

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva



## **Tvrdość dřeva**

(Diplomová práce)

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Novák**

Autor diplomové práce: **Petr Šverma**

Praha 2009

**Poděkování :**

Mé poděkování patří především Ing. Pavlu Novákovi za odborné vedení diplomové práce a poskytnuté cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Böhmovi, Ph.D. za pomoc při statistickém zpracování naměřených hodnot. V neposlední řadě děkuji svým rodičům a blízkým za podporu při studiu na VŠ.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Tvrдост dřeva“ jsem vypracoval samostatně a všechny použité literární zdroje jsou úplně citovány.

V Praze.....

podpis.....

## **Abstrakt**

Tato diplomové práce se zabývá porovnáním zkušebních metod měření tvrdosti dřeva. Porovnává u nás dvě nejpoužívanější metody pro měření tvrdosti dřeva, metodu Brinell a metodu Janka. V teoretické části se zabývá historií tvrdosti a popisem jednotlivých druhů zkoušek. V praktické části jsou provedena měření na dřevě borovice a buku porovnávanými metodami. Výsledky jsou vyhodnoceny statisticky a v závislosti na hustotě.

Klíčová slova:

Brinell, Janka, tvrdost dřeva, indentor, mechanické zkoušky, borovice, buk

## **Abstract**

The intention of this diploma thesis is to compare testing methods of the hardness measurement of wood. It compares two of most commonly used methods for the hardness measurement of wood in our country, method Brinell and method Janka. In the theoretical part it deals with the hardness history and the description of tests. In the practical part are done some measurements on pinewood and beechwood. Results are analysed statistically and in dependence on the density.

Keywords:

Brinell, Janka, hardness of wood, indentor, mechanical tests, pine, beech

# Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1 Dřevo jako surovina</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2 Cíl práce</b> .....	<b>8</b>
<b>1.3 Tvrdost</b> .....	<b>8</b>
<b>1.4 Vnikací zkoušky (statické)</b> .....	<b>9</b>
1.4.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	10
1.4.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella .....	11
1.4.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	12
<b>1.5 Dynamické zkoušky</b> .....	<b>13</b>
1.5.1 Tvrdoměr Poldi .....	14
1.5.2 Baumanovo kladívko.....	15
1.5.3 Shoreho metoda.....	15
1.5.4 Tvrdoměr Equotyp .....	16
<b>1.6 Vrypové zkoušky</b> .....	<b>16</b>
<b>2. Tvrdost dřeva jako vlastnost</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Tvrdost dřeva</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Statická tvrdost dřeva .....	17
2.1.2 Dynamická tvrdost dřeva.....	18
<b>2.2 Historie zjišťování tvrdosti</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Závislost tvrdosti na jiných vlastnostech</b> .....	<b>20</b>
2.3.1 Hustota dřeva.....	20
2.3.2 Vlhkost dřeva .....	20
2.3.3 Pevnost dřeva .....	20
<b>2.4 Charakteristika zkoušených dřevin</b> .....	<b>21</b>
2.4.1 Borovice lesní (Pinus sylvestris L.).....	21
2.4.2 Buk lesní (Fagus silvatica L.).....	22
<b>3. Porovnání zkušebních metod Brinell – Janka</b> .....	<b>24</b>

<b>3.1 Měření tvrdosti dřeva dle Brinella .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Měření tvrdosti dřeva dle Janka .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3 Popis dalších používaných metod .....</b>	<b>27</b>
3.3.1 Metoda Chalais – Meudon .....	27
3.3.2 Návrh podle M. Krippela.....	28
3.3.3 Postup podle E. Möratha .....	28
<b>3.4 Porovnání zkušebních metod Brinell-Janka .....</b>	<b>29</b>
<b>4. Provedení zkoušek.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 Odběr zkušebních vzorků .....</b>	<b>30</b>
4.1.1 Stanovení potřebného rozsahu pokusu .....	30
<b>4.2 Měření hustoty .....</b>	<b>31</b>
<b>4.3 Metodika zkoušení.....</b>	<b>32</b>
4.3.1 Měření tvrdosti dřeva dle Brinella.....	32
4.3.2 Měření tvrdosti dřeva dle Janka .....	33
<b>4.4 Použité statistické metody .....</b>	<b>35</b>
4.4.1 Základní definice statistických hodnot .....	35
<b>4.5 Použité přístroje a pomůcky .....</b>	<b>38</b>
<b>5. Vyhodnocení výsledků včetně statistických metod.....</b>	<b>39</b>
<b>5.1 Výsledky zkoušek.....</b>	<b>39</b>
5.1.1 Vyhodnocení výsledků zkoušek tvrdosti.....	39
5.1.2 Vyhodnocení výsledků na základě hustoty .....	40
5.1.3 Vyhodnocení výsledků na základě F – testu .....	40
5.1.4 Vyhodnocení výsledků na základě T – testu .....	40
<b>5.2 Diskuse výsledků.....</b>	<b>40</b>
5.2.1 Diskuse výsledků tvrdosti .....	40
5.2.2 Diskuse výsledků na základě hustoty .....	41
5.2.3 Diskuse metod zjišťování tvrdosti .....	42
<b>6. Závěr.....</b>	<b>43</b>
<b>7. Seznam použité literatury .....</b>	<b>44</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>46</b>

# 1. Úvod

## 1.1 Dřevo jako surovina

Dřevo jako přírodní materiál provází člověka už od nepaměti. Patří mezi obnovitelné suroviny, pokud se s ním správně hospodaří. Splňuje tak i ty nejnáročnější ekologické požadavky. Už v minulosti bylo dřevo využíváno jako zdroj obživy, tepla a postupem času se stalo jedním z hlavních stavebních materiálů. Pro své specifické vlastnosti a širokou možnost použití se i dnes dostává do popředí zájmu.

V minulém století byla snaha překonat dřevní surovinu a nahradit jí novými materiály. Největším konkurentem jsou plasty a kompozitní materiály. Plasty předčily dřevo zejména svou životností a nízkou výrobní cenou. Na druhou stranu nastala otázka jak nepotřebné plastické hmoty likvidovat.

Dřevo je pro svou strukturu, kresbu a některé výjimečné vlastnosti nenahraditelné a jen potvrzuje, že se jedná o jedinečný přírodní materiál. Jednou z důležitých mechanických vlastností dřeva je jeho tvrdost.

## 1.2 Cíl práce

V této práci si kladu za cíl porovnat zkušební metody na zjišťování tvrdosti dřeva. Porovnávat budu dvě u nás nejpoužívanější metody měření tvrdosti dřeva, metodu Brinellovu a metodu Janka. Měření bude provedeno na reprezentativních dřevinách, a to na borovici a buku. Další snahou bude poukázat na jisté odlišnosti jednotlivých metod, a to i v rámci jednoho autora. Dalším úkolem bude vyhodnocení výsledků na základě hustoty.

## 1.3 Tvrdost

Tvrdost [H] je mechanická vlastnost, která je velmi důležitá v technické praxi. Je vlastností příliš komplexní a jednotlivé její parametry dostatečně neznáme. Tvrdost lze zjistit pomocí řady mechanických zkoušek. Hodnota tvrdosti se zjišťuje poměrně často a je velmi důležitá i tím, že v některých případech z ní lze odvodit

hodnotu napětí na mezi pevnosti v tahu (Hluchý et al., 1976).

Zkoušky tvrdosti patří mezi nejstarší zkoušky kovů a jiných technických materiálů. Jedná se prakticky o zkoušky nedestruktivní, neboť funkční a vzhledové porušení zkoušených dílů je většinou bezvýznamné. Z toho plyne výhoda zkoušet hotové výrobky bez větší destrukce či znehodnocení (Bílek et al., 2002).

Tvrdot je obecně definována jako vlastnost, jež se projevuje odporem proti pružné nebo plastické deformaci tělesa nebo oddělováním částí povrchu nebo jejich kombinací (Bílek et al., 2002).

Hodnoty tvrdosti se uvádějí bezrozměrně nebo s jednotkou MPa ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ). Použití jednotky MPa ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ) může vést k záměně za pevnost. Proto se většinou uvádí bezrozměrně s udáním způsobu měření. Přesné porovnání hodnot tvrdosti je možné pouze při použití stejné metody a stejného zkušebního zařízení. Hodnoty tvrdosti zjištěné jednou metodou nelze obecně převádět na jiné stupnice tvrdosti nebo pevnost v tahu. Takových převodů je třeba se vyvarovat s výjimkou takových případů, kdy jsou k dispozici podklady pro přepočítání z porovnávacích zkoušek (Bílek et al., 2002; Hluchý et al., 1976).

Podle způsobu porušení povrchu zkoušeného materiálu se zkoušky tvrdosti dělí na:

- 1) Statické – indenter se vtlačuje klidnou silou ve směru kolmém ke zkoušenému povrchu. Tyto zkoušky jsou označovány jako „zkoušky vnikací“. Jsou nejčastější pro svoji přesnost, jednoduchost a dobrou reprodukovatelnost.
- 2) Dynamické – indenter proniká do zkoumaného povrchu rázem vedeným kolmo – tzv. „rázové zkoušky“.
- 3) Vrypové – porušení povrchu je dosaženo ostrým nástrojem rovnoběžně s povrchem tak, aby se vytvořil vryp. Tento způsob se volí u křehkých materiálů.

