled některých tropických dřevin. Březové dřevo s velkým počtem suků vytváří pěkné spektrum odstínů. [9]

### 3.1.3.1.1. Buková dřevo (*Fagus silvatika*)



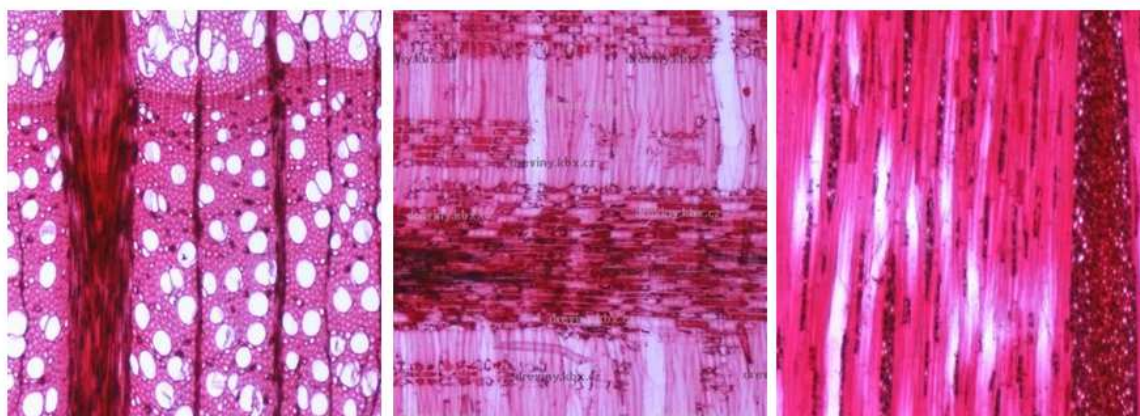
Obr. 4 Barevná změna buku upraveného při teplotě 191°C/1 h

Makroskopické znaky: dřevo je bez zřetelného zbarvení mezi vyvrálým dřevem (jádrem) a bělí - má jednotnou pleťově růžovou barvu. Výjimkou je čerstvě pokácené bukové dřevo, kde je nápadně zbarvené středové dřevo (jádro), což je způsobeno rozdílným obsahem vody ve dřevě. Postupným vysycháním získává dřevo buku jednotnou barvu. U starších stromů se vyskytuje ve středové části vyvrálého dřeva nepravidelně ohraničené (letokruhy tvoří hranici) tzv. nepravé jádro zbarvující dřevo do červenohněda. Dřevo je roztroušeně pórovité, cévy jsou pouhým okem nezřetelné. Dřeňové paprsky jsou široké, velmi dobře znatelné a nápadné i na příčném řezu. Na radiálním řezu jsou rozeznatelné jako světlá zrcátka. Na tangenciálním řezu jsou jako tmavší čáry.

Mikroskopické znaky: tracheje jsou velmi četné a ojediněle nebo častěji ve skupinách. Širší cévy v jarní části letokruhu mají jednoduchou perforaci, užší cévy v letní



části letokruhu mají mřížkovou perforaci. Stěny cév jsou řídce tečkované a jen na dotykové ploše s dřevnými paprsky jsou tečky častější. Dřevné paprsky jsou značně široké a vysoké složené z parenchymatických buněk. Vyskytují se v jednovrstvých (častější) i vícevrstvých velikostech. Na hranici letokruhu jsou vždy rozšířené. Pouze při tvorbě nepravého jádra jsou cévy často vyplněné thylami.



Příčný řez

Radiální řez

Tangenciální řez

Obr. 5 Mikroskopická stavba buku ([www.dreviny.kbx.cz](http://www.dreviny.kbx.cz))

Dřevo buku je středně tvrdé, těžké, snadno štípatelné a pevné, je však málo pružné. Značně se sesychá a při změně vlhkosti silně pracuje. Dobře se moří, impregnuje a paří a napařené se dobře ohýbá. Dobře a snadno se obrábí. Pod vodou je trvanlivé, v exteriéru ovšem dlouho nevydrží. Snadno podléhá napadení houbami a dřevokazným hmyzem. Bukové dřevo je velmi výhřevné a proto se využívá jako palivo.

Bukové dřevo má velmi široké možnosti použití. Je důležitou surovinou k soustružení, truhlářské výrobě, výrobě hraček, dekoračních předmětů a různého kuchyňského nádobí. Často se používá k výrobě nábytku - je výbornou dřevinou pro výrobu ohýbaného nábytku (masivního i lamelového). Používá se také k výrobě dekoračních dýh, překližek (rovných i tvarovaných), podlah a schodišť. Je využíváno k výrobě dřevěného uhlí a dřevo horší jakosti jako palivo.

Tepelnou úpravou bukového dřeva se možnosti jeho využití rozšíří. Zvýšením jeho odolnosti se může využívat v exteriéru. Tepelnou úpravou získá dřevo hnědý odstín napodobující některé exotické dřeviny. (Balabán 1955)

### **Mechanické a fyzikální vlastnosti**

Hlavní mechanické a fyzikální vlastnosti bukového dřeva jsou uvedeny v tabulce 1.



Při tepelné úpravě dřeva se mění fyzikální a mechanické vlastnosti. V závislosti na úpravě se tyto vlastnosti mění více či méně.

Konkrétně u buku, jak uvádí Maulis, (2009), při zkouškách na tepelně upraveném buku (*Fagus silvatica*) při teplotě 210 °C technologií THERMOWOOD jsou hodnoty změn následující:

Pevnost přírodního buku v tlaku ve směru vláken je podle tabulky 1 53 MPa (střední hodnota). U buku tepelně ošetřeného při 210 °C stoupla pevnost v tlaku o 23 MPa, tedy na 76 MPa, což je nárůst přibližně o 30 % pevnosti v tlaku (Maulis, 2009). Hodnoty zvyšování pevnosti v tlaku u jiných dřevin v závislosti na teplotě úpravy jsou uvedeny v tabulce 14.

Vlastnosti buku ( <i>Fagus silvatica</i> )		
Fyzikální vlastnosti		
	Střední hodnota	min./max. hodnota
Hustota při W = 0 % [kg/m <sup>3</sup> ]	680	490/880
Hustota při W = 12 % [kg/m <sup>3</sup> ]	710	530/880
Sesychání v podélném směru	0,3%	/
Sesychání v radiálním směru	5,0%	/
Sesychání v tangenciálním směru	11,8%	/
Sesychání objemové	17,5%	/
Mechanické vlastnosti		
Pevnost v tlaku [MPa]	53	35/84
Pevnost v ohybu [MPa]	105	63/180
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	16000	10000/18000
Pevnost v tahu podél vláken	135	57/180
Pevnost ve smyku [MPa]	8	6,5/19
Rázová houževnatost [J/cm <sup>2</sup> ]	10	3/19
Tvrdost (HB) ve směru vláken [MPa]	72	/
Tvrdost (HB) kolmo na vlákna [MPa]	34	/

Tab. 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti bukového dřeva (Prokeš 1982, Wagenführ 1975)

Ohybová pevnost u tepelně ošetřeného dřeva se mění v závislosti na teplotě v zásadě tak, že do určité teploty ošetření se ohybová pevnost zvyšuje. Po překročení této teploty a s dalším stoupaním teploty pevnost v ohybu začne klesat až na svoji původní úroveň. S dalším zvyšováním teploty a času úpravy se pevnost v ohybu dále snižuje. Konkrétně u buku zjistil Maulis (2009) ohybovou pevnost 97 MPa (střední hodnota) což je o 8 MPa méně než je uvedeno v tabulce 1. Ovšem ve srovnání s Dřevařskou příručkou

(Peschel 2002), kde je uvedena hodnota 120 MPa, je snížení pevnosti o 23 MPa, což je úbytek ohybové pevnosti přibližně o 20%.

Střední hodnota rázové houževnatosti je u přírodního buku 10 J/cm<sup>2</sup> (tab. 1). U tepelně upraveného buku při 210 °C je rázová houževnatost 5,24 J/cm<sup>2</sup> při hustotě 669 kg/m<sup>3</sup> (Maulis, 2009).

Tvrдость podle Brinella tepelně ošetřeného buku je 20,3 MPa na radiální plochu, 24,3 MPa na tangenciální plochu a 60,8 MPa na čelní plochu (Maulis, 2009). Hodnoty tvrdosti podle Brinella u tepelně upraveného dřeva jsou o 30 – 40 % nižší v podélných plochách a přibližně o 16 % menší na čelní plochu ve srovnání s hodnotami uvedenými v tabulce 1.

Mechanické vlastnosti dřeva se mění v závislosti na fyzikálních vlastnostech dřeva jako jsou vlhkost dřeva, rovnovážná vlhkost, bobtnání a sesychání a především na hustotě dřeva. I u tepelně upraveného dřeva se mění fyzikální vlastnosti. Smyslem tepelné úpravy je některé fyzikální vlastnosti dřeva zlepšit, především rovnovážnou vlhkost, s tím související bobtnání a sesychání a také například tepelnou vodivost.

Třeba rovnovážná vlhkost tepelně ošetřeného buku je 4 % (Maulis, 2009), přírodní neupravený buk má ve stejném prostředí (vlhkost vzduchu 65 ± 5 % a teplotě 20 ± 2 °C) vlhkost přibližně 12 %. Z toho vyplývá, že je rovnovážná vlhkost snížena přibližně o 60 %. Závislost tepelné úpravy na rovnovážné vlhkosti je ukázána v grafu 7.

Objemové sesychání (bobtnání) rostlého buku je podle tabulky 1 17,5 %. Maulis (2009) uvádí hodnotu objemového sesychání u tepelně upraveného buku 9,1 %. To odpovídá snížení sesychání přibližně o 50 %.

Hustota rostlého buku je podle tabulky 1 710 kg/m<sup>3</sup>. Peschel (2002) uvádí pro buk při 12 % vlhkosti také hodnotu 710 kg/m<sup>3</sup>. Maulis (2009) uvádí pro tepelně ošetřené bukové dřevo hustotu 648 kg/m<sup>3</sup>. Snížení hustoty o 62 kg/m<sup>3</sup>, což odpovídá snížení o cca 10 %, má vliv především na mechanické vlastnosti dřeva.

### **3.1.4. Vlastnosti termicky modifikovaného dřeva**

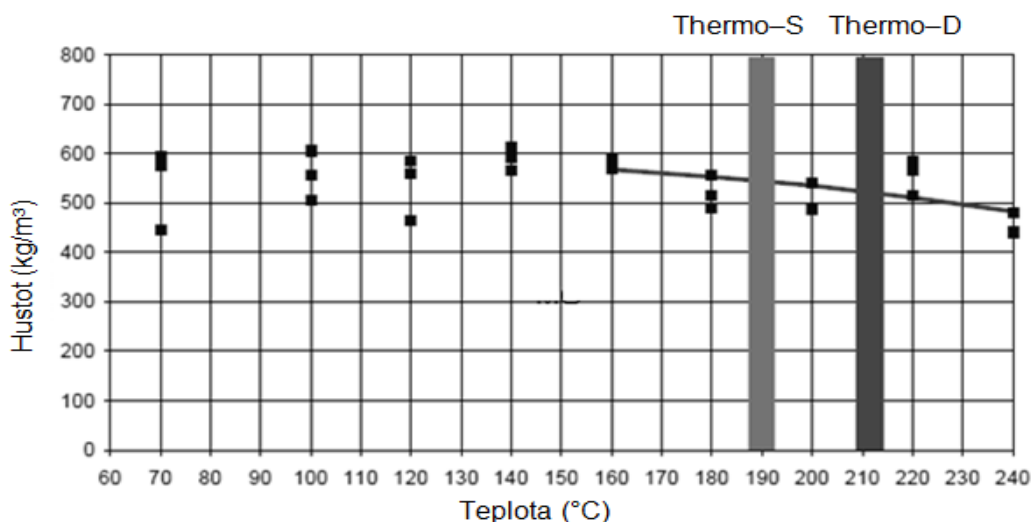
Dřevo je přírodní materiál, který má jako všechny přírodní materiály své specifické vlastnosti. Stejně tak i tepelně modifikované dřevo má charakteristické vlastnosti, které získává tepelnou úpravou. Tepelná úprava se provádí s cílem potlačení vlastností dřeva, které omezují jeho využívání, jako jsou nasákavost, bobtnání, sesychání a hlavně nízká

odolnost proti biologickým škůdcům. Některé vlastnosti se ale tepelnou úpravou zhorší, jsou to především mechanické vlastnosti (pevnost, rázová houževnatost,...).

### 3.1.4.1. Fyzikální vlastnosti TM dřeva

#### 3.1.4.1.1. Hustota

Hustota se stanovuje na základě měření velikosti vzorku a jeho hmotnosti. Hustota tepelně ošetřeného dřeva je mírně nižší než u dřeva neošetřeného. Důvodem je především ztráta váhy při tepelné úpravě dřeva. Hustota tepelně upraveného smrku technologií Platowood klesne na  $421 \text{ kg/m}^3$ , přičemž hustota přírodního smrku umístěného ve stejných podmínkách je  $460 \text{ kg/m}^3$ . Snížení hustoty touto úpravou je přibližně 10 %. Na obrázku 6 je znázorněn pokles hustoty s rostoucí teplotou úpravy u technologie Thermowood. (ThermoWood Hendbook 2003, [www.platowood.nl](http://www.platowood.nl))



Obr. 6 Změna hustoty borovicového dřeva tepelně upravované při teplotách od 160 do 240 °C po dobu 3 hodin. Průměrná hustota v rozsahu teplot  $T < 160 \text{ °C}$  je  $560 \text{ kg/m}^3$ . (ThermoWood Hendbook 2003)

#### 3.1.4.1.2. Tepelná vodivost

Tepelná vodivost dřeva podrobenému tepelné úpravě je ve srovnání s neupraveným dřevem snížena o 20 až 25 %. Proto je vhodné tepelně upravené dřevo používat díky jeho izolačním vlastnostem na venkovní obklady fasád, obložení saun, na okna a dveře. V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty tepelné vodivosti pro borovici a smrk při (po) úpravě při 230 °C po dobu 3 a 5 hodin. (ThermoWood Hendbook 2003)

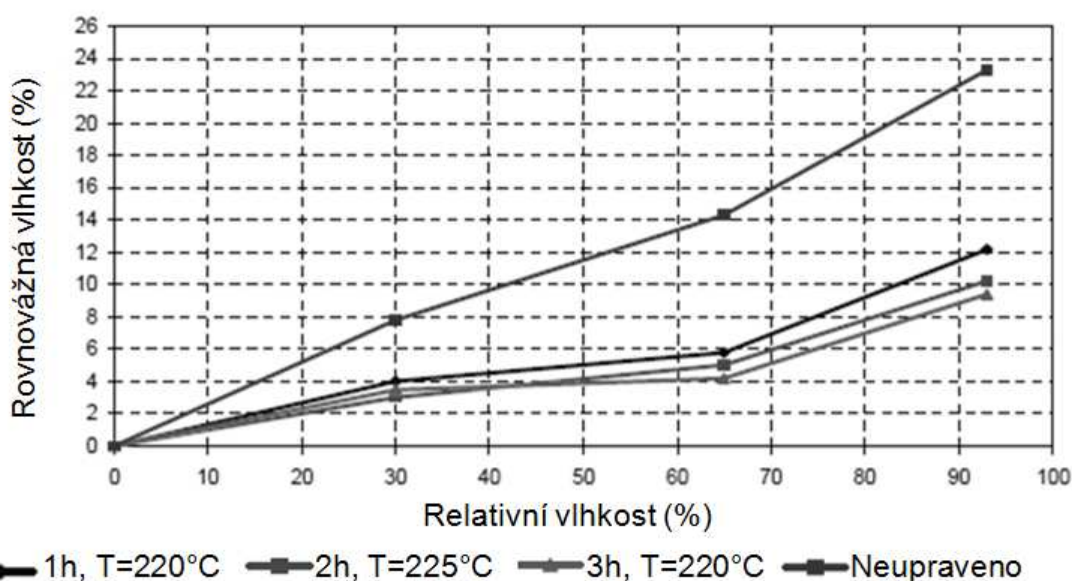
Rozměry (mm)	Doba zpracování při 230 °C (h)	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	Vlhkost (%)	Tepelná vodivost (W/m.K)
<b>Borovice</b>				
25 x 125	3	525	4,5	0,107
25 x 125	5	474	3,6	0,101
	0	505		1,130
<b>Smrk</b>				
22 x 100	3	445	5,5	0,097
22 x 100	5	405	4,4	0,082
	0	432		0,110

Tab. 2 Hodnoty tepelné vodivosti borovice a smrku po tepelném zpracování v 230 °C po dobu 3 a 5 hodin. (ThermoWood Hendbook 2003)

### 3.1.4.1.3. Rovnovážná vlhkost

Tepelně modifikované dřevo má ve srovnání se dřevem neupraveným sníženou nasákavost. Tepelně ošetřený (Platowood) smrk má při relativní vlhkosti vzduchu 65 % rovnovážnou vlhkost sníženou přibližně o 5 vlhkočních procent.

Při teplotě modifikace 220 °C je nasákavost snížena asi na polovinu odpovídající hodnoty neupraveného dřeva. Rozdíl mezi hodnotami vlhkosti dřeva je větší při vyšší relativní vlhkosti vzduchu. Následující obrázek 7 znázorňuje vliv tepelné úpravy při teplotě 220°C a 225 °C po dobu 1 až 3 hodin úpravy při různých hodnotách relativní vlhkosti vzduchu. (ThermoWood Hendbook 2003, www.platowood.nl)

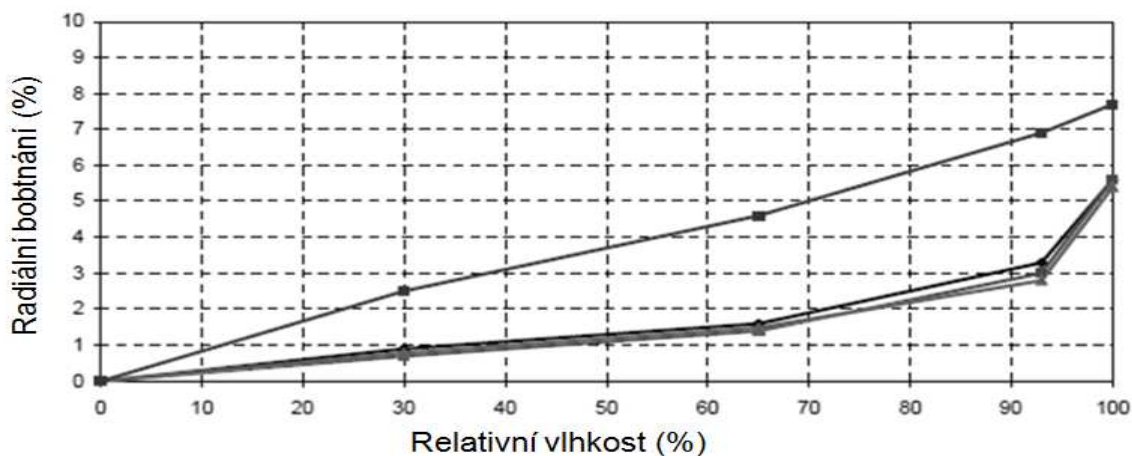


Obr. 7 Vliv relativní vlhkosti na hodnoty vlhkosti tepelně upraveného smrkového dřeva při různých podmínkách úpravy technologií ThermoWood. (ThermoWood Hendbook 2003)

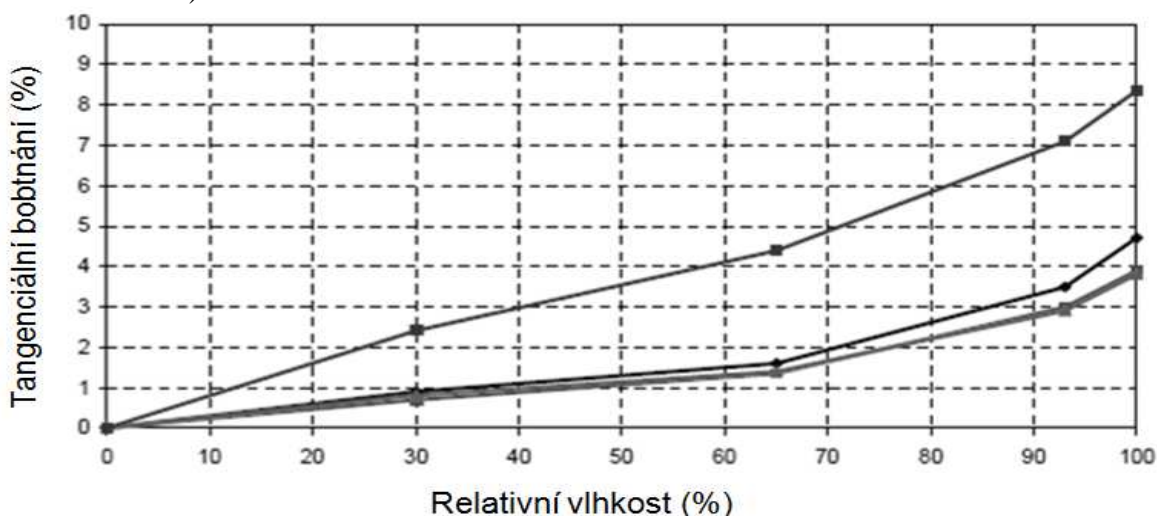
### 3.1.4.1.4. Rozměrová stabilita

Termicky modifikované dřevo má lepší rozměrovou stabilitu, tj. při změnách relativní vlhkosti vzduchu se jeho rozměry mění méně než u rostlého dřeva. Například u tepelně modifikovaného dřeva typu Thermowood dosahují hodnoty bobtnání a sesychání 50 až 90 % z hodnot původního dřeva. Podobné hodnoty dosahuje i typ úpravy Platowood. Tato výhodná vlastnost se využívá u dřevařských výrobků, kde se vyžaduje snížené vlhkostní pracovní výměrky, jako jsou terasové podlahy, parkety v interiéru, atd. (Reinprecht 2008)

Na obrázku 8 a 9 je znázorněno bobtnání v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu pro různě ošetřené vzorky dřeva.



—●— 1h, T=220°C —■— 2h, T=225°C —▲— 3h, T=220°C —◆— Neupraveno  
Obr. 8 Radiální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti. Smrkové dřevo bylo upraveno technologií Thermowood za různých podmínek. (Thermowood handbook 2003)



—●— 1h, T=220°C —■— 2h, T=225°C —▲— 3h, T=220°C —◆— Neupraveno  
Obr. 9 Tangenciální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti. (Thermowood Handbook 2003)

### **3.1.4.1.5. Akustické vlastnosti**

Termicky upravené dřevo má zajímavé akustické vlastnosti. Pro hudební nástroje je možné za nižších teplot úpravy připravit speciální druhy tepelně upraveného dřeva. Jeho struktura a vlastnosti se shodují s dlouhodobě přirozeně sušeným dřevem. Akustické vlastnosti se často podobají vlastnostem dřeva vzácných historických hudebních nástrojů. Důležitým faktorem je i dobrá rozměrová stabilita tepelně upraveného dřeva. (Reinprecht 2008)

### **3.1.4.1.6. Vůně**

Dřevo po termické úpravě získává charakteristickou vůni podobnou karamelu. Příčinou jsou prchavé organické produkty vzniklé rozkladem hemicelulóz. Tepelně upravené dřevo s vyšším podílem prchavých látek může až zapáchat, což omezuje jeho širší využití v interiérech budov. Vůně či zápach tepelně upraveného dřeva jsou závislé také na technologii a prostředí, ve kterém je dřevo upravováno. (Reinprecht 2008)

### **3.1.4.1.7. Barva**

Barva dřeva ošetřeného tepelnou úpravou se mění v závislosti na teplotě a čase zpracování. S přibývajícím teplotou a časem dřevo získává tmavší barvu až do hnědočerného odstínu. Ohřev dřeva v atmosféře vzduchu vyvolá v porovnání s ohřevem v dusíku intenzivnější změny v jeho barvě. Netradiční změny barvy a lesku dřeva nastávají při jeho ohřevu v rostlinných olejích (obr. 86 příloha). Na obrázku 87 (v příloze) jsou barevné změny tepelně upravené borovice v atmosféře vzduchu za různých teplot.

Dlouhodobější testy přirozeného stárnutí tepelně upraveného dřeva prokázaly, že jeho barevnost není trvalá a s postupem času zešedne a bledne. Jeho přirozenou barvu lze zachovat povrchovou úpravou. (Reinprecht 2008)

### **3.1.4.2. Mechanické vlastnosti**

Mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva se ve většině případů zhorší (rázová houževnatost, pevnost,...), avšak v některých případech se mohou i zlepšit (modul pružnosti, případně i tvrdost). Pokles rázové houževnatosti a pevnosti termicky upraveného

dřeva je obvykle vzhledem k poklesu jeho hmotnosti a hustoty výraznější. To platí v případech, že se srovnává původní a termicky upravené dřevo o stejné vlhkosti. Avšak v praxi se mechanické vlastnosti tepelně upraveného dřeva nemusí díky jeho snížené hygroskopicitě v daném prostředí vůbec lišit, protože s poklesem vlhkosti na bod nasycení vláken obvykle mechanické vlastnosti vzrůstají. Všeobecně potom platí, že změny mechanických vlastností závisí na faktorech, které působí na změny v jeho chemické struktuře a na poklesu jeho hmotnosti a hustoty. Faktory, které ovlivňují především mechanické vlastnosti jsou teplota, čas a prostředí tepelné úpravy, vlhkost a druh dřeva. (Reinprecht 2008)

#### **3.1.4.2.1. Pevnost**

Pevnost dřeva obecně souvisí s jeho hustotou a tepelně upravené dřevo má po ošetření hustotu o něco nižší. Je tedy zřejmé, že ošetřené dřevo má v některých případech nižší pevnost. Dalším důvodem snížení pevnosti jsou mikrotrhliny vznikající ve stěnách buněk. Pevnost je také do značné míry závislá na obsahu vlhkosti. Výhodou v tomto případě může být nižší rovnovážná vlhkost tepelně upraveného dřeva.

#### **3.1.4.2.2. Ohybová pevnost**

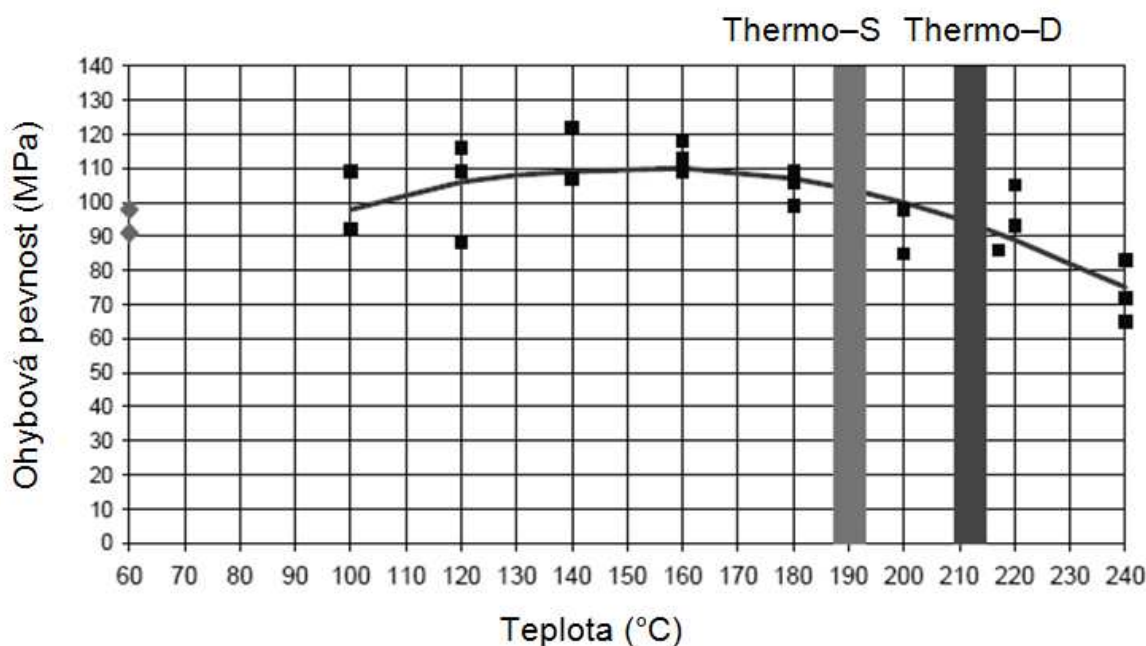
Ohybová pevnost tepelně upraveného dřeva při teplotě 220 °C po dobu 5 hodin s etapami ohřevu a chlazení v celkovém čase čtyř dní se snížila dokonce až o 50% (Bengtsoon a kol 2002). Podobný výrazný pokles ohybové pevnosti zjistily i Bekhta a Niemz (2003) u smrkového dřeva upraveného při teplotě 200 °C. Anonymus (2003) uvádí pokles ohybové pevnosti u borovice o něco mírnější a dokonce při teplotách 100 až 180°C dochází k mírnému nárůstu ohybové pevnosti. K výraznému poklesu pevnosti o 30 % dochází až při ohřevu na 240 °C. Pokles ohybové pevnosti průmyslově vyráběných tepelně upravených dřevin jako je Thermowood a Platowood je v rozsahu od 5 do 30 %. (Reinprecht 2008, ThermoWood Handbook 2003)

Výsledky ukázaly, že k významnějším ztrátám ohybové pevnosti tepelně ošetřené borovice dochází až při teplotách nad 220 °C (viz obr 10).

V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty ohybové pevnosti smrku tepelně ošetřeného při 230 °C po dobu 5 hodin a poté byl stabilizován při relativní vlhkosti 45 % a 65 %.

série	šířka (mm)	výška (mm)	délka (mm)	relativní vlhkost vzduchu (%)	hustota (kg/m <sup>3</sup> )	pevnost v ohybu (MPa)	modul pružnosti (MPa)
1	38	100	1800	45	425	23,0	11015
2	38	100	1800	65	392	22,5	12326
3	100	38	1800	45	392	19,0	10486
4	100	38	1800	65	397	27,9	11913

Tab. 3 Pevnost v ohybu a modul pružnosti smrkového dřeva ošetřeného při 230 °C po dobu 5 hodin. Referenční hodnoty pro neošetřený smrk o vlhkosti 12 % jsou pro pevnost v ohybu 40 až 50 MPa a pro modul pružnosti 9,700 až 12,000 MPa. (ThermoWood Handbook 2003)



Obr. 10 Změna ohybové pevnosti borového dřeva v závislosti na teplotě úpravy. (ThermoWood Handbook 2003)

### 3.1.4.2.3. Rázová houževnatost

Podle výsledků zkoušek je rázová houževnatost tepelně upraveného dřeva nižší než u dřeva neupraveného. U smrku podrobenému tepelnému ošetření v 220 °C po dobu 3 hodin, byla zjištěna rázová houževnatost snižená o 25 %.

Reinprecht (1992) při ohřevu topolového dřeva na teplotu 210 °C po dobu 3 hodin zjistil pokles rázové houževnatosti o 61 % při úbytku hmotnosti o 11,3 %. (Reinprecht 2008, ThermoWood Handbook 2003)

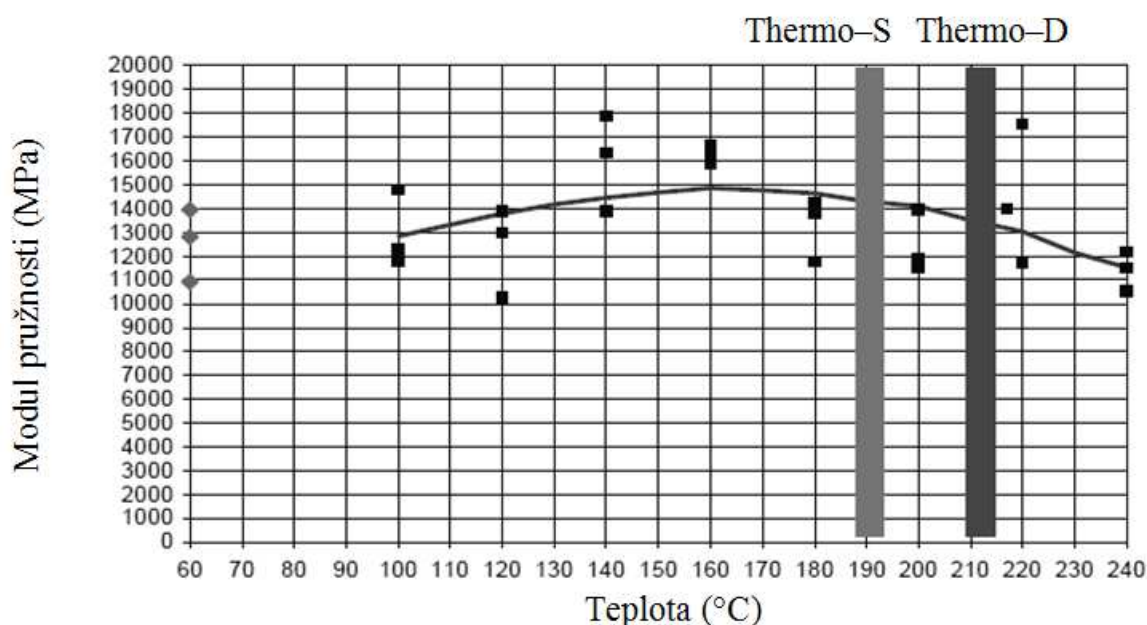


### 3.1.4.2.4. Modul pružnosti

Modul pružnosti dřeva se vlivem ohřevu při teplotách do 160 °C a při kratších časech ohřevu, jak je vidět na obrázku 11, zvyšuje. Modul pružnosti začíná klesat zejména při výraznějším úbytku hmotnosti dřeva o více než 6 až 8 %.

Při ohřevu dřeva na teplotu 160 °C v atmosféře vzduchu klesá modul pružnosti s přibývajícím časem ohřevu, avšak v atmosféře čistého dusíku se modul pružnosti dřeva mírně zvýší a potom se už nemění.

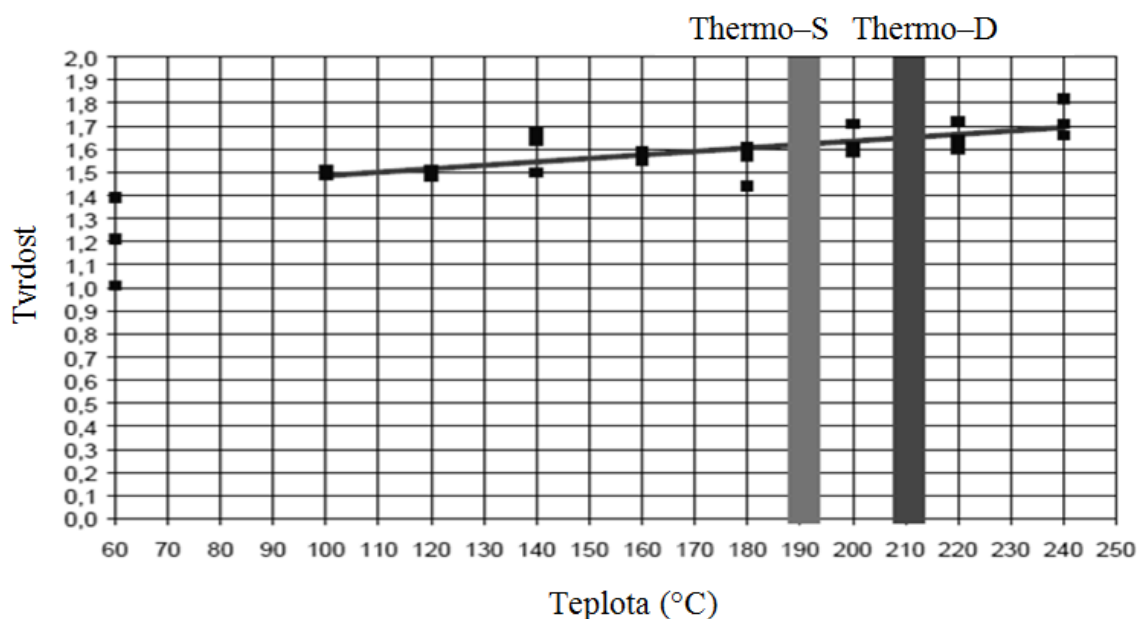
Působením vyšších teplot nad 160 až 190 °C se modul pružnosti snižuje i při kratších časech ohřevu, avšak mírněji než pevnost dřeva. (Reinprecht 2008)



Obr. 11 Změna modulu pružnosti borového dřeva v závislosti na teplotě úpravy. (ThermoWood Handbook 2003)

### 3.1.4.2.5. Tvrdost

Stejně jako u všech druhů dřeva je tvrdost do značné míry závislá na hustotě. Tvrdost tepelně upraveného dřeva se zvyšuje v závislosti na zvyšující se teplotě. Zvýšení tvrdosti je ale malé a v praxi nemá výraznější efekt na využívání tepelně upraveného dřeva. Vliv působící teploty na tvrdost dřeva podle Brinella je znázorněna na obrázku 12. (ThermoWood Handbook 2003)

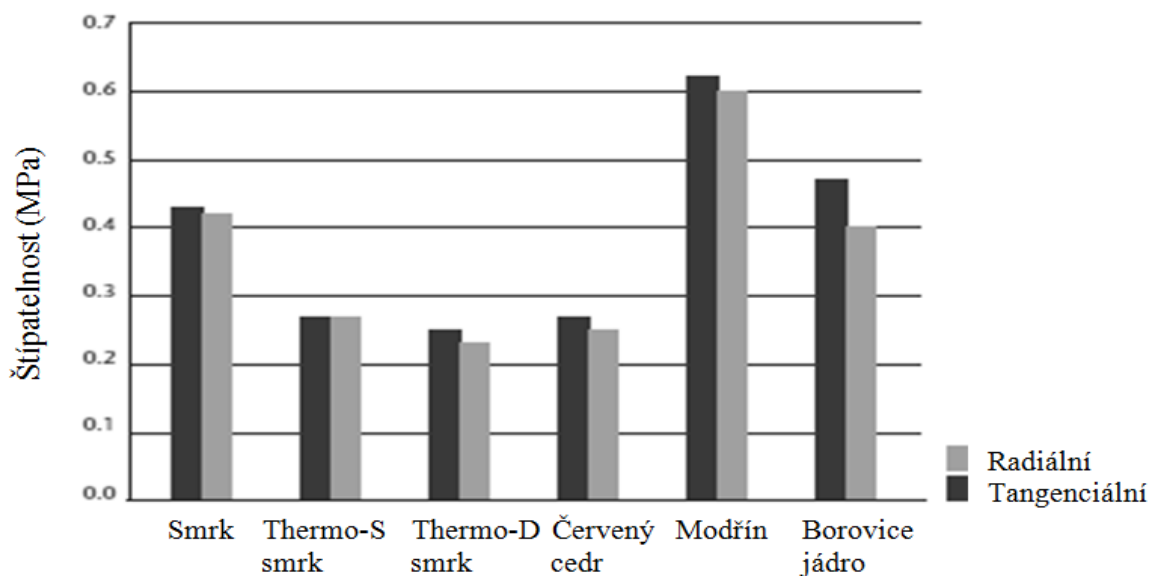


Obr. 12 Závislost tvrdosti borového dřeva na teplotě ošetření podle Brinella (doba ošetření 3 hodiny).

### 3.1.4.2.6. Štípatelnost

Odpor proti rozdělení dřeva ve směru podél vláken je u tepelně upraveného dřeva nižší než u neupraveného dřeva. Podle výsledků testů, které byly prováděny na smrku, borovici a bříze se štípatelnost v závislosti na teplotě úpravy snížila o 30 – 40 %. Při zpracování ve vyšších teplotách je hodnota štípatelnosti ještě o něco větší. (ThermoWood Handbook 2003)

Následující obrázek 13 ukazuje srovnání štípatelnosti různých druhů dřeva s tepelně upraveným smrkem v atmosféře vzduchu Thermo-S a Thermo-D.



Obr. 13 Odolnost různých druhů dřeva proti rozštípnutí v radiální a tangenciální rovině.

### 3.1.4.2.7. Smyk

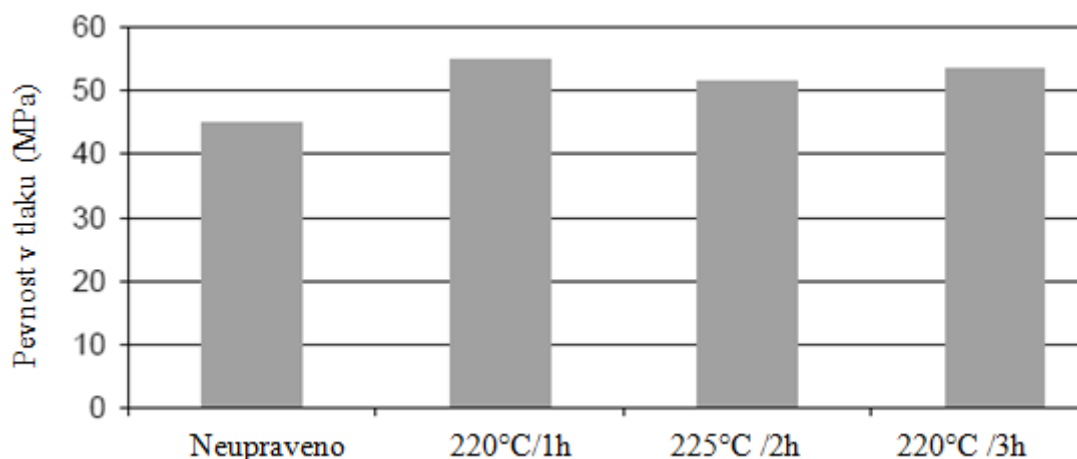
Pevnost ve smyku je u tepelně upraveného dřeva snížena jak v radiálním tak i v tangenciálním směru. Úpravou dřeva při teplotě 230°C po dobu 4 hodin klesla radiální pevnost ve smyku o 1 až 25 %. V tangenciálním směru klesla pevnost o 1 až 40 %. Přesto zpracováním při nižších teplotách (190 °C) je vliv na pokles pevnosti ve smyku nižší, a to o 1 až 20 % v obou směrech. (ThermoWood Handbook 2003)

### 3.1.4.2.8. Pevnost v tlaku

Zkoušky provedené na pevnost v tlaku ukázaly, že proces tepelného zpracování nemá negativní vliv na hodnoty pevnosti v tlaku, ale naopak se mohou o něco zvýšit. Podle zkoušek provedených ve výzkumném ústavě VTT ve Finsku na smrkovém dřevě ošetřeném při 195 °C po dobu 3 hodin pevnost v tlaku ve směru vláken stoupla přibližně o 30 % k dřevu neošetřenému. Změny pevnosti v tlaku na smrkovém dřevě jsou uvedeny na obrázku 15. (ThermoWood Handbook 2003)

K podobným výsledkům dospěli i na TU Zvolen při termické úpravě buku a běle borovice v řepkovém oleji při teplotách 180 až 220 °C.

Průběh deformace tepelně upraveného dřeva se při tlakovém zatížení od dřeva sušeného v klasických sušárnách liší. Při maximálním zatížení se upravené dřevo rozpadá na více kousků, což poukazuje na jeho zvýšenou křehkost. (Reinprecht 2008)



Obr. 14 Pevnost v tlaku tepelně upraveného smrkového dřeva při teplotách 220°C a 225 °C 1 až 3 hodiny (ThermoWood Handbook 2003)

### 3.1.5. Odolnost dřeva

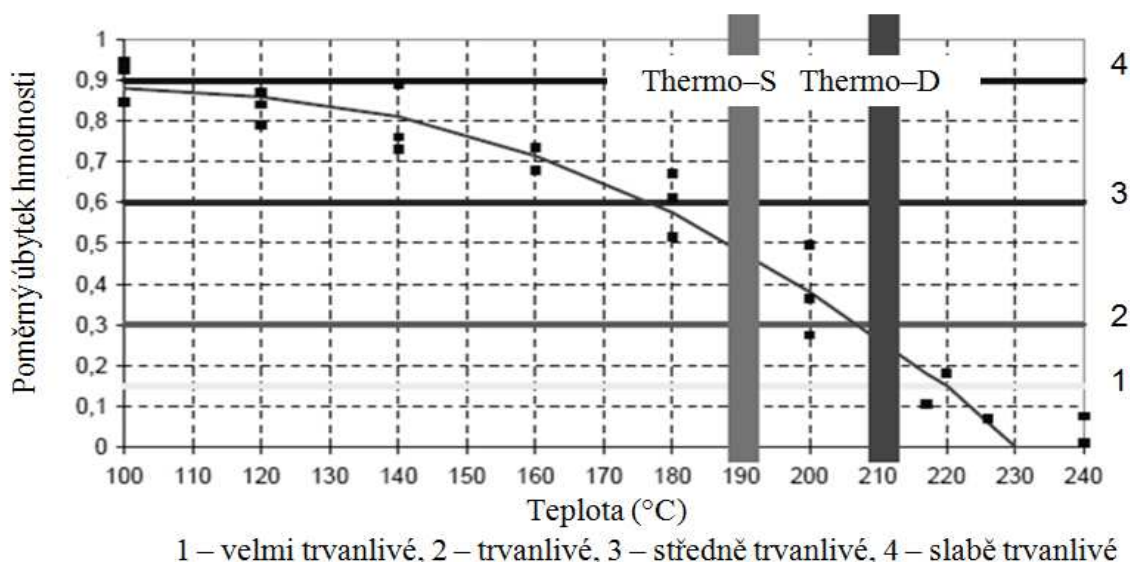
Tepelná modifikace dřeva se provádí a je zkoumána hlavně z důvodu zvýšení trvanlivosti a prodloužení životnosti dřevěných výrobků. Zvýšení životnosti a odolnosti u dřeva znamená především omezit přístup vody do dřeva a tím zamezit jeho napadení biotickými škůdci jako jsou plísně, houby a dřevokazný hmyz.

Odolnost tepelně upraveného dřeva je všeobecně vyšší jak proti biotickým škůdcům tak proti povětrnostním podmínkám.

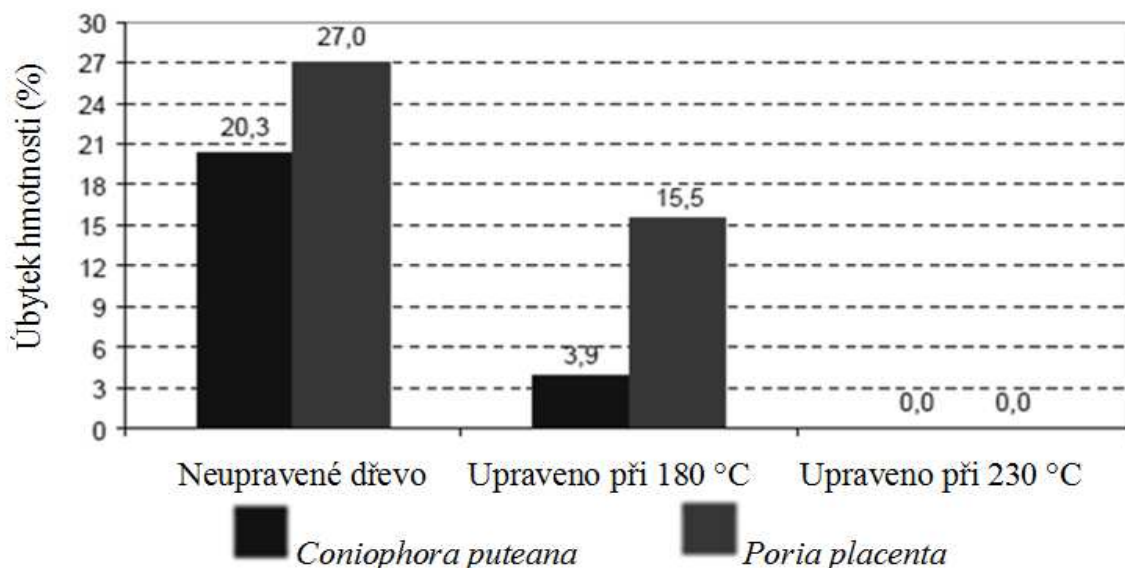
#### 3.1.5.1. Biologická odolnost

Zvýšení biologické odolnosti tepelně ošetřeného dřeva při 150 až 260 °C se připisuje zejména změnám v jeho chemické struktuře. Dochází ke snížení podílu -OH funkčních skupin a zvýšení hydrofóbnosti dřeva následkem kondenzačních a jiných reakcí. Sníží se tak schopnost absorpce vlhkosti nutná pro napadení a život biologických škůdců. Dále se odbourává určitý podíl hemicelulóz, které jsou nejpřístupnější pro škůdce a vytvářejí se látky s biocidním účinkem. (Reinprecht 2008)

Odolnost proti houbám a plísním je důležitá, pokud je vlhkost dřeva větší jak 20 %. Dřevo tepelnou úpravou získá vyšší odolnost proti biotickým škůdcům. Málo trvanlivé dřeviny s třídou trvanlivosti 5 nebo 4 dosáhnou tepelnou úpravou zvýšení trvanlivosti na úroveň 3. až 1. třídy trvanlivosti. Úpravou běle borovice (třída trvanlivosti 4) technologií ThermoWood se dosáhne u typu Thermo-S třídy trvanlivosti 3 a u typu Thermo-D dokonce 2. třídy. Změna třídy trvanlivosti borovice v závislosti na teplotě je znázorněna na obrázku 15. Na obrázku 16 je úbytek hmotnosti běle borovice tepelně upravené v 180° C a 230°C po dobu 4 hodin způsobený houbami Konioforou sklepní (*Coniophora puteana*), Pórnatkou (*Poria Placenta*). K podobným výsledkům došli i při testech na TU Zvolen na vzorcích borovice Thermo-S a Thermo-D. (Reinprecht 2008)



Obr. 15 Poměrný úbytek hmotnosti ošetřené borovice napadené Coniophora puteana k neupravenému dřevu. Čas úpravy 3 hodiny. (ThermoWood Handbook 2003)



Obr. 16 Vliv tepelně upravené borovice na úbytek hmotnosti při napadení dřevokaznou houbou. Čas úpravy 4 hodiny. (ThermoWood Handbook 2003)

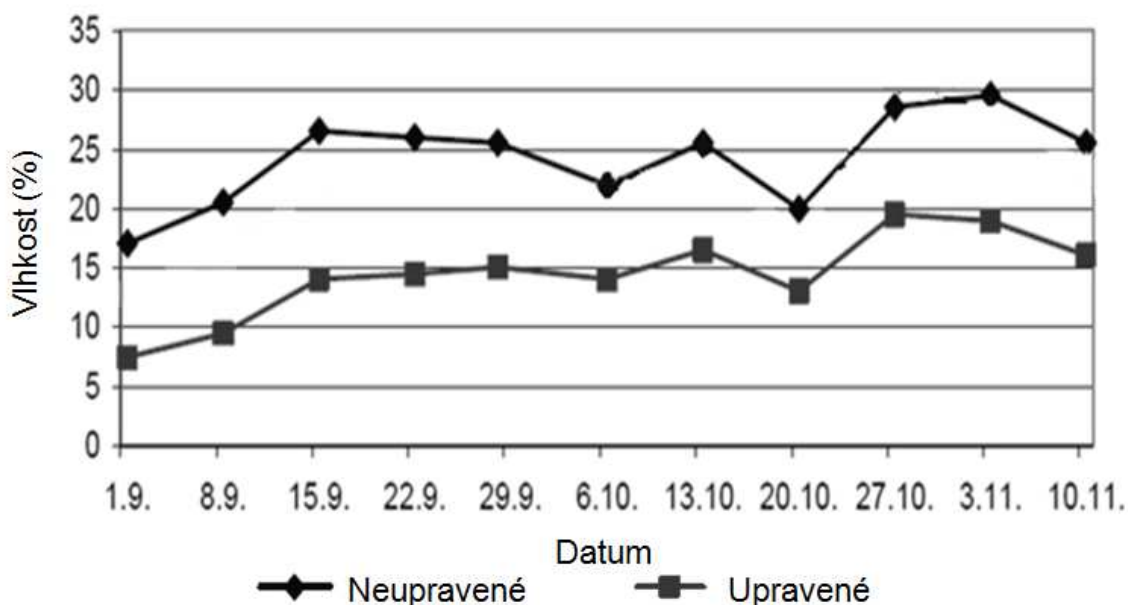
Testy provedené ve Francii na dřevokazných broucích Červotoči proužkovaném (*Anobium punctatum*) a Hrbohlavu hnědém (*Lyctus brunus*) prokázaly, že tepelně upravené dřevo je proti dřevokazným broukům dostatečně odolné. Dřevokazný hmyz také nejví zájem klást vajíčka do tepelně upraveného dřeva, ve kterém jsou sníženy prchavé atraktanty a terpenoidy, a brouci dávají přednost rostlému dřevu. (Reinprecht 2008, ThermoWood Handbook 2003)

### 3.1.5.2. Odolnost proti povětrnosti

Vlhkost termicky upraveného dřeva je z důvodu snížené navlhavosti nižší než u neupraveného dřeva ve stejném prostředí. Vlhkost dřeva borovice tepelně upravené při 225 °C po dobu 6 hodin vystavené venkovní expozici je přibližně dvakrát menší než u rostlého dřeva. (obr. 17)

Vlivem UV záření, působení kyslíku a srážek tepelně ošetřené dřevo ztrácí svoji původní barvu a šedne. Na obrázku 18 je ukázána změna barvy tepelně upraveného dřeva po 6 měsících ve venkovním prostředí.

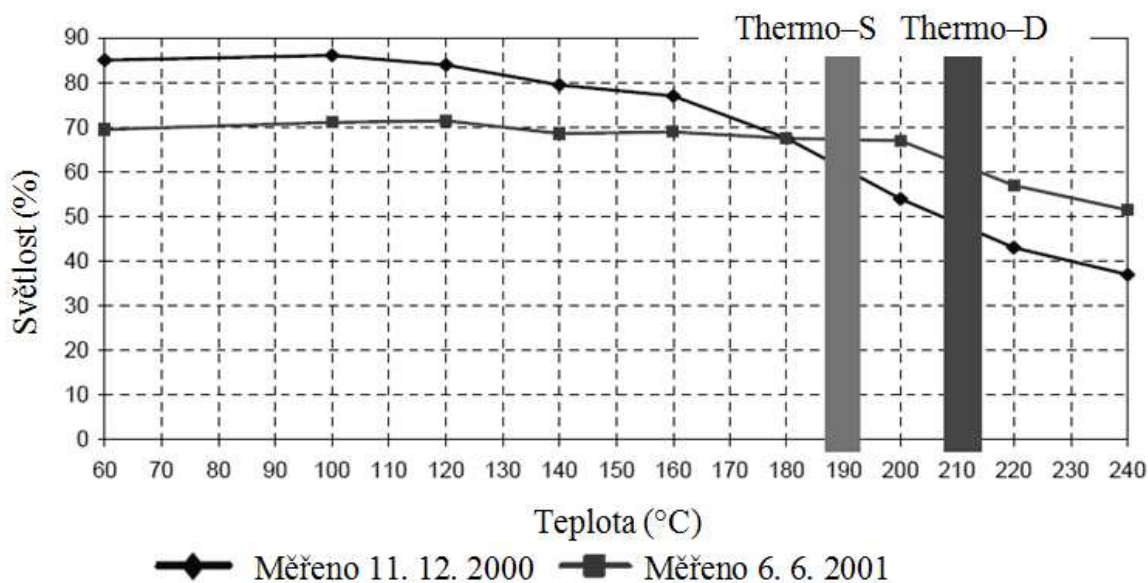
Trhliny se na povrchu tepelně ošetřeného dřeva tvoří méně. To souvisí s jeho nižší navlhavostí a rozměrovou stabilitou. (Reinprecht 2008, ThermoWood Handbook 2003)



Obr. 17 Hodnoty měnící se vlhkosti tepelně upravené borovice (225 °C/6h) vystavené venkovní expozici. (ThermoWood Handbook 2003)

Přirozená trvanlivost dřeva				
1	2	3	4	5
velmi trvanlivé	trvanlivé	středně trvanlivé	slabě trvanlivé	netrvanlivé

Tab. 4 Přirozená trvanlivost dřeva.(Král 2005)



Obr. 18 Změna barvy tepelně upravené borovice vystavené venkovní expozici 6 měsíců. Čas úpravy 3 hodiny. (ThermoWood Handbook 2003)

### 3.1.6. Obrábění

Tepelně modifikované dřevo může být zpracováváno a obráběno běžným strojním zařízením, lze ho však opracovávat i ručním nářadím. Tepelně upravené dřevo nemá ve srovnání s přírodním dřevem při obrábění žádné zásadní omezení. Problémem může být při opracování a broušení tepelně upraveného dřeva tvorba jemné frakce nebo až prachu. Vznik jemné frakce je způsoben zkřehnutím buněk a snížením některých mechanických vlastností. Proto by měla být vzniklá frakce dostatečně odsávána z pracovního prostoru. Odsátá frakce se musí dokonale odfiltrovat. Problémem malých frakcí a prachových částic je znečištění pracovního prostředí a způsobování zdravotních problémů. (Reinprecht 2008, Král 2005)

Vznikem a složením dezintegrované dřevní frakce se zabývají další části této práce.

### 3.1.7. Technologie výroby tepelně modifikovaného dřeva

#### 3.1.7.1. Thermowood

Materiál zvaný Thermowood je připravován v atmosféře vzduchu. Proces výroby Thermowoodu byl vyvinut na základě výzkumu ve výzkumném centru VTT ve Finsku.



Technologie výroby Thermowoodu se skládá ze tří hlavních fází, kterými jsou zvýšení teploty a sušení, tepelná úprava, chlazení a úprava vlhkosti.

### Fáze 1. Zvýšení teploty a sušení

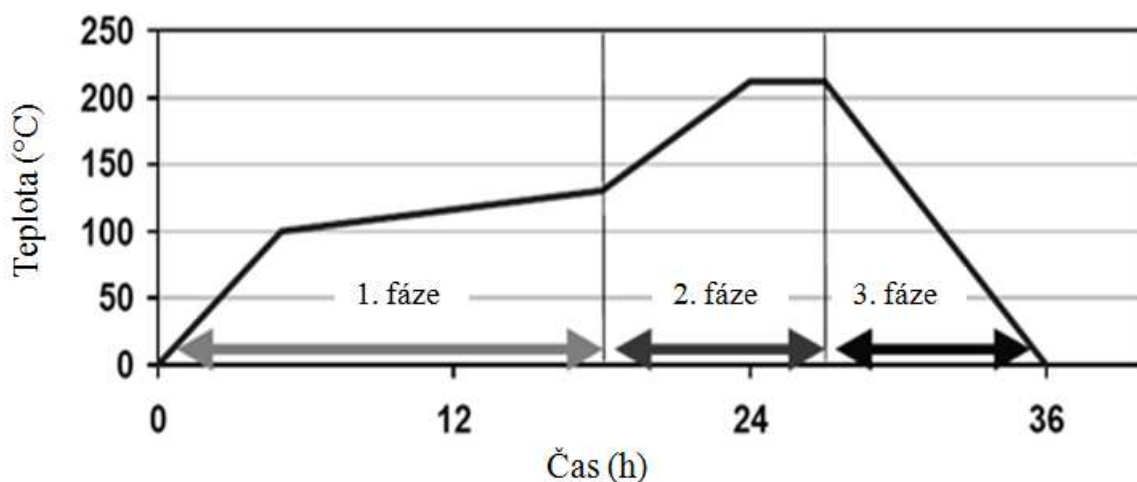
Sušení je nejdelší fáze tepelného zpracování. Čas sušící fáze je závislý především na počáteční vlhkosti, druhu dřeviny a tloušťce materiálu. V sušárně se v prostředí vodní páry teplota rychle zvýší na 100 °C. Poté se teplota postupně zvyšuje na 130 °C. Materiál se postupně vysuší téměř na nulovou vlhkost.

### Fáze 2. Tepelná úprava

Samotné tepelné ošetření dřeva se provádí v uzavřeném prostoru hned po vysušení, kdy se dosahuje teploty 185 až 215 °C v závislosti na úrovni zpracování. Po dosažení požadované teploty se v závislosti na konečném použití výrobku prostředí udržuje 2 až 3 hodiny.

### Fáze 3. Chlazení a úprava vlhkosti

V poslední fázi se teplota prostředí snižuje. Při dosažení teploty 80 až 90 °C se dřevo zvlhčuje na úroveň 4 až 7 %. V závislosti na teplotě zpracování a druhu dřeviny trvá třetí fáze od 5 do 15 hodin. (Reinprecht 2008, ThermoWood Handbook 2003)



Obr. 19 Schéma výrobního procesu ThermoWood. (ThermoWood Handbook 2003)

Celý proces zpracování dřeva od sušení po konečné zvlhčení byl zpracován tak, aby tvořil jeden souvislý průběh úprav. Výrobní proces zahrnuje šest tunelů, kterými dřevo prochází. V prvních třech tunelech se řezivo suší a připravuje pro vlastní tepelnou úpravu, která se provádí ve čtvrtém tunelu. Poslední dva tunely slouží ke chlazení, zvlhčování, provzdušnění a konečné úpravě zpracovaného dřeva. Normalizace po zpracování pokračuje v teplých zastřešených prostorách po dobu 24 až 48 hodin před jeho zpracováním. (ThermoWood Handbook 2003, [www.prokom.cz](http://www.prokom.cz))

Thermowood se vyrábí ve dvou variantách úpravy - Thermo-S a Thermo-D.



Thermo-S se vyrábí při teplotě 185 °C z listnatých dřevin a při teplotě 190 °C z jehličnatých dřevin. Písmeno S v názvu znamená stabilitu. Je určeno pro vnitřní použití (nábytek, lavičky do sauny, podlahy).

Thermo-D se vyrábí při vyšších teplotách než Thermo-S. Listnaté dřevo se upravuje při 200 °C a jehličnatá při 212 °C. Označení D znamená trvanlivost (durability). Materiál je odolnější proti biotickým škůdcům než Thermo-S. Thermo-D je určen do exteriéru na obklady fasád, podlahy, pochozí plochy.

Změny vlastností způsobené tepelnou úpravou u ThermoWood dřevin jsou uvedeny v tabulce 5. (Král 2005)

Listnaté dřeviny (topol a bříza)	Thermo-S	Thermo-D
Teplotní zpracování	185 ± 3 °C	200 ± 3 °C
Odolnost proti povětrnosti	+	+
Třída trvanlivosti	4	3
Rozměrová stabilita	+	+
Pevnost v ohybu	Beze změny	-
Tmavost barvy	+	++
Doporučené účely použití	Interiér Nábytek Podlahy Vybavení sauny Zahradní nábytek	Účel použití stejně jako u Thermo-S. Využívá se při požadavku na tmavší barvu.
Jehličnaté dřeviny (borovice a smrk)	Thermo-S	Thermo-D
Teplotní zpracování	190 ± 3 °C	212 ± 3 °C
Odolnost proti povětrnosti	+	++
Třída trvanlivosti	3	2
Rozměrová stabilita	+	++
Pevnost v ohybu	Beze změny	-
Tmavost barvy	+	++
Doporučené účely použití	Konstrukční prvky Nábytek Zahradní nábytek Okenní a dvevní konstrukce	Vnější obklady Zahradní domky Venkovní stavby Zahradní nábytek Lávky a chodníčky

Tab. 5 Změny vlastností způsobené tepelnou úpravou u dřevin typu Thermo-S a Thermo-D. (www. prokom.cz)

### **3.1.7.2. Platowood**

Platowood je termicky modifikované dřevo v prostředí vodní páry. Tento proces se odehrává za nižších teplot a zvýšeného tlaku. Skládá se ze čtyř fází a celkový čas procesu je závislý na druhu a tloušťce dřeva.

#### **Fáze 1. Hydrotermická úprava**

Hydrotermická úprava se odehrává při teplotách 150 až 190 °C v tlakové nádobě při zvýšeném tlaku 0,6 až 1 MPa. Čas úpravy je 4 až 6 hodin. Hydrotermická úprava se provádí u vzduchosuchého dříví vodní parou a u čerstvého dříví horkým vzduchem.

#### **Fáze 2. Sušení**

Po hydrotermické úpravě se termicky aktivované dřevo suší v klasické sušárně po dobu 3 až 5 dní, případně i déle (do 3 týdnů). Dřevo se suší na vlhkost 8 až 10 %.

#### **Fáze 3. Vytvrzování**

Vytvrzování neboli stabilizace dřeva se odehrává po dobu 12 až 16 hodin při teplotě 150 až 190 °C a při atmosférickém tlaku 0,1 MPa, avšak za omezeného přístupu vzduchu. Vlhkost dřeva při vytvrzování klesá pod 1 %.

#### **Fáze 4. Klimatizace**

Poslední fází je zvýšení vlhkosti dřeva v sušárně na hodnotu 4 až 6 %. Zvyšování vlhkosti probíhá asi 3 dny. (Reinprecht 2008)

### **3.1.7.3. Retificatèdwood**

Retificatèdwood se připravuje v inertním prostředí dusíku při teplotách až 260 °C, podle licenčního procesu NOW - New Option Wood, Francie.

Princip procesu je založen na postupném zvyšování teploty dřeva do oblasti 210 až 260 °C v inertním prostředí dusíku. Podíl kyslíku v prostředí musí být nižší než 2%. Dřevo se přitom mírně pyrolyzuje. Termooxidační reakce ve dřevě probíhají jen v menší míře, čímž se víceméně zachovává jeho původní pevnost. Před samotným procesem se musí dřevo vysušit na 12% vlhkost. (Reinprecht 2008 )

### **3.1.7.4. OHT – Wood**

OHT – Wood je termická modifikace dřeva v horkých rostlinných olejích, podle licenčního OHT procesu (OHT – Oil Heat Treatment, Německo).

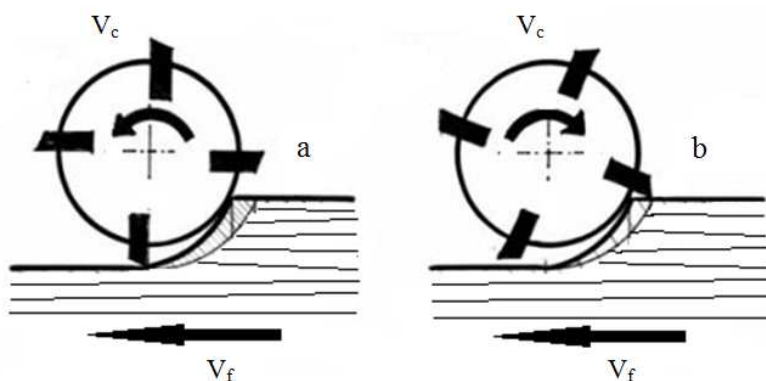
OHT proces úpravy dřeva se provádí v impregnačním kotli v horkém rostlinném oleji. Teplota oleje bývá v rozmezí teplot 200 až 220 °C. Horký olej vniká do dřeva a postupně ho ohřívá, zároveň snižuje přístup kyslíku, čímž se omezují nežádoucí termooxidační procesy. Ve středu materiálu je nutné udržet teplotu v rozsahu 180 až 200 °C po dobu 2 až 4 hodin. V praxi to znamená, že pro produkty dlouhé 4 metry a o průměru 100 milimetrů trvá proces (a) úprava včetně ohřevu a konečného ochlazení asi 18 hodin.

Jako výhodné médium pro rychlý a rovnoměrný přenos tepla se osvědčil lněný olej, který je zároveň ekologický.(Reinprecht 2008)

## 3.2. Teorie frézování dřeva

### 3.2.1. Pojem a druhy frézování

Frézováním nazýváme proces obrábění dřeva otáčejícím se nástrojem (frézou, frézovací hlavou, stopkovou frézou apod.), při kterém se hloubkou úběru mění nominální tloušťka třísky od minimální hodnoty po maximální hodnotu při nesousledném (protiběžném) frézování, nebo naopak od maximální po minimální při sousledném frézování. Dále se mění šířka, nebo tvar opracovávaného dřevěného materiálu. Posuv materiálu je ve směru vektoru obvodové rychlosti otáčejícího se řezného nástroje.



Obr. 20 Druhy frézování podle způsobu podávání materiálu a- nesousledné frézování, b- sousledné frézování

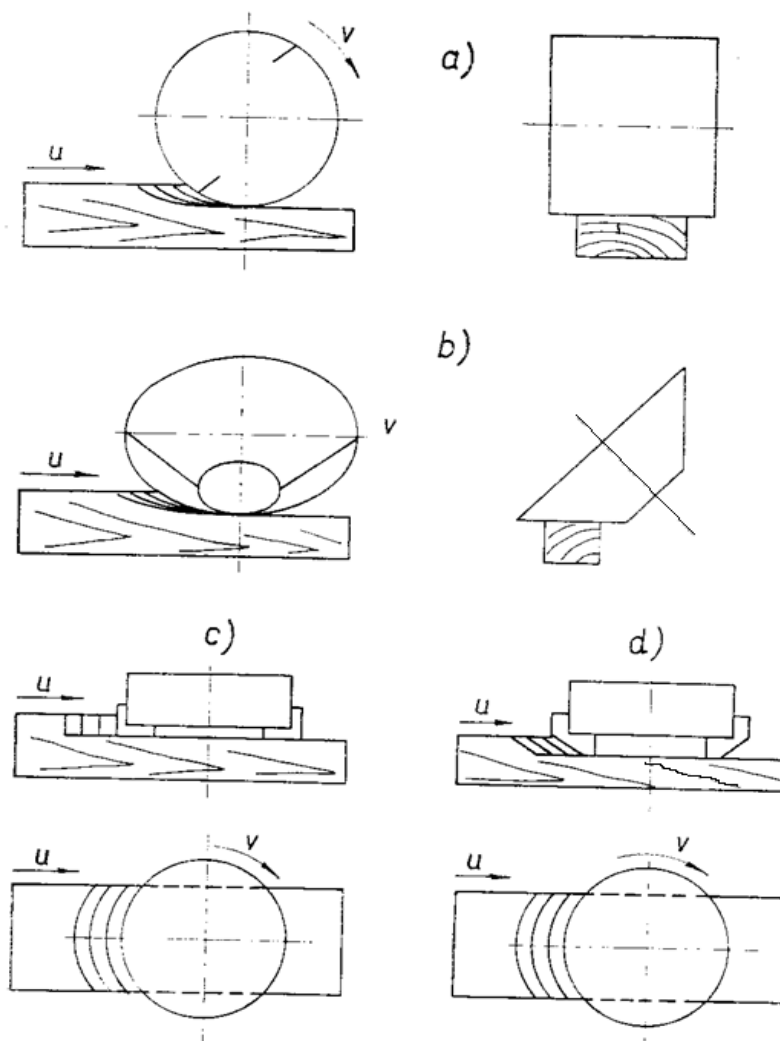
Tento způsob obrábění volíme při potřebě dosažení hladkého povrchu a přesných rozměrů obráběného materiálu (srovnávací a tloušťkovací frézovací stroje). K vytvoření rovinných, rotačních, anebo různě tvarovaných ploch se používají spodní a vrchní svislé frézovací stroje. Při výrobě složitějších tvarových výrobků se používají speciální typy frézovacích strojů - například kopírovací frézka.

Obráběný materiál se v praxi při různých operacích frézuje ve všech směrech vzhledem k průběhu dřevních vláken, nejčastěji ve směru podélném až podélně příčném. To je dáno především základními technologickými operacemi a kvalitou při výrobě.

Frézovací nástroj se otáčí většinou proti směru posuvu obrobku (nesousledné frézování). V některých případech se nástroj otáčí ve směru posuvu obrobku (sousedné frézování). (Prokeš 1982)

Podle polohy osy otáčení a podle ploch, které při frézování opisují řezné klíny nástroje, rozlišujeme čtyři druhy frézování. (Lisičan 1988, Prokeš 1982)

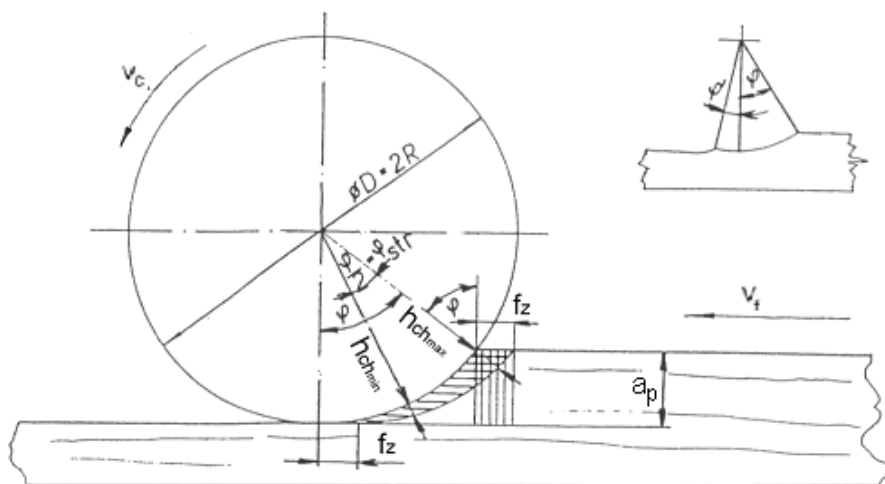
- 1) Válcové – osa otáčení nástroje je rovnoběžná s obráběnou plochou, řezné klíny nástroje opisují válcovou plochu.
- 2) Kuželové – osa otáčení nástroje je k obráběné ploše skloněná pod určitým úhlem a řezné klíny nástroje opisují kuželovou plochu.
- 3) Čelní – osa otáčení nástroje je kolmá k obráběnému povrchu dílce, řezné klíny frézovacího nástroje opisují válcovou plochu, boční řezné klíny pracují na principu válcového frézování a to přibližně kolmo k směru dřevních vláken. Tento způsob se používá u některých tvarových a stopkových fréz.
- 4) Čelně kuželové – osa otáčení je kolmá k obráběnému povrchu, ale na rozdíl od čelního způsobu, kde jsou řezné klíny kolmo k obráběnému povrchu, jsou řezné klíny nástroje skloněné k obráběnému povrchu pod určitým úhlem.