### **1.4 Vnikací zkoušky (statické)**

Tyto zkoušky jsou nejrozšířenější a velice významné. Všeobecného rozšíření dosáhly metody, u kterých je měřítkem tvrdosti velikost plastické deformace



(Brinell, Vickers, Knoop) nebo metody, u kterých je měřítkem tvrdosti velikost elasticko plastické deformace (Rockwell). Tvrdost je u vnikacích metod definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa (Bílek et al., 2002).

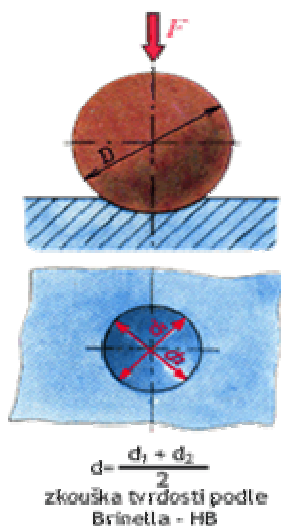
Vnikací tělesa jsou většinou jednoduchého geometrického tvaru např. koule, jehlan, kužel nebo těmto tvarům podobná tělesa např. kužel s malým zaoblením vrcholu (Rockwell). Zvolením těchto tvarů se sledovala jednoduchost, snadná reprodukovatelnost jejich výroby a optimální využití vlastností materiálu vnikacího tělesa. Vickers používá těleso, které respektuje tvar krystalu diamantu i jeho tvrdost. Volbou tvaru kužele a jehlanu se sledovala možnost stanovení tvrdosti nezávislé na velikosti použité síly (podobnost vtisků). Vnikací metody jsou dále definovány poměrem mezi použitým zatížením a plochou vtisku (Brinell, Vickers) nebo poměrem mezi použitým zatížením a plochou průmětu vtisku (Knoop). U metod Rockwell je tvrdost určována přímo z trvalé hloubky vtisku (Bílek et al., 2002).

#### 1.4.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

V roce 1900 na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálu v Paříži poprvé představil švédský inženýr Brinell svoji metodu určování tvrdosti.

Metoda se velmi rychle rozšířila a později byla normována (Jareš, 1966).

Podstatou zkoušky je zatlačování indentoru (ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu o průměru  $D$ ) do povrchu materiálu. Ocelová kulička se používá pro materiály s tvrdostí do 450 HB a kulička z tvrdokovu pro materiály s tvrdostí do 650 HB. Hodnoty tvrdosti získané pomocí ocelové kuličky a kuličky z tvrdokovu se značně liší nad hodnotu 350 HB (Bílek et al., 2002).



Obr. 1 Zkouška tvrdosti podle Brinella (Hluchý et al., 1979).

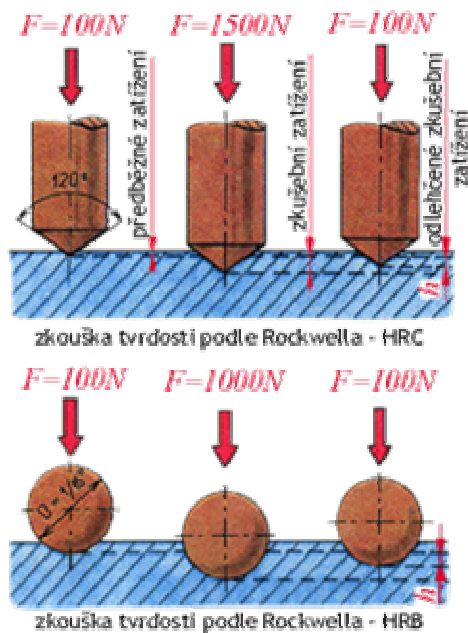
Používají se kuličky o průměru 1mm, 2 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Zatěžující síla působí kolmo na plochu zkoušeného materiálu po určitou dobu. Síla se volí s ohledem na průměr použité kuličky a měřený materiál (Hluchý et al., 1979).

Po odlehčení zatížení se změří dva na sebe kolmé průměry vtisku  $d_1$  a  $d_2$ , a následně se z nich pomocí aritmetického průměru vypočte průměr vtisku  $d$ . Povrch materiálu musí být hladký, rovný, bez nečistot, cizích tělísek a tloušťka zkoušeného materiálu musí být nejméně osminásobek hloubky vtisku. Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace od vnikacího tělesa (Bílek et al., 2002).

Výsledky Brinellovi zkoušky za normálních podmínek, tj. při průměru  $D = 10$  mm,  $F = 29\,430$  N, (300 kp) a době zatížení 10 až 15 s., se označuje pouze číslem tvrdosti a písmeny HB, tedy např. HB = 280. Jestliže byly podmínky zkoušky jiné, uvádějí se za označením HB v pořadí: průměr  $D$  (mm),  $F$  (N), doba zatěžování (s), např. HB 5/750/20 = 280 (Hluchý et al., 1976).

#### 1.4.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Rockwell používá jako indentor ocelovou kuličku (pro malé tvrdosti) nebo diamantový jehlan o vrcholovém úhlu  $120^\circ$  s poloměrem zaoblení 0,2 mm (Jareš, 1966).



Metoda je vypracována pro zkoušení kalených, zušlechťovaných nebo jinak tepelně zpracovaných ocelí. Tato zkouška tvrdosti nevyžaduje dokonale opracovaný povrch, neboť hloubka vtisku se měří tak, že při zatížení 98 N se ustaví hloubkoměr na nulu a následně se zatíží hlavní silou. Po odlehčení na hodnotu původních 98 N se odečte hloubka vtisku (Hluchý et al., 1976; Jareš 1966).

Obr. 2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (Hluchý et al., 1979)

Účelem předběžného zatížení je eliminovat pružné deformace vtisku ale i veškeré pružné deformace stojanu stroje a podložky. Celková měřitelná hloubka při použití kuželové indentoru je 0,2 mm. Tato hloubka je rozdělena na 100 dílků. Tvrdost zkoušeného materiálu je rovna tvrdosti diamantu v případě, že se hrot po odlehčení na 98 N vrátí do původní, nulové polohy (Bílek et al., 2002; Hluchý et al., 1976).

Tloušťka zkoušeného materiálu musí být nejméně desetinásobek hloubky vtisku (kužel) a pětinasobek hloubky vtisku (kulička). Zatěžující síla působí kolmo na povrch zkoušeného materiálu po určitou dobu. Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace od vnikacího tělesa. Rockwellova zkouška je rychlá a snadná, vhodná při kontrole velkých sérií výrobků a tam, kde již Brinellova metoda není použitelná (Bílek et al., 2002).

Jak uvádí (Bílek et al., 2002) výsledky Rockwellovy zkoušky se vyjadřují čísly, která určují hodnotu tvrdosti a písmeny HR s uvedením stupnice tvrdosti, tedy např. 59 HRC (tvrdost povrchu 59, naměřené na stupnici C) nebo 70 HR 30 N (tvrdost povrchu 70, naměřené na stupnici 30 N).

### **1.4.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse**

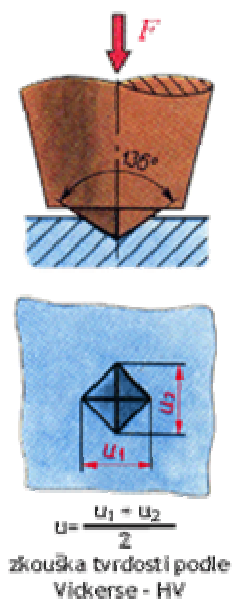
V době kdy v Americe vznikala Rockwellova metoda, v Anglii vznikala metoda, kterou popsali Smith a Sandland. V Evropě je tato zkouška známa podle tvrdoměrů firmy Vickers (Hluchý et al., 1976).

Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku. Zkouška spočívá v zatlačování čtyřbokého jehlanu kolmou silou k ploše zkoušeného materiálu po určitou dobu zatěžování. Diamantové vnikací těleso je ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou o vrcholovém úhlu 136°. Je voleno tak, aby tření co nejméně ovlivňovalo výsledek zkoušky a hodnoty tvrdosti se příliš neodlišovaly od tvrdosti stanovené podle Brinella (Bílek et al., 2002).

Vnikací těleso je shodné pro všechny metody. Vickersova zkouška je ze všech dosavadních metod jediná, která splňuje všechny teoretické požadavky. Dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrdsí kalené ocele.

Hodnoty tvrdosti jsou na velikosti zatížení prakticky nezávislá (Jareš, 1966).

Tloušťka zkoušeného materiálu musí být nejméně jeden a půl násobek délky úhlopříčky vtisku. Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace od vnikacího tělesa. Po odlehčení zatížení se změří obě úhlopříčky  $u_1$  a  $u_2$  a následně se pomocí aritmetického průměru vypočte hodnota  $u$  (Bílek et al., 2002).



Jak uvádí (Bílek et al., 2002) výsledky Vickersovy zkoušky se vyjadřují čísly, která určují hodnotu tvrdosti, písmeny HV a číslem odpovídajícím použitému zatížení, tedy např. 814 HV 5 (tvrdost povrchu 814 naměřená při zatížení 49,03 N).

Obr. 3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse (Hluchý et al., 1979)

## 1.5 Dynamické zkoušky

Dynamické zkoušky tvrdosti jsou obdobou statických zkoušek, a však nedosahují jejich přesnosti. Je třeba rozlišovat rázové zkoušky dvojího typu. V prvním případě jde o obdobu zkoušky vnikací, kde je ovšem klidné zatěžování nahrazeno rázem. Nejvíce se uplatňuje měření tvrdosti pomocí Poldi kladívka a Baumanova kladívka, v obou metodách je vnikacím tělesem kulička.

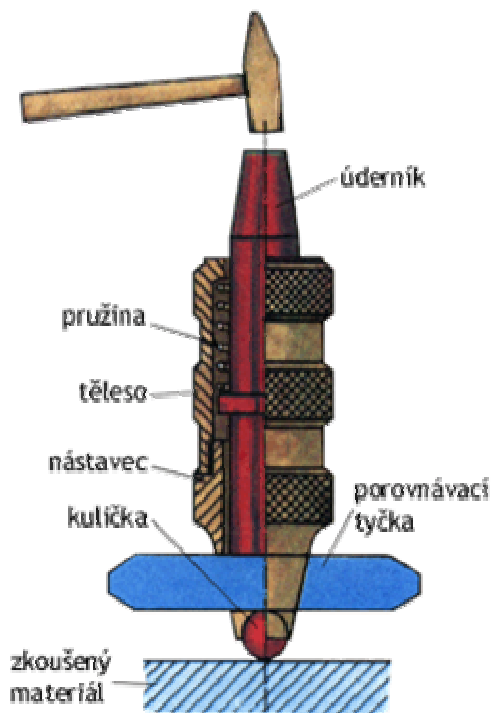
Metoda pružného odrazu je založena na měření tvrdosti na základě pružného odrazu tělesa padajícího z určité výšky na povrch zkoušeného materiálu. Při nárazu tělesa se malá část kinetické energie spotřebuje na nevratnou plastickou deformaci povrchu zkoušeného tělesa a zbývající energie se projeví odrazem tělesa. Celková energie je součtem trvalých a pružných energií. Poměr těchto energií je pak

ukazatelem tvrdosti materiálu. Z dosažené výšky nebo úhlu odrazu se vypočte hodnota tvrdosti (Bílek et al., 2002; Hluchý et al., 1976).

### 1.5.1 Tvrdoměr Poldi

Měření kladívkem Poldi je založeno na srovnávací metodě. Tvrdost je stanovena na základě plastické deformace vzniklé rázem a porovnáním velikosti vzniklého otisku s velikostí vtisku na materiálu o známé tvrdosti. Jde o nejmenší přenosný tvrdoměr pro měření tvrdosti metodou Brinell. Je vhodný pro měření na velkých výrobcích a konstrukcích, kde nelze využít statických metod měření. Tvrdoměr byl vyroben a patentován již v roce 1921 (Bílek et al., 2002; Hluchý et al., 1976).

Tvrdoměr se skládá z pouzdra a odpruženého pístu. Pouzdro je ukončeno držákem ocelové kuličky o průměru 10mm. Mezi kuličku a píst se vkládá porovnávací tyčka čtvercového průřezu o hraně 11 mm a tvrdosti cca 200 HBS.



Při vlastním měření se přístroj postaví kolmo ke zkoušenému předmětu a udeří se na píst kladivem o hmotnosti cca 500 g. Nárazem kladiva se vytvoří dva vtisky, jeden na zkoušeném předmětu a druhý na porovnávací tyčince. Porovnáním průměru obou vtisků lze z přepočítávacích tabulek stanovit hodnotu tvrdosti zkoušeného předmětu. Měření je ovšem zatíženo poměrně velkou chybou (až  $\pm 10\%$ ) a zjištěnou hodnotu tvrdosti lze brát jen jako informativní. Výsledky zkoušky se vyjadřují značkou HB POLDI (Bílek et al., 2002; Hluchý et al., 1976).

Obr. 4 Ruční tvrdoměr Poldi (Hluchý et al., 1976).

### 1.5.2 Baumanovo kladívko

Pracuje na principu vyvolání rázové energie k vytvoření vtisku pružinou, která má definovanou tuhost. Proto je kulička vždy stejnou energií vtiskována do zkoušeného materiálu. Po odjištění a zpuštění pružiny dojde k úderu na vnikací indentor ve tvaru kuličky a k jeho vtlačení do povrchu zkušebního tělesa. Následně se změří průměr vtisku  $d_1$  a  $d_2$ . Z těchto hodnot se pomocí aritmetického průměru vypočte hodnota  $d$ , z které je v tabulkách odečtena tvrdost. Tvrdost se určuje jako poměr zkušebního zatížení a povrchu vtisku (Bílek et al., 2002; Hluchý et al., 1976).

Výsledky zkoušky se vyjadřují značkou HB BAUMAN (Bílek et al., 2002).

### 1.5.3 Shoreho metoda

Uvedená metoda patří mezi dynamické zkoušky tvrdosti a její princip je založen na pružném odrazu tělesa o standardní hmotnosti, které dopadá z konstantní výšky na povrch zkoušeného předmětu. Z dosažené výšky po odrazu se vypočte hodnota tvrdosti (Bílek et al., 2002).

Skleroskop se skládá z kalibrované trubky, ve které se pohybuje malé válcové těleso o váze cca 2,5 g zakončené na spodní části kulovitě zabroušeným diamantem. Těleso volně padá z výšky 254 mm. Tato výška je rozdělena na 140 dílků. Stupnice je volena tak, že  $H_{SH} 100$  odpovídá kalené oceli. Výška odrazu závisí na modulu pružnosti zkoušeného materiálu, proto lze přesně srovnávat jen výsledky u materiálů s přibližně stejným modulem pružnosti (Hluchý et al., 1976; Jareš, 1966).

Shoreho skleroskopy se používaly především k měření tvrdosti válců do válcovacích stolic a to ve dvou stupnicích – HSC a HSD.

U moderních přístrojů pro dynamické zkoušky tvrdosti se používají tělíska o jiném tvaru i hmotnosti než u původní metody a k udělení počáteční energie se využívá energie pružiny nebo elektromagnetického pole. Vyhodnocení je prováděno výhradně elektronicky s možností přepočtu na jiné stupnice tvrdosti. Přesnost měření závisí na mnoha faktorech, jako je hladkost povrchu, kolmost dopadu tělíska, hmotnosti zkoušeného předmětu a především na modulu pružnosti zkoušeného materiálu (Bílek et al., 2002; Jareš, 1966).

### **1.5.4 Tvrdoměr Equotyp**

Princip měření tvrdosti vychází ze stanovení kinetické energie sondy vymrštěné pomocí pružiny kolmo proti měřenému povrchu. Tvrdost je odvozena z porovnání rychlosti sondy před dopadem a po odrazu sondy od povrchu měřeného materiálu. Ztráta energie je tím větší, čím větší je deformace, tedy čím je zkoušený materiál měkkčí. Jako vnikací tělísko se používá kulička ze slinutých karbidů nebo u velmi tvrdých materiálů kulička diamantová. Tento tvrdoměr je vhodný pro měření tvrdosti hrubozrnných materiálů a součástí s větší hmotností (Bílek et al., 2002).

### **1.6 Vrypové zkoušky**

Patří mezi nejstarší způsoby měření tvrdosti a jejich princip byl převzat z mineralogie, kde se ke klasifikaci tvrdosti užívá tzv. Mohsovy stupnice. V této stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vrýt do všech předcházejících nerostů vryp. Citlivost této stupnice je však velmi malá, proto se u kovů a jejich slitin určuje tvrdost na základě šířky vytvořeného vrypu (Jareš, 1966).

K určování této tvrdosti se používá přístroj, který zavedl Martens a pracuje na následujícím principu. Po vyhlazené ploše zkoušeného materiálu pojíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem 90°, který lze zatížit silou až 19,8 N. Tím se vytváří vryp, jehož šířka se měří pomocí optického mikroskopu. Číslem tvrdosti podle Martense je zatížení, které vytvoří vryp šířky 0,01 mm. Druhou možností je, že při stejném zatížení se vytvoří vryp a porovnává se šířka vrypu (Hluchý et al., 1976; Jareš, 1966).

Způsob zjišťování tvrdosti vrypovou metodou je značně nepřesný, a proto se velmi málo používá. Jediné současné praktické využití je možno nalézt při studiu velmi tvrdých povrchových několik mikronů tenkých vrstev nitridů popř. karbidu kovů (Hluchý et al., 1976; Jareš, 1966).

## **2. Tvrдость dřeva jako vlastnost**

### **2.1 Tvrдость dřeva**

Je jednou ze základních technologických vlastností dřeva, která významně rozhoduje o jeho dalším použití. Tvrдость je odpor, který klade dřevo proti vnikání jiného předmětu do svého povrchu. Při použití dřeva k účelům, kde je vystaveno velkému opotřebení (dlažební kostky, ložiska, podlahoviny) může být tvrдость dřeva vlastností žádoucí (Balabán, 1955).

Podle druhu zatížení rozlišujeme tvrдость na statickou a dynamickou. Tvrдость je závislá na mnoha číselných a liší se i v rámci jednoho druhu dřeviny. Závisí na vlhkosti, hustotě a dalších důležitých vlastnostech dřeva. Pod pojmem hustota se rozumí podíl mezi hmotou dřeva a jeho objemem. Dřevní hmota se skládá z pórů a stěn které je obklopují. Hustotu póru a stěn ovlivňuje prostředí ve kterém strom roste. Např. severská bříza, rostoucí v chladném podnebí, je z hlediska hustoty dřeva velmi odlišná od břízy rostoucí v mírném klimatickém pásu, tudíž i tvrдость těchto dřevin bude odlišná (Plaček, 2004).