Obr. 21 Způsoby frézování podle polohy osy otáčení a podle tvaru ploch, které opisují břity nástroje. a- válcové, b- kuželové, c- čelní, d- čelně kuželové. (Prokeš 1982)

### 3.2.2. Kinematika frézování

Vzhledem k rotačnímu pohybu řezného klínu frézovacího nástroje a přímočarému pohybu obrobku je výsledný pohyb řezného klínu cykloidní. Protože poměr veličin řezné rychlosti a posuvu materiálu je značně velký je cykloida natolik prodloužená, že můžeme prakticky bez velké chyby předpokládat, že řezná dráha břitu tvoří kružnice. Řezný klín je v průběhu jedné otáčky v záběru na délku oblouku  $l$ , který odpovídá střednímu úhlu  $\varphi + \varphi'$ . Úhel  $\varphi'$  je velmi malý, a proto se při výpočtu délky třísky  $l$  většinou zanedbává. (Prokeš 1982)



Obr 22 Schéma oddělování třísky při válcovém frézování. (Prokeš 1982)

**Teoretická délka třísky:**

$$L = \frac{D}{2} \cdot \arctg(\varphi + \varphi') = \frac{\pi \cdot D \cdot (\varphi + \varphi')}{360^\circ} \approx 0,0175 \cdot R \cdot \varphi \text{ [mm]}$$

Kde: D – průměr řezné kružnice [mm]

R – poloměr řezné kružnice [mm]

$\varphi$  – úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°]

$\varphi'$  – posunutý úhel styku dřevních vláken [°]

Při větších průměrech frézovacího nástroje, malých tloušťkách odebírané vrstvy třísky a malých podávacích rychlostech je možné vypočítat délku třísky z jednoduchého vztahu (Prokeš 1982)

$$L = R \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{a_p}{R}} = \sqrt{a_p \cdot D} = \frac{f_z \cdot a_p}{h_{ch-str}} \text{ [mm]}$$

Kde: D – průměr řezné kružnice [mm]

R – poloměr řezné kružnice [mm]

$a_p$  – tloušťka odebírané vrstvy [mm]

$f_z$  – posuv na zub [mm/zub]

$h_{ch-str}$  – střední tloušťka odebírané třísky [mm]

Skutečná délka odebírané třísky je vlivem deformace třísky a nesoudržností materiálu obrobku obvykle menší než vypočítaná teoretická délka třísky. (Prokeš 1982, Lisičan 1988)

**Teoretická střední tloušťka třísky:**

$$h_{ch-str} = \frac{f_z \cdot a_p}{L} \approx \frac{f_z \cdot a_p}{\sqrt{a_p \cdot D}} \approx f_z \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} \approx \frac{f_z \cdot 1000}{n \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} \quad [\text{mm}]$$

Kde:  $D$  – průměr řezné kružnice [mm]

$L$  – teoretická délka třísky [mm]

$a_p$  – tloušťka odebírané vrstvy [mm]

$f_z$  – posuv na zub [mm/zub]

$n$  – otáčky frézovacího nástroje [ot/min]

$z$  – počet zubů [-]

**Teoretická maximální tloušťka třísky:**

$$h_{ch-max} \approx f_z \sin \varphi \approx 2 \cdot h_{ch-str} \quad [\text{mm}]$$

Kde:  $f_z$  – posuv na zub [mm/zub]

$h_{ch-str}$  – střední tloušťka odebírané třísky [mm]

$\varphi$  – úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°]

(Prokeš 1982, Lisičan 1988)

**Řezná rychlost:**

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad [\text{m/s}]$$

Kde:  $D$  – průměr řezné kružnice [mm]

$n$  – otáčky frézovacího nástroje [ot/min]

**Posuvná rychlost:**

$$v_f = \frac{f_z \cdot n \cdot z}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

Kde:  $f_z$  – posuv na zub [mm/zub]

$n$  – otáčky frézovacího nástroje [ot/min]

$z$  – počet zubů [-]

**Posuv na zub:**

$$f_z = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} \quad [\text{mm}]$$

Kde:  $v_f$  – posuvná rychlost [m/min]

$n$  – otáčky frézovacího nástroje [ot/min]

$z$  – počet zubů [-]

(Prokeš 1982)

### 3.3. Dezintegrovaná dřevní hmota

#### 3.3.1. Vznik třísky při podélném frézování

Při prvním styku řezného klínu s obrobkem se hmota nejprve více či méně deformuje (otupení ostří řezného klínu) a po překročení určitého napětí v těsném okolí dotyku řezného klínu s materiálem nastává oddělování části hmoty obrobku.

V průběhu vytváření třísky lze pozorovat vznik trhlin. Jejich umístění a směr je vzhledem k okamžité poloze a směru pohybu řezného klínu závislí na orientaci a stavbě obráběného materiálu a na dalších vlivech.

Na oddělování třísky, její vlastnosti a konečnou formu třísky po odlétnutí od nástroje mají největší vliv hlavně:

- Druh obráběného materiálu a jeho vlastnosti (vlhkost, teplota, objemová hmotnost, mechanické a fyzikální vlastnosti)
- Směr dřevních vláken a letokruhů vzhledem k směru pohybu řezného klínu
- Geometrie a mikrogeometrie nástroje
- Směr otáčení nástroje vzhledem ke směru posuvu obrobku (sousedné a nesousedné frézování)
- Řezné podmínky (řezná rychlost, podávací rychlost, posuv na zub, tloušťka odebírané vrstvy.
- Způsob odvádění vzniklé třísky z místa jejího oddělování  
(Prokeš 1982)

#### 3.3.2. Rozměry a tvar třísky

Tříska je charakterizována jednak průřezem (rozměry a tvarem) a jednak typem (druhem). Velikost třísky a tvar jejího průřezu neurčujeme po odvedení třísky z místa řezu, ale ještě před odvedením a to v rovině kolmé k ploše řezání předcházejícím ostřím nástroje. Určujeme proto takzvané nominální rozměry třísky.

Tříska je totiž při oddělování deformována ve směru podélném i příčném a vnitřní vazba hmoty třísky je většinou narušena.

Průřez třísky je určený tloušťkou  $s$  a šířkou  $b$ . Její nominální délka  $l$  se rovná délce průchodu ostří nástroje, přičemž její skutečná délka  $l'$  je vlivem stlačení menší. (Lisičan 1988)





Na začátku procesu se dřevo v místě dotyku ostří deformuje tlakem v čelním i podélném směru. Dalším vnikáním řezného klínu do dřeva jsou vlákna ohýbána a při větší tloušťce třísky je její odpor proti ohybu větší než tahová pevnost dřeva ve směru kolmo k vláknům. Vzniká zalomení, které se zvětšuje, dokud nedojde k překonání tahové pevnosti vláken na venkovní straně ohybu a nedojde tak k nalomení třísky.

Při větší tloušťce třísky může dojít k rozštěpení nebo dvojitému zalomení. Vznik takovéto třísky je ovlivněný štípatelností dřeva, vlhkostí dřeva, řezným úhlem a součinitelem tření mezi třískou a čelní plochou nástroje.

Velmi důležitým faktorem kvality obrobeneho povrchu je úhel mezi rovinnou řezu a směrem dřevních vláken( $\varphi_2$ ):

- Pokud je tento úhel nulový, tj. obrobeneý povrch je rovnoběžný s vlákny dřeva, nehrozí akutní nebezpečí poškození obrobeneho povrchu trhlinami a zalomením. Pokud ovšem vzniknou, jsou nevýrazné.
- Pokud se však řeže i při malém úhlu  $\varphi_2$  „proti vláknům“, jsou trhliny a zalomení výrazné a zasahují pod úroveň ostří do obrobeneho povrchu materiálu (obr. 23). Tím se kvalita obrábeneho povrchu velmi zhorší. (Lisičan 1988)

### **3.3.3.2. Tříška souvislá, tenká, hladká**

Tato tříška vzniká při tenkých třískách, při střední vlhkosti a při středních hodnotách řezného úhlu. Při točité třisce (hoblině) vzrůstá se stoupající tloušťkou třísky poloměr spirály. Řezaný povrch a ostří nástroje jsou v neustálém kontaktu, kde vzniká dobrá kvalita obrobeneho povrchu. V důsledku stálého kontaktu ostří s dřevem je otupení ostří rychlejší. Při elementárním řezání a při  $\varphi_2 > 0$  vznikají cyklické změny třísky (b) „po vláknech“.

Zalomení „po vláknech“ směřuje od ostří k obrobeneému povrchu a vytváří tak třísku typu a. Po nalomení, které pohybující se ostří „zabere“ znova od nejtenčí třísky až po následné opětovné zalomení a nalomení. Proces tvorby třísky má tento cyklický charakter. Obrobeneý povrch má při tomto jevu dobrou kvalitu. (Lisičan 1988)

### 3.3.3.3. Souvislá plastická tříska zhuštěná

Ke vzniku takovéto třísky dochází tlakovým zdeformováním dřeva plochou řezného klínu v podélném směru až do plastického stavu, kdy se třísky hromadí před ostřím, až nakonec sklouzne po čele nože, kde se tento proces začne znovu opakovat.

Nevýhodou je zpětné zdvihání vláken z obrobeného povrchu. Tyto vlákna jsou vtlačena do méně deformovaného podkladu a nebyli přeřezané. Povrch obrobku proto zůstává chlupatý a vlnitý.

Důvodem této varianty je malý nebo žádný čelní úhel a nadměru otupené ostří nástroje s velkým poloměrem zakřivení ostří, na kterém se řezný úhel transformuje až do záporných hodnot.

Uvedené modely třískotvorných procesů při podélném elementárním řezání vznikají v celé škále běžných řezných rychlostí  $v_c$  do 50m/s. Podle měnicích se vlastností obrobku se mění forma a tvar třísky, a tím i celý řezný proces. Při řezání jsou možné rychlé změny a přechody z jedné třískotvorné formy do druhé bez výraznější hranice. (Lisičan 1988)

### 3.3.4. Vlastnosti dezintegrované dřevní hmoty

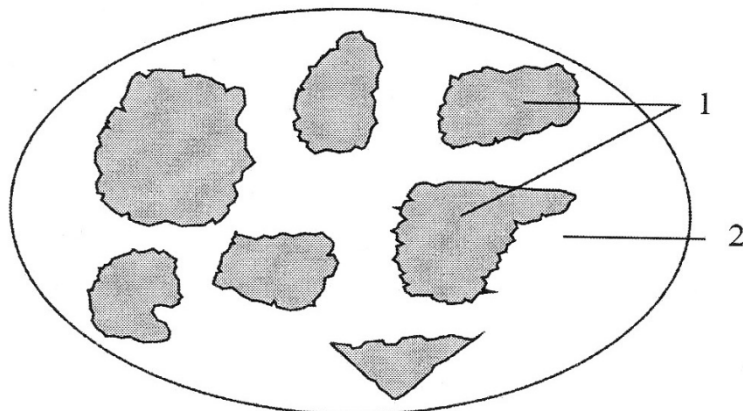
V procesu třískového obrábění dřeva vzniká tříska s různými vlastnostmi (rozměr, tvar a množství). Tyto vlastnosti jsou závislé na fyzikálně-mechanických vlastnostech dřeva, tak i na uhlové geometrii, otupení a materiálu ostří řezného nástroje. Dále jsou závislé na technicko-technologických podmínkách procesu obrábění dřeva.

Třísky jsou částice vzniklé při třískovém obrábění a dělení dřeva. Jsou podle způsobu vzniku označovány také jako štěpka, tříska, hoblina, pilina, vlákno, dřevní moučka, nebo společným pojmem „dezintegrovaná dřevní hmota“.

Pro dezintegrovanou dřevní hmotu je charakteristické, že jednotlivá zrna nevyplňují celý objem prostoru, ve kterém se tato hmota nachází. Mezi jednotlivými třískami (zrny) jsou mezery vyplněné vlhkým vzduchem. Uvedená skutečnost řadí dezintegrovanou dřevní hmotu do kategorie disperze tj. do nestejnorodé soustavy sestávající se z dvou fází - částice dřevní hmoty a vlhký vzduch.

Další typickou vlastností dezintegrované dřevní hmoty je skutečnost, že při přesouvání jednotlivých částic se mění celkový tvar zaplněného prostoru dezintegrovanou

dřevní hmotou. Tyto vlastnosti řadí dezintegrovanou dřevní hmotu mezi sypké materiály. (Dzurenda 2002)



Obr. 24 Disperzní soustava, 1- částice dezintegrované dřevní hmoty, 2- vlhký vzduch

Základními údaje, které charakterizují a popisují fyzikální a chemické vlastnosti dezintegrované dřevní hmoty jsou:

- a) velikost třísky
- b) tvar třísky
- c) zrnitost dezintegrované dřevní hmoty
- d) vlhkost dezintegrované dřevní hmoty
- e) sypná hustota dezintegrované dřevní hmoty
- f) sypný úhel dezintegrované dřevní hmoty
- g) pádová rychlost dezintegrované dřevní hmoty
- h) stlačitelnost dezintegrované dřevní hmoty
- i) elektrické vlastnosti prachových dřevních částic
- j) koagulace prachových částic dřeva
- k) explozivnost prachových částic dřeva
- l) abrazivnost dezintegrované dřevní hmoty
- m) biologické a zdravotní účinky dřevěného prachu na lidský organizmus

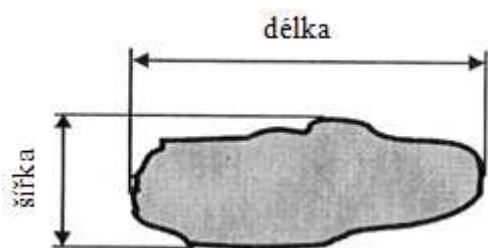
#### 3.3.4.1. Velikost a tvar třísky

Velikost a tvar částic dezintegrované dřevní hmoty jsou dva základní údaje, které sypkou dřevní hmotu charakterizují. Uvedené vlastnosti mají vliv na fyzikální vlastnosti sypké dřevní hmoty, jako jsou především sypná hustota, granulometrická skladba, úhel

skluzu a sypný úhel. Velikost a tvar třísky má také vliv na pohybové vlastnosti v proudu vzduchu odsávacího zařízení a na podmínky odlučování a filtraci částic v separačním zařízení.

Rozměry částic jsou definovány rozměrem pravoúhlého kvádrů opsaného kolem dané částice, kde jsou jednotlivé rozměry definovány jako:

- délka - největší rozměr částice
- tloušťka - nejmenší rozměr částice
- šířka - třetí (střední) rozměr částice



Obr 25 Základní rozměry částice dezintegrované dřevní hmoty.

Velikost částice určuje největší rozměr pravoúhlého kvádrů opsaného kolem částice, tj. délka třísky.

Částice dezintegrované dřevní hmoty vznikající z procesu třískového obrábění a dělení dřeva jsou značně rozdílné. Velikosti intervalu minimálních a maximálních hodnot rozměrů třísky je u štěpky vzniklé na kotoučové sekačce 2,5 až 40 mm, u mokré piliny vzniklé při řezání na rámové pile je 0,064 až 4,8 mm a u dřevního prachu je interval hodnot 0,001 až 0,5 mm. (Dzurenda 2002)

Geometrický tvar třísek vznikajících v procesu obrábění dřeva je nejrozmanitějších tvarů. I přes tuto skutečnost je snaha zrna sypkých hmot zařadit do některé z třech základních skupin tvarů zrn

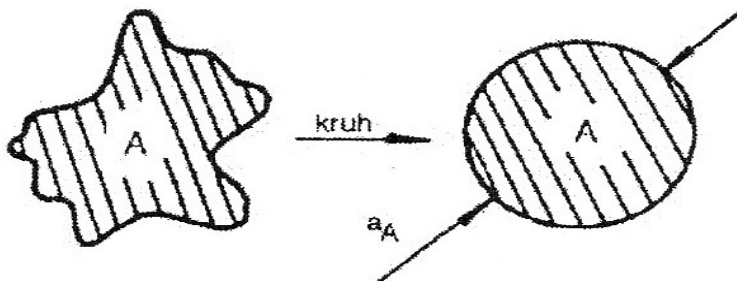
- a) **zrna izometrická** – třísky mající ve všech třech směrech přibližně stejně velké rozměry (jemné frakce pilin, jemné a velmi jemné frakce dřevního prachu).
- b) **zrna plochá** (laminární) – u těchto třísek je rozměr šířky a délky výrazně větší než třetí rozměr (tloušťka).
- c) **zrna vláknitá** (fibrilární) – třísky s výrazně větším délkovým rozměrem oproti dalším rozměrům (vlákno, středně hrubé a hrubé frakce pilin, jehličkové třísky, středně hrubé frakce dřevního prachu).

V závislosti na technologických vlastnostech dezintegrované dřevní hmoty a aeromechanických vlastnostech třísky v proudu vzduchu, či sedimentačních vlastnostech je snaha odborníků jednotlivých vědních disciplín zabývajících se problematikou charakterizovat částice sypké hmoty jedním rozměrem (údajem). Ve vzduchotechnice by takovýmto rozměrem měl být tzv. ekvivalentní průměr, tj. průměr, který má s danou částicí společnou některou z vlastností. (Dzurenda 2002)

### Ekvivalentní vlastnosti částic

a) Ekvivalentní průměr částice  $a_A$  – je takový průměr částice A, jejíž plocha kruhu je stejně velká jako plocha průřezu skutečné částice S ve směru její tloušťky.

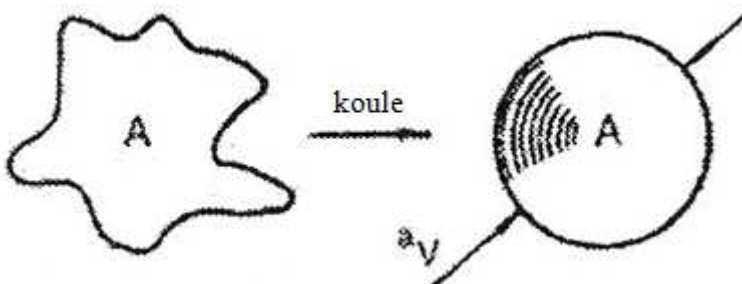
$$a_A = \sqrt{\frac{4 * S}{\pi}} \text{ [}\mu\text{m]}$$



Obr 26 Ekvivalentní velikost částice podle průměru. (Dzurenda 2002)

b) Ekvivalentní průměr částice  $a_V$  – je takový průměr koule, jejíž objem je stejně velký jako objem částice V.

$$a_V = \sqrt[3]{\frac{6 * V}{\pi}} \text{ [}\mu\text{m]}$$

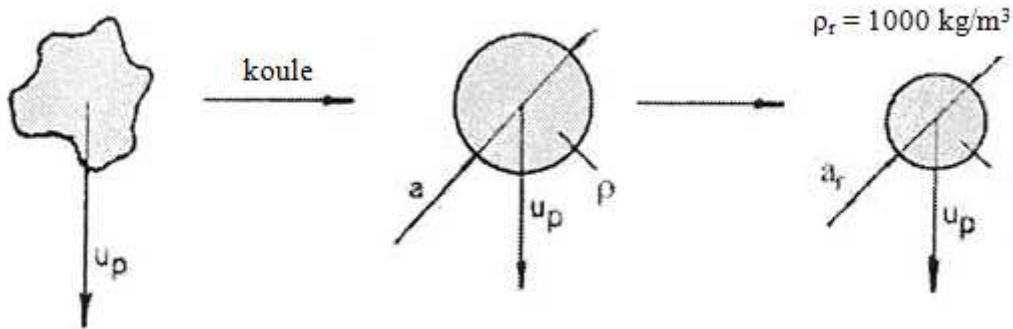


Obr 27 Ekvivalentní poměr částice podle objemu. (Dzurenda 2002)

c) Ekvivalentní velikost částice podle pádové rychlosti  $a_R$  – je taková velikost koule referenčního materiálu s průměrem  $a_R$ , která v daném prostředí sedimentuje se stejnou pádovou rychlostí, jako skutečná částice s hustotou  $\rho$ . Hustota referenčního

materiálu  $\rho_R = 1000\text{kg/m}^3$ . Ekvivalentní průměr částice podle pádové rychlosti  $a_R$ , je vyjádřen vztahem:

$$a_R = a * \sqrt{\frac{\rho_m}{1000}} \quad [\mu\text{m}]$$



Obr. 28 Ekvivalentní velikost částice podle pádové rychlosti. (Dzurenda 2002)

### 3.3.4.2. Faktory ovlivňující velikost dřevních částic

Při obrábění dřeva třískovou metodou pomocí řezného klínu odstraňujeme z obráběného materiálu určitou část hmoty. Odebírání třísky je složitý proces, u kterého se projevuje celá řada technických i technologických činitelů vztahujících se k:

- obráběcímu nástroji (materiál, uhlová geometrie řezného klínu, otáčky, otupění)
- nástroji a obrobku současně (posuv obráběného materiálu, tloušťka odebírané vrstvy a její průřez, úhel mezi dřevními vlákny a rovinou řezu, řezná rychlost)
- obráběnému materiálu (druh materiálu a jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti)

#### Tvar třísky závisí na způsobu pohybu ostří nástroje:

- Při pohybu přímočarém vratném (např. rámové pily), kde je obvyklý mírný předklon pilového listu, aby se řezný klín při zpětném pohybu netřel o řezaný materiál. Takto vznikající pilina má nerovnoměrnou tloušťku. Na začátku řezání je tloušťka třísky větší než v polovině zdvihu, ve spodní úvrati je tloušťka třísky největší. Během řezání se mění i posuv na zub u plynulého podávání materiálu. (Lisičan 1988)
- Při pohybu přímočarém (např. pásová pila), kde nástroj (pilový pás) obíhá je průběh tloušťky třísky rovnoměrná po celé řezné délce. To je způsobeno konstantní podávací a řeznou rychlosti. (Lisičan 1988, Prokeš 1982)

- c) Při pohybu rotačním je tloušťka třísky proměnlivá (např. rovinné frézování, řezání kotoučovými pilami). V případě řezání kotoučovými pilami se tloušťka třísky mění od minimální (břit již na začátku obrábění odebrává třísku určité tloušťky) po maximální tloušťku třísky. Při frézování se tloušťka třísky mění od nuly po maximum. Maximální tloušťka třísky je dána rychlostí posuvu obrobku a řeznou rychlostí nástroje. (Lisičan 1988, Prokeš 1982)

**Vlastností materiálu, z něhož jsou třísky odebírány:**

- a) Pevnost dřevěného materiálu při přeřezávání dřevních vláken ostřím řezného klínu (překonání pevnosti ve stříhu)
- b) Tření třísky o čelo zubu
- c) Tření hřbetové části ostří o obráběnou plochu (plochu řezu). Toto tření narůstá s postupným otupením ostří.

**Rozměry třísky jsou dány:**

- a) Tloušťkou – tloušťka je kolmá vzdálenost mezi dvěma sousedními pohyby ostří v materiálu.
- b) Délka – délka je zpravidla dána drahou ostří probíhající přes obrobek.
- c) Šířka – je dána typem řezání. Při volném řezání je šířka třísky totožná s rozměrem obráběné plochy obrobku.

Při řezání v drážce je šířka třísky dána šířkou drážky. Pokud je tato drážka vytvořena jedním ostřím. (Lisičan 1988)

### **3.3.4.3. Zrnitost – granulometrické složení sypké dřevní hmoty**

Zrnitost (granulometrické složení) je údaj charakterizující zastoupení jednotlivých částic (skupin částic) určité velikosti v celém souboru sypké hmoty.

Na základě skutečnosti, že sypká hmota obecně představuje značně polydisperzní systém (soubor s částicemi různé velikosti). Pro identifikaci sypké hmoty jsou vymezené intervaly zrnitosti, které řadí částice určité velikosti do tříd (frakcí). (Dzurenda 2002) V tabulce 6 jsou uvedené třídy zrnitosti sypkých hmot tak, jak je vymezuje ČSN 26 0070 - Klasifikace a označování sypkých hmot dopravovaných na dopravních zařízeních



<b>Třída</b>	<b>Zrnitost [mm]</b>	<b>Označení</b>
Velmi jemné	0,07 - 0,50	A
Jemné	0,50 - 3,50	B
Jemně zrnité	3,50 - 13,0	C
Středně zrnité	13,0 - 75,0	D <sub>1</sub>
Hrubě zrnité	Nad 75,0	D <sub>2</sub>
Nepravidelné	Vláknité, tvarově různorodé	E

Tab. 6 Třídy zrnitosti sypkých hmot podle ČSN 26 0070

Pro dezintegrovanou dřevní hmotu zavedl Hejma a kolektiv (1981) jinou klasifikaci zrnitosti dezintegrované dřevní hmoty. Sypký dřevní materiál zařazuje do pěti kategorií - hrubý odpad, středně hrubý odpad, střední odpad, jemný odpad a velmi jemný odpad. Zrnitost těchto frakcí uvádí tabulka 7.

<b>Označení</b>	<b>Rozměra frakce[mm]</b>
Hrubý odpad	> 1
Středně hrubý odpad	0,5 - 1
Střední odpad	0,3 - 0,5
Jemný odpad	0,03 - 0,3
Velmi jemný odpad	0,001 - 0,03

Tab. 7 Zrnitost dezintegrování dřevní hmoty Hejma (1981)

Jemné frakce sypké hmoty včetně dřevní sypké hmoty s velikostí od 1  $\mu\text{m}$  do 500  $\mu\text{m}$  jsou označovány pojmem „prach“(Hejma a kolektiv (1981)).

Jiní autoři jako jsou Konz (1975), Longauer – Sujová (2001) pod pojmem prach uvádějí frakce sypké hmoty v rozmezí 0,1 – 1000  $\mu\text{m}$  a dále tento prach dělí do třech skupin na:

- Velmi jemný prach v rozmezí 0,1  $\mu\text{m}$  až 10  $\mu\text{m}$
- Jemný prach v rozmezí 10  $\mu\text{m}$  až 100  $\mu\text{m}$
- Hrubý prach v rozmezí 100  $\mu\text{m}$  až 1000 $\mu\text{m}$

Prachové částice s rozměry 1  $\mu\text{m}$  až 100  $\mu\text{m}$  se od ostatních zrn sypké hmoty liší tím, že velmi pomalu sedimentují a dlouhou dobu setrvávají v ovzduší. Tyto částice jsou explozivní, nositelem elektrického náboje a vlhký dřevní prach má tendenci koagulace a shlukování. (Dzurenad 2002)

Granulometrické složení sypké dřevní hmoty (zrnitosti) se stanovuje analytickým rozbohem, který je založen na různých fyzikálních principech (prosévání, profukování, mikroskopická analýza). Výběr metody pro určitý druh sypké hmoty závisí především na jeho fyzikálních vlastnostech. (Hejma 1981)

Rozlišujeme přímé a nepřímé metody stanovení granulometrického složení sypké hmoty. Přímé metody jsou: optická mikroskopie, elektronová mikroskopie, prosévání, sedimentační metody. Nepřímé metody stanovují složení pomocí principů, které zjišťují hodnoty souboru sypké dřevní hmoty jen nepřímo související s velikostí dřevěných částic.

Mikroskop je nejvhodnější přístroj pro komplexní zkoumání morfologických vlastností dřevěných částic, a to převážně prachu. Je totiž vhodný pro určení ekvivalentního průměru částic, tvaru částic, struktury, velikosti povrchu a dalších vlastností sypké dřevní hmoty. Pro mikrosnímky je velmi vhodnou pomůckou podkladové sklíčko opatřené rastrem (sítí). Pomocí tohoto sklíčka můžeme přímo určovat rozměry částic a zkoumat i granulometrické složení sypké dřevní hmoty (prachu). Obvyčejným mikroskopem můžeme zkoumat částice o velikosti 1  $\mu\text{m}$  až 1000  $\mu\text{m}$ .

Nejběžnější metodou pro stanovení granulometrické skladby je sítování, tj. prosévání vzorku sypké dřevní hmoty na sadě sít s určitými velikostmi mezer (ok) v pletivu síta. Síta jsou uspořádána obvykle v sestavě od největších po nejmenší velikosti ok. V průběhu sítové analýzy se roztřídí zrna sypké hmoty do jednotlivých frakcí (částice větší než rozměry mezer síta přes síto nepropadnou a zůstanou na pletivu síta). Po skončení sítování zůstane na jednotlivých pletivech síta zbytek, který je propadem síta předchozího.

Hodnota tohoto zbytku určuje zrnitost frakce, tj. kolik částic z celkového vzorku patří do oblasti velikosti mezer předcházejícího pletiva a velikosti mezer pletiva se zbytkem (propadem). Například pokud se na síte s velikostí mezer 60  $\mu\text{m}$  zachytilo 20 % vzorku a mělo-li předcházející síto velikost mezer 80  $\mu\text{m}$ , je možné konstatovat, že podíl frakce v intervalu 60  $\mu\text{m}$  až 80  $\mu\text{m}$  představuje 20 % z celkového analyzovaného vzorku.

V praxi se síťová analýza vykonává ručně nebo strojně. Strojní sítování je rychlejší. Doba sítování vzorku je závislá na fyzikálně-mechanických vlastnostech sypké dřevní hmoty, zrnitosti, vlhkosti a také na velikosti mezer v pletivu síta.

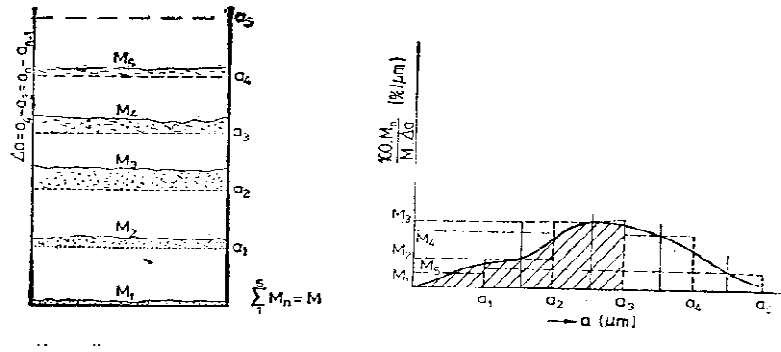
Výsledky sítové analýzy se uvádějí ve formě tabulek nebo grafickou formou v podobě grafu. Pro grafické zobrazení výsledků se používá distribuční křivka  $D_a$  nebo integrální křivky zrnitosti. Křivka propadu  $P_a$  nebo křivka zbytku  $Z_a$ . (Hejma 1981, Dzurenda 2002)

### Distribuční křivka $D_a$

Vyjadřuje závislost poměrného zastoupení hmotnosti  $m_i$  určité velikosti zrn (frakce) v analyzovaném souboru sypké hmoty. Způsob sestavení distribuční křivky z výsledků sítové analýzy názorně zobrazuje obrázek 29.

$$f_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \cdot 100 \text{ [%]}$$

$$\Delta a_i = a_{a+1} - a_n \text{ [\mu m]}$$



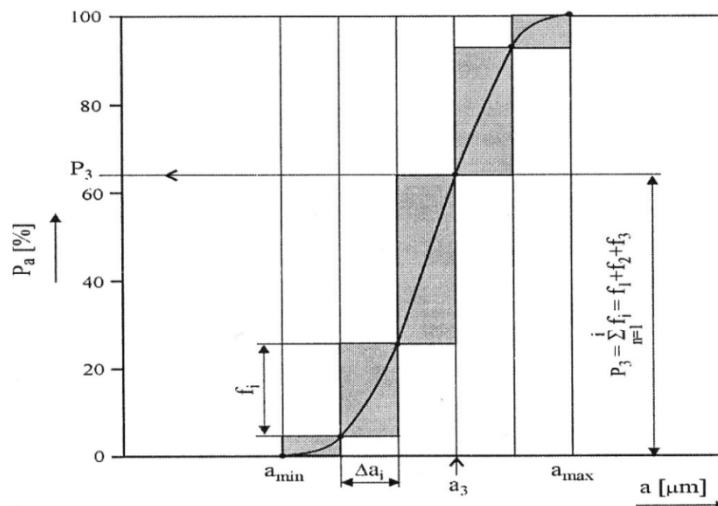
Obr. 29 Distribuční křivka získaná síťováním (Hejma 1981)

### Křivka propadu $P_a$

Vyjadřuje závislost poměrné hmotnosti menších zrn v analyzovaném vzorku  $P_a$  [%] a velikost částice „a“ [ $\mu\text{m}$ ]. Křivka propadu vznikne postupným vynášením hodnot jednotlivých frakcí „ $f_i$ “ na svislou osu a hodnot jednotlivých rozměrů frakcí „ $\Delta a_i$ “ na vodorovnou osu v posloupnosti od jemných frakcí k hrubím frakcím, přičemž platí vztahy:

$$P_i = \sum_{n=1}^i f_n \text{ [%]}$$

$$a_i = a_{\min} + \sum_{n=1}^i \Delta a_n \text{ [\mu m]}$$



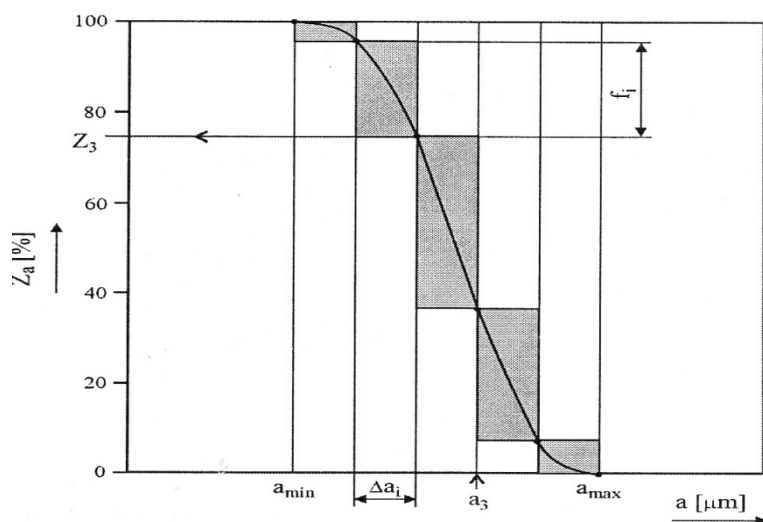
Obr. 30. Křivka propadu (Dzurenda 2002)

## Křivka zbytku $Z_a$

Vyjadřuje závislost poměrné hmotnosti větších zrn analyzovaného vzorku  $Z_i$  [%] a velikost částice  $a$  [ $\mu\text{m}$ ]. Křivka zbytku se z výsledků sítové analýzy vytváří obdobně jako křivka propadu, tj. postupným vynášením rozměrů jednotlivých frakcí na vodorovnou osu a hodnot jednotlivých frakcí  $f_i$  na svislou osu. Rozdíl v konstrukci křivky zbytku v porovnání s konstrukcí křivky propadu je ten, že vynášení frakčních hodnot je prováděné od frakce největších částic. Pro souřadnice jednotlivých hodnot platí vztahy:

$$Z_i = \sum_{n=1}^i f_i \text{ [%]}$$

$$a_i = a_{\max} - \sum_{n=1}^i \Delta a_i \text{ [\mu m]}$$

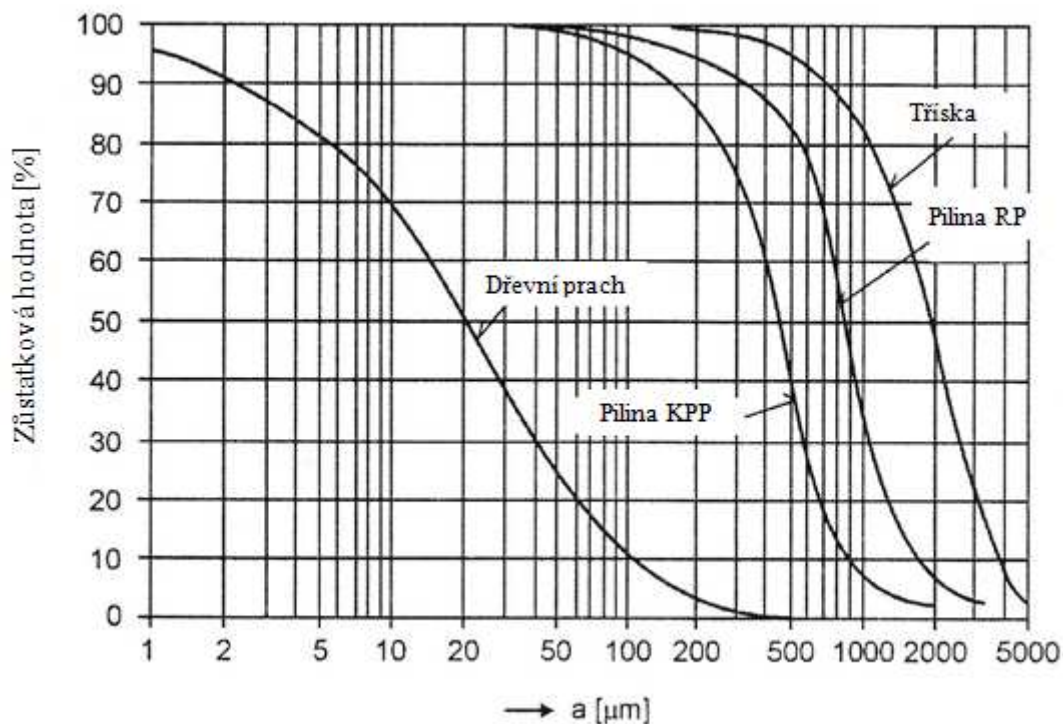


Obr 31 Křivka zbytku (Dzurenda 2002)

Mezi hodnotami integrálních křivek zrnitosti  $Z_a$  a  $P_a$  v rámci jednoho souboru vzorku sypké hmoty platí závislost, kterou vyjadřuje vztah:

$$P_a + Z_a = 100 \text{ [-]}$$

Křivka zbytku nebo křivka propadu bývá často zobrazována v logaritmicky-normální síti. V této síti jsou na logaritmické stupnici (vodorovná osa) vynášené hodnoty velikosti částic „ $a_i$ “ a na lineární stupnici je vynášen podíl jednotlivých frakcí „ $f_i$ “. Značný úsek křivky zbytku (propadu) je v této stupnici vykreslený přímkou. To je hlavní výhoda této formy zobrazování sítové analýzy. Křivky zbytku některých sortimentů sypké dřevní hmoty jsou ukázány na obr 32.