Dále tvrдость závisí na anatomické stavbě dřeva. Všechny okolnosti anatomické stavby příznivé vysoké hustotě, jsou příznivé i pro tvrдость dřeva. Při tvrđosti hraje roli i množství libriformu a minerálních usazenin ve dřevě obsažených. Čím dřevo obsahuje více libriformu a čím hustší a kompaktnější jsou jeho vlákna, tím je tvrđší (Balabán, 1955).

Od tvrđosti lze odvodit i další využití dřeva. Např. v dýchárenském průmyslu je důležitou hodnotou pro dobu napaření kulatiny, s čímž úzce souvisí ekonomická stránka tohoto odvětví zpracování dřeva. I v pilařském zpracování dřeva hraje tvrđost důležitou úlohu. Dřeviny s vyšší tvrđostí výrazně zkracují dobu opotřebení řezného nástroje a tím snižují jeho životnost. Mimořádně důležitá je tvrđost při ručním opracování. Dřevo není homogenní materiál, není tedy ve všech místech a směrech stejně tvrđý.

Hodnota tvrđosti uváděná v literatuře nebývá jednotná. Někde je uváděna jako průměrná hodnota, jinde i včetně maximálních a minimálních hodnot.

#### **2.1.1 Statická tvrđost dřeva**

Hodnota statické tvrđosti se zjišťuje zatlačováním ocelové kuličky daného průměru. Kulička se zatlačuje klidnou silou působící kolmo na povrch zkoušeného materiálu po určitou dobu. Tvrđost se měří na transversálních, radiálních a tangenciálních plochách.



Obecně je statická tvrdost vyšší na transversálních než na bočních plochách. U jehličnatých dřev je tento rozdíl cca 40 %, u listnatých cca 30 %. U většiny druhů dřev nejsou významné rozdíly mezi tvrdostí na radiální a tangenciální ploše. Pouze u některých listnatých dřev s dobře vyvinutými dřeňovými paprsky (buk, dub) je tvrdost na radiální ploše větší o (5-10 %) než na tangenciální. V zásadě se používají dvě metody zjišťování statické tvrdosti dřeva, podle Brinella a podle Janka (Matovič, 1993)

Hodnoty statické tvrdosti jsou závislé na hustotě a vlhkosti. Velký význam má obsah vody ve dřevě. Suché dřevo je vždy tvrdší než vlhké. Se změnou vlhkosti o 1 % se změní hodnota statické tvrdosti o cca 3 %. Na základě údajů o transversální tvrdosti při 12 % vlhkosti se mohou dřeva dělit do 5 skupin (Matovič, 1993; Šlezingerová – Horáček – Gandelová, 1998):

- 1) Měkká dřeva (< 40 MPa) např. smrk, borovice, topol.
- 2) Středně tvrdá dřeva (41 – 80 MPa) např. buk, dub, modřín.
- 3) Tvrdá dřeva (81 – 100 MPa) např. akát, habr.
- 4) Velmi tvrdá dřeva (101 – 150 MPa) např. zimostráz.
- 5) Super tvrdá dřeva (> 150 MPa) např. eben, quajak.

### 2.1.2 Dynamická tvrdost dřeva

Je charakterizována podílem potenciální energie kuličky padající volným pádem ze stanovené výšky a plochy otláčení, kterou kulička vytvoří. R. Bauman, M.V. Schwarz a K. Bueson nahradili statický postup dynamickým. Tvrdost udávali vtiskem kuličky, která je upevněna na kladivu nebo v padajícím závaží. Takto stanovené výsledky však vykazovaly značný rozptyl hodnot a sám Bauman je považoval za přibližné. Dynamická tvrdost se mění se změnou vlhkosti do meze hygroskopicity. Se změnou vlhkosti o 1 % se dynamická tvrdost změní o 2 %. Tvrdost se obecně stanovuje jen na radiálních a tangenciálních plochách (Balabán, 1955; Matovič, 1993).

Dynamická tvrdost se vypočte ze vztahu:

$$H_w = \frac{4 * A}{\pi * d_1 * d_2} \quad [\text{J.cm}^{-2}]$$

$$A = m * g * h \quad [\text{J}]$$

A...spotřebovaná práce (J)

m...hmotnost ocelové kuličky (kg)  
g...gravitační zrychlení ( $m \cdot s^{-2}$ )  
h...výška pádu kuličky (m)  
 $d_1, d_2$ ...průměr zbytkového vtisku (cm)  
 $\pi$ ...3,14

## 2.2 Historie zjišťování tvrdosti

Tvrdot dřeva byla posuzována již v dobách minulých a to nejrůznějšími subjektivními způsoby. První kdo se systematicky zabýval měřením tvrdosti dřeva byl profesor lesnictví **H. Nördlinger**. Experimentálně určil tvrdost dřeva jako odpor, který dřevo klade při řezání pilou. Tvrdot dřeva rozdělil do následujících skupin: velmi měkké, měkké, polotvrdé, slabě tvrdé, tvrdé, velmi tvrdé, „tvrdé jako kost“ a „tvrdé jako kámen“. Každou skupinu vymezil hodnotami objemové váhy. Takto stanovené hodnoty nejsou exaktní, a proto klasifikaci nevyhovují (Balbán, 1955).

**M. Büsgen** vyvinul metodu určenou pro dřevo v roce 1904. Metoda spočívá v zatlačení jehly známého průměru do hloubky dvou milimetrů pomocí závaží. Tíha závaží potřebná k zatlačení jehly je bezprostředně hodnota tvrdosti. Nedostatkem této zkoušky je velikost hrotu jehly, který se řádově přibližuje velikosti dřevních vláken. V důsledku toho nemůže zkouška poskytnout průměrné hodnoty ani na malé ploše zkušební vzorku (Nimrichtr, 1999).

**Warren** vycházel z metody Brinellovy. Zatlačuje ocelovou kuličku o průměru 20 mm, kterou zatěžuje hmotností 1 000 kg. Následně změří průměr vtisku, vypočte plochu otláčení a vyjádří napětí, které udává tvrdost (Oprchal, 1999).

**Janka** opět vycházel z metody Brinellovy, zvolil kuličku o průměru 11,28 mm, kterou zatlačuje do hloubky 5,64 mm. Otláčená plocha je rovna  $100 \text{ mm}^2$ . Síla potřebná na zatlačení polokoule je bezprostředně hodnota tvrdosti.

**Chalais – Meudonova** metoda vznikla ve Francii v leteckém výzkumném ústavu. Do hranolku o průřezu  $20 \times 20 \text{ mm}$  se vtlačuje ocelový váleček o průměru 30 mm, který se zatlačuje silou 100 kg na 10 mm šířky vtisku. Jeho délka musí být větší než šířka vzorku. Následně se změří šířka vtisku, z které se vypočte hloubka vtisku. Tvrdot se vypočte jako převrácená hodnota hloubky vtisku. Předností této zkoušky je velký rozsah měřítka od 0,2

do 20. Tvrdost dřeva je rozdělena do následujících skupin. Velmi měkké, měkké, polotvrdé, tvrdé, velmi tvrdé (Balabán, 1955; Oprchal 1999).

### **2.3 Závislost tvrdosti na jiných vlastnostech**

Jak již bylo zmíněno, tvrdost je vlastnost na kterou má vliv řada faktorů. Je vlastností komplexní a jednotlivé její parametry nejsou dostatečně známé.

#### **2.3.1 Hustota dřeva**

Tvrdost, stejně jako většina mechanických vlastností dřeva je závislá na hustotě. Hustota je základní charakteristikou dřeva, která je definována jako podíl hmotnosti dřeva v přirozeném stavu za dané vlhkosti a jeho objemu. Hustota dřeva je závislá na řadě faktorů, např. anatomické stavbě, poloze v kmeni, druhu dřeviny, vlhkosti aj. Je vlastností snadno měřitelnou, značně variabilní a to i v rámci jednoho druhu dřeviny. Při udání hustoty dřeva musíme poznamenat za jaké vlhkosti byla zjišťována (Balabán, 1955; Požgaj, 1993).

Dalším termínem je hustota dřevní substance, pod kterým se rozumí poměr hmotnosti dřeva a objem dřeva bez buněčných dutin. Hustota dřevní substance je pro všechny dřeviny podobná a udává se průměrnou hodnotou, která je  $1,56 \text{ g/m}^3$  (Požgaj, 1993).

#### **2.3.2 Vlhkost dřeva**

Na vlhkosti dřeva jsou závislé hodnoty mechanických vlastností. Se stoupající vlhkostí do bodu nasycení vláken klesají pevnostní vlastnosti dřeva. Vlhkost dřeva je definována jako množství vody ve dřevě vyjádřené jako procento z celkové hmotnosti dřeva. Rozlišujeme absolutní vlhkost dřeva, která je vztažena k hmotnosti absolutně suchého dřeva a relativní vlhkost vztaženou k hmotnosti vlhkého dřeva. Měření vlhkosti se provádí váhovou zkouškou nebo elektrickými odporovými vlhkoměry (Balabán, 1955).

#### **2.3.3 Pevnost dřeva**

Vztah mezi tvrdostí a pevností dřeva v tlaku objevil G. Janka na základě svých

zkoušek. Tuto závislost uvádí vztahem:

$$H_J = 2 * \sigma_{DB} - 500 \quad [\text{kg.cm}^{-2}]$$

kde:  $\sigma_{DB}$  – pevnost v tlaku ( $\text{kg.cm}^{-2}$ )

$H_J$  – Jankova tvrdost ( $\text{kg.cm}^{-2}$ )

Závislost tvrdosti na pevnosti v tlaku je nepřesná a je nutné ji brát jen jako orientační. Tato skutečnost je dána rozdílnou hustotou v kmeni stromu, vlivem tření a trhlin ve dřevě. Další skutečností je, že tvrdost se určuje na malé ploše bez vad, naproti tomu pevnost v tlaku je vztažena na celý průřez zkoušeného vzorku (Nimrichtr, 1999).

## **2.4 Charakteristika zkoušených dřevin**

### **2.4.1 Borovice lesní (Pinus sylvestris L.)**

**Vzhled:** Strom dorůstající výšky až 40 m, na extrémních stanovištích může být i podstatně nižší. Kmen přímý, válcovitý, větvený až v horní čtvrtině. V dolní části je krytý silnou rozpukanou borkou, v horní části kmene se tenká borka odlupuje v papírovitých listcích a je rezavě červená či oranžová. Koruna spíše štíhlá, ale vyskytují se i jedinci s deštníkovitou korunou. Kořenový systém je mohutný, většinou se zachovalým křivým kořenem (Musil et al., 2002).

Je to borovice s největším areálem na světě. Její areál se rozkládá od Atlantiku, prochází Evropou přes celou Sibiř až téměř k Pacifiku. Nejižněji zasahuje do Španělska, nejseverněji do Skandinávie až za severní polární kruh (Musil et al., 2002).

**Makroskopické znaky:** Čerstvě poražené dřevo je bělavé, nažloutlé až narůžovělé, teprve po nějaké době působením světla a vzduchu se dá rozlišit jádro a běl. Běl je značně široká, barvy žlutobílé až načervenalé bílé. Jádrové dřevo je červenohnědé, oxidací silně tmavne, je smolnaté a značně trvanlivé. Pryskyřičné kanálky jsou patrné na všech řezech. Na transversálním řezu se jeví jako světlé lesklé tečky dobře patrné pod lupou. Na podélných řezech jsou vidět jako svislé světlé čárky. Ve dřevě jsou značně četné dřeňové paprsky viditelné jen pod lupou. Ohoblované plochy podélného řezu jsou matně až voskově lesklé. Suky jsou roztroušeny v běli a jsou větší než u smrku. Jádrové dřevo je středně odolné proti povětrnostním vlivům, bělové dřevo je neodolné proti napadení houbou a dřevokazným hmyzem (Balabán, 1955).

Hustota dřeva při vlhkosti (12-15 %) se pohybuje v rozmezí včetně extrémních

hodnot od 320...520...890 kg/m<sup>3</sup>. Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny je cca 50 MPa, v ohybu cca 86 MPa (Wagenfür - Scheiber, 1974).

**Mikroskopické znaky:** Borové dřevo se vyznačuje četnými pryskyřičnými kanálky, jejichž buňky jsou tenkostěnné, zpravidla v počtu 5-6. Na průřezu jsou obklopené pochvou z tenkostěnných parenchymatických buněk. Vertikální pryskyřičné kanálky jsou nejčastěji jednotlivé, četnější a větší než u smrku. Dřeňové paprsky jsou jednovrstvé i vícevrstvé. Jednovrstvé jsou složené z parenchymatických buněk a příčných tracheid. Jejich výška dosahuje 1-12 buněk. Vícevrstvé s pryskyřičnými kanálky jsou obvykle 20-25 buněk vysoké. Na obvodu dřeňových paprsků probíhají souběžně s parenchymatickými buňkami příčné tracheidy (kolmo k podélným tracheidám). Parenchymatické buňky jsou ve středu dřeňového paprsku, jsou tenkostěnné a mají velké, nápadné, široké tečky. V jádrovém dřevě bývají parenchymatické buňky dřeňových paprsků vyplněny pryskyřicí (Balabán, 1955).

**Využití dřeva:** Borové dřevo se používá ve stavebnictví, na sloupy, vzpěry, pražce a je vhodné zejména na stavební práce ve vlhku např. piloty. Ve stavebním truhlářství se používá na obklady, podlahy, okna a dveře. Využívá se na výrobu dýh, v loděařství i jako důlní dřevo (Balabán, 1955).

#### 2.4.2 Buk lesní (*Fagus silvatica* L.)

**Vzhled:** Strom velkých rozměrů, dorůstající výšky kolem 35 m, s rovným válcovitým kmenem sahajícím vysoko do koruny. Koruna je u volně rostoucích exemplářů kulovitá, v porostu metlovitá. Větve odstávají v ostrém úhlu, druhotné větvení je plošně rozvinuté. Kůra je hladká šedavé barvy, jen výjimečně rozpraskaná. Kořenový systém je srdčitý, proto bývá v půdě velmi dobře zakotven (Úradníček - Chmelař, 1995).

Buk je rozšířen v celé Evropě s výjimkou východní Evropy. Severní hranice jeho rozšíření probíhá z Anglie do nejteplejší části Skandinávského poloostrova. Západní hranici tvoří kromě Pyrenejí území Francie až po Bretaň. Východní hranice postupuje z Pobaltí přes Polsko k jihovýchodu na úpatí Karpat a na Balkánský poloostrov (Úradníček - Chmelař, 1995).

**Makroskopické znaky:** Po skácení kmene je na transversálním řezu nápadné různé zbarvení dřeva, které je způsobeno různým obsahem vody ve dřevě. Vnitřní sušší dřevo je

světlemější a vnější vlhčí dřevo je tmavší. Postupným vysycháním nabývá celé dřevo stejnoměrného, pleťově růžového zabarvení. U starých stromů se často vyskytuje nepravé jádro. Dřevo je roztroušeně pórovité, cévy jsou pouhým okem nezřetelné. Dřeňové paprsky jsou široké, dobře znatelné na všech řezech. Na transversálním řezu jsou patrné jako různě široké, světlé přímkové, paprscitě se rozbíhající ze dřene kolmo na letokruhy. Na radiálním řezu jsou viditelné jako světlá zrcátka hustě nad sebou rozložená a na tangenciálním řezu jako temnější čárky až 2 mm vysoké (Balabán, 1955).

Hustota dřeva při vlhkosti (12-15 %) se pohybuje v rozmezí včetně extrémních hodnot od 540...720...910 kg/m<sup>3</sup>. Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny se pohybuje od 60-120 MPa, v ohybu cca 120 Mpa (Wagenfür - Scheiber, 1974).

**Mikroskopické znaky:** Tracheje jsou hustě seřazené, samostatně nebo po 2-6 ve skupinkách. Širší cévy v jarním dřevě mají jednoduchou perforaci, užší cévy v pozdním dřevě mají žebříčkovitou perforaci. Dřeňové paprsky jsou jednovrstvé a vícevrstvé, ty jsou složeny z parenchymatických buněk poměrně tlustostěnných. Buňky dřeňových paprsků mají na styčných stěnách s cévami velké jednoduché tečky. Dřevo obsahuje velmi četné vláknité tracheidy, které tvoří přechod k libriformním vláknům. Při tvorbě nepravého jádra jsou cévy často vyplněny thyly (Balabán, 1955).

**Využití dřeva:** Bukové dřevo má velmi rozsáhlé použití. Je důležitou surovinou pro výrobu pražců. Velmi dobře se ohýbá, obrábí, moří a impregnuje. Je vhodný na výrobu dřevěného uhlí, parketových vlysů, překližek i okrasných dýh. Hojně používaný je především k výrobě ohýbaného nábytku (Balabán, 1955).

### 3. Porovnání zkušebních metod Brinell – Janka

V první řadě musíme připomenout, že převážná část prací na zjišťování tvrdosti byla zaměřena na kovové materiály a jejich aplikace na jiné materiály bývá obtížná. Pro zjišťování tvrdosti dřeva se v technické praxi uplatnily dvě výše zmíněné metody. Obě metody zjišťují statickou tvrdost, který dřevo klade při vnikání ocelové kuličky daného průměru.

#### 3.1 Měření tvrdosti dřeva dle Brinella

Tuto metodu vynalezl švédský inženýr Johan August Brinell (1845 – 1925). Metoda je určena pro kovové materiály, ale byla upravena pro potřeby měření tvrdosti dřeva.

Brinellova zkušební metoda prošla mnohými úpravami a modifikacemi. Norma ČSN 64 01 28 Zkoušky tuhých nekovových materiálů, s účinností od 1.5. 1953 byla zrušena k 1.1. 1996 bez náhrady. Tato norma vyhovovala i pro zjišťování tvrdosti dřeva. Norma 64 06 19 Plasty-Zkouška tvrdosti vtiskem kuličky s účinností od 1.7. 1982 byla zrušena k 1.4. 1998 a byla nahrazena normou ČSN EN ISO 2039-1. Tato norma popisuje stanovení tvrdosti plastů pomocí kuličky metodou Brinell, její účinnost je od 1.9. 2003. Od předešlé normy se liší podrobnostmi o vlastnostech zkušebních těles, zkušebního zařízení a přesností při měření hloubky vtlačení. Pro měření tvrdosti dřeva metodou Brinell tak zůstala jediná norma, a to ČSN EN 1534.