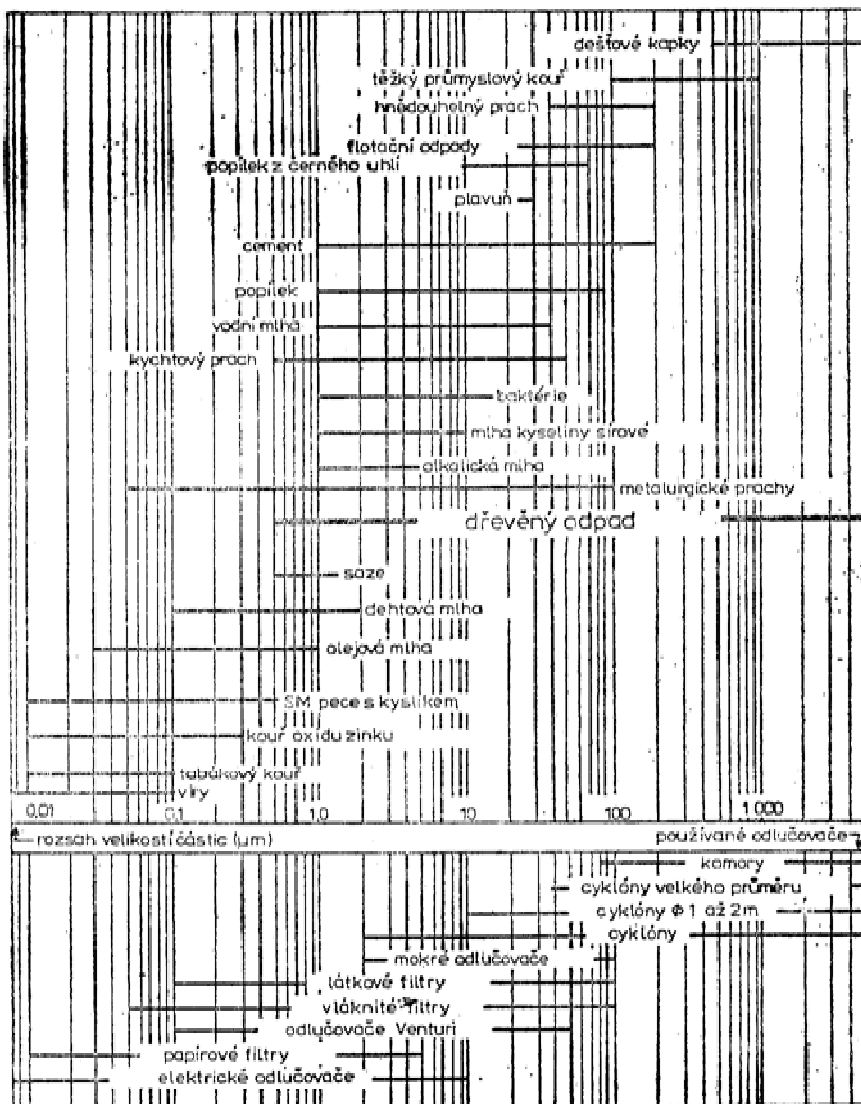
Obr 32 Křivka zbytku (Dzurenda 2002)

V dopravní technice se často křivky zbytku uvádějí formou referenčního materiálu, tj. pro materiál s hustotou  $\rho_R = 1000 \text{ kg/m}^3$ , a velikost částic je vyjádřena prostřednictvím ekvivalentního rozměru  $a_R$  – ekvivalentní průměr podle pádové rychlosti. Pro sypkou dřevní hmotu složenou z izometrických zrn můžeme ekvivalentní průměr části vypočítat ze vztahu:

$$a_R = a * \sqrt{\frac{\rho_m}{1000}} \text{ [}\mu\text{m]}$$

Pokud je skutečná hustota částic  $\rho > \rho_R$ , potom se po přepočtení na hustotu referenčního materiálu křivka zbytku  $Z_a$  posune vpravo, tj. frakce zhrubnou. Jestliže je hustota  $\rho < \rho_R$ , potom se křivka  $Z_a$  posouvá doleva, tj. rozměry částic se zmenšují (frakce se zjemňuje). (Dzurenda 2002)

Zjištění granulometrického složení a posouzení jeho chování je důležité z mnoha hledisek, například schopnost odlučování v různých druzích odlučovačů, zdravotní působení, schopnost usazování nebo schopnost exploze. Postavení dřevního odpadu mezi ostatními duhy jemných částic a rozsah použitelných odlučovačů je znázorněn na obrázku 33. (Hejma 1981)



Obr. 33 Postavení dřevního odpadu mezi ostatními duhy jemných částic a rozsah použitelných odlučovačů (Hejma 1981)

Hlavní operace používané při obrábění a dělení dřeva, při kterých vzniká dřevní odpad (tříška), lze rozdělit na řezání, roztřískování, frézování, vrtání, soustružení, dlabání a broušení. Odlučování odpadu (z proudu vzduchu) vzniklého při těchto operacích může být různě obtížné. Hejma (1981) uvádí obtížnosti odlučování podle tabulky 8. Obtížnost odlučování v závislosti na technologické operaci a hrubosti vzniklého odpadu je znázorněno v tabulce 9. (Hejma 1981)

Označení	Obtížnost	
1	Snadné	(cyklóny velkého průměru)
2	Nesnadné	(Cyklóny s maximální odlučivostí)
3	Velmi obtížné	(látkové filtry)

Tab. 8 Obtížnost odlučování odpadu (Hejma 1981)

Operace	Nástroj	Odpad	Odlučování (dle tab.8)
Řezání	rámová pila	hrubý	1
	kotoučová pila, pásová pila	hrubý až středně hrubý	1.2
	řetězová pila	hrubý	1
Třískování	roztřískovač	hrubý	1
Frézování	fréza (všechny druhy)	hrubý až střední s jemným podílem	2 (1)
Vrtání	vrták	hrubý až středně hrubý	1 - 2
Soustružení	nůž	hrubý až střední	1 - 2
Dlabání	dlabací vrták, dlabací pila, dlabací řetěz	hrubý	1
Broušení	brusný papír, brusný pás	jemný až velmi jemný	3 (2)

Tab. 9 Základní operace opracování dřeva, vznik odpadu a způsob jeho odlučování (Hejma 1981)

## 4. Metodika práce

### 4.1. Výběr a příprava vzorků

Materiál potřebný k výrobě vzorků pro analýzu granulometrického složení třísky poskytla firma TIMLESS TIMBER, s.r.o. Velká nad Veličkou. Tato firma provedla i tepelnou úpravu poloviny vybraného materiálu. Pro analýzu bylo vybráno bukové dřevo (*Fagus sylvatica*), jehož vlastnosti jsou popsány v kapitole výše. (kap. 3.1.3.1.1.)

Vybrané bukové prkno bylo vybráno s ohledem na co nejmenší zastoupení vad a co nejrovnější průběh dřevních vláken po délce prkna. Prkno bylo následně délkově přeříznuto na dvě stejné poloviny. Jedna polovina byla odložena pro následné další zpracování a druhá polovina byla tepelně upravena v zařízení na tepelnou úpravu dřeva. Poté byly obě poloviny převezeny do dílen Fakulty lesnické a dřevařské při ČZU v Praze.

Dovezený rostlý a tepelně upravený bukový materiál byl následně rozřezán na přířezy jeden metr dlouhé a 10 cm široké. Připravené přířezy se ponechaly, při relativní vlhkosti vzduchu 65 % a teplotě 20 °C pro ustálení vlhkosti. Všechn materiál byl následně srovnán na srovnávací frézce a protažen na tloušťku 30 mm. Takto upravený rostlý i tepelně ošetřený materiál byl připraven na samotné odebrání vzorků.



Obr. 34 Materiál připravený k frézování a odběru vzorků.

#### 4.1.1. Tepelné ošetření materiálu

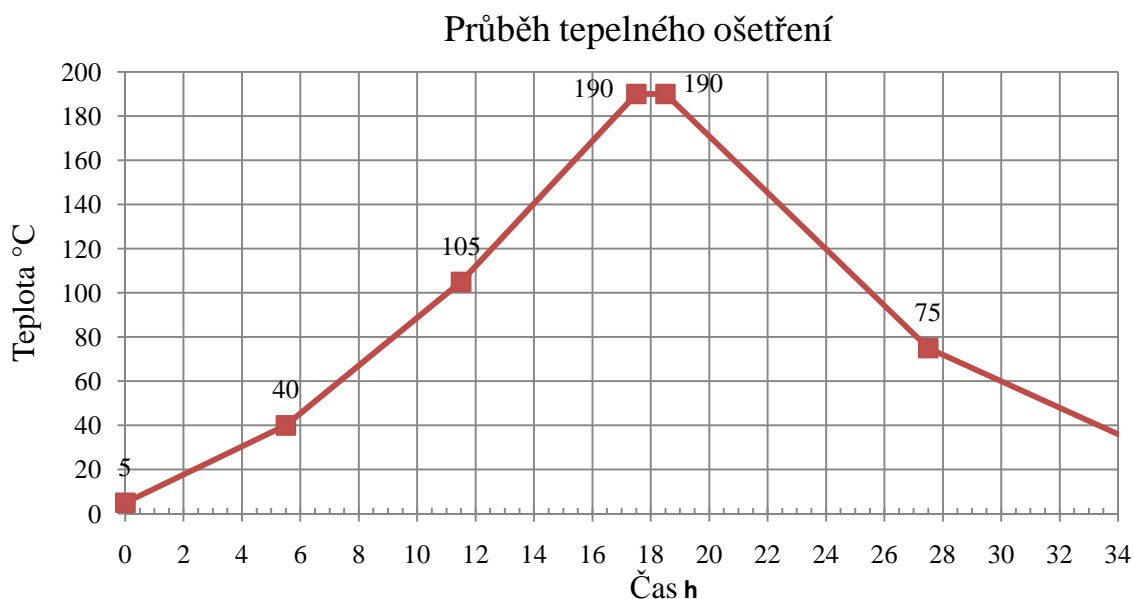
Samotná tepelná úprava byla provedena v zařízení pro tepelnou úpravu dřeva firmy Timless Timber Tec, které firma Timless Timber s.r.o. provozuje. Toto zařízení je určeno k tepelnému ošetření dřeva technologií ThermoWood v prostředí vodní páry.

Výhodou tohoto zařízení je stlačení upraveného materiálu a zabránění tak tvarové deformaci a kroucení. Každá vrstva narovnaného dřeva je proložena kovovými pláty, které zajišťují přenos tlaku, stabilizaci dřeva a přenos tepla. Obrázky této technologie jsou v příloze obr. 88 a 89.

Samotná tepelná úprava bukového dřeva použitého na vzorky byla provedena při těchto podmínkách:

Náplň pece 7 m<sup>3</sup> dřeva s počáteční vlhkostí přibližně 11 %. Počáteční fáze - ohřev - trvala 5,5 hodiny s dosaženou teplotou 40 °C. Následné sušení trvalo 6 hodin při dosažení teploty 105 °C. Další ohřev na teplotu úpravy 190 °C trval 6 hodin. Samotná tepelná úprava trvala 1 hodinu za teploty 190 °C. Poslední fáze ochlazení trvala 9 hodin. Při ní klesla teplota na 75 °C a po dosažení této teploty se pec vypne a otevřou se dveře pece. Dřevo se dále chladí samovolně, až dosáhne teploty cca 30 °C, kdy se vyndává z pece. Při fázi tepelné úpravy se udržuje teplota v rozmezí +3 -4 °C. Průběh tepelné úpravy je znázorněn na obrázku 35.





Obr 35 Průběh tepelné úpravy buku použitého k odběru vzorků.

## 4.2. Popis strojního zařízení a frézovací hlavy,

### 4.2.1. Popis strojního zařízení

Na experiment bylo použito strojní vybavení již zmíněné dílny FLD. Rovinné frézování materiálu bylo realizováno na spodní svislé frézce typového označení FVS. Podávání obrobku do řezu zajišťovalo podávací zařízení STEFF 2034. Materiál byl obráběn tzv. nesousledným frézováním (obr.20).

#### Parametry spodní svislé frézy FVS:

Proudová soustava	360/220 [V]
Příkon	4 [kW]
Kmitočet	50 [Hz]
Rok výroby	1975
Výrobce	Československé hudební nástroje Hradec králové
Otáčky stroje	3000, 4500, 6000, 9000
Řezná rychlost (Ø nástroje 130 mm)	20, 30, 40, 60 [m/s]

Tab. 10 Parametry spodní svislé frézy FVS



Obr. 36 Spodní svislá fréza a podávací zařízení

**Parametry podávacího zařízení:**

Výrobce	MAGGI
Typ	STEFF 2034
Motor	400[V]
Příkon	0,8 - 0,6 [kW]
Otáčky	1400/2800
Podávací rychlost	4, 8, 11, 22 [m/min]
Rok výroby	2005

Tab. 11 Parametry podávacího zařízení

**4.2.2. Popis frézovací hlavy**

Jednotlivá frézování byla prováděna frézovací hlavou opatřenou dvěma vyměnitelnými noži. Pro obrábění byly použity tři typy frézovacích hlav - každá s jiným úhlem čela  $\gamma$  ( $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ). Změnou úhlu čela se změní také úhlová geometrie nástroje. Do frézovacích hlav byly použity nože s úhlem břitu  $45^\circ$  a před osazením do hlavy byly naostřeny.

### Charakteristika frézy:

Výrobce	STATON
Průměr frézy	125 [mm]
Šířka frézy	45 [mm]
Průměr upínacího otvoru	30 [mm]
Počet nožů	2
Max. otáčky	8000
Průměr frézy s noži	130 [mm]

Tab. 12 Charakteristika frézy



Fréza s úhlem čela 15°

Fréza s úhlem čela 20°

Fréza s úhlem čela 25°

Obr. 37 Frézy použité při frézování

Fréza	Úhel čela [γ]	Úhel břitu [β]	Úhel hřbetu [α]	Řezný úhel [δ]
1	15	45	30	75
2	20	45	25	70
3	25	45	20	65

Tab. 13 Úhlová charakteristika frézovacích hlav

### 4.3. Řezné podmínky a odběr vzorků

Odběr třísek vznikajících při rovinném frézování probíhal za různých podmínek obrábění. Jednou z podmínek byla již zmíněná geometrie ostří nástroje, kde byly použity

tří typy frézovacích hlav s úhlem čela 15°, 20°, 25°. Další podmínkou ovlivňující vznik třísek při frézování je řezná rychlost. Pro naše účely byly vybrány tři hodnoty řezných rychlostí - 20, 30, 40 m/s a podávacích rychlostí 4, 8, 11 m/min. Odebírána byla při těchto hodnotách vždy vrstva silná 1 mm.

Při třech různých řezných podmínkách (u každé po třech hodnotách) nám vznikne 27 odlišných řezných podmínek a při dvou druhích materiálu nám dohromady vzniklo 54 vzorků dezintegrované dřevní hmoty. Jednotlivé řezné podmínky jsou v tabulce 14.

Řezné podmínky	Hodnota
Řezná rychlost [m/s]	20
	30
	40
Podávací rychlost [m/min]	4
	8
	11
Řezný úhel [°]	75
	70
	65
Tloušťka úběru [mm]	1

Tab. 14 Řezné podmínky

### Odběr třísek (vzorků)

Vzorky dezintegrované dřevní hmoty byly odebírány přímo při obrábění dřeva. Jednotlivé odebrané vzorky byly vloženy do igelitového sáčku a označeny jednotlivými parametry obrábění.

### Postup odběru třísek:

- Nastavení kombinace řezných podmínek (frézy, řezné rychlosti a podávací rychlosti)
- Frézování materiálu (zachytávání třísek)
- Vypnutí frézky
- Odběr třísek (vzorku) - přibližně 100 g
- Očištění stroje od přebytečných třísek (odsáváním a tlakovým vzduchem)

Postup odebírání třísek se opakoval vždy při každé kombinaci řezných podmínek a obráběním materiálu.

#### 4.4. Granulometrická analýza

Samotná granulometrická analýza byla provedena v laboratoři Dřevařské fakulty na Technické univerzitě ve Zvolenu.

Sítová analýza byla vykonána na automatickém síťovacím stroji Retsch AS 200. Po konzultaci s prof. Ing. Dzurendou, PhD. byly nastaveny parametry síťování a čas síťování 5 min s přerušením vždy po 10 vteřinách. Dále byla vybrána síta s rozměrem ok 8; 5; 2; 1; 0,5; 0,250; 0,125; 0,080; 0,032 mm a dno. (použitá síta byla v souladu s ČSN ISO 3310-1 (259610) Zkušební síta - Technické požadavky a zkoušení - Část 1: Zkušební síta z kovové tkaniny)

Protože už při odebrání vzorků byl znatelný rozdíl ve velikosti třísek u přírodního a tepelně ošetřeného buku, bylo pro síťování tepelně ošetřeného buku odebráno síto s 8 mm oky. Pro síťování třísek z rostlého buku byla odebrána síta s velikostí ok 0,032 a 0,080 mm. Granulometrická analýza byla provedena u všech pořízených vzorků.

Po dokončení samotného síťování se vzorky zachycené na jednotlivých sítích zvážily na laboratorních vahách Radwag s přesností vážení 0,001 g.



Obr. 38 Vibrační síťovací stroj se sadou sít a laboratorní váha

### **Postu granulometrické analýzy:**

Volba a umístění sestavy sít na síťovací stroj (volba sít podle již zmíněného druhu dřeviny)

Odvážení vzorku třísek (cca 60 g) na laboratorní váze

Umístění naváženého vzorku na horní síto a uzavření sestavy víkem

Nastavení parametrů síťování a spuštění 5 min síťování

Po ukončení síťování se sestava sít rozebrala

Jednotlivé frakce třísek zachycených na sítěch se zvážily a zapsaly

Na vážené hodnoty se přepočítal na procentuální podíl z celku

Všechna síta se vyčistila

## **4.5. Stanovení fyzikálních a mechanických vlastností**

Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva mají výrazný vliv na technologické zpracování dřeva jako je lisování, ohýbání, sušení, řezání a obrábění všeobecně. Proto mají tyto vlastnosti vliv i na tvorbu a složení třísek při rovinném frézování. Obrábění dřeva významně ovlivňuje fyzikální vlastnosti, a to především hustota a vlhkost dřeva. Základní mechanické vlastnosti ovlivňující obrábění dřeva jsou pružnost, pevnost a houževnatost. (Prokeš 1982, Požgaj 1993)

Pro orientační stanovení fyzikálních vlastností byla zjišťována vlhkost a hustota dřeva. Z mechanických vlastností byly měřeny hodnoty ohybové pevnosti a rázové houževnatosti.

Vzorky pro tyto zkoušky byly vyrobeny ze vzorků používaných pro odběr třísek z rovinného frézování. Z důvodu omezeného množství materiálu bylo vždy vyrobeno po pěti vzorcích od každého materiálu na mechanické zkoušky a po šesti vzorcích pro stanovení fyzikálních vlastností.

Všechna měření související se stanovením fyzikálních a mechanických vlastností dřeva se prováděla v laboratoři FLD na Katedře zpracování dřeva.

### 4.5.1. Stanovení hustoty

Hustota dřeva udává hmotnost jeho objemové jednotky, přičemž se nejčastěji vyjadřuje v  $\text{kg/m}^3$  nebo  $\text{g/m}^3$ . Hustota dřeva se stanovuje při určité vlhkosti ( $w = 0 \%$ ,  $w = 12 \%$ ,  $w > 0 \%$ ). (Požgaj 1993)

Pro účely této diplomové práce jsme zjišťovali hustotu dřeva pro vlhkost dřeva použitého při obrábění.

Vzorky pro stanovení hustoty byly vyrobeny z rostlého i tepelně upraveného dřeva používaného pro experiment. Pro každou dřevinu bylo vyrobeno šest vzorku o rozměrech  $20 \times 20 \times 30 \text{ mm}$  ( $\text{š} \times \text{tl} \times \text{l}$ ).

Všechny vzorky byly změřeny digitálním posuvným měřidlem s přesností na  $0,01 \text{ mm}$  a zváženy na laboratorní váze s přesností na  $0,01 \text{ g}$ . Získané hodnoty byly zapsány a hustota byla vypočítána podle vztahu:  $\rho_w = m_w / V_w$ .

### 4.5.2. Stanovení vlhkosti

Vlhkost dřeva je množství vody, která se ve dřevě nachází. Vlhkost dřeva se vyjadřuje v procentech a stanovuje se jako poměr hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva ( $W_{\text{abs}} = (m_w - m_0) / m_0$ ), pokud mluvíme o absolutní vlhkosti. Pokud se vlhkost dřeva vyjadřuje jako poměr hmotnosti vody a hmotnosti mokrého dřeva ( $W_{\text{rel}} = (m_w - m_0) / m_w$ ), mluvíme o vlhkosti relativní. K určování vlastností dřeva se používá absolutní vlhkost dřeva. (Požgaj 1993)

Vlhkost jsme stanovovali na vzorcích o velikosti  $20 \times 20 \times 30 \text{ mm}$  ( $\text{š} \times \text{tl} \times \text{l}$ ), vždy po šesti kusech od každé dřeviny.

Vážení vzorku probíhalo na laboratorních vahách s přesností na  $0,01 \text{ g}$ . Vzorky byly sušeny v laboratorní sušárně při teplotě  $103 \text{ }^\circ\text{C}$  a byly považovány za absolutně suché, pokud změna hmotnosti mezi dvěma váženími prováděnými po dvou hodinách nepřekročí  $0,01 \text{ g}$ . (ČSN 49 0103)

Naměřené hodnoty byly zaznamenávány a vlhkost byla spočítána podle vztahu  $W_{\text{abs}} = (m_w - m_0) / m_0$ .



### 4.5.3. Stanovení ohybové pevnosti

Pevnost v ohybu byla zkoušena v tangenciálním směru na vzorcích o velikosti 20 x 20 x 300 mm (š x tl x l). Zkoušení probíhalo na zkušebním laboratorním stroji ZDM 5/91 s namontovaným zařízením pro zkoušení ohybu, se vzdáleností podpěr 240 mm. Rozsah zatížení 0 – 10 kN. Mez pevnosti ve statickém ohybu se vypočítá podle vzorce: (ČSN 49 0115)

$$\sigma_{oh} = \frac{3.F.l}{2.b.h^2} \text{ [MPa]} \text{ –vztah pro výpočet ohybové pevnosti}$$

Pro zkoušku v ohybu bylo vyrobeno po pěti vzorcích od každé dřeviny. Naměřené hodnoty byly zaznamenávány do tabulek.



Obr. 39 Univerzální zkušební stroj ZDM 5/91 a zkušební tělíška.

### 4.5.4. Stanovení rázové houževnatosti

Tato zkouška byla provedena na zkušebním přerážecím zařízení (tzv. Charpyho kladivo). Rozsah zkušebního zařízení je 0 – 50 J. Zkoušené vzorky byly zkoumané také



v tangenciálním směru. Vzorky o rozměrech 20 x 20 x 300 mm (š x tl x l) byly ukládány na podpěry kladiva o rozteči 240 mm. Hodnota rázové houževnatosti se vypočítala podle vztahu: (ČSN 49 0117)

$$A = \frac{W}{b \cdot h} \text{ [J/cm}^2\text{]} - \text{vztah pro výpočet rázové houževnatosti}$$

Pro tuto zkoušku bylo také vyrobeno po pěti vzorcích pro každou dřevinu.



Obr. 40 Přerážecí zařízení (Charpyho kladivo)

## 5. Experimentální část a zhodnocení

### 5.1. Fyzikální a mechanické vlastnosti

#### 5.1.1. Fyzikální vlastnosti bukového dřeva

##### Vlhkost bukového dřeva

Protože vlastnosti dřeva se vždy uvádějí v závislosti na vlhkosti a protože se u tepelně ošetřeného dřeva udává snížená navlhavost, provedli jsme orientační měření vlhkosti použitých dřevin. Měření vlhkosti jsme provedli na šesti vzorcích u každé dřeviny (přírodní buk, buk TO). Vzorky byly vyrobeny z materiálu používaného k experimentu (viz. kap. 4.5.). Vlhkost jsme spočítali podle vztahu:  $W_{abs} = (m_w - m_0)/m_0$ . Naměřené hodnoty a vypočítané vlhkosti jsou uvedeny v tabulce 15 pro oba druhy materiálu.

<b>Buk</b>			
č. vzorku	$m_w$	$m_0$	$W_{abs}$
1	8,81	7,97	10,5%
2	8,90	8,10	9,9%
3	8,85	8,02	10,3%
4	8,94	8,06	10,9%
5	8,72	7,90	10,4%
6	8,86	8,02	10,5%

<b>Buk TO</b>			
č. vzorku	$m_w$	$m_0$	$W_{abs}$
1	8,58	8,33	3,0%
2	8,24	8,01	2,9%
3	9,27	9,11	1,8%
4	8,55	8,34	2,5%
5	8,17	7,96	2,6%
6	9,30	9,15	1,6%

Rozsah celého souboru	6
Minimální hodnota [%]	9,9
Maximální hodnota [%]	10,6
Střední hodnota [%]	10,5
Směrodatná odchylka	0,297
Variační koeficient [%]	2,8

Rozsah celého souboru	6
Minimální hodnota [%]	1,6
Maximální hodnota [%]	3,0
Střední hodnota [%]	2,6
Směrodatná odchylka	0,526
Variační koeficient [%]	20,6

Tab. 15 Vlhkost přírodního a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h). Při podmínkách prostředí  $\varphi = 65 \pm 5 \%$ ,  $t = 20 \pm 2 \%$ .

Střední hodnota vlhkosti přírodního buku je 10,5 %, což by přibližně odpovídalo vlhkosti dřeva při podmínkách prostředí  $\varphi = 65 \pm 5 \%$ ,  $t = 20 \pm 2 \%$ , kdy by měla být vlhkost dřeva kolem 12 % (Peschel 2002). U tepelně ošetřeného buku je střední hodnota

vlhkosti 2,6 %. Maulis (2009) uvádí pro tepelně ošetřený buk vlhkost 4 % při srovnatelných podmínkách prostředí. V ThermoWood Handbook (2003) se uvádí snížení vlhkosti až o 50 % oproti původním hodnotám. Mnou zjištěné snížení rovnovážné vlhkosti je ještě o něco větší a to cca 75 % snížení vlhkosti oproti původní hodnotě neupraveného dřeva.

### **Hustota bukového dřeva**

Další zjišťovanou fyzikální vlastností je hustota používaného dřeva. Hustota dřeva patří k hlavním fyzikálním vlastnostem dřeva. Výrazně ovlivňuje ostatní fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva. Měření spočívalo v porovnání a určení hustoty rostlého buku a buku tepelně ošetřeného. Důležitým údajem doplňujícím hustotu je vlhkost dřeva, při které byla hustota zkoumána. Pro účely této práce byla hustota stanovena při vlhkosti odpovídající rovnovážné vlhkosti dřeva v prostředí kde byly oba druhy materiálu frézovány a byly odebírány vzorky sypkého dřevního materiálu (viz. výše) . Výroba vzorků, měření a stanovení vlhkosti dle již popsaného postupu v kapitole 4.5. Naměřené hodnoty a výsledky jsou uvedené v tabulce 16.

Střední hodnota hustoty námi měřeného přírodního buku je  $715 \text{ kg/m}^3$ . To odpovídá hodnotě  $720 \text{ kg/m}^3$  - uvádí Prokeš (1982). U námi použitého tepelně ošetřeného buku vystaveného 1 hodinu teplotě  $190 \text{ }^\circ\text{C}$  je střední hodnota hustoty  $686 \text{ kg/m}^3$ . Hustota tepelně ošetřeného buku je tedy nižší o  $29 \text{ kg/m}^3$ , což odpovídá přibližně 5 % snížení hustoty. To je způsobeno především snížením hmotnosti. Maulis (2009) uvádí 10 % snížení hustoty u tepelně ošetřeného buku ovšem při  $210 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Buk							
č. vzorku	rozměry vzorku [mm]			hmotnost	objem	hustota	hustota
	A	B	C	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
1	20,10	20,30	30,26	8,81	12,347	0,714	714
2	20,12	20,32	30,29	8,90	12,384	0,719	719
3	20,26	20,20	30,28	8,85	12,392	0,714	714
4	20,27	20,33	30,30	8,94	12,486	0,716	716
5	20,21	20,28	30,26	8,72	12,402	0,703	703
6	20,13	20,21	30,26	8,86	12,311	0,720	720

Rozsah celého souboru	6
Minimální hodnota [kg/m <sup>3</sup> ]	703
Maximální hodnota [kg/m <sup>3</sup> ]	720
Střední hodnota [kg/m <sup>3</sup> ]	715
Směrodatná odchylka	5,438
Variační koeficient [%]	0,76

Buk TO							
č. vzorku	rozměry vzorku [mm]			hmotnost	objem	hustota	hustota
	A	B	C	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
1	20,34	20,36	30,20	8,58	12,506	0,686	686
2	20,20	20,33	30,27	8,24	12,431	0,663	663
3	20,39	20,45	30,30	9,27	12,634	0,734	734
4	20,32	20,29	30,26	8,55	12,476	0,685	685
5	20,19	20,28	30,23	8,17	12,378	0,660	660
6	20,38	20,44	30,24	9,30	12,597	0,738	738

Rozsah celého souboru	6
Minimální hodnota [kg/m <sup>3</sup> ]	660
Maximální hodnota [kg/m <sup>3</sup> ]	738
Střední hodnota [kg/m <sup>3</sup> ]	686
Směrodatná odchylka	31,082
Variační koeficient [%]	4,53

Tab. 16 Hustota přírodního a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h).

### 5.1.2. Mechanické vlastnosti bukového dřeva

Z mechanických vlastností, které ovlivňují obrábění dřeva a vznik dezintegrované dřevní hmoty jsme experimentálně zjišťovali pevnost ve statickém ohybu a rázovou houževnatost bukového dřeva.

#### Pevnost ve statickém ohybu

Pevnost ve statickém ohybu byla porovnávána u rostlého a tepelně upraveného buku. Výsledky měření ohybové pevnosti jsou uvedeny v tabulce 17.

Buk					
číslo vzorku	rozměry vzorku [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
	A	B	C		
1	20,34	20,15	300	2,80	122,06
2	20,31	20,15	300	2,62	114,38
3	20,26	20,23	300	2,91	126,35
4	20,32	20,2	300	2,90	125,91
5	20,32	20,18	300	2,63	114,42

Rozsah celého souboru	5
Minimální hodnota [MPa]	114,38
Maximální hodnota [MPa]	126,35
Střední hodnota [MPa]	120,17
Směrodatná odchylka	5,868
Variační koeficient [%]	4,88

Buk TO					
číslo vzorku	rozměry vzorku [mm]			síla [kN]	pevnost [MPa]
	A	B	C		
1	20,25	20,33	300	3,83	164,74
2	20,33	20,32	300	3,71	159,11
3	20,38	20,32	300	3,50	149,73
4	20,3	20,27	300	3,41	147,18
5	20,23	20,31	300	3,61	155,74

Rozsah celého souboru	5
Minimální hodnota [MPa]	147,18
Maximální hodnota [MPa]	159,11
Střední hodnota [MPa]	152,74
Směrodatná odchylka	4,725
Variační koeficient [%]	3,09

Tab. 17 Pevnost ve statickém ohybu přírodního a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h).

Pevnost ve statickém ohybu pro námi zkoušený rostlý buk je 120,2 MPa (střední hodnota). Tento výsledek je srovnatelný s udávanými hodnotami pevnosti v ohybu pro buk při vlhkosti 12 %. Prokeš (1982) uvádí pevnost v ohybu 123 MPa. Pevnost v ohybu u námi používaného tepelně ošetřeného buku stoupla o 32,5 MPa na 152,7 MPa. Zvýšení pevnosti upraveného buku je přibližně o 25 % z hodnoty pevnosti rostlého buku. Zvýšení pevnosti lze vysvětlit krátkou dobou působení nižší používané teploty. U technologie tepelného ošetření dřeva „ThermoWood“ je u mírnějšího typu ošetření (Thermo-S) uváděna

nezměněná nebo mírně zvýšená pevnost v ohybu. Změna pevnosti v závislosti na teplotě je znázorněno na obrázku 10.

### Rázová houževnatost

Buk					
číslo vzorku	rozměry vzorku [mm]			potřebná práce [J]	rázová houževnatost [J/cm <sup>2</sup> ]
	A	B	C		
1	20,23	20,27	300	46,0	11,22
2	20,31	20,29	300	43,0	10,43
3	20,34	20,22	300	40,5	9,85
4	20,32	20,28	300	44,5	10,80
5	20,29	20,2	300	48,0	11,71

Rozsah celého souboru	5
Minimální hodnota [J/cm <sup>2</sup> ]	9,85
Maximální hodnota [J/cm <sup>2</sup> ]	11,71
Střední hodnota [J/cm <sup>2</sup> ]	10,80
Směrodatná odchylka	0,640
Variační koeficient [%]	5,92

Buk TO					
číslo vzorku	rozměry vzorku [mm]			potřebná práce [J]	rázová houževnatost [J/cm <sup>2</sup> ]
	A	B	C		
1	20,39	20,35	300	35,5	8,56
2	20,32	20,33	300	41,0	9,92
3	20,28	20,32	300	34,5	8,37
4	20,37	20,23	300	36,0	8,74
5	20,29	20,38	300	38,5	9,31

Rozsah celého souboru	5
Minimální hodnota [J/cm <sup>2</sup> ]	8,37
Maximální hodnota [J/cm <sup>2</sup> ]	9,92
Střední hodnota [J/cm <sup>2</sup> ]	8,74
Směrodatná odchylka	0,568
Variační koeficient [%]	6,50

Tab. 18 Rázová houževnatost přírodního a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h).

Naměřené a vypočítané výsledky rázové houževnatosti poukázaly na snížení rázové houževnatosti u tepelně upraveného buku. Jednotlivé hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce 18. Námi zjištěná střední hodnota rázové houževnatosti u rostlého buku je 10,8 J/cm<sup>2</sup>. U tepelně upraveného buku je střední hodnota rázové houževnatosti snížena na hodnotu 8,7 J/cm<sup>2</sup>. Z těchto hodnot vyplívá snížení rázové houževnatosti přibližně o 20 % z původní hodnoty. Pokles rázové houževnatosti je mírnější než udávají jiní autoři, kteří udávají snížení až o 50 % (Maulis 2009). Mírnější snížení rázové houževnatosti u námi zkoumaných vzorků je způsobeno nižší teplotou úpravy a kratším časem působení tepla na vzorky. Typ lomu vzniklého při rázové zkoušce je na obrázku 41.