Tvrdost se zjišťuje vlačováním ocelové kuličky o průměru 10 mm do zkušebního tělesa na transversálních, radiálních a tangenciálních plochách. Rozdíly v tvrdosti nejsou na radiální a tangenciální ploše jednoznačné (Požgaj, 1993).

Zatěžující síla působí rovnoměrně a kolmo na plochu zkušebního tělesa po určitou dobu. Následně po odlehčení indentoru se změří dva kolmé průměry vtisku  $d_1$  a  $d_2$ , z nich se vypočte pomocí aritmetického průměru průměr vtisku  $d$ . Průměry vtisku se měří pomocí Brinellovi lupy (ČSN EN 1534).

Kulička, jako sférická plocha, je příčinou závislosti tvrdosti na hloubce vtisku. Aby byly zachovány přibližně stejné poměry napjatosti, je tato skutečnost eliminována třemi různými zatěžujícími silami podle tvrdosti zkoušených dřev. Zatěžující síla u velmi tvrdých dřev je 1 000 N, u středně tvrdých 500 N a u nejměkčích 100 N. Největší zatížení

se dosáhne při rovnoměrném zatěžování po dobu 15 sec., následně se nechá zatížení 30 sec. působit a během dalších 15 sec. se odlehčí. Uvedené trojí zatížení vzbuzuje pochybnosti o spolehlivosti zkoušky a neposkytuje jednotný základ k porovnání. Při výpočtu Brinellovy tvrdosti je zatížení vztaženo na plochu kulového vrchlíku (Oprchal, 1999). Tvrdost se vypočte ze vztahu:

$$H_B = \frac{2 * F}{\pi * D [D - \sqrt{(D^2 - d^2)}]} \quad [\text{MPa}]$$

kde: F...nominální síla (N)

D...průměr kuličky (mm)

d...průměr zbytkového vtisku (mm)

$\pi$ ...3,14

Druhým způsobem výpočtu je stanovení tvrdosti ze zatížení a hloubky vtisku. Měření se provádí při konstantním zatěžování 500 N. Indentor je ocelová kulička o průměru 10 mm, která působí na plochu zkušebního tělesa. Po jedné minutě působení síly se odečte hloubka vtisku s přesností na 0,01 mm. Tento způsob výpočtu tvrdosti je zvláště nepřesný na radiálních a tangenciálních plochách (ČSN 64 01 28).

Tvrdost se vypočte ze vztahu:

$$H_B = \frac{F}{\pi * D * h} \quad [\text{MPa}]$$

kde: F...nominální síla (N)

D...průměr kuličky (mm)

h...hloubka vtlačení kuličky (mm)

$\pi$ ...3,14

### **3.2 Měření tvrdosti dřeva dle Janka**

Metoda Janka vznikla modifikací z Brinellovy metody a byla vyvinuta speciálně pro dřevo. První výsledky o své práci zveřejnil Gabriel Janka v roce 1906. Přezkoušel celkem 285 druhů dřev, z nichž bylo 62 velmi tvrdých, 97 tvrdých, 40 prostředně tvrdých, 40 měkkých, 39 velmi měkkých a jen 9 (převážně exotických) neobyčejně tvrdých. Na



základě provedených zkoušek zjistil, že nejtvrdší dřevo má 55krát větší tvrdost než nejměkčí. Své výsledky zkoušek tvrdosti uveřejnil v díle „Die Härte der Hölzer“ v roce 1915 (Balabán, 1955).

Zkouška spočívá v zatlačování ocelové kuličky o průměru 11,284 mm, která je zatlačena až do poloviny průměru, tj. do hloubky 5,64 mm. Při použití kuličky jako indentoru, je dána závislost tvrdosti na použitém zatížení. Tvrdost je vyjádřena jako podíl zatížení kuličky a plochy průmětu vtisku. Zjišťuje se síla, která je potřebná na zatlačení kuličky. Hodnota tvrdosti je síla potřebná na zatlačení kuličky, protože plocha průmětu je přibližně rovna 100 mm<sup>2</sup> (ČSN 49 01 36).

Tvrdost se vypočte ze vztahu:

$$H_j = \frac{F}{\pi * r^2} \quad [\text{MPa}]$$

kde: F...nominální síla (N)

r...poloměr kuličky (mm)

$\pi$ ...3,14

V případě rozštípnutí zkušebního tělíska se indentor zatlačuje jen do ¼ poloměru kuličky, tj. do hloubky 2,84 mm. V tomto případě se tvrdost vypočte ze vztahu:

$$H_j = \frac{4 * F}{3 * \pi * r^2} \quad [\text{MPa}]$$

kde: F...nominální síla (N)

r...poloměr kuličky (mm)

$\pi$ ...3,14

K metodice, kterou představil Janka byla vznesena řada připomínek, i přesto byla přijata jako zkušební předpis v USA, Kanadě a Velké Británii.

J. Stauer poukázal na skutečnost, že pro většinu dřev (hlavně jehličnatých) je hodnota tvrdosti, jako podíl zatížení a hloubky vtisku kuličky, poměrně malá. Tento vztah platí u borového dřeva, podobné závislosti byly zjištěny u smrkového, modřínového ale i u lipového a dubového dřeva. U listnatých dřev není tvrdost závislá na poměru hloubky vtlačení k poloměru kuličky. (Balabán, 1955; Oprchal 1999).

Další zmínka poukazuje na nestejně namáhání vláken při velkých hloubkách vtlačení, kde mohou vznikat trhliny a dochází k většímu tření mezi indentorem a

zkoušeným vzorkem.

U nás má zkouška podle Janka dlouhou tradici a je oblíbená zejména pro svou jednoduchost výpočtu.

### 3.3 Popis dalších používaných metod

Mnohé námitky k metodice podle Janka i Brinella vedly k určitým modifikacím těchto metod. Někteří z autorů pozměnili původní metodiku a navrhli určitá řešení.

#### 3.3.1 Metoda Chalais – Meudon

Metoda, která vznikla pro zkoušení bočních ploch dřeva. Měření na transversálních plochách se neprovádí, podle M. Monima je to jen hodnota pevnosti v tlaku a je doprovázena jevy, které byly popsány u metody Janka. Lokální, nerovnoměrné namáhání vzorku kuličkou je spojeno s nepravidelným stříhovým napětím a velkou deformací vláken v místě vtisku (Balabán, 1955).

Metoda byla přijata francouzskou společností pro normalizaci. Zkouška se provádí zatlačováním ocelového válečku o průměru 3 cm, jehož délka musí být delší než šířka zkoušeného vzorku. Osa válečku je kolmá na dřevní vlákna. Váleček je zatlačován hmotností 100 kg na 1 cm šířky vzorku, u měkkých dřevin 50 kg po dobu 5 sec. Následně se změří šířka vtisku, z které se vypočte hloubka vtisku ze vztahu (Oprchal, 1999):

$$t = \frac{1}{2} - \sqrt{900 - l^2} \quad [\text{mm}]$$

kde: t...hloubka vtisku (mm)

l...šířka vtisku (mm)

Hodnota tvrdosti se vypočte ze vztahu:

$$N = \frac{1}{t} \quad [\text{mm}^{-1}]$$

Výhoda této metody je široký rozsah měření, šířka vtisku se pohybuje od 0,2 mm až do 20 mm. Byla snaha porovnat výsledky stanovené metodou Chalais – Meudon s metodou G. Janka. Zatímco metoda Chalais – Meudon je charakterizována jako povrchová tvrdost,

při metodě Janka vniká indentor hluboko do struktury zkušební vzorku a dochází k velké deformaci vláken. I přes rozdílnost obou metod provedl P. Sallenave měření na 88 tropických dřevinách, výsledky však měly značný rozptyl hodnot. Na základě srovnávacích měření byl stanoven převodní koeficient, na který je nutno se dívat jen jako na orientační (Nimrichtr, 1999; Oprchal 1999).

$$\frac{\text{tvrdost JANKA}}{\text{tvrdost CHALAIS – MEUDON}} = 300$$

### 3.3.2 Návrh podle M. Krippela

Tento návrh vychází z kombinací metod Brinell a Janka. M. Krippel chtěl navrhnout jednoduchou metodu na zjišťování průměrné hodnoty tvrdosti.

Indentorem je ocelová kulička o průměru 31,831 mm, která je do zkušební vzorku vtisknuta rovnoměrně vzrůstající silou až do hloubky 2 mm. Plocha vtisku kulového vrchlíku je pak přesně 2 cm<sup>2</sup>. Hodnota tvrdosti se vypočte ze vztahu:

$$H_K = \frac{F}{2} \quad [\text{MPa}]$$

kde: F...nominální síla (N)

Z metody Janka převzal pevnou hloubku vtisku, z Brinellovy metody pak přejal vztah zatížení na plochu kulového vrchlíku. M. Pollay na základě svých měření zjistil, že v oblasti hloubky vtisku 1-2 mm neexistuje závislost tvrdosti na hloubce vtisku pro dřevo borové a dubové (Oprchal, 1999).

### 3.3.3 Postup podle E. Möratha

Vznesené námitky proti metodě Janka daly Mörathovi podnět vrátit se k Brinellově Indentor metodě. Podle Brinellovy metody přezkoušel dalších 153 druhů dřev. Ocelovou kuličku o průměru 10 mm zatížil silou, 100 N pro měkké, 500 N pro tvrdé a 1 000 N pro velmi tvrdé dřeviny. Po odlehčení změřil průměr vtisku a vypočetl plochu. Podíl zatížení a plochy udává Brinellovu tvrdost v MPa, která je srovnatelná s jinými materiály.

Předepsal 9 vtisků pro každou zkoumanou plochu vzorku. Na transversální ploše

musí být vtisky vzdáleny nejméně 25 mm od sebe i od hrany vzorku. Na radiální a tangenciální ploše tuto vzdálenost stanovil na 50 mm (Oprchal, 1999).

Mörathova metodika byla přijata do německé normy DIN C 3011, ale pro značný počet připomínek nebyla již novelizována.

### **3.4 Porovnání zkušebních metod Brinell-Janka**

Obě uvedené metody používají jako indentor ocelovou kuličku o průměru  $d$ . Použití kuličky jako indentoru má za následek závislost tvrdosti na hloubce vtisku, tedy na velikosti použitého zatížení. Tvrdost, která se vztahuje na plochu vtisku nejdříve stoupá. U většiny dřev se docílí maximální hodnota tvrdosti při hloubce vtisku 0,77 mm, u dubového dřeva při hloubce vtisku 1,65 mm a u dřeva quajaku až při hloubce vtisku 2,82 mm. U Brinellovy metody nebylo dosaženo nejvyššího odporu při vtisku, u Janka byl tento poměr překročen (Oprchal, 1999; Balabán, 1955).

Vážným nedostatkem Brinellovy zkoušky je závislost na podmínkách zkoušky. Zjišťovaná tvrdost je závislá na velikosti použitého zatížení, přičemž závislost nemá lineární charakter. Tento nedostatek byl eliminován třemi stupni zatížení podle tvrdosti zkoušené dřeviny. Jak již bylo zmíněno, uvedené trojí zatížení neposkytuje jednotný základ k porovnání. Tuto skutečnost řeší norma ČSN EN 1534 a to použitím jediného zatížení o hodnotě 1 000 N. Brinellova tvrdost je vztažena na plochu vtisku, tedy na kulový vrchlík.

U metody Janka je tvrdost závislá na zatížení, tvrdost je vztažena na plochu průmětu vtisku. Při zkoušce jsou zasažené hluboké partie dřeva, dochází k silnému porušení vláken až k jejich rozdrčení.

## 4. Provedení zkoušek

Zkoušky měření tvrdosti dřeva byly provedeny v laboratoři FLD při České zemědělské univerzitě v Praze.

### 4.1 Odběr zkušebních vzorků

Měření tvrdosti dle Brinella a Janka jsem provedl na reprezentativních dřevinách, tedy na borovici a buku. Před samotným měřením bylo nutné připravit zkušební vzorky, od každé dřeviny min. 50 ks.

Vzorky byly připraveny ve školní dílně a to zpracováním 2 ks fošen pro každou dřevinu. Fošny byly vybrány náhodně, necharakterizují tedy určitou oblast původu. Měly tloušťku 60 mm, šířku cca 300 mm a délku 2 000 mm. Následně byly rozřezány na hranoly, z kterých byly nařezány vzorky o rozměrech 50 × 50 × 50 mm. Bylo vyrobeno cca 100 ks vzorků od každé dřeviny, následně z nich bylo vybráno 50 vzorků s ideálním průběhem vláken.

Norma Janka (ČSN 49 01 36) předepisuje zkušební vzorky tvaru krychle o hraně 50 mm. Brinellova norma (ČSN EN 1534) doporučuje zkušební vzorky přednostně o straně délky 50 mm. Vzhledem k rozměrům zkušebních vzorků a jejich kvalitativním požadavkům, je nutné podotknout, že jsou velmi náročné na vstupní materiál. Na zkoumané ploše (50 × 50 mm) jsou značné rozdíly v odklonu vláken i šířce letokruhů, tato skutečnost negativně ovlivňuje přesnost výsledků celé zkoušky.

#### 4.1.1 Stanovení potřebného rozsahu pokusu

Norma pro Jankovu tvrdost neudává přímo rozsah měření, ale odkazuje na něj prostřednictvím normy ČSN 49 01 01 (Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky) a normy ČSN 49 01 23 (Drevo. Štatická metóda odberu vzoriek). Obě normy byly zrušeny k 1.7. 2002 a to bez přímé náhrady.

Norma pro Brinellovu tvrdost uvádí počet zkušebních těles v závislosti na počtu zkušebních vtisků na zkušebním tělese. Jejich počet se stanoví tak, aby bylo umožněno provedení celkem 50 zkušebních vtisků (ČSN EN 1534).

Počet zkušebních vzorků lze stanovit podle aproximačního vzorce. Známe-li před

plánovaným pokusem alespoň přibližnou hodnotu očekávaného průměru a příslušný variační koeficient, můžeme poměrně dobře odhadnout počet zkušebních vzorků s přesností 95 %. Počet zkušebních vzorků se vypočte podle vzorce (Doležal, 1973):

$$n_p = \left( \frac{2 * v * \bar{x}}{100} \right)^2 \div g^2$$

kde: v...variační koeficient (%)

$\bar{x}$  ...průměr

g...přesnost stanovení průměru

Na první pohled je zřejmé, že výsledný počet vzorků velmi ovlivňuje střední hodnota zjišťované veličiny a požadovaná přesnost stanovení průměrné hodnoty výběru. Rozdílné hodnoty tvrdosti na transversálních a podélných plochách znamenají rozdílný počet zkušebních vzorků pro transversální a podélné plochy vzorků. Rozdíly mezi hodnotami tvrdosti Janka a Brinella též znamenají rozdílný počet vzorků.

Pro zkoušky tvrdosti podle Brinella a Janka na dřevě borovice a buku jsem podle aproximačního vzorce vypočetl potřebný počet zkušebních vzorků. Budeme-li požadovat střední hodnotu tvrdosti s přesností 0,5 MPa, pak se počet zkušebních vzorků pro obě metody měřené na buku bude pohybovat v rozmezí cca 125 – 655 ks. Počet zkušebních vzorků pro obě metody měřené na borovici se bude pohybovat v rozmezí cca 100 – 325 ks. Stanovení rozsahu výběru pro požadovanou přesnost průměrné hodnoty, kterou předem můžeme volit, nám může značně ovlivnit náklady na provedení zkoušek a také nám umožní vyhnout se pokusům, které jsou svým rozsahem příliš rozsáhlé nebo naopak značně poddimenzované.

## **4.2 Měření hustoty**

Vzorky byly dostatečně dlouhou dobu uloženy v klimatizovaném prostředí laboratoře s regulovanou teplotou ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) a relativní vlhkostí vzduchu ( $65 \pm 5 \%$ ). Lze tedy důvodně předpokládat, že vlhkost vzorků se bude pohybovat kolem požadovaných 12 %.

U každého vzorku byly změřeny všechny 3 rozměry pomocí posuvného měřítka s přesností 0,01 mm a byl vypočten jejich objem. Následně byly vzorky zváženy pomocí

elektrické digitální váhy. Z naměřených a vypočtených hodnot byla stanovena jejich hustota při vlhkosti 12%. Hustotu vzorků jsem vypočetl ze vztahu (ČSN 49 0108):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

kde: m...hmotnost dřeva při w = 12%

V...objem dřeva při w = 12 %

## 4.3 Metodika zkoušení

### 4.3.1 Měření tvrdosti dřeva dle Brinella

Měření jsem prováděl podle normy ČSN EN 1534. Norma popisuje metodu stanovení odolnosti proti vtisku u parket a jiných dřevěných podlahovin odvozenou od Brinellovy zkoušky. Zkoušky jsem provedl na 50 ks vzorcích od každé dřeviny. Na každém vzorku jsem provedl měření na všech třech plochách, tedy na transversální, radiální a tangenciální.

**Postup zkoušky:** Zkušební vzorek jsem položil na stůl tlačné hlavice a spustil zkušební zařízení. Indentor se snížil na plochu zkušební vzorku při předpětí 10 N. Následně na zkušební stroji byl vzorek plynule zatěžován silou kolmou k ploše zkušební vzorku. Působící síla dosáhla plného zatížení za  $(15 \pm 3)$  s. Tato síla se udržovala po dobu  $(25 \pm 5)$  s. a následně byl indentor odstraněn. Po jeho odstranění jsem musel nejméně 3 min. čekat, než jsem pomocí Brinellovy lupy změřil dva na sebe kolmé průměry vtisku. Pro zviditelnění hran vtisku jsem použil grafit. Měření průměru vtisku na radiálních a tangenciálních plochách, zejména u borovice, bylo značně problematické. Průměr vtisku měl eliptický tvar a hrana vtisku nebyla ostře ohraničena. V této fázi měření mohla nastat největší chyba, která negativně ovlivňuje výsledek celého měření (ČSN EN 1534).