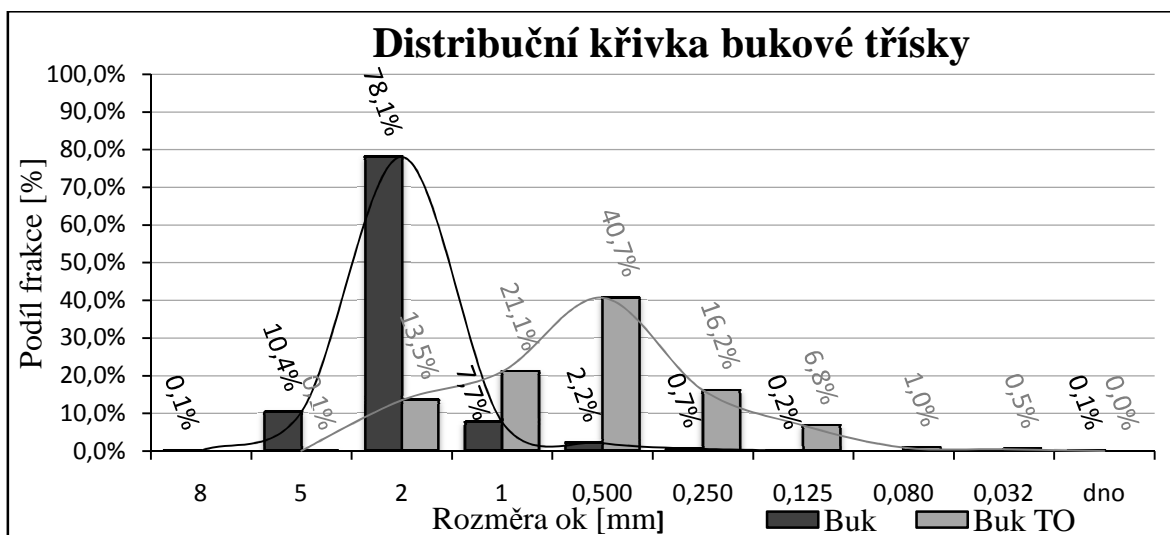


Obr. 41 Lom způsobený rázovou zkouškou u přírodního buku a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h).

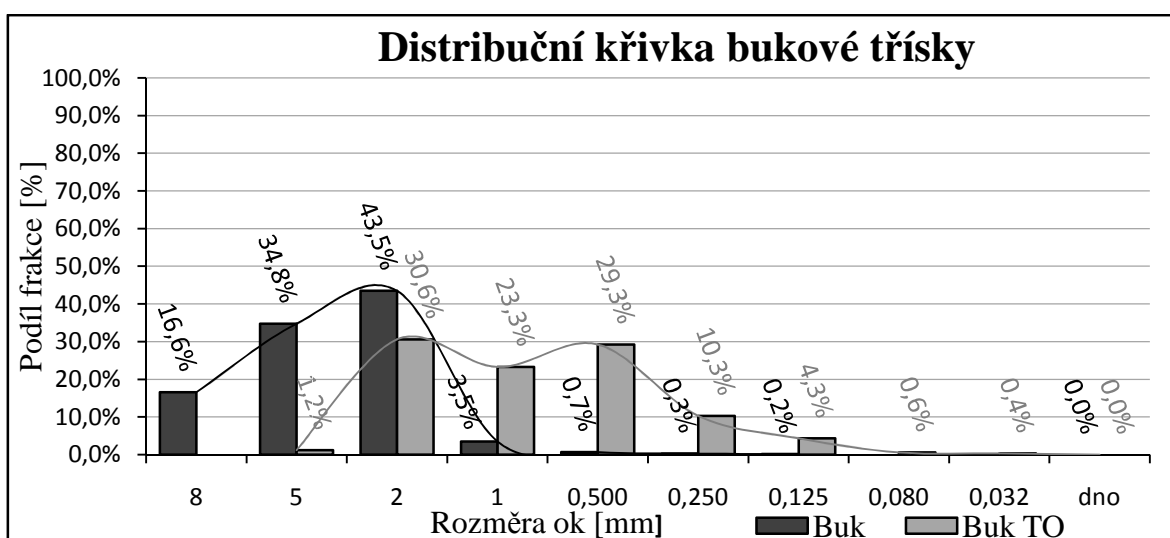
## 5.2. Granulometrická analýza

V následujících obrázcích 41 až 68 jsou uvedeny distribuční křivky zrnitosti všech kombinací technicko-technologických parametrů frézování použitých pro experiment. V každém grafu je graficky porovnáno granulometrické složení dřevního odpadu rostlého a tepelně ošetřeného buku vzniklého při stejných parametrech frézování.

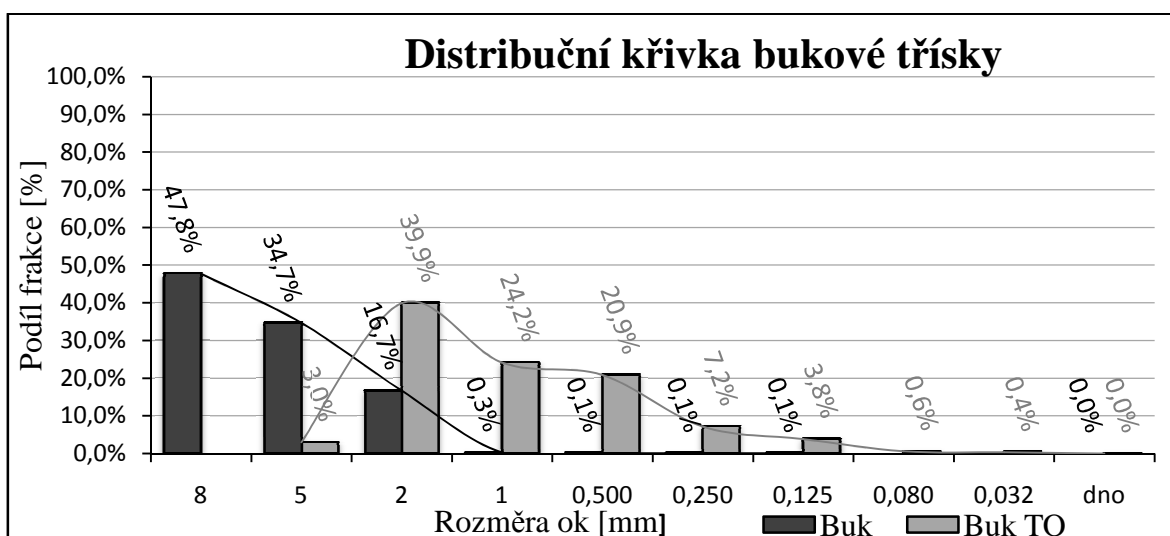
Jelikož již při obrábění a odběru vzorků dezintegrované dřevní hmoty byl patrný rozdíl ve velikosti a složení třísek u rostlého a tepelně upravovaného buku, byly pro jednotlivé druhy materiálů pozměněny velikosti nejmenších a největších ok použitých sít. Toto je potřeba si uvědomit při čtení z jednotlivých distribučních křivek. Pro vzorky odebrané z rostlého buku byla použita síta s velikostmi ok 8; 5; 2; 1; 0,500; 0,250; 0,125 mm a dno. Pro vzorky z tepelně ošetřeného buku, kde byly vzorky třísek znatelně menší a jemnější, byla použita síta s oky 5; 2; 1; 0,500; 0,250; 0,125; 0,080; 0,032 mm a dno. Je třeba si především uvědomit, že hodnoty uváděné pro dno jsou s jinou velikostí propadlých zrn. U rostlého buku je ve dnu propad posledního síta s velikostí ok 0,125 mm a u upraveného buku je ve dnu propad síta s oky 0,032 mm.



Obr. 42 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.

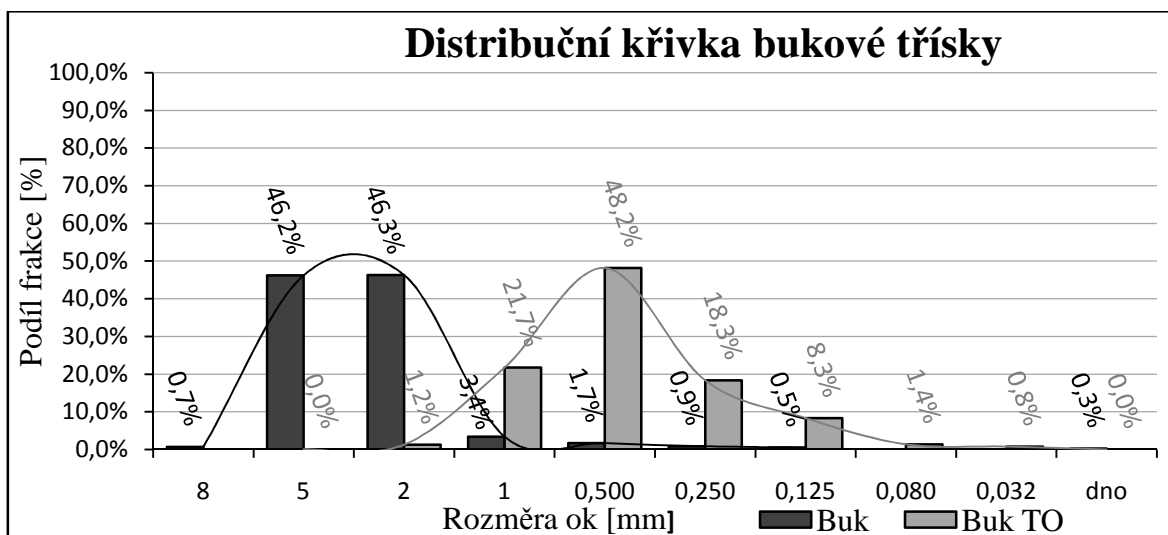


Obr. 43 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.

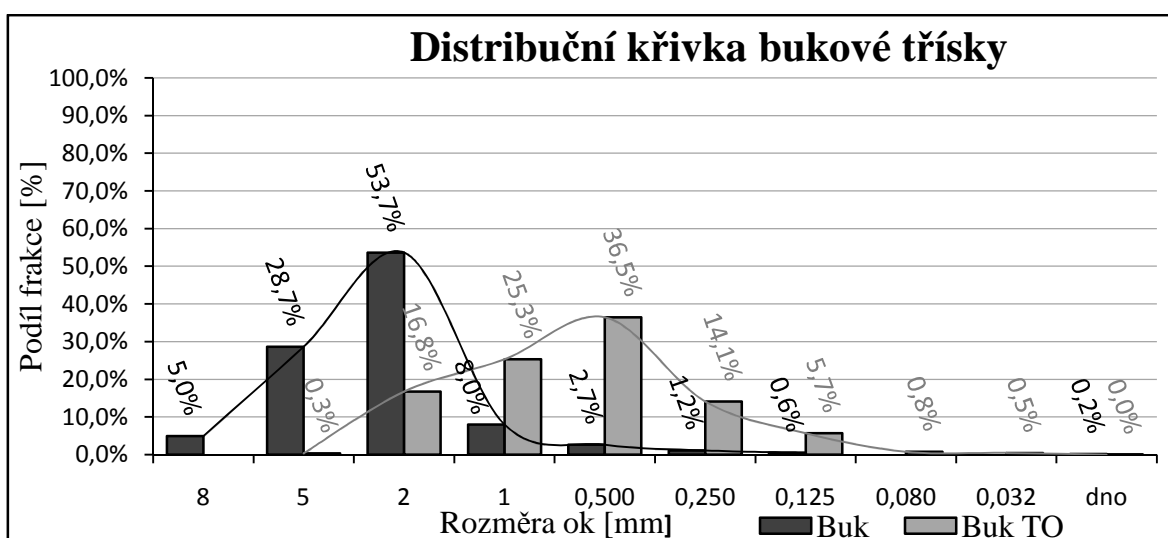


Obr. 44 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.

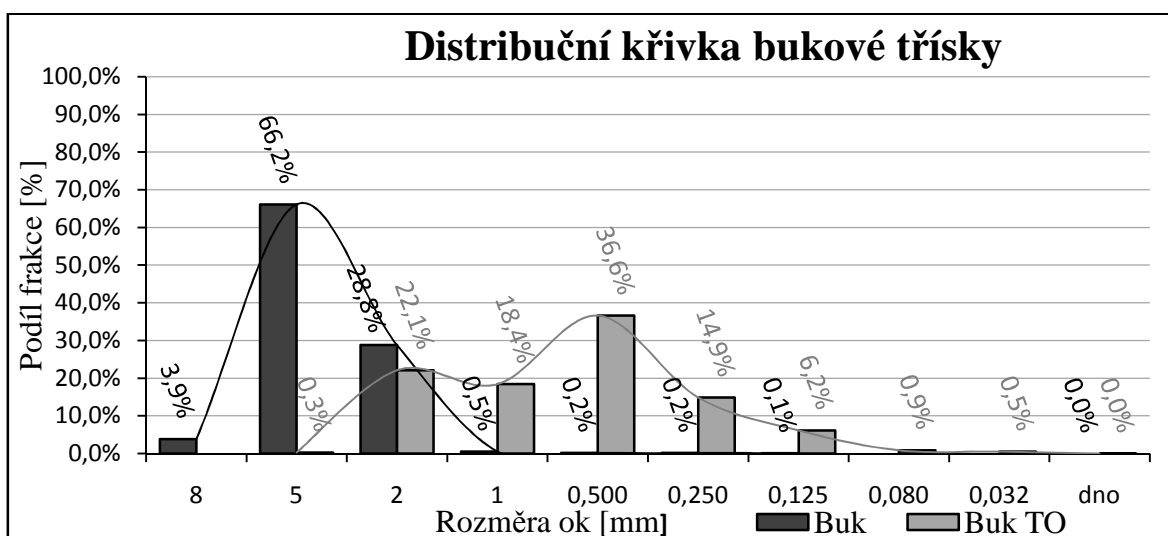




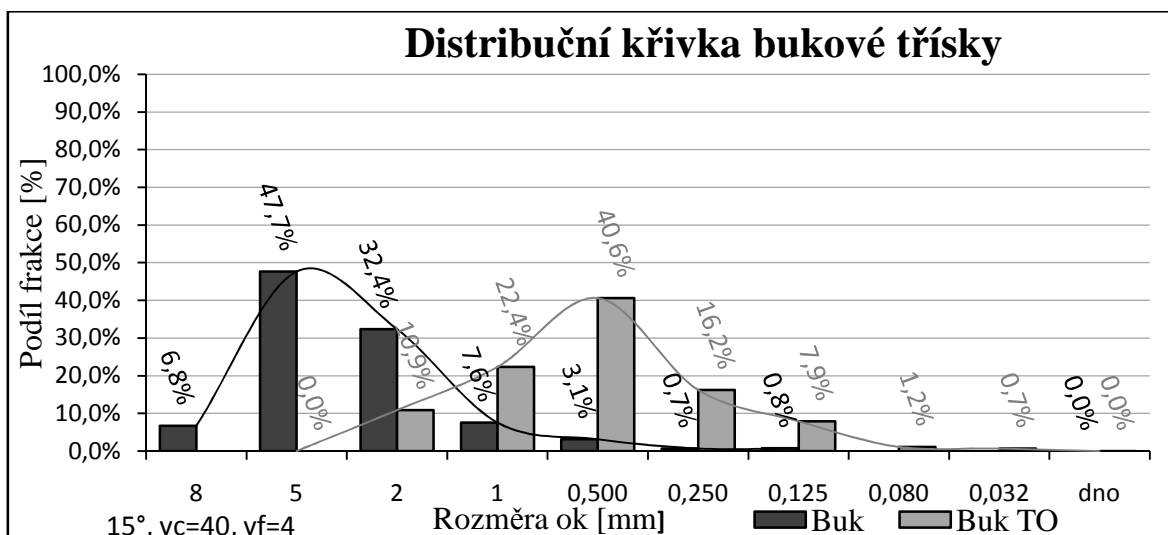
Obr. 45 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.



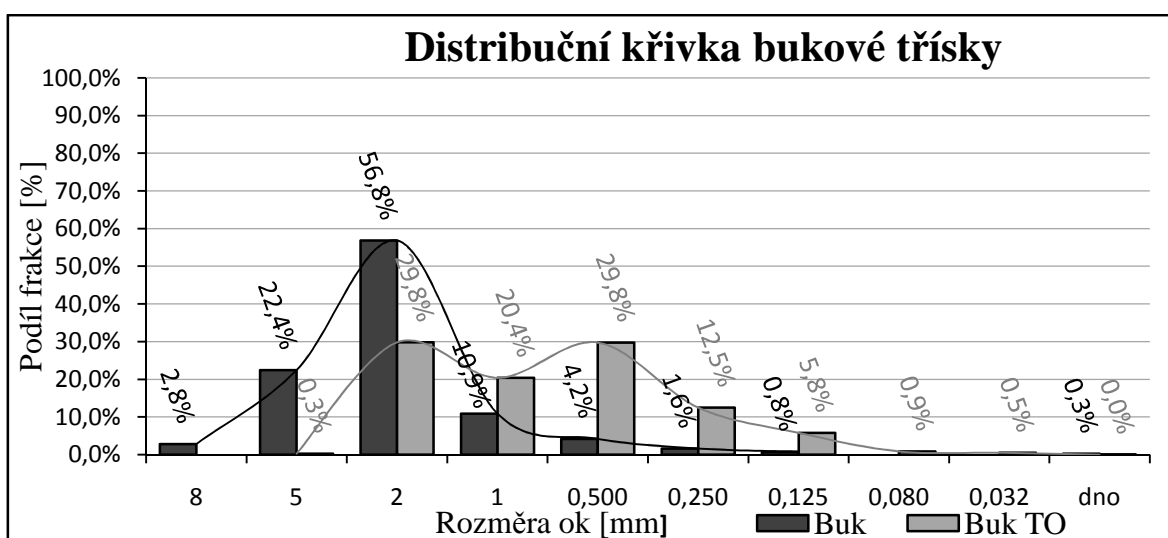
Obr. 46 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.



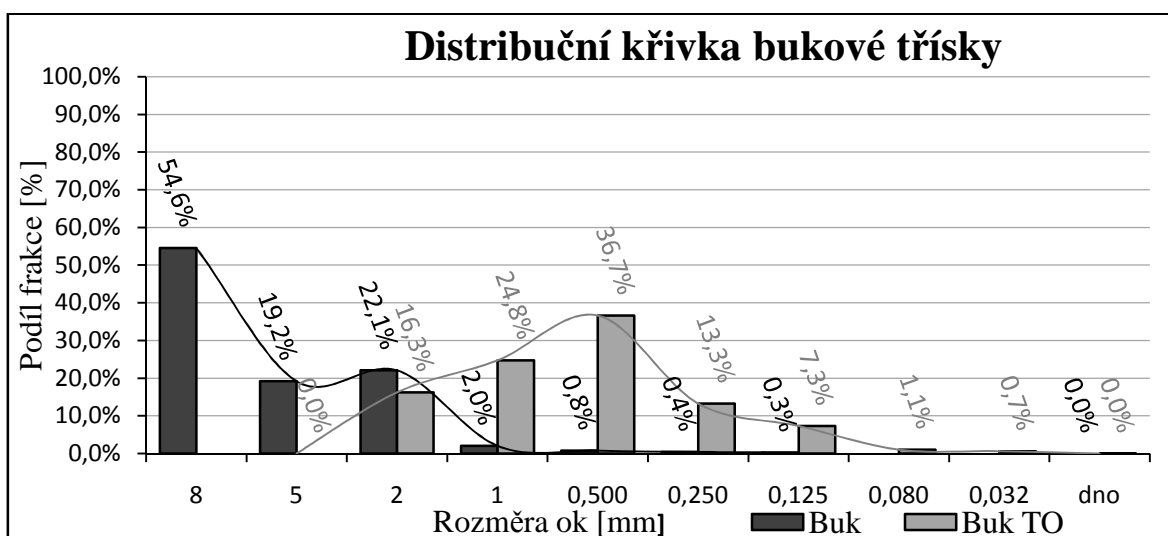
Obr. 47 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.



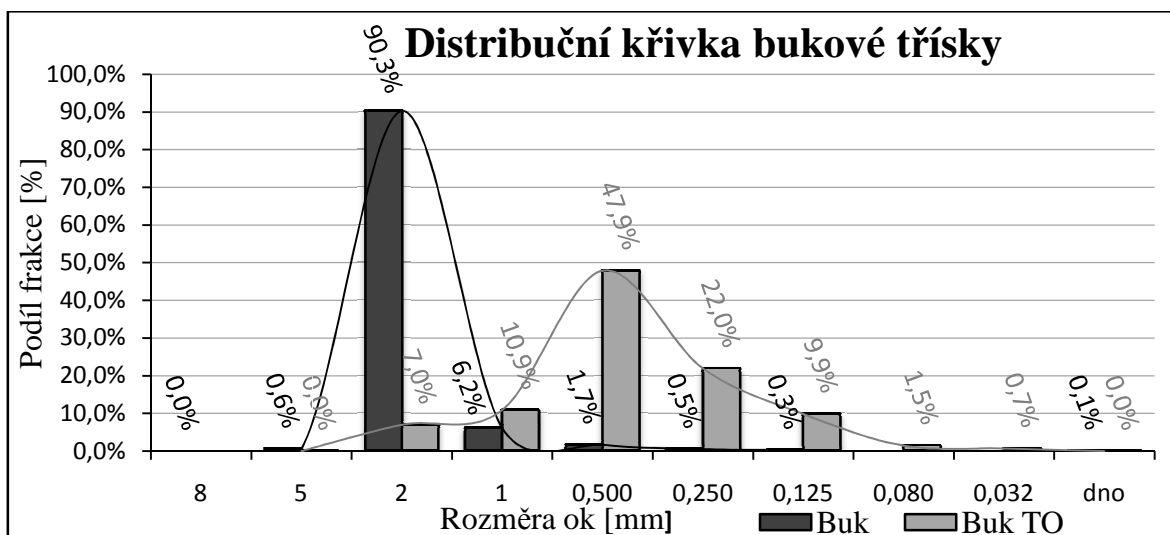
Obr. 48 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.



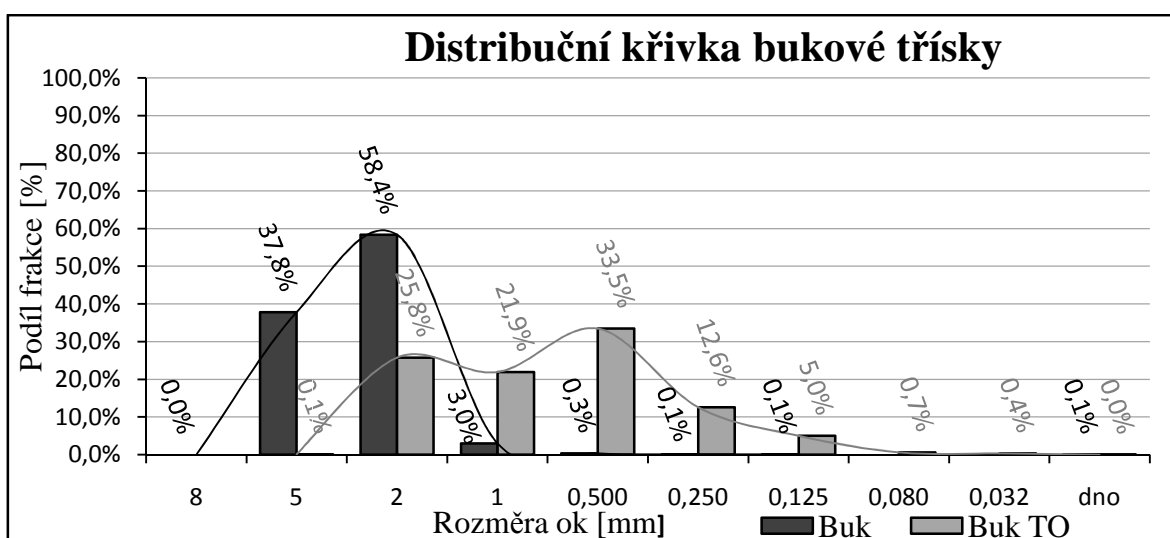
Obr. 49 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.



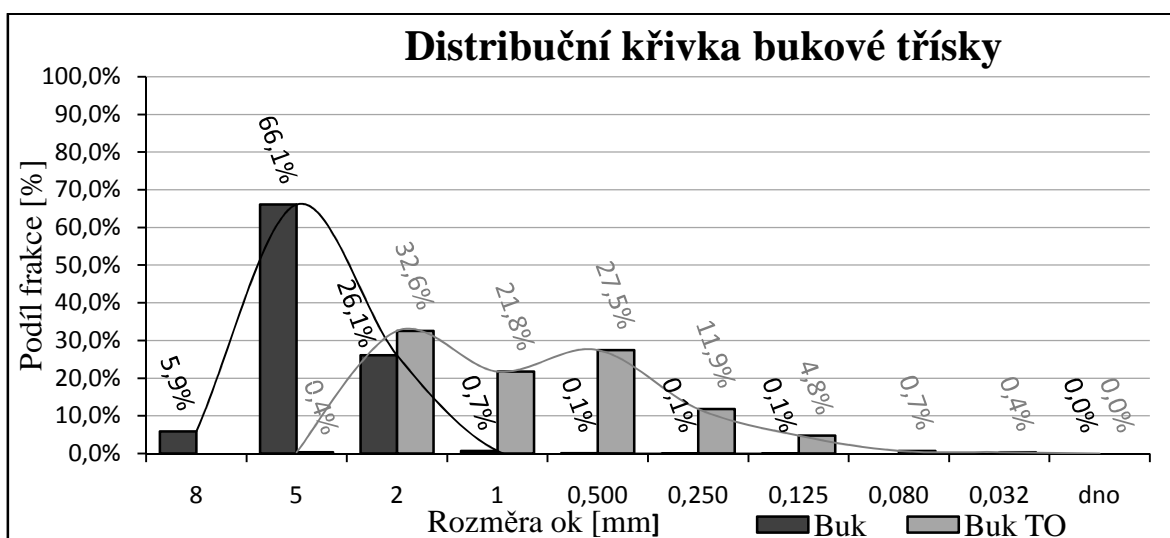
Obr. 50 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.



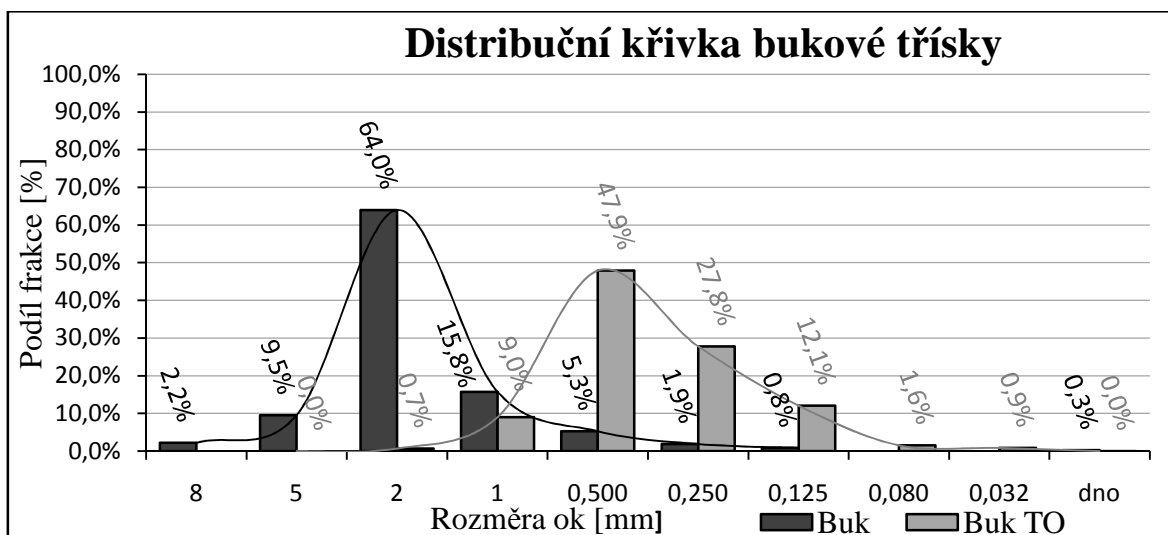
Obr. 51 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.



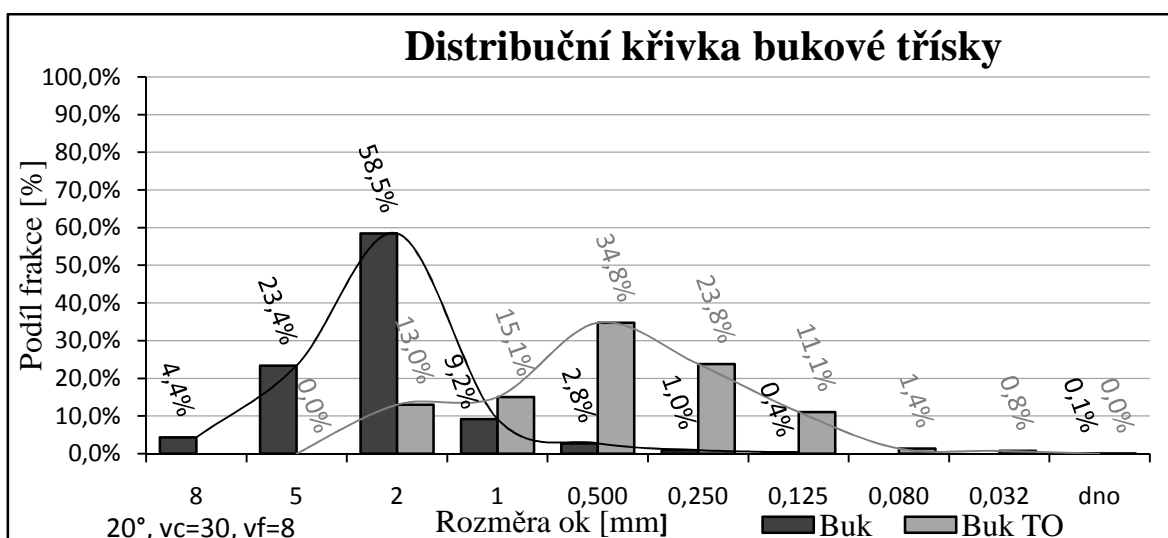
Obr. 52 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.



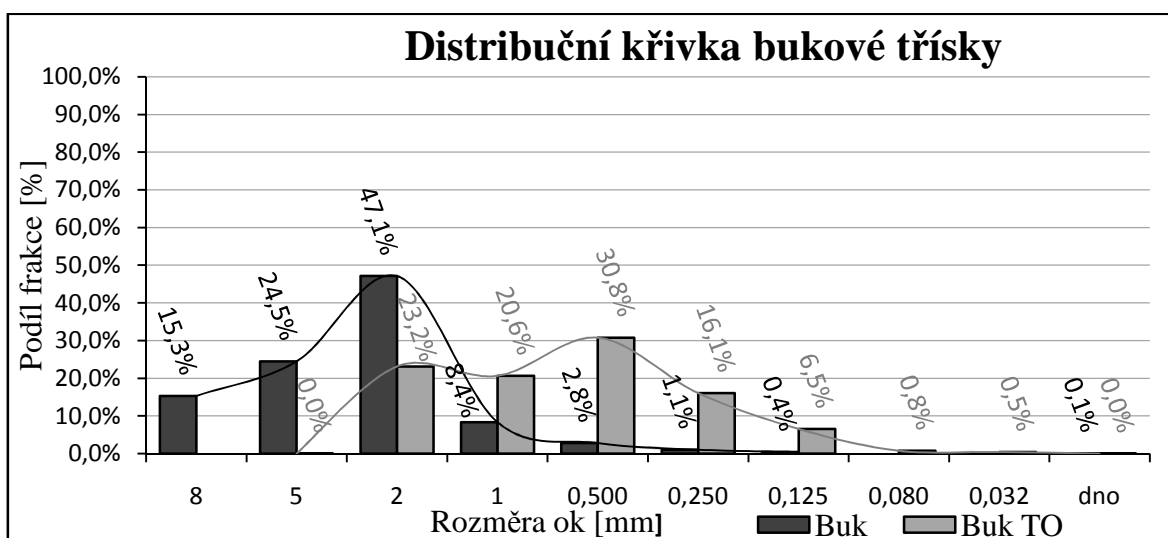
Obr. 53 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.



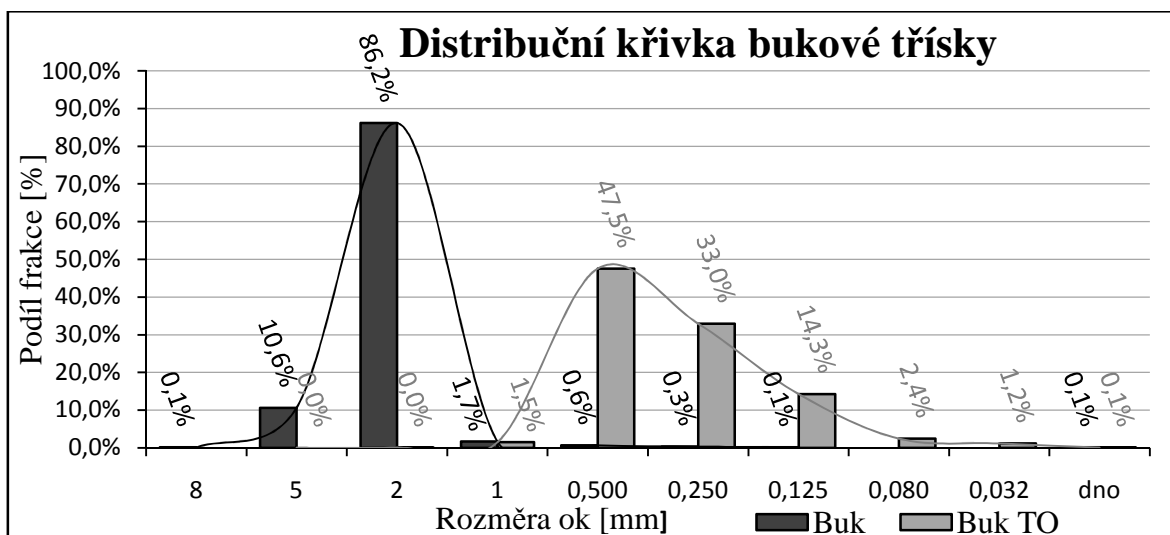
Obr. 54 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.



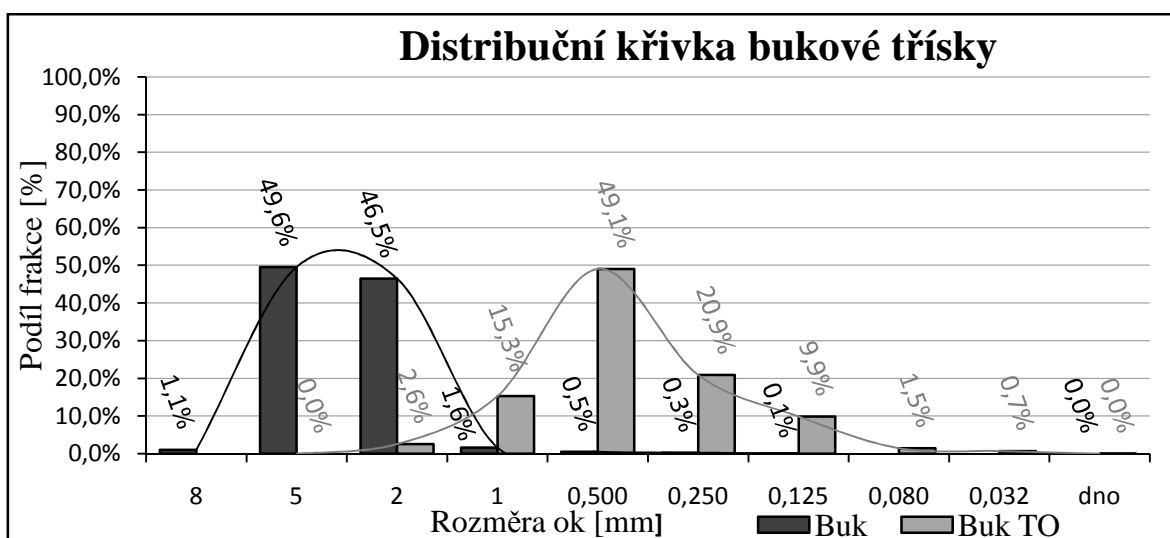
Obr. 55 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.