Vzdálenost mezi středy vtisků a každou hranou zkušební vzorku musí být nejméně 20 mm. Pokud je vzorek širší méně než 40 mm, musí vtisk ležet na podélné ose. Zjištěné hodnoty jsem zapisoval do tabulky. Z naměřených hodnot jsem vypočetl hodnotu tvrdosti podle Brinella, která je charakterizována vztahem:

$$H_B = \frac{2 * F}{\pi * D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad [\text{MPa}]$$

kde: F...nominální síla (N)

D...průměr kuličky (mm)

d...průměr zbytkového vtisku (mm)

$\pi$ ...3,14

### **Zkušební protokol:**

1. **Název laboratoře:** Veškerá měření a zkoušky jsem provedl ve školní laboratoři FLD při České zemědělské univerzitě v Praze.
2. **Datum zkoušky:** Zkoušky jsem prováděl od 25.2. 2009 do 7.3. 2009.
3. **Druh zkoušeného materiálu:** Zkoušky jsem provedl na 50 vzorcích pro každou dřevinu. Plochy vzorku byly obrobena řezáním a frézováním, jejich rozměry byly 50 × 50 × 50 mm.
4. **Klimatizace vzorků:** Zkušební vzorky byly uloženy v laboratoři FLD od 18.12 2008 po celou dobu probíhání zkoušek.
5. **Klimatické podmínky v laboratoři:** Prostředí v laboratoři bylo automaticky řízeno. Zkoušky probíhaly při teplotě okolí (20 ± 2°C) a relativní vlhkosti vzduchu (65 ± 5%).
6. **Použité zkušební zařízení:** Zkoušky probíhaly na trhacím stroji UTS 50, na kterém bylo možno nastavit rychlost zatěžování a měřit působící sílu s přesností na 1 %. Bylo použito zatížení 1 000 N.
7. **Výsledky zkoušky:** Výsledky dílčích tvrdostí jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2. Statistické hodnoty tvrdostí jsou uvedeny ve srovnávacích tabulkách 4 a 5.

### **4.3.2 Měření tvrdosti dřeva dle Janka**

Měření jsem prováděl podle normy ČSN 49 0136. Norma popisuje stanovení tvrdosti dřeva pomocí zatlačení razníku tvaru polokoule do požadované hloubky. Na rozdíl od Brinellovy metody se zde zjišťuje síla potřebná na zatlačení kuličky do požadované hloubky. Zkoušky jsem provedl na 50 ks vzorcích od každé dřeviny. Měření jsem provedl na ploše transversální, radiální a tangenciální.



**Postup zkoušky:** Zkušební vzorek jsem položil na stůl tlačné hlavice a spustil zkušební zařízení. V mém případě byla použita nenormovaná kulička o průměru 11,11 mm. To znamená, že kulička byla zatlačována do hloubky 5,555 mm. Zatěžující síla působila kolmo a rovnoměrně na plochu zkušební vzorku. Působící síla dosáhla požadované hloubky vtlačení za 1 min. Po zatlačení kuličky do požadované hloubky byla odečtena síla s přesností na 1 %. Odečtené hodnoty síly jsem zapisoval do tabulky.

Indentor se zatlačuje v místě průsečíku úhlopříček, tedy ve středu zkušební vzorku. (ČSN 49 01 36)

Z naměřených hodnot jsem vypočetl hodnotu tvrdosti podle Janka, která je charakterizována vztahem:

$$H_J = \frac{F}{\pi \cdot r^2} \quad [\text{MPa}]$$

kde: F...nominální síla (N)

r...poloměr kuličky (mm)

$\pi$ ...3,14

V případě potřeby při vlhkosti ( $12 \pm 3$  lze statickou tvrdost přepočítat na vlhkost 12 % podle vztahu: %)

$$H_{12} = H_w [1 + \alpha (W - 12)]$$

kde:  $\alpha$ ...opravný koeficient vlhkosti,

pro všechny dřeviny  $\alpha = 0,03$

### **Zkušební protokol:**

1. **Název laboratoře:** Veškerá měření a zkoušky jsem provedl ve školní laboratoři FLD při České zemědělské univerzitě v Praze.
2. **Datum zkoušky:** Zkoušky jsem prováděl od 25.2. 2009 do 7.3. 2009.
3. **Druh zkoušeného materiálu:** Zkoušky jsem provedl na 50 vzorcích pro každou dřevinu. Plochy vzorku byly obrobena řezáním a frézováním, jejich rozměry byly  $50 \times 50 \times 50$  mm.
4. **Klimatizace vzorků:** Zkušební vzorky byly uloženy v laboratoři FLD od 18.12 2008 po celou dobu probíhání zkoušek.
5. **Klimatické podmínky v laboratoři:** Prostředí v laboratoři bylo automaticky

řízeno. Zkoušky probíhaly při teplotě okolí ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) a relativní vlhkosti vzduchu ( $65 \pm 5 \%$ ).

6. **Použité zkušební zařízení:** Zkoušky probíhaly na trhačím stroji UTS 50, na kterém bylo možno nastavit rychlost zatěžování a měřit působící sílu s přesností na 1 %. Požadované hloubky vtláčení se dosáhlo za 1 min.
7. **Výsledky zkoušky:** Výsledky dílčích tvrdostí jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2. Statistické hodnoty tvrdostí jsou uvedeny ve srovnávacích tabulkách 4 a 5.

## **4.4 Použité statistické metody**

### **4.4.1 Základní definice statistických hodnot**

Použité statistické metody jsou převzaty z publikace „Matematickostatistické metody v dřevařském průmyslu“ (Doležal, 1973).

#### **Průměr ( $\bar{x}$ )**

Charakterizuje polohu výběru. Vypočte se sečtením všech hodnot ve výběru a následným vydělením rozsahem tohoto výběru. Výběrový průměr se vypočte ze vztahu:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{n}$$

Hodnoty jednotlivých výběrových průměrů jsou uvedeny ve srovnávacích statistických tabulkách.

#### **Výběrový rozptyl ( $\sigma^2$ )**

Je charakterizován jako průměr druhých mocnin odchylek hodnot ( $x_i$ ) od výběrového průměru ( $\bar{x}$ ). Vyjadřuje míru rozptýlení hodnot od průměrné hodnoty. Vypočte se ze vztahu:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}$$

Hodnoty výběrového rozptylu jsou uvedeny ve srovnávacích statistických tabulkách.

### **Směrodatná odchylka (s)**

Charakterizuje, jak se dílčí vypočtené hodnoty liší od průměrné (střední) hodnoty. Výběrová směrodatná odchylka se vypočte ze vztahu:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

Hodnoty výběrové směrodatné odchylky jsou uvedeny ve srovnávacích statistických tabulkách.

### **Variační koeficient (v)**

Je charakterizován jako relativní míra rozptýlení hodnot a stanoví se v (%) jako podíl směrodatné odchylky a průměru. Využívá se pro porovnání variabilit nestejně velkých objektů. Vypočte se ze vztahu:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad [\%]$$

kde : s...směrodatná odchylka

$\bar{x}$  ...průměr

Hodnoty variačního koeficientu jsou uvedeny ve srovnávacích statistických tabulkách.

### **Suma hodnot ( $\Sigma$ )**

Je součtová hodnota dílčích hodnot měření. Hodnoty jsou uvedeny ve srovnávacích tabulkách.

### **Kvantil ( $X_k$ )**

Charakteristická hodnota je definována jako 5 % kvantil předpokládaného normálního rozdělení. Vypočte se ze vztahu (ČSN EN 1534):

$$X_k = \bar{x} - (t_{05} * s)$$

kde:  $\bar{x}$  ...průměr

$t_{05}$ ...koeficient studentova rozdělení

$s$ ...směrodatná odchylka

Tabulka s koeficienty studentova rozdělení pro rozsah zkušebních vzorků je uvedena v normě ČSN EN 1534. Hodnoty jsou uvedeny ve srovnávacích statistických tabulkách.

### **F - test**

Slouží k posouzení významnosti (či nevýznamnosti) rozdílu dvou rozptylů. Ověří, zda rozptyly srovnávaných výběrů jsou či nejsou navzájem význačně rozdílné. Na základě tohoto testu jsem porovnával metodu podle Brinella a Janka na jednotlivých řezech. Vyhodnocení na základě F – testu je uvedeno v kapitole 5.1.3.

### **T - Test**

Slouží k porovnání průměrných hodnot dvou výběrových průměrů. Zamítne či nezamítne nulovou hypotézu, zda výběr s průměrem ( $\bar{x}$ ) se významně neliší od výběru z průměrné hodnoty souboru druhého ( $\bar{y}$ ). Na základě tohoto testu jsem porovnával obě zkušební metody na jednotlivých řezech. Vyhodnocení na základě T – testu je uvedeno v kapitole 5.1.4.

### **Největší výběrová hodnota ( $x_{max}$ )**

Charakterizuje největší zjištěnou hodnotu z výběrových hodnot dané množiny.

### **Nejmenší výběrová hodnota ( $x_{min}$ )**

Charakterizuje nejmenší zjištěnou hodnotu z výběrových hodnot dané množiny.

## **4.5 Použité přístroje a pomůcky**

Při měření a zpracování výsledků jsem použil těchto přístrojů a pomůcek:

- Digitální posuvné měřítko MITUTOYO, typ CD – 15 B (rozsah měření 0 – 150 mm, rozlišení 0,01 mm