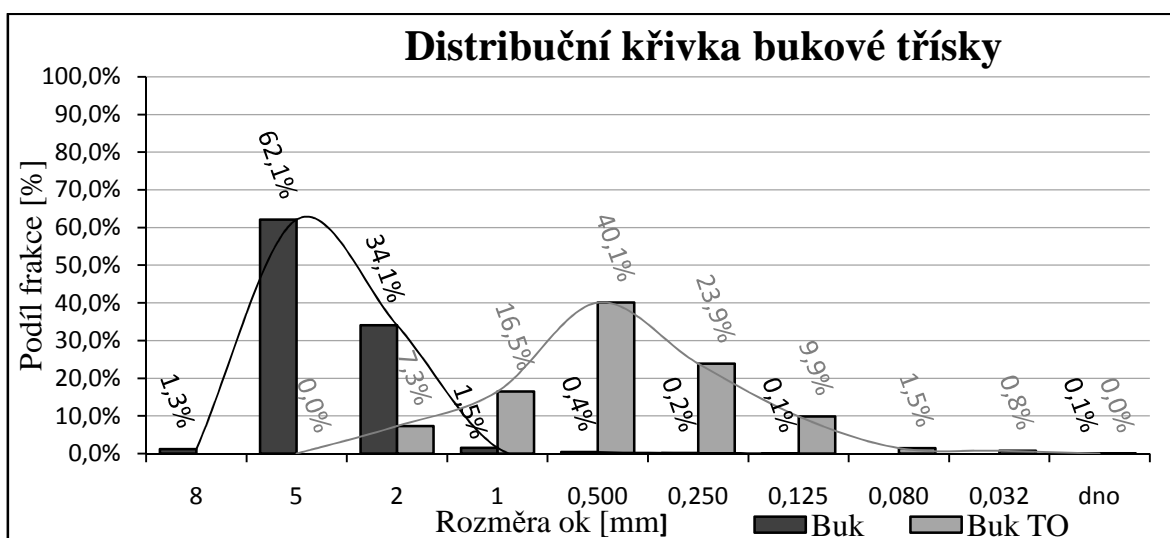
Obr. 56 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování - úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.



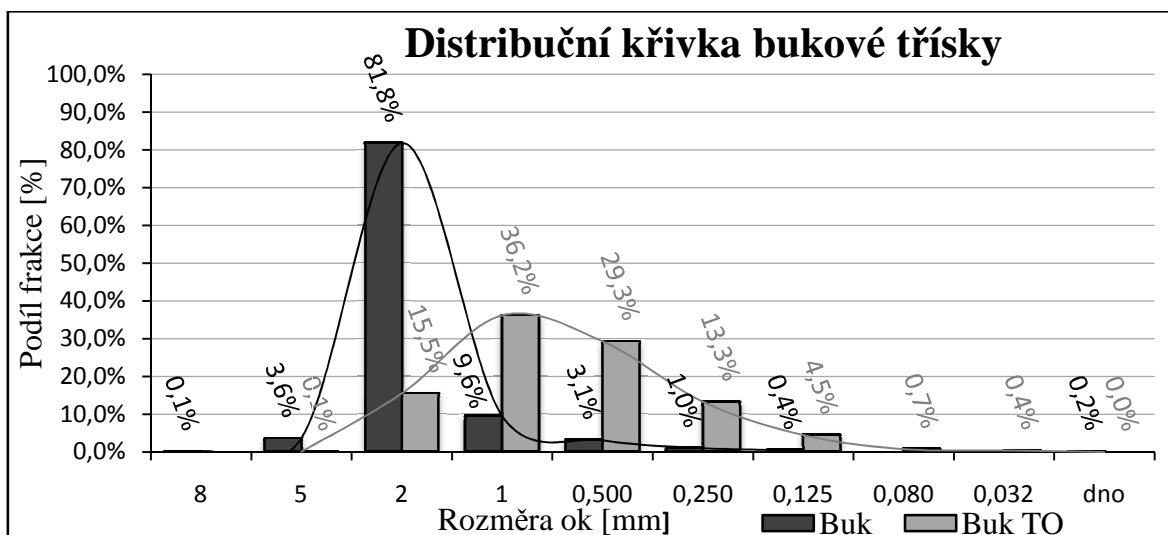
Obr. 57 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.



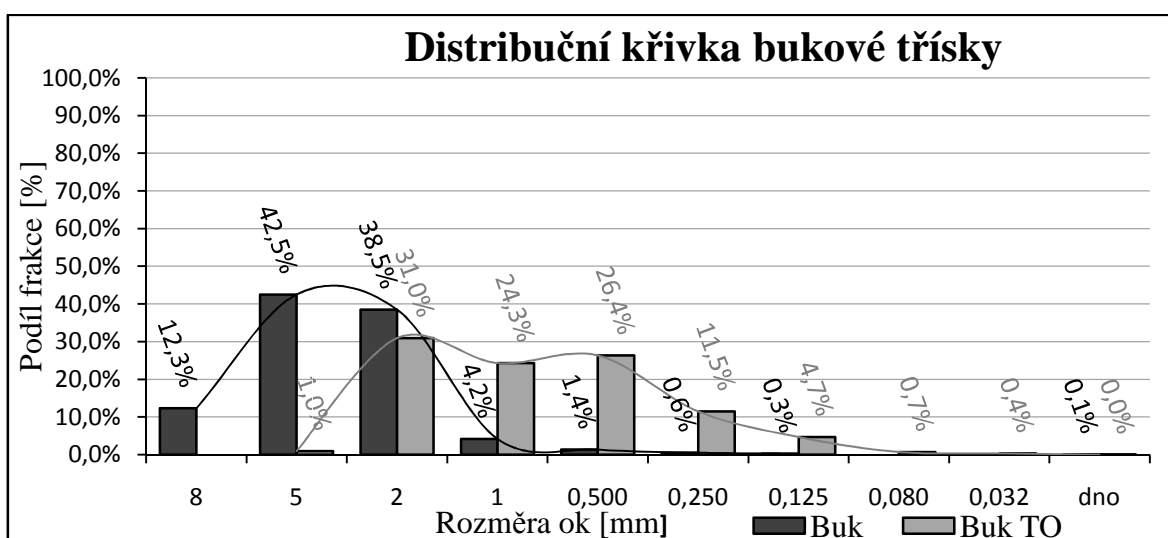
Obr. 58 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.



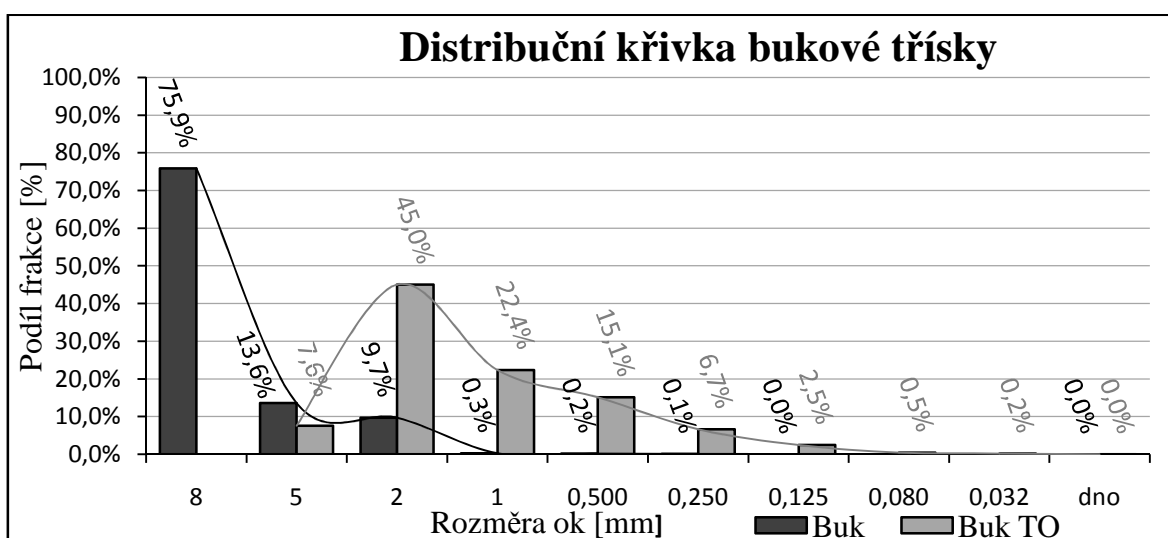
Obr. 59 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 20^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.



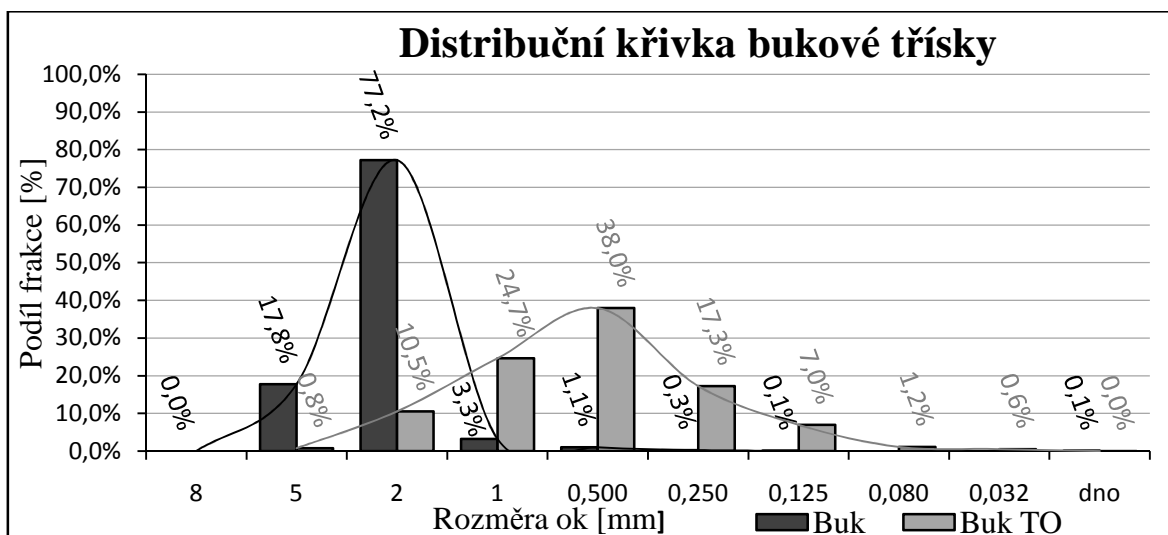
Obr. 60 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.



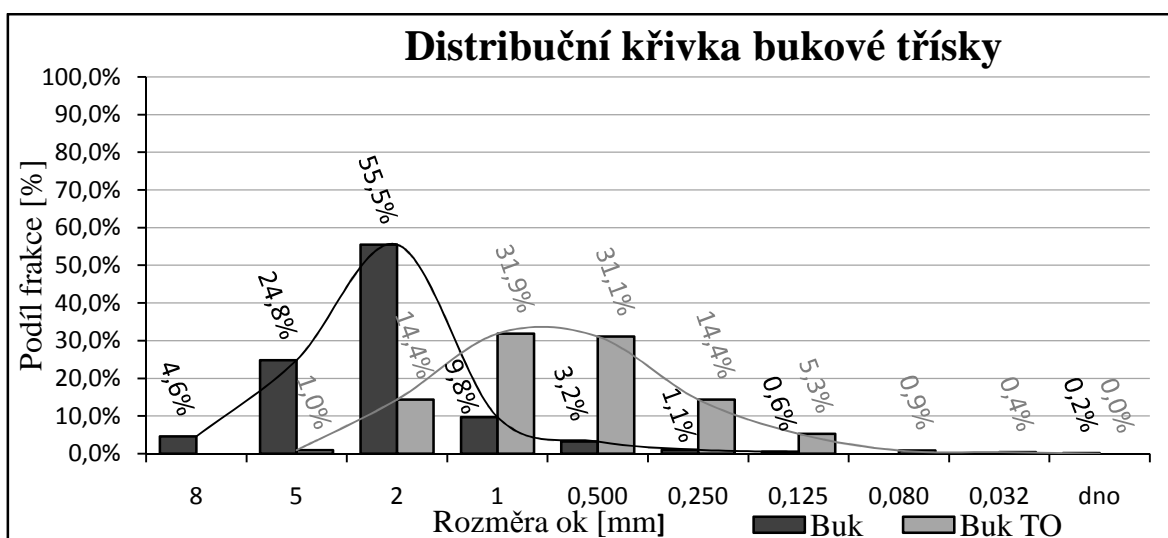
Obr. 61 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.



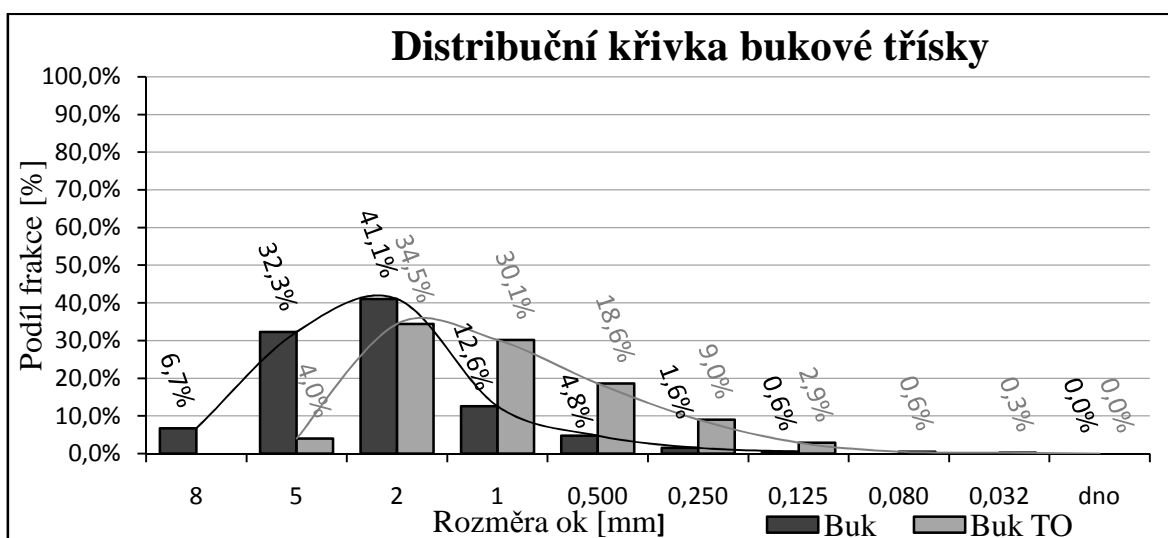
Obr. 62 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.



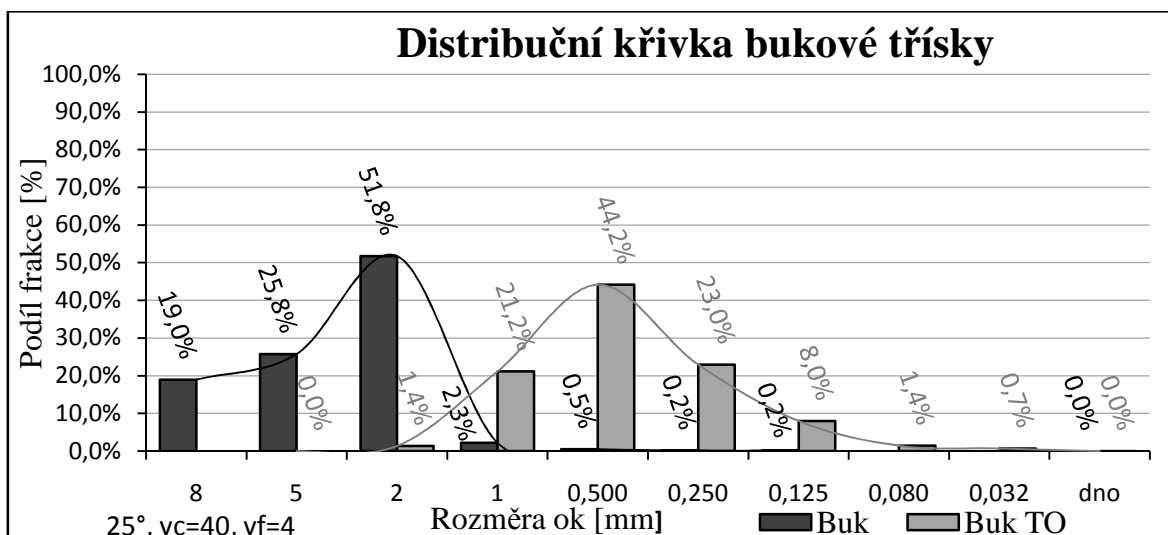
Obr. 63 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.



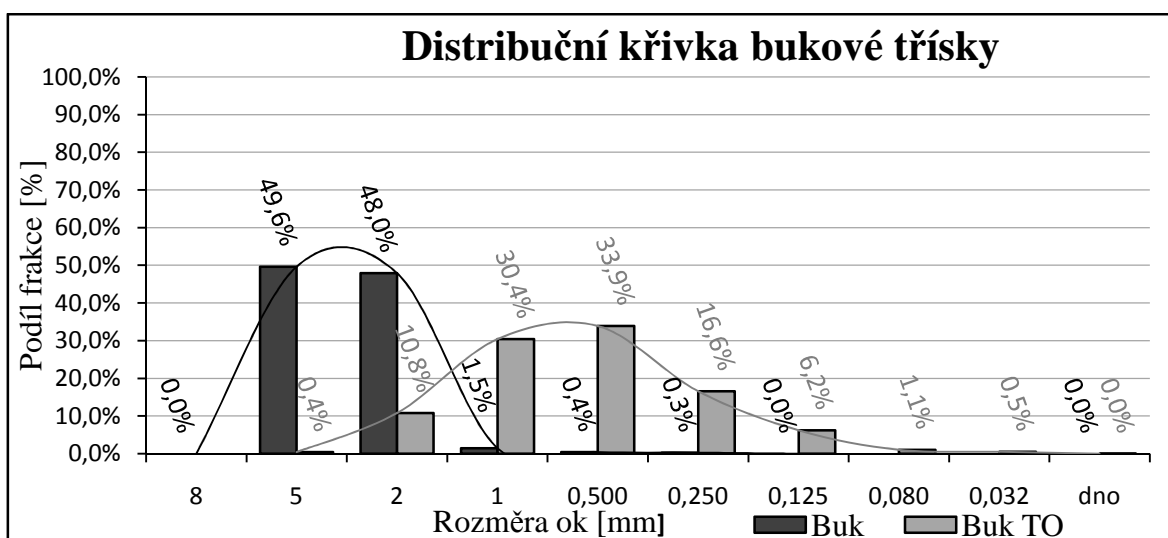
Obr. 64 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.



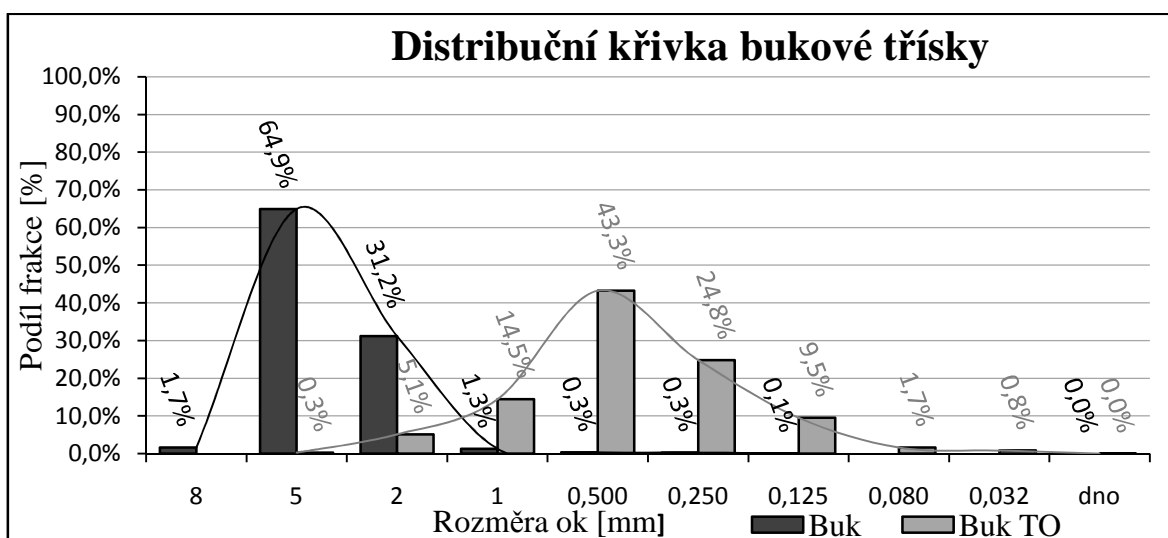
Obr. 65 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.



Obr. 66 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.



Obr. 67 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.



Obr. 68 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.



Ve výše uvedených grafech (obr. 41 až 68) je uvedeno granulometrické složení třísky pomocí distribučních křivek. Jednotlivé hodnoty zastoupení frakcí ve vzorku jsou také uvedeny v tabulkové podobě v příloze, tabulce 19, 20, 21. Z těchto tabulek vyplívají následující největší podíly jednotlivých frakcí podle podmínek obrábění.

- Největší zastoupení frakce nad 8 mm je 15,9 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 25^\circ$ ,  $v_c = 20$  m/s,  $v_f = 11$  m/min u přírodního buku, u tepelně ošetřeného buku se frakce nad 8 mm nezjišťovala.
- Největší zastoupení frakce mezi 8 a 5 mm je 66,2 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 15^\circ$ ,  $v_c = 30$  m/s,  $v_f = 11$  m/min u přírodního buku a 7,6 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 25^\circ$ ,  $v_c = 20$  m/s,  $v_f = 11$  m/min u tepelně ošetřeného buku.
- Největší zastoupení frakce mezi 5 a 2 mm je 90,3 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 20$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u přírodního buku a 45 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 25^\circ$ ,  $v_c = 20$  m/s,  $v_f = 11$  m/min u tepelně ošetřeného buku.
- Největší zastoupení frakce mezi 2 a 1 mm je 15,8 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 30$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u přírodního buku a 36,2 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 25^\circ$ ,  $v_c = 20$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u tepelně ošetřeného buku.
- Největší zastoupení frakce mezi 1 a 0,5 mm je 5,3 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 30$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u přírodního buku a 49,1 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 40$  m/s,  $v_f = 8$  m/min u tepelně ošetřeného buku.
- Největší zastoupení frakce mezi 0,5 a 0,250 mm je 1,9 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 30$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u přírodního buku a 33 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 40$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u tepelně ošetřeného buku.
- Největší zastoupení frakce mezi 0,250 a 0,125 mm je 0,8 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 30$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u přírodního buku a 14,3 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 40$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u tepelně ošetřeného buku.
- Největší zastoupení frakce mezi 0,125 a 0,080 mm je 2,4 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 40$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u tepelně ošetřeného buku, u přírodního buku se tato frakce nezjišťovala.
- Největší zastoupení frakce mezi 0,080 a 0,032 mm je 1,2 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 40$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u tepelně ošetřeného buku, u přírodního buku se tato frakce nezjišťovala.
- Největší zastoupení frakce pod 0,125 mm je 0,3 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 15^\circ$ ,  $v_c = 30$  m/s,  $v_f = 4$  m/min u přírodního buku.

- Největší zastoupení frakce pod 0,032 mm je 0,1 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 25^\circ$ ,  $v_c = 30$  m/s,  $v_f = 8$  m/min u tepelně ošetřeného buku.
- Pro srovnání s nejmenší frakcí přírodního buku je u tepelně ošetřeného buku zastoupení frakce pod 0,125 mm 3,6 % při podmínkách obrábění  $\gamma = 20^\circ$ ,  $v_c = 40$  m/s,  $v_f = 4$  m/min.

### 5.2.1. Vliv technicko-technologických parametrů

Technicko-technologické parametry obrábění mají vliv na tvorbu a gromulometrické složení třísky vždy ve vzájemné kombinaci. Jednotlivým kombinováním úhlové geometrie, řezné rychlosti a podávací rychlosti vznikne mnoho variant jednotlivých řezných procesů. V následujícím textu jsou uvedeny jednotlivé parametry a jejich vliv na granulometrické složení třísky.

#### Úhlová geometrie

Granulometrické složení třísky má přibližně srovnatelný průběh při změně úhlové geometrie nástroje za shodných podávacích a řezných rychlostech. Jednotlivé frakce se liší jen v procentuálních podílech. Jen u kombinace podmínek  $v_c=20$  a  $v_f=11$  je výraznější rozdíl v zastoupení největší frakce u rostlého buku. Grafické vyjádření změny úhlové geometrie na granulometrické složení třísky je znázorněno na obrázcích 69 až 77 v příloze.

Za podmínek obrábění - řezné rychlosti  $v_c=20$  m/s a posuvné rychlosti  $v_f=4$  m/min - je u rostlého buku výrazně největší zastoupení frakce 5 až 2 mm u všech tří variant úhlové geometrie. Podíl této frakce je 80 až 90 %. Podíly jednotlivých frakcí přírodního buku jsou srovnatelné, avšak výrazně nižší (pod 10 %) než zmíněná frakce. U tepelně ošetřeného buku vzniklo největší množství frakce (cca 48%) 1 až 0,5 mm u frézy s úhlem čela  $20^\circ$ . (obr. 69)

Při podmínkách obrábění  $v_c=20$  m/s a  $v_f=8$  m/min je u přírodního buku největší zastoupení frakce 5 až 2 mm u frézy s úhlem  $\gamma=20^\circ$ . U tepelně upraveného dřeva je nejvíce frakce 1 až 0,5 při  $\gamma=20^\circ$ . Frakce upraveného dřeva má srovnatelné zastoupení (cca 30%) u dvou velikostí zrn a to v intervalu 5 až 2 mm a 1 až 0,5 mm u všech typů úhlů čela. (obr. 70)

Při podmínkách  $v_c=20$  m/s,  $v_f=11$  m/min je výrazný rozdíl v zastoupení frakce nad 8 mm u přírodního buku. Nejvíce této frakce vzniklo při  $\gamma=25^\circ$ , a to cca 75%. Ovšem při  $\gamma=15^\circ$  je této frakce cca 47 % a při  $\gamma=20^\circ$  jen cca 6 %. U tepelně ošetřeného buku je největší zastoupení frakce 5 až 2 mm při  $\gamma=25^\circ$ , ovšem průběh distribuční křivky je přibližně stejný u všech úhlů. (obr. 71)

Při  $v_c=30$  m/s,  $v_f=4$  m/min je průběh zrnitosti srovnatelný u všech úhlů čela pro přírodní buk s největší hodnotou frakce v intervalu 5 až 2 mm při  $\gamma=25^\circ$ . Tepelně upravený buk má největší zastoupení frakce 1 až 0,5 mm při  $\gamma=15^\circ$  a  $\gamma=20^\circ$ . (obr. 72)

Při  $v_c=30$  m/s,  $v_f=8$  m/min jsou zrnitosti u přírodního buku prakticky identické s největší hodnotou zrnitosti v intervalu 5 až 2 mm (cca 53 až 58 %) u všech použitých úhlů čel. U tepelně ošetřeného buku je průběh zrnitosti také srovnatelný s rozdílným podílem frakcí v intervalu 2 až 1 mm a největší hodnotou podílu v intervalu 1 až 0,5 mm pro všechny druhy úhlů. (obr. 73)

Při  $v_c=30$  m/s,  $v_f=11$  m/min je největší hodnota frakce přírodního buku v intervalu 8 až 5 mm při  $\gamma=15^\circ$ , pro úhly  $\gamma=20^\circ$  a  $\gamma=25^\circ$  je největší hodnota frakce v intervalu 5 až 2 mm. U tepelně ošetřeného buku je největší zastoupení frakce v intervalu 1 až 0,5 mm při  $\gamma=15^\circ$ . (obr. 74)

Při  $v_c=40$  m/s a  $v_f=4$  m/min je u přírodního buku největší hodnota (cca 85 %) v intervalu 5 až 2 mm při  $\gamma=20^\circ$ , ovšem u ostatních frakcí je největší podíl nižší (cca 50 %), a to v intervalu velikosti 8 až 5 mm při  $\gamma=15^\circ$  a v intervalu 5 až 2 mm při  $\gamma=25^\circ$ . Pro tepelně ošetřený buk je největší hodnota přibližně shodná (cca 45%) v intervalu 1 až 0,5 mm pro všechny úhly. (obr. 75)

Při  $v_c=40$  m/s a  $v_f=8$  m/min je pro přírodní buk největší hodnota (cca 55 %) v intervalu nad 8 mm při  $\gamma=15^\circ$ , avšak pro úhly  $\gamma=20^\circ$  a  $\gamma=25^\circ$  je největší hodnota (cca 47 %) přibližně shodná pro intervaly 8 až 5 mm a 5 až 2 mm, Ostatní podíly intervalu jsou výrazně nižší cca pod 2 %. U tepelně ošetřeného buku je největší hodnota (cca 48 %) v intervalu 1 až 0,5 mm při  $\gamma=20^\circ$ , u ostatních úhlů je největší zastoupení menší ale průběh zrnitosti je srovnatelný. (obr. 76)

Při  $v_c=40$  m/s a  $v_f=11$  m/min je největší hodnota (cca 65 %) i intervalu 8 až 5 mm při  $\gamma=25^\circ$ , avšak křivka zrnitosti pro  $\gamma=20^\circ$  je skoro identická s křivkou pro  $\gamma=25^\circ$ . Tepelně upravený buk má největší podíl frakce (cca 43 %) v intervalu 1 až 0,5 mm při  $\gamma=25^\circ$  a je identická s křivkou pro  $\gamma=20^\circ$ . Křivka zrnitosti tepelně ošetřeného buku pro  $\gamma=15^\circ$  má dvě přibližně stejně velká maxima podílu (cca 30 %) v intervalu 5 až 2 mm a 1 až 0,5 mm. (obr. 77)

## Řezná rychlost a posuvná rychlost

Změna řezné rychlosti měla vliv na granulometrické složení třísky především v kombinaci s posuvnou rychlostí. Protože při výpočtu teoretické velikosti třísky se zohledňuje rychlost posuvu materiálu do řezu.

Vliv změny řezné rychlosti při podávací rychlosti  $v_f = 4$  m/min se výrazně neprojevil na změně průběhu granulometrického složení třísky. U většiny řezných parametrů je při všech řezných rychlostech nejvíce zastoupena frakce 5 až 2 mm u přírodního buku a frakce 1 až 0,5 mm u tepelně ošetřeného buku. Ke změnám zastoupení nejpočetnější frakce došlo u tepelně ošetřeného buku při úhlu čela  $25^\circ$ , kde byl podíl nejpočetnější frakce (cca 36 %) v intervalu 2 až 1 mm při řezné rychlosti  $v_c = 20$  m/s a při zvýšení řezné rychlosti na  $v_c = 30$  m/s byla nejvíce zastoupena (cca 38 %) frakce v intervalu 1 až 0,5 mm. Dalším zvýšení rychlosti na  $v_c = 40$  m/s se podíl frakce 1 až 0,5 mm jen zvýšil na 44 %. K podobné změně došlo u přírodního buku při úhlu čela  $15^\circ$  a podávací rychlosti  $v_f = 4$  m/min. Při rychlosti  $v_c = 40$  m/s je největší podíl (cca 48 %) frakce v intervalu 8 až 5 mm a při snížení rychlosti na  $v_c = 30$  m/s se podíl nezmění, ale přesune se do intervalu velikosti 5 až 2 mm. Dalším snížením rychlosti se podíl frakce zvedne na cca 78 % stejného intervalu. U ostatních úhlových parametrů nedochází ke změnám největšího zastoupení frakce, ale jen ke změně hodnoty zastoupení. Přírodní buk podíl nejpočetnější frakce zvyšuje se snižující se řeznou rychlostí z cca 52 na 90 %. Změna podílu frakce u tepelně ošetřeného buku je se změnou řezné rychlosti mnohem menší a pohybuje se v intervalu 30 až 50 %. Křivky závislosti změny řezné rychlosti při podávací rychlosti  $v_f = 4$  m/min je v příloze na obrázku 78.

Vliv změny řezné rychlosti při podávací rychlosti  $v_f = 8$  m/min se také výrazně neprojevil na průběhu granulometrického složení třísky přírodního buku. Nejvíce zastoupenou frakcí byl interval 5 až 2 mm, kde se podíl zastoupení mění podle změny řezné rychlosti. Největší zastoupení v tomto intervalu má řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, kde se podíl frakce pohybuje mezi 53 až 58 %, bez ohledu na úhlovou geometrii. Vyjímkou je řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s a úhel čela  $15^\circ$ , kde je největší zastoupení (cca 55 %) v intervalu nad 8 mm. U tepelně upraveného buku se změny rychlosti při podávací rychlosti  $v_f = 8$  m/min projeví snížením hodnot podílů u frakce 1 až 5 mm na 25 až 35 % a znatelný nárůst hodnot podílů u frakce 5 až 2 mm na 25 až 31 % při rychlosti  $v_c = 20$  m/s. Křivky závislosti změny řezné rychlosti při podávací rychlosti  $v_f = 8$  m/min jsou na obrázku 79 v příloze.

Vliv změny řezné rychlosti při podávací rychlosti  $v_f = 11$  m/min se především projevil posunem nejvíce zastoupené frakce směrem k hrubším frakcím se změnou řezné rychlosti. U přírodního buku je nejvíce zastoupenou frakcí (okolo 65 %) interval 8 až 5 mm při řezných rychlostech  $v_c = 40$  m/s a  $v_c = 30$  m/s. Vyjímkou je  $v_c = 20$  m/s při úhlech čela  $15^\circ$  a  $25^\circ$ , kde je největší zastoupení ve frakci nad 8 mm. U tepelně ošetřeného buku je změna výraznější. Při řezné rychlosti  $v_c = 40$  m/s jsou největší hodnoty podílu zastoupení v intervalu 1 až 0,5 mm. Ovšem při řezných rychlostech  $v_c = 20$  m/s jsou největší hodnoty podílu zastoupení v intervalu 5 až 2 mm a to hlavně při úhlu čela  $25^\circ$ . Křivky závislosti změny řezné rychlosti při podávací rychlosti  $v_f = 11$  m/min jsou na obrázku 80 v příloze.

## 6. Výsledky

Z uvedených hodnot a grafů granulometrické analýzy vyplývá, že frézováním tepelně upraveného buku (dřeva) dochází ke změně granulometrického složení jak velikostí, tak i podílem jednotlivých frakcí ve srovnání s přírodním (neupraveným) bukem (dřevem).

Změna v hodnotách podílu zastoupení jednotlivých frakcí se projevila snížením zastoupení nejpočetnější frakce u tepelně upraveného buku. Tato hodnota nepřekročila 50 % hranici u žádné z podmínek frézování. Ostatní nejbližší velikosti zastoupené frakce tepelně ošetřeného buku dosahovaly podílu do 30%, nejmenší prachové frakce pod 125  $\mu\text{m}$  nepřesáhly hodnotu 4 %. U neošetřeného buku dosahovaly hodnoty nejpočetnější frakce až 90 %. Na ostatní nejbližší velikosti frakce zbyval jen malý poměr zastoupení pod 10 %. Křivky zrnitosti neošetřeného buku mají strmější průběh.

Další výraznou změnou v granulometrickém složení třísky je velikost nejpočetnější frakce u jednotlivých dřevin. U neošetřeného buku je nejpočetnější frakce v intervalu 5 až 2 mm při  $v_f = 4$  m/min a 8 až 5 mm při  $v_f = 11$  m/min. Tepelně ošetřený buk má nejpočetnější frakci v intervalu 1 až 0,5 mm při  $v_f = 4$  m/min bez ohledu na řeznou rychlost. Zvýšením rychlosti podávání na  $v_f = 4$  m/min se hodnota nejpočetnější frakce mění s řeznou rychlostí. Při  $v_c = 40$  m/s je to frakce 1 až 0,5 mm a při  $v_f = 20$  m/s je poččetnější frakce 5 až 2 mm. Z uvedených údajů vyplývá, že na velikost procentuálního podílu a velikost frakcí granulometrického složení dezintegrované dřevní hmoty má největší vliv posuvná rychlost v kombinaci s řeznou rychlostí.

Na základě uvedených hodnot je zřejmé že technicko-technologické parametry obrábění mají vliv na granulometrické složení třísky tepelně ošetřeného buku (dřeva). Ovšem granulometrické složení tepelně ošetřeného dřeva nemá velký vliv na navrhování a konstrukci odsávacího a filtračního zařízení. U tepelně ošetřeného buku je sice větší podíl menších frakcí, ale u rostlého buku se tyto frakce také vyskytují a filtrační zařízení je musí odstranit. Podle tabulky 9 odpad z frézování spadá do kategorie hrubý a střední s jemným podílem a jeho odlučování je nesnadné (dle tab. 8). Odpad vzniklý při obrábění spadá také do kategorie hrubý a střední s podílem jemného dle tab. 7. Podle obrázku 33 je možné použít na odlučování odpadu z frézování tepelně ošetřeného dřeva cyklóny s maximální odlučivostí a na nejmenší frakci látkové filtry.

## 7. Závěr

Vliv technicko-technologických parametrů na granulometrické složení třísky při rovinném frézování tepelně modifikovaného (ošetřeného) dřeva je hlavním záměrem experimentu této diplomové práce. Experimentem se zkoušel vliv uhlové geometrie obráběcího nástroje (frézy), řezné rychlosti a posuvné rychlosti materiálu na složení třísky.

Granulometrická analýza byla provedená síťovou analýzou. Síťovou analýzou se roztřídili třísky do jednotlivých frakcí, ze kterých se poté vážením určily podíly jednotlivých frakcí ve vzorku. Frakce a jejich podíly se určovaly pro jednotlivé podmínky obrábění, kterých bylo 27 kombinací. Pro zjišťování granulometrického složení třísky bylo vybráno bukové dřevo. Polovina získaného bukového dřeva byla tepelně upravena technologií „THERMOWOOD“. Úprava byla provedena teplotou 190 °C působící na dřevo 1 hodinu. Z důvodu porovnání jednotlivých frakcí se granulometrické složení zjišťovalo i u přírodního (neupraveného) buku.

Protože na vznik třísky při obrábění dřeva nemají vliv jen technicko-technologické vlastnosti ale i fyzikální a mechanické vlastnosti samotné dřeviny, byly provedeny orientační zkoušky těchto vlastností. Konkrétně byly zkoušeny fyzikální vlastnosti: rovnovážná vlhkost a hustota a mechanické vlastnosti: pevnost ve statickém ohybu a rázová houževnatost. Rovnovážná vlhkost tepelně ošetřeného buku byla stanovena na 2,6 %, což je pokles ve srovnání s přírodním bukem, který měl vlhkost 10,5 % při stejných podmínkách prostředí. Hustota klesla z hodnoty 715 kg/m<sup>3</sup> (buk) na 686 kg/m<sup>3</sup> (buk TO). Ohybová pevnost přírodního buku byla 120 MPa a u tepelně ošetřeného stoupla na 153 MPa. Rázová houževnatost však poklesla z 10,8 J/cm<sup>2</sup> (buk) na 8,7 J/cm<sup>2</sup> (buk TO).

Samotnou granulometrickou analýzou se zjistily změny v granulometrickém složení třísky neošetřeného a tepelně ošetřeného buku. Pro přírodní buk vznikají nejvíce frakce v intervalu 8 až 5 mm a 5 až 2 mm, prachové frakce pod 125 μm bylo ve vzorcích méně než 1 %. U tepelně ošetřeného buku vznikají nejvíce frakce v intervalu 1 až 0,5 mm, prachových částic pod 125 μm vzniká do 4 %.

Z technicko-technologických parametrů obrábění měla na granulometrické složení vliv především podávací rychlost s řeznou rychlostí. Úhlová geometrie neměla na vznik a granulometrické složení třísky výrazný vliv, z kterého by šlo vyvodit nějaké konkrétní závěry. Vliv na granulometrické složení měly i změny vlastností dřeva způsobené tepelnou úpravou.

Pro podrobnější určení tvorby a granulometrického složení třísky tepelně ošetřeného dřeva by bylo vhodné experimentálně zjistit složení třísky u tepelně upraveného dřeva ošetřeného jinými, především vyššími teplotami, kde dochází k výraznějším změnám ve struktuře dřeva.



## 8. Použitá literatura

- Balabán K., Anatomie dřeva, Praha 1955
- Barčík Š., Čunderlík I., Kotlínová M., Pivolusková E., Vplyv vybraných fyzikálno-mechanicko-technologických vlastností juvenilného borovicového dreva na granulometrické zloženie triesky pri rovinnom frézovaní, Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva, 2004, TU vo Zvolene, 2004, ISBN 80-228-1385-0
- Bučko J., Šutý L., Košík M. Chemické spracovanie dreva, Alfa 1988
- ČSN 49 0103 (490103) Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach
- ČSN 49 0103 (490103) Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach
- ČSN 49 0115 (490115) Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe
- ČSN 49 0117 (490117) Rázová húževnatosť v ohybe
- ČSN ISO 3310-1 (259610) Zkušební síta - Technické požadavky a zkoušení - Část 1: Zkušební síta z kovové tkaniny
- Dzurenda L., Štruktúra zrnitosti a podiel izometrických triesok v mokrej piline z procesov pílenia dreva na hlavných pilárskych strojoch, Acta facultatis xylogiae, 2009, TU vo Zvolene, ISSN 1336-3824
- Dzurenda L., Vzduchotechnická doprava a separácia dezintegrovanej drevnej hmoty, TU vo Zvolene 2002, ISBN 80-228-1212-9
- Hejma J. a kolektiv, Vzduchotechnika v dřevozpracovávajícím průmyslu, Praha SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981, ISBN 04-829-81
- Hejzok L., Vzduchotechnické zariadenia drevopriemyslu, Alfa 1989, ISBN 80-05-00188-6
- Josten E., Reiche T., Wittchen B., Dřevo a jeho obrábění, Grada Publishing a.s., 2010, ISBN 978-80-247-2961-9
- Kačíková D., Kačík F., Chmecké a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave, TU vo Zvolene 2011, ISBN 978-80-228-2249-7
- Král P., Hrázský J., Využití nového materiálu ThermoWood, Materiály pro stavbu 1/2005
- Kučerka M., Kvantifikácia rozmerov a tvarov častíc jemnej frakcie z procesov pílenia dreva, Dizertační práce, 2008, TU vo Zvolene
- Liščan J., Obrábanie a delenie drevných materiálov, VŠLD Zvolen, 1988,
- Longauer J., Hydraulika a vzduchotechnika v drevospracujúcom priemysle, Alfa, 1991,
- Longauer J., Sujová E., Vybrané vlastnosti tuhých častíc, Vedecké štúdie, TU vo Zvolene, 2000, ISBN 80-228-1022-3

- Maulis V., Technologie a zhodnocení vybraných vlastností dřeva modifikovaného teplem, Diplomová práce, 2009, ČZU v Praze
- Peschel P., Dřevařská příručka, Praha: Sobotáles, 2002, ISBN 80-859-2084-0
- Požgaj A. a kolektiv, Štruktúra a vlastnosti dreva, Píroda a.s., Bratislava 1993, ISBN 80-07-00600-1
- Prokeš S., Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva, Praha SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1982, ISBN 04-817-78
- Reinprecht L., Vidholdová Z. Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie, TU Zvolen 2008, ISBN 978-80-228-1920-6
- Valenta V., ThermoWood – tepelně upravené dřevo, Stolařský magazín 6/2009
- Wagenführ R., Scheiber Ch., *Holz atlas*, Leipzig 1975

### **8.1. Elektronické dokumenty:**

- <http://www.thermowood.fi> [17. 2. 2010] Finnich ThermoWood Association, ThermoWood Handbook (2003)
- <http://www.lunawood.fi/index.php?sivu=338&l=5> [20. 4. 2010]
- <http://www.platowood.nl/projecten/utiliteitsbouw/alle/63/Roof%20terrace.html> [20. 4. 2010]
- <http://www.prokom.cz/thermowood-tepelne-upravene-drevo/index.htm> [10. 2. 2010]
- <http://www.storaenso.com> [10. 2. 2010]
- <http://www.dreviny.kbx.cz/?sekce=atlas> [5. 4. 2012]

## 9. Seznam obrázků

- Obr. 1 Neupravená borovice
- Obr. 2 Borovice tepelně ošetřená
- Obr. 3 Mikrotrhlina v jarní cévě buku ošetřeného v 205 °C/6h
- Obr. 4 Barevná zněna buku upraveného při teplotě 191 °C/1h
- Obr. 5 Mikroskopická stavba buku
- Obr. 6 Změna hustoty borovicového dřeva tepelně upravované od 160 do 240 °C po dobu 3 hodin. Průměrná hustota v rozsahu teplot  $T < 160$  °C je  $560 \text{ kg/m}^3$
- Obr. 7 Vliv relativní vlhkosti na hodnoty vlhkosti tepelně upraveného smrkového dřeva při různých podmínkách úpravy technologií Thermowood
- Obr. 8 Radiální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti. Smrkové dřevo bylo upraveno technologií Thermowood za různých podmínek
- Obr. 9 Tangenciální bobtnání smrkového dřeva v závislosti na relativní vlhkosti. Smrkové dřevo bylo upraveno technologií Thermowood za různých podmínek
- Obr. 10 Změna ohybové pevnosti borového dřeva v závislosti na teplotě úpravy
- Obr. 11 Změna modulu pružnosti borového dřeva v závislosti na teplotě úpravy
- Obr. 12 Závislost tvrdosti podle Brinella borového dřeva na teplotě ošetření
- Obr. 13 Odolnost různých druhů dřeva proti rozštípnutí v radiální a tangenciální rovině
- Obr. 14 Pevnost v tlaku tepelně upraveného smrkového dřeva upraveného při 220 a 225 °C 1 až 3 hodiny
- Obr. 15 Poměrný úbytek hmotnosti ošetřené borovice napadené *Coniophora puteana* k neupravenému dřevu. Čas úpravy 3 hodiny
- Obr. 16 Vliv tepelně upravené borovice na úbytek hmotnosti při napadení dřevokaznou houbou. Čas úpravy 4 hodiny
- Obr. 17 Hodnoty měnící se vlhkosti tepelně upravené borovice (225 °C/6h) vystavené venkovní expozici
- Obr. 18 Změna barvy tepelně upravené borovice vystavené 6 měsíční venkovní expozici
- Obr. 19 Schéma výrobního procesu ThermoWood
- Obr. 20 Druhy frézování podle způsobu podávání materiálu. a- nesousledné frézování, b- sousledné frézování
- Obr. 21 Způsoby frézování podle polohy osy otáčení a podle tvaru ploch, které opisují břity nástroje. a- válcové, b- kuželové, c- čelní, d- čelně kuželové
- Obr. 22 Schéma oddělování třísky při válcovém frézování

- Obr. 23 Vznik třísky při podélném obrábění
- Obr. 24 Disperzní soustava
- Obr. 25 Základní rozměry částice dezintegrované dřevní hmoty
- Obr. 26 Ekvivalentní velikost částice podle průměru
- Obr. 27 Ekvivalentní poměr částice podle objemu
- Obr. 28 Ekvivalentní velikost částice podle pádové rychlosti
- Obr. 29 Distribuční křivka získaná síťováním
- Obr. 30. Křivka propadu
- Obr. 31 Křivka zbytku
- Obr. 32 Křivka zbytku
- Obr. 33 Postavení dřevního odpadu mezi ostatními duhy jemných částic a rozsah použitelných odlučovačů
- Obr. 34 Materiál připravený k frézování a odběru vzorků
- Obr. 35 Průběh tepelné úpravy buku použitého k odběru vzorků
- Obr. 36 Spodní svislá fréza a podávací zařízení
- Obr. 37 Frézy použité při frézování
- Obr. 38 Vibrační síťovací stroj se sadou sít a laboratorní váha
- Obr. 39 Univerzální zkušební stroj ZDM 5/91 a zkušební tělíška
- Obr. 40 Přerážecí zařízení (Charpyho kladivo)
- Obr. 41 Lom způsobený rázovou zkouškou u přírodního buku a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h)
- Obr. 42 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min
- Obr. 43 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min
- Obr. 44 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 20$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min
- Obr. 45 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min
- Obr. 46 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min
- Obr. 47 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování: úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min



- Obr. 65 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování:  
úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 30$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.
- Obr. 66 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování:  
úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 4$  m/min.
- Obr. 67 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování:  
úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 8$  m/min.
- Obr. 68 Distribuční křivka bukové třísky vzniklé rovinným frézováním. Parametry frézování:  
úhel čela  $\gamma = 25^\circ$ , řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s, podávací rychlost  $v_f = 11$  m/min.
- Obr. 69 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=20$  m/s,  $v_f=4$  m/min
- Obr. 70 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=20$  m/s,  $v_f=8$  m/min.
- Obr. 71 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=20$  m/s,  $v_f=11$  m/min
- Obr. 72 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=30$  m/s,  $v_f=4$  m/min
- Obr. 73 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=30$  m/s,  $v_f=8$  m/min.
- Obr. 74 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=30$  m/s,  $v_f=11$  m/min
- Obr. 75 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=40$  m/s,  $v_f=4$  m/min
- Obr. 76 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=40$  m/s,  $v_f=8$  m/min
- Obr. 77 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech  
obrábění  $v_c=40$  m/s,  $v_f=11$  m/min
- Obr. 78 Vliv řezných rychlostí na granulometrické složení třísky buku při podávací  
rychlosti  $v_f = 4$  m/min
- Obr. 79 Vliv řezných rychlostí na granulometrické složení třísky buku při podávací  
rychlosti  $v_f = 8$  m/min
- Obr. 80 Vliv řezných rychlostí na granulometrické složení třísky buku při podávací  
rychlosti  $v_f = 11$  m/min
- Obr. 82 Vliv podávacích rychlostí na granulometrické složení třísky buku při řezné  
rychlosti  $v_c = 30$  m/s

- Obr. 83 Vliv podávacích rychlostí na granulometrické složení třísky buku při řezné rychlosti  $v_c = 40$  m/s
- Obr. 84 Nárůst prodeje termicky upraveného dřeva ThermoWood období 2001 až 2007
- Obr. 85 Relativní zastoupení jednotlivých druhů dřevin na výrobě dřeva ThermoWood
- Obr. 86 Barevné změny tepelně upraveného borového dřeva v řepkovém oleji, při teplotách 180 °C a 220 °C po dobu 3 nebo 6 hodin. (Reinprecht 2008)
- Obr. 87 Barevné změny borového dřeva upravené při 120 až 220 °C v intervalech po 20°C
- Obr. 88 Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou
- Obr. 89 Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou
- Obr. 90 Sada sít (5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,080; 0,032 a dno) s roztříděným vzorkem třísky tepelně ošetřeného buku

## 10. Seznam tabulek

Tab. 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti bukového dřeva

Tab. 2 Hodnoty tepelné vodivosti borovice a smrku po tepelném zpracování v 230 °C po dobu 3 a 5 hodin

Tab. 3 Pevnost v ohybu a modul pružnosti smrkového dřeva ošetřeného ve 230 °C po dobu 5 hodin

Tab. 4 Přirozená trvanlivost dřeva

Tab. 5 Změny vlastností způsobené tepelnou úpravou u dřevin typu Thermo-S a Thermo-D

Tab. 6 Třídy zrnitosti sypkých hmot podle ČSN 26 0070

Tab. 7 Zrnitost dezintegrovaní dřevní hmoty Hejma

Tab. 8 Obtížnost odlučování odpadu

Tab. 9 Základní operace opracování dřeva, vznik odpadu a způsob jeho odlučování

Tab. 10 Parametry spodní svislé frézy FVS

Tab. 11 Parametry podávacího zařízení

Tab. 12 Charakteristika frézy

Tab. 13 Úhlová charakteristika frézovacích hlav

Tab. 14 Řezné podmínky

Tab. 15 Vlhkost přírodního a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h). Při podmínkách prostředí  $\varphi = 65 \pm 5 \%$ ,  $t = 20 \pm 2 \%$

Tab. 16 Hustota přírodního a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h)

Tab. 17 Pevnost ve statickém ohybu přírodního a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h).

Tab. 18 Rázová houževnatost přírodního a tepelně ošetřeného buku (190 °C, 1 h)

Tab. 19 Granulometrické složení bukové frakce

Tab. 20 Granulometrické složení bukové frakce

Tab. 21 Granulometrické složení bukové frakce

## 11. Seznam zkratk

Obr. .... obrázek

Tab. .... tabulka

OHT.....Oil Heat Treatment

VTT.....Výzkumný ústav ve Finsku

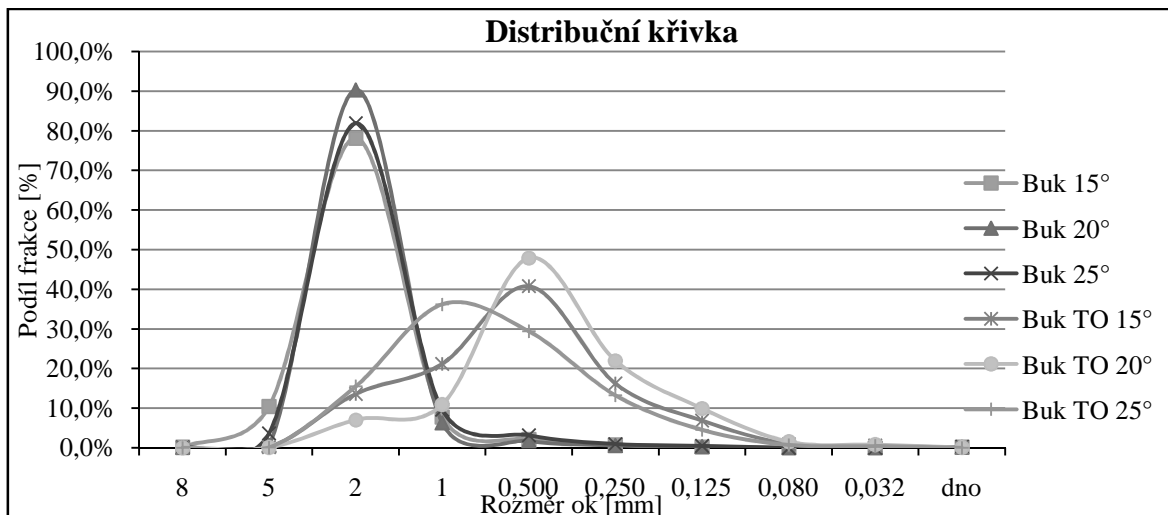
EU .....Evropské unie

PVAc....Polyvinylacetát

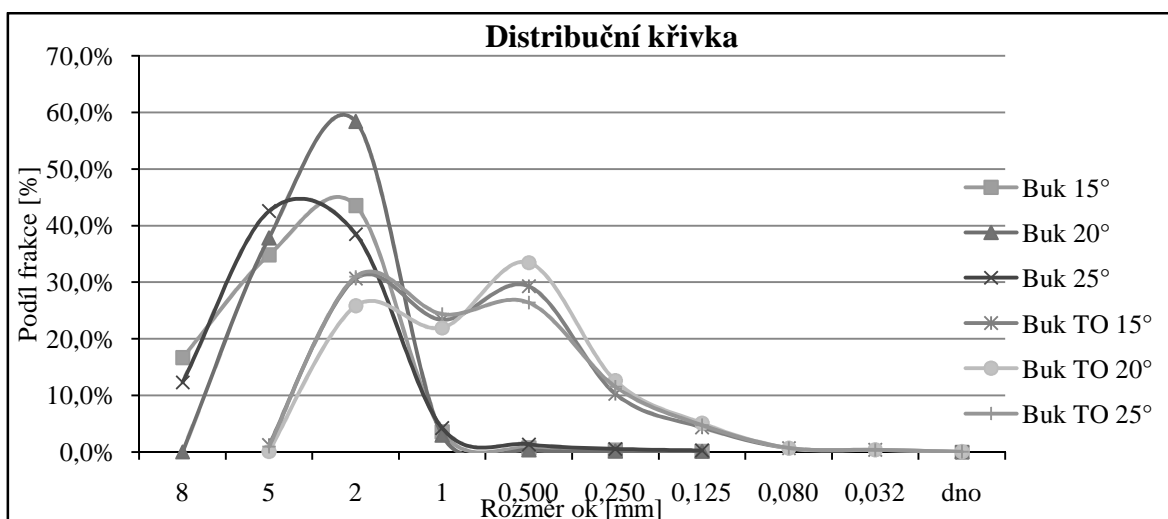
TO.....Tepelně ošetřený



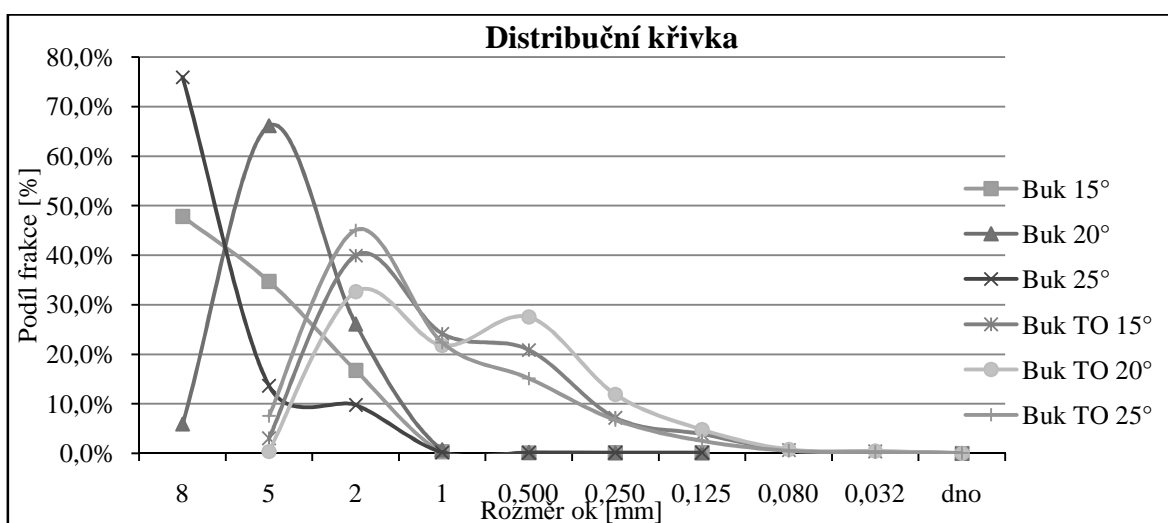
## 12. Přílohy



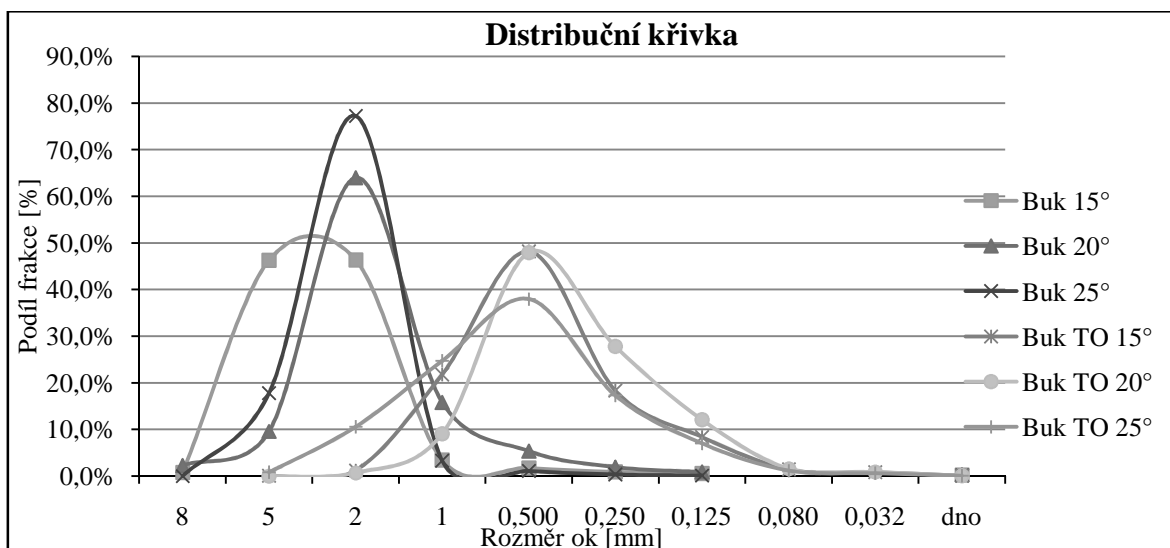
Obr. 69 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=20$  m/s,  $v_f=4$  m/min.



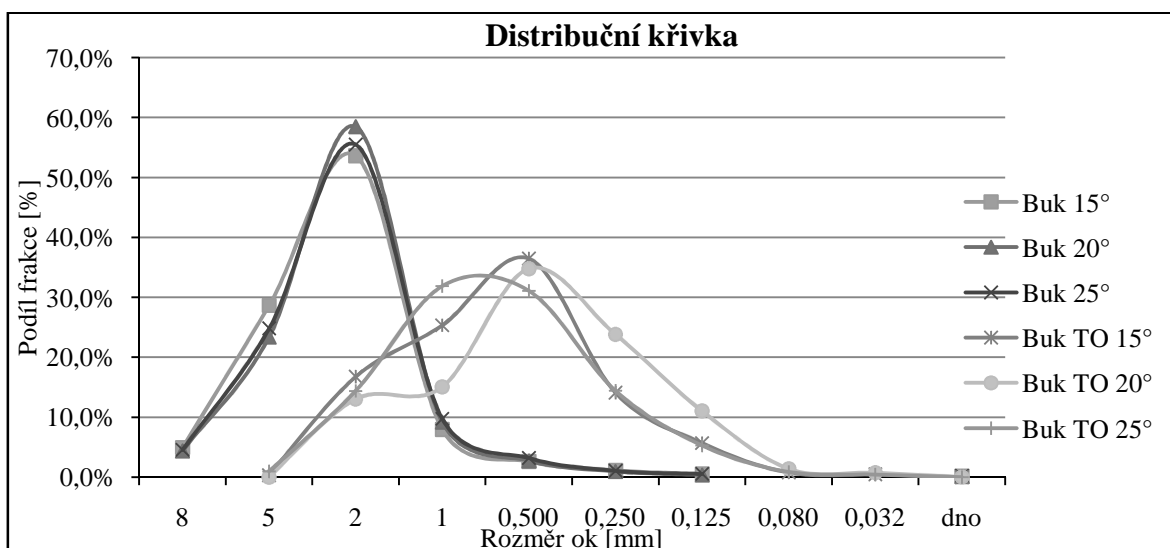
Obr. 70 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=20$  m/s,  $v_f=8$  m/min.



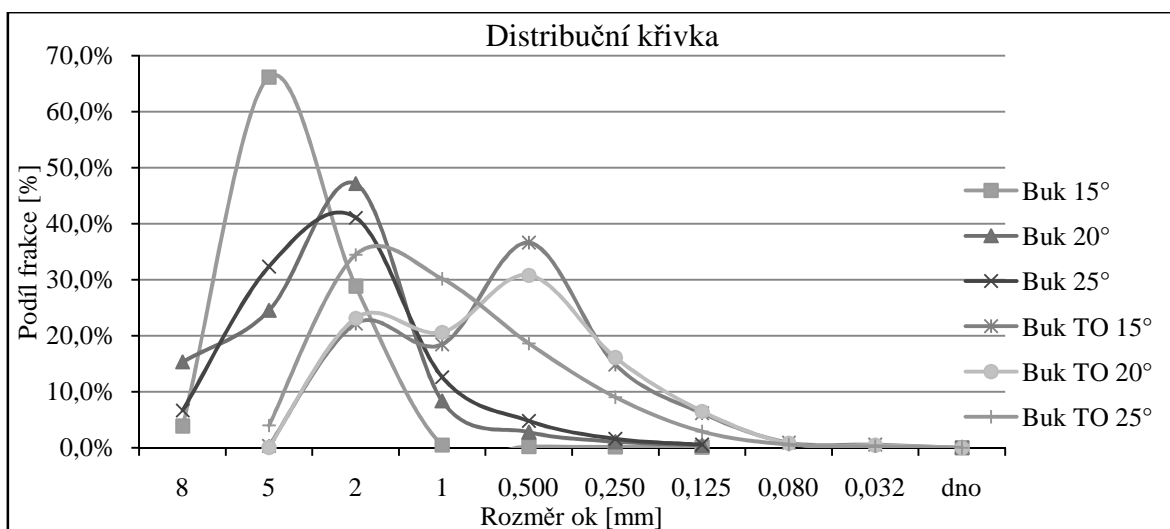
Obr. 71 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=20$  m/s,  $v_f=11$  m/min.



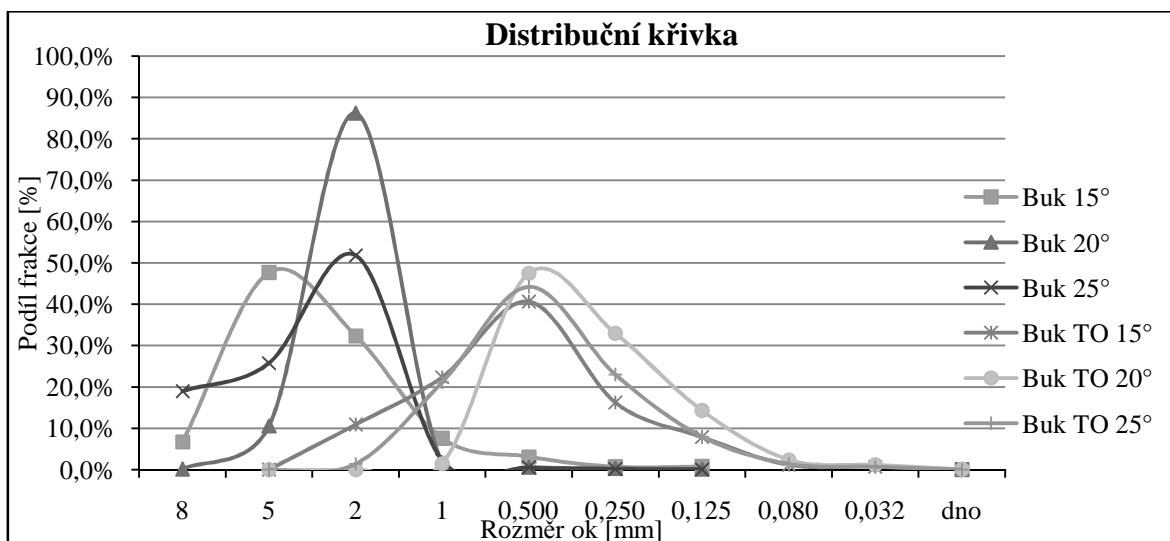
Obr. 72 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=30$  m/s,  $v_f=4$  m/min.



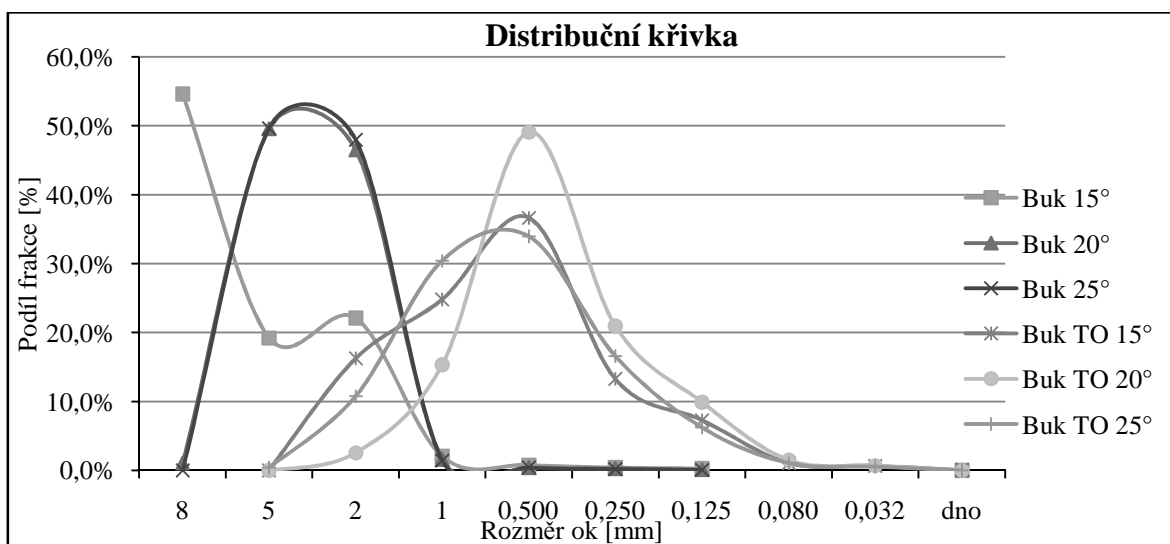
Obr. 73 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=30$  m/s,  $v_f=8$  m/min.



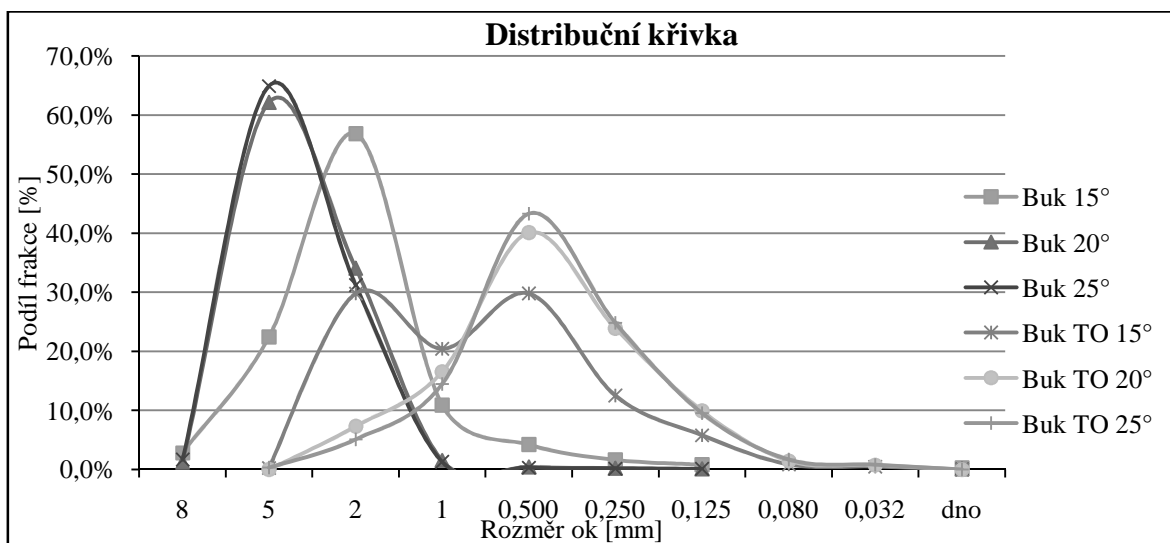
Obr. 74 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=30$  m/s,  $v_f=11$  m/min.



Obr. 75 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=40$  m/s,  $v_f=4$  m/min.

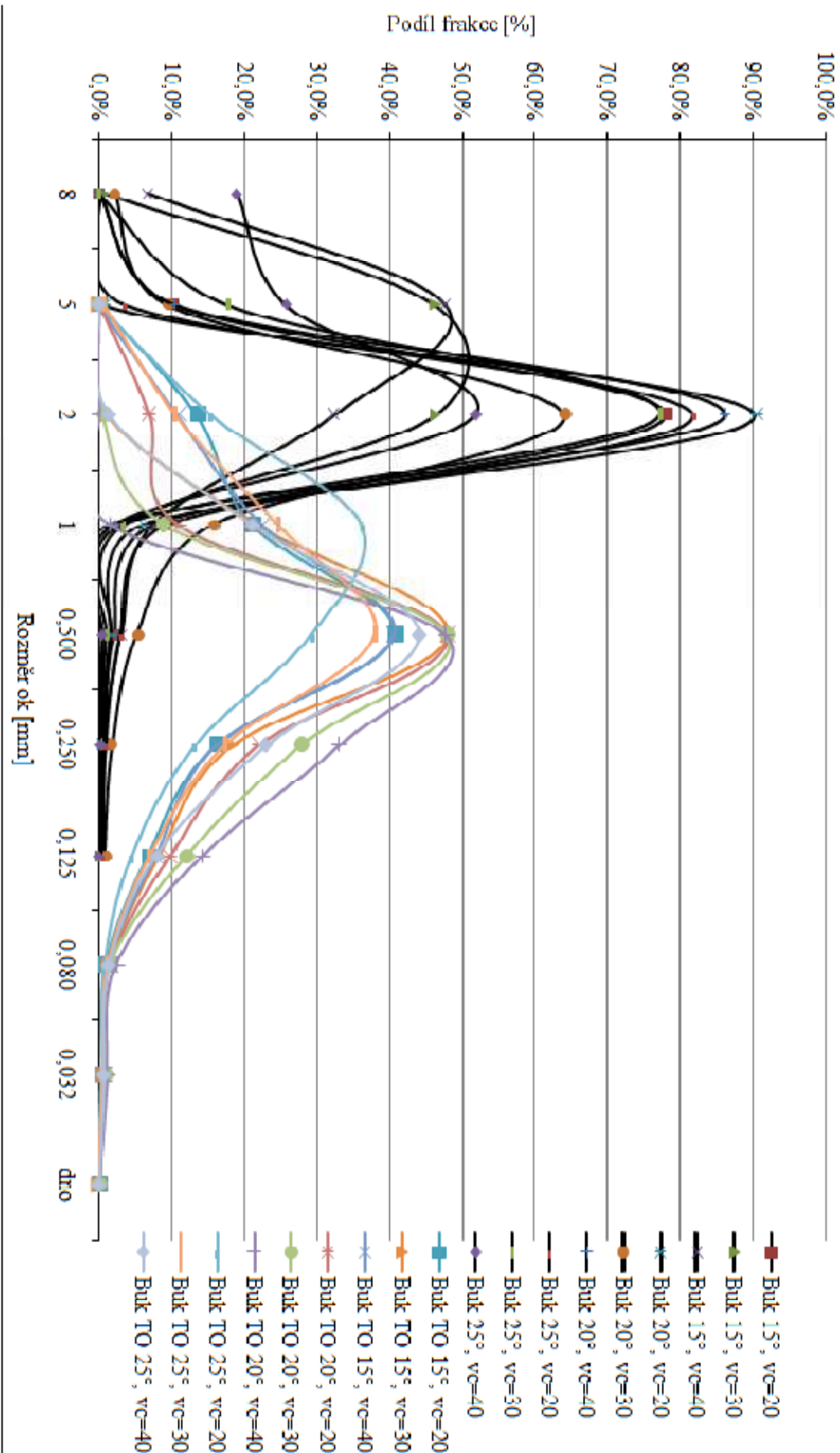


Obr. 76 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=40$  m/s,  $v_f=8$  m/min.



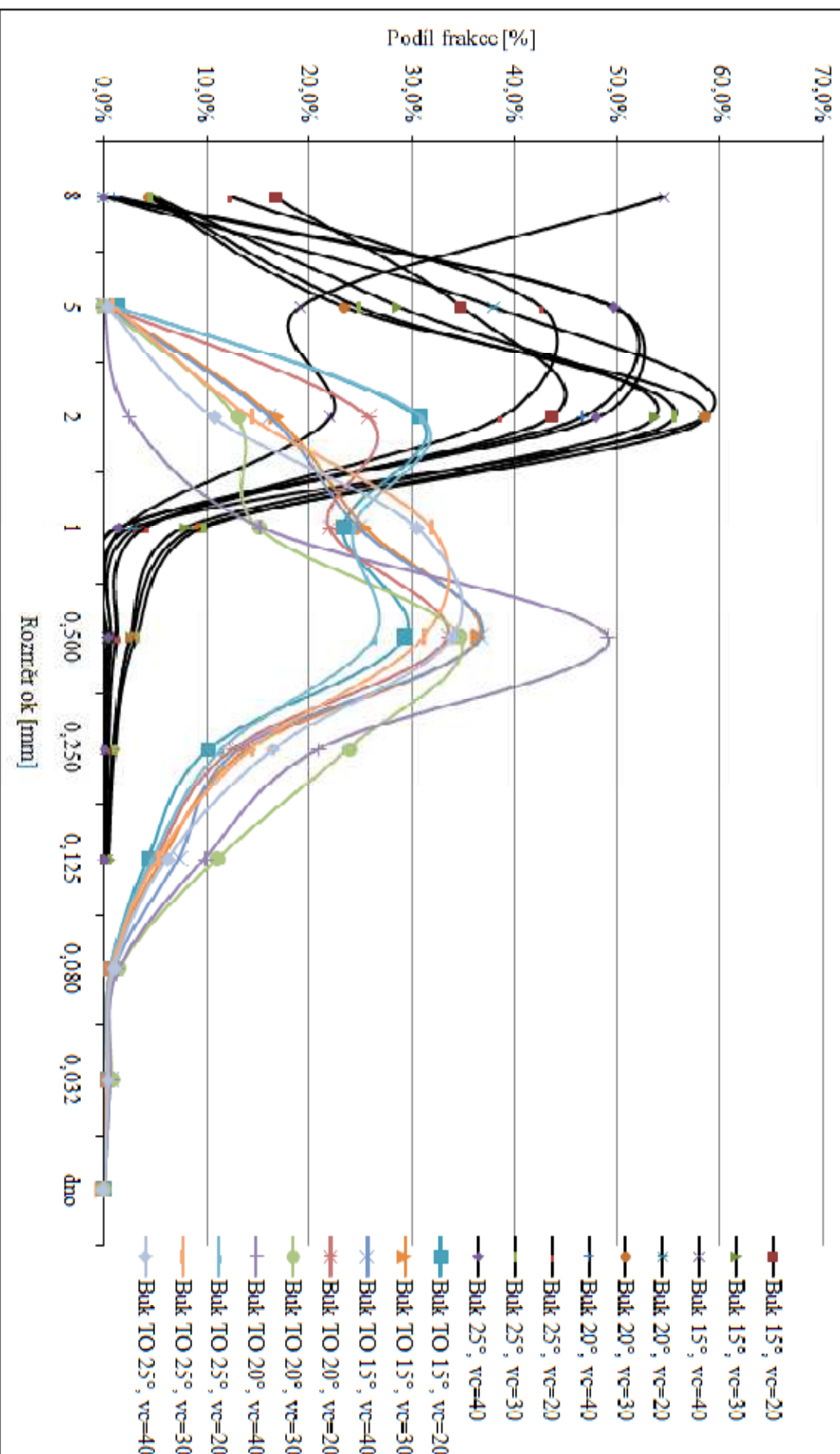
Obr. 77 Vliv úhlové geometrie nástroje na granulometrické složení třísky při parametrech obrábění  $v_c=40$  m/s,  $v_f=11$  m/min.

### Distribuční křivka



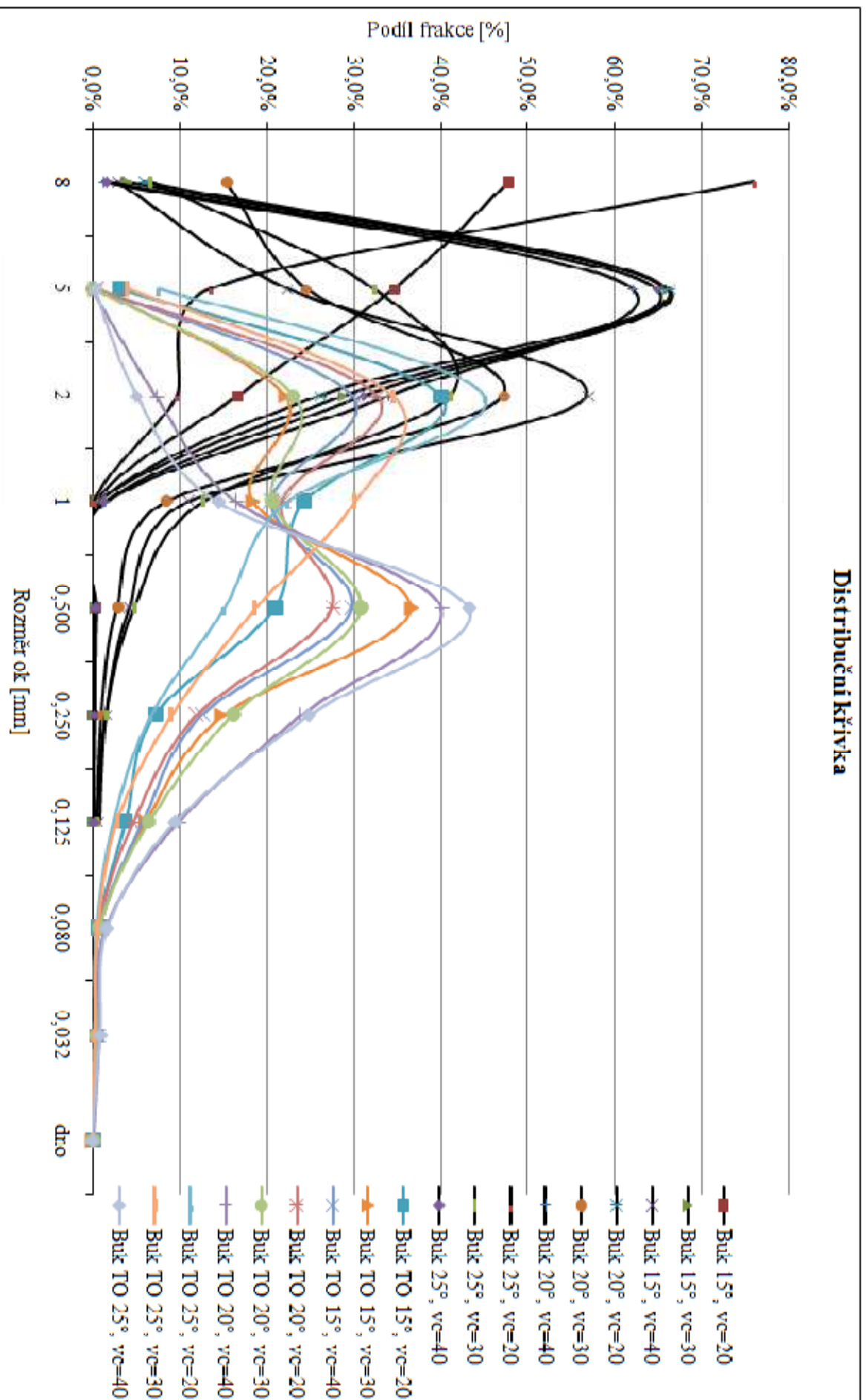
Obr. 78 Vliv řezných rychlostí na granulometrické složení třísky buku při podávací rychlosti  $v_f = 4$  m/min.

### Distribuční křivka



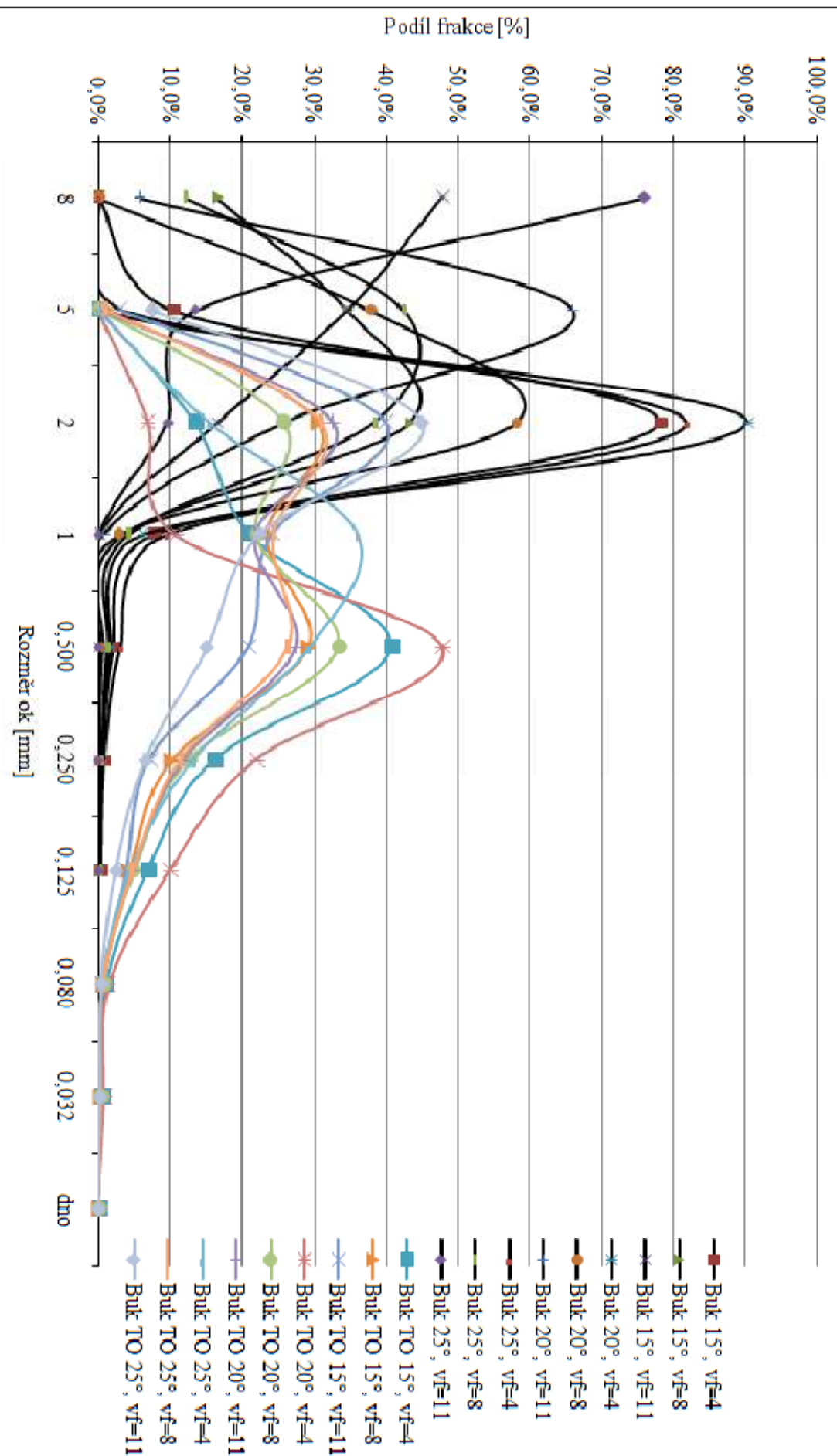
Obt. 79 Vliv teplotních rychlostí na granulometrické složení třísky buku při podávací rychlosti  $v_f = 8 \text{ m/min}$ .

### Distribuční křivka



Obt. 80 Vliv řezných rychlostí na granulometrické složení třísky buku při podávací rychlosti  $v_f = 11$  m/min.

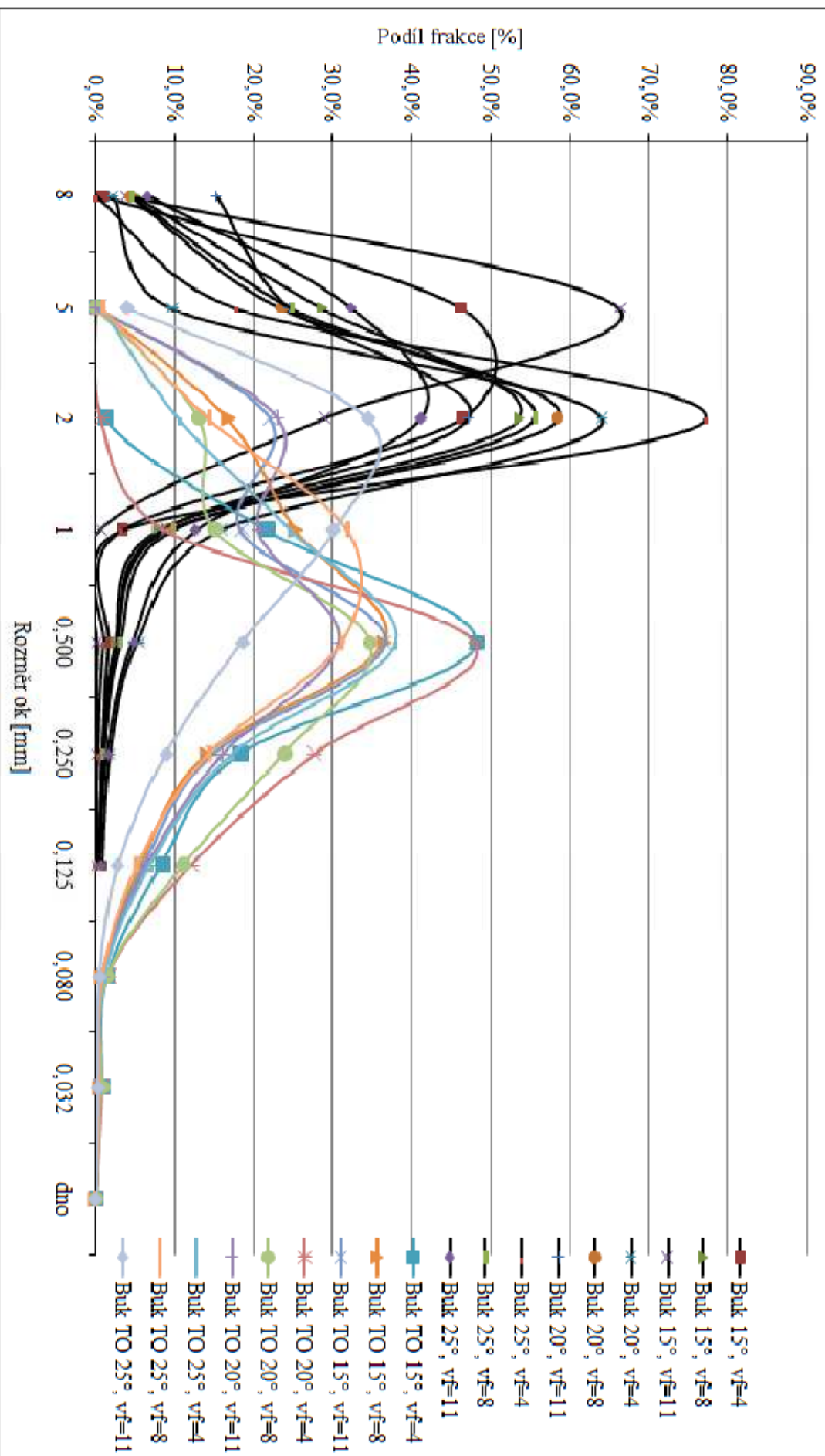
### Distribuční křivka



Obr. 81 Vliv podávacích rychlostí na granulometrické složení třísky buku při řezné rychlosti  $v_c = 20$  m/s.



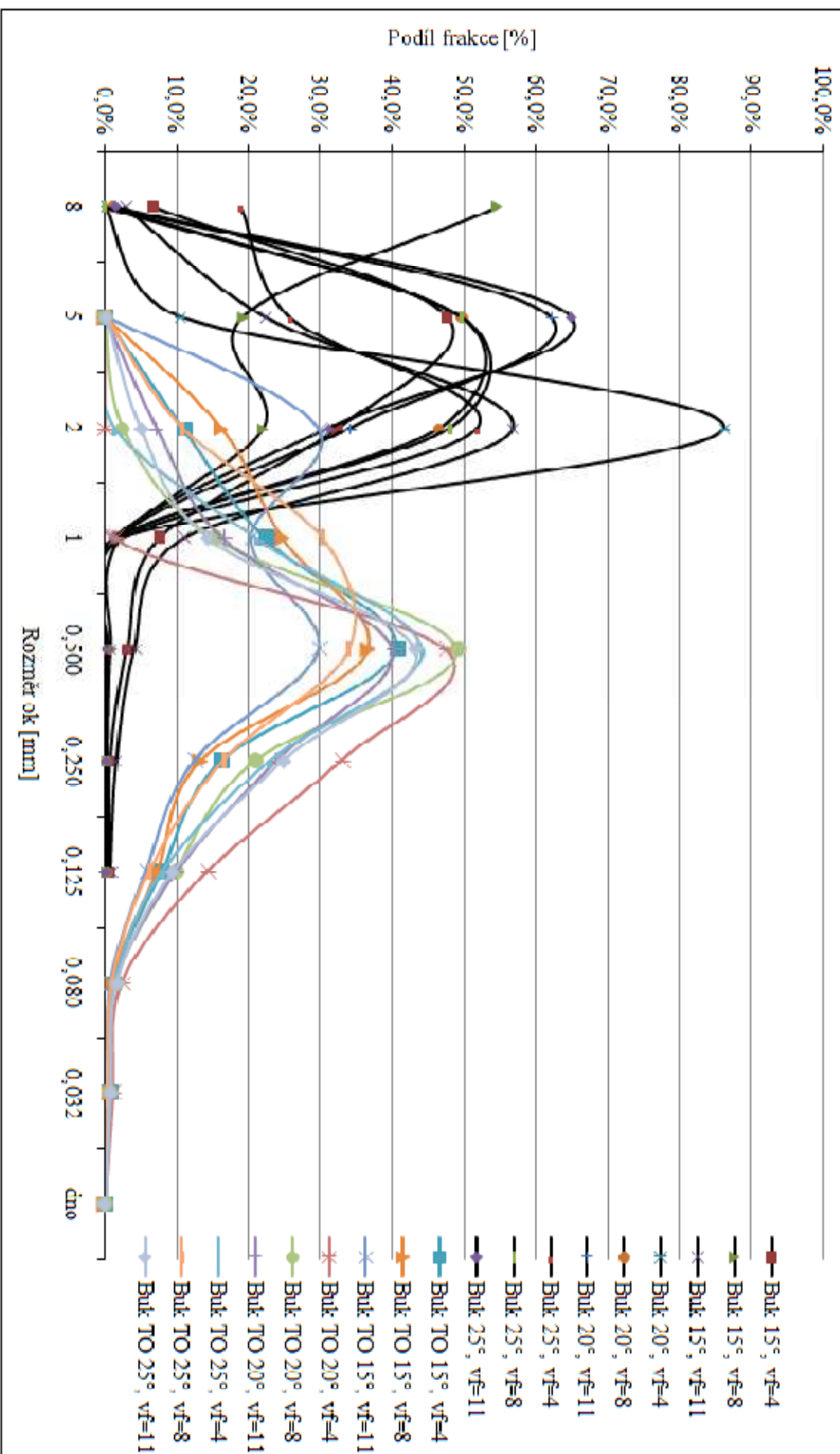
### Distribuční křivka



Obr. 82 Vliv podávacích rychlostí na granulometrické složení třísky buku při řezné rychlosti  $v_c = 30$  m/s.



### Distribuční křivka



Obt. 83 Vliv podávacích rychlostí na granulometrické složení třísky buku při řezné rychlosti  $v_c = 40$  m/s.

sifto [mm]	$\gamma=15^\circ$		$\gamma=15^\circ$		$\gamma=15^\circ$		$\gamma=15^\circ$		$\gamma=15^\circ$		$\gamma=15^\circ$		$\gamma=15^\circ$		$\gamma=15^\circ$			
	$V_c=20$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_c=20$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_c=20$ Buk	$V_f=11$ Buk TO	$V_c=30$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_c=30$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_c=30$ Buk	$V_f=11$ Buk TO	$V_c=40$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_c=40$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_c=40$ Buk	$V_f=11$ Buk TO
8	0,1%	/	16,6%	/	47,8%	/	0,7%	/	5,0%	/	3,9%	/	6,8%	/	54,6%	/	2,8%	/
5	10,4%	0,1%	34,8%	1,2%	34,7%	3,0%	46,2%	0,0%	28,7%	0,3%	66,2%	0,3%	47,7%	0,0%	19,2%	0,0%	22,4%	0,3%
2	78,1%	13,5%	43,5%	30,6%	16,7%	39,9%	46,3%	1,2%	53,7%	16,8%	28,8%	22,1%	32,4%	10,9%	22,1%	16,3%	56,8%	29,8%
1	7,7%	21,1%	3,5%	23,3%	0,3%	24,2%	3,4%	21,7%	8,0%	25,3%	0,5%	18,4%	7,6%	22,4%	2,0%	24,8%	10,9%	20,4%
0,500	2,2%	40,7%	0,7%	29,3%	0,1%	20,9%	1,7%	48,2%	2,7%	36,5%	0,2%	36,6%	3,1%	40,6%	0,8%	36,7%	4,2%	29,8%
0,250	0,7%	16,2%	0,3%	10,3%	0,1%	7,2%	0,9%	18,3%	1,2%	14,1%	0,2%	14,9%	0,7%	16,2%	0,4%	13,3%	1,6%	12,5%
0,125	0,2%	6,8%	0,2%	4,3%	0,1%	3,8%	0,5%	8,3%	0,6%	5,7%	0,1%	6,2%	0,8%	7,9%	0,3%	7,3%	0,8%	5,8%
0,080	/	1,0%	/	0,6%	/	0,6%	/	1,4%	/	0,8%	/	0,9%	/	1,2%	/	1,1%	/	0,9%
0,032	/	0,5%	/	0,4%	/	0,4%	/	0,8%	/	0,5%	/	0,5%	/	0,7%	/	0,7%	/	0,5%
dno	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%

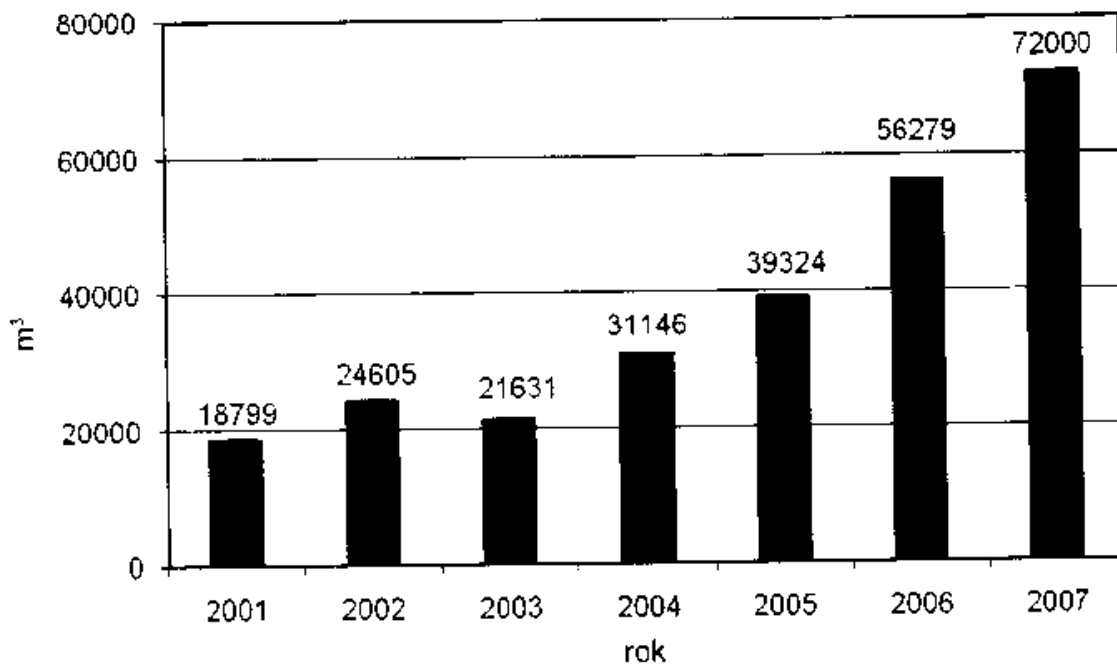
Tab. 19 Granulometrické složení bukové frakce.

síta [mm]	$\gamma = 20^\circ$		$\gamma = 20^\circ$		$\gamma = 20^\circ$		$\gamma = 20^\circ$		$\gamma = 20^\circ$		$\gamma = 20^\circ$		$\gamma = 20^\circ$		$\gamma = 20^\circ$			
	$V_c=20$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_c=20$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_c=20$ Buk	$V_f=11$ Buk TO	$V_c=30$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_c=30$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_c=30$ Buk	$V_f=11$ Buk TO	$V_c=40$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_c=40$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_c=40$ Buk	$V_f=11$ Buk TO
8	0,0%	/	0,0%	/	5,9%	/	2,2%	/	4,4%	/	15,3%	/	0,1%	/	1,1%	/	1,3%	/
5	0,6%	0,0%	37,8%	0,1%	56,1%	0,4%	9,5%	0,0%	23,4%	0,0%	24,5%	0,0%	10,5%	0,0%	49,6%	0,0%	62,1%	0,0%
2	90,3%	7,0%	58,4%	25,8%	26,1%	32,6%	64,0%	0,7%	58,5%	13,0%	47,1%	23,2%	86,2%	0,0%	46,5%	2,6%	34,1%	7,3%
1	6,2%	10,9%	3,0%	21,9%	0,7%	21,8%	15,8%	9,0%	9,2%	15,1%	8,4%	20,6%	1,7%	1,5%	1,6%	15,3%	1,5%	16,5%
0,500	1,7%	47,9%	0,3%	33,5%	0,1%	27,5%	5,3%	47,9%	2,8%	34,8%	2,8%	30,8%	0,5%	47,5%	0,4%	49,1%	0,4%	40,1%
0,250	0,5%	22,0%	0,1%	12,6%	0,1%	11,9%	1,9%	27,8%	1,0%	23,8%	1,1%	16,1%	0,3%	33,0%	0,3%	20,9%	0,2%	23,9%
0,125	0,3%	9,9%	0,1%	5,0%	0,1%	4,8%	0,8%	12,1%	0,4%	11,1%	0,4%	6,5%	0,1%	14,3%	0,1%	9,9%	0,1%	9,9%
0,080	/	1,5%	/	0,7%	/	0,7%	/	1,6%	/	1,4%	/	0,8%	/	2,4%	/	1,5%	/	1,5%
0,032	/	0,7%	/	0,4%	/	0,4%	/	0,9%	/	0,8%	/	0,5%	/	1,2%	/	0,7%	/	0,8%
dno	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%

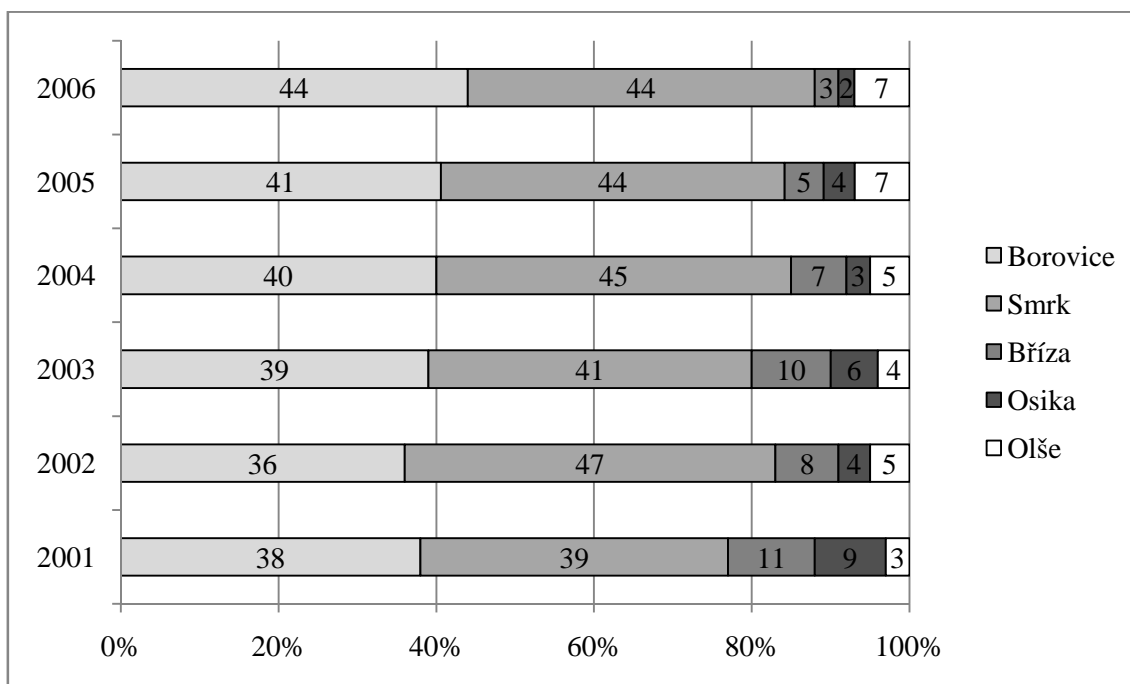
Tab. 20 Granulometrické složení bukové frakce.

síta [mm]	$\gamma = 25^\circ$		$\gamma = 25^\circ$		$\gamma = 25^\circ$		$\gamma = 25^\circ$		$\gamma = 25^\circ$		$\gamma = 25^\circ$		$\gamma = 25^\circ$		$\gamma = 25^\circ$			
	$V_0=20$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_0=20$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_0=20$ Buk	$V_f=11$ Buk TO	$V_0=30$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_0=30$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_0=30$ Buk	$V_f=11$ Buk TO	$V_0=40$ Buk	$V_f=4$ Buk TO	$V_0=40$ Buk	$V_f=8$ Buk TO	$V_0=40$ Buk	$V_f=11$ Buk TO
8	0,1%	/	12,3%	/	75,9%	/	0,0%	/	4,6%	/	6,7%	/	19,0%	/	0,0%	/	1,7%	/
5	3,6%	0,1%	42,5%	1,0%	13,6%	7,6%	17,8%	0,8%	24,8%	1,0%	32,3%	4,0%	25,8%	0,0%	49,6%	0,4%	64,9%	0,3%
2	81,8%	15,5%	38,5%	31,0%	9,7%	45,0%	77,2%	10,5%	55,5%	14,4%	41,1%	34,5%	51,8%	1,4%	48,0%	10,8%	31,2%	5,1%
1	9,6%	36,2%	4,2%	24,3%	0,2%	22,4%	3,3%	24,7%	9,8%	31,9%	12,6%	30,1%	2,3%	21,2%	1,5%	30,4%	1,3%	14,5%
0,500	3,1%	29,3%	1,4%	26,4%	0,1%	15,1%	1,1%	38,0%	3,2%	31,1%	4,8%	18,6%	0,5%	44,2%	0,4%	33,9%	0,3%	43,3%
0,250	1,0%	13,3%	0,6%	11,5%	0,1%	6,7%	0,3%	17,3%	1,1%	14,4%	1,6%	9,0%	0,2%	23,0%	0,2%	16,6%	0,2%	24,8%
0,125	0,4%	4,5%	0,3%	4,7%	0,1%	2,5%	0,1%	7,0%	0,6%	5,3%	0,6%	2,9%	0,1%	8,0%	0,1%	6,2%	0,1%	9,5%
0,080	/	0,7%	/	0,7%	/	0,5%	/	1,2%	/	0,9%	/	0,6%	/	1,4%	/	1,1%	/	1,7%
0,032	/	0,4%	/	0,4%	/	0,2%	/	0,6%	/	0,4%	/	0,3%	/	0,7%	/	0,5%	/	0,8%
dno	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,2%	0,01%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%

Tab. 21 Granulometrické složení bukové frakce.

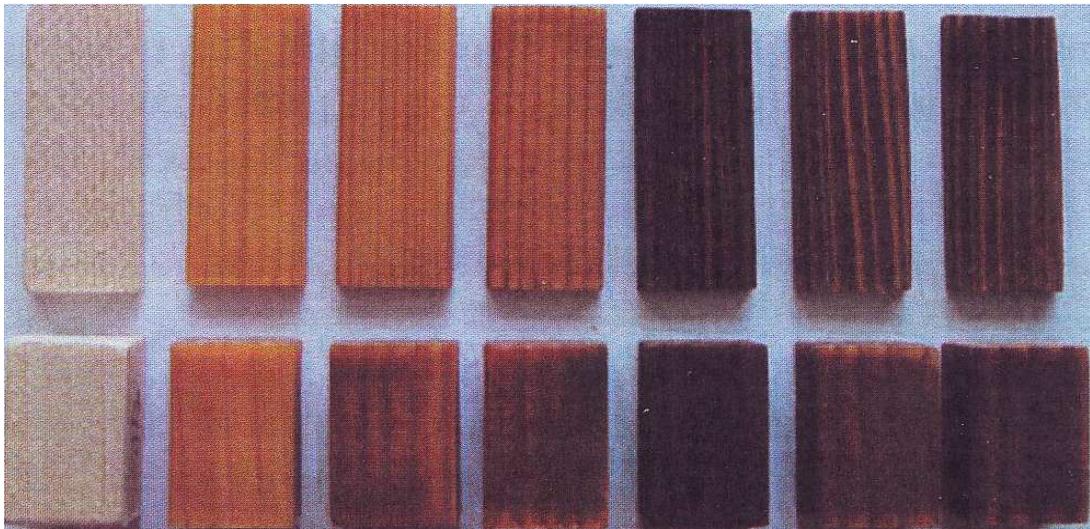


Obr 84 Nárůst prodeje termicky upraveného dřeva ThermoWood období 2001 až 2007. (Kačíková 2011)



Obr. 85 Relativní zastoupení jednotlivých druhů dřevin na výrobě dřeva ThermoWood. (Kačíková 2011)





Neupraveno 180°C /3h 180°C/6h 220°C/3h 220°C/6h 180°C/3h 220°C/3h  
220°C/3h 180°C/3h

Obr. 86 Barevné změny tepelně upraveného borového dřeva v řepkovém oleji, při teplotách 180 °C a 220 °C po dobu 3 nebo 6 hodin. (Reinprecht 2008)



Obr. 87 Barevné změny borového dřeva upravené při 120 až 220 °C v intervalech po 20 °C. (Reinprecht 2008)

**Timless Timber**  
with Compendium System

Timless Timber is a new generation of timber products. It is made from natural wood, but with a special treatment that makes it resistant to fire, rot, and insects. It is also very durable and has a long service life. The Compendium System is a new way of connecting timber products. It is a simple and fast system that allows for easy installation and dismantling. It is also very flexible and can be used for a wide range of applications. The Compendium System is a perfect solution for modern timber construction. It is a reliable and durable system that will last for many years.

**Timless Timber, Ltd.**  
Průmyslová zóna, 158 001 015  
www.timless-timber.com



Obt. 88 Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou (Timless Timber)





Obr. 89 Technologie výroby thermowoodu firmy Timless Timber Velká nad Veličkou (Timless Timber)



Obr 90. Sada sít (5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,080; 0,032 a dno) s roztríděným vzorkem třísky tepelně ošetřeného buku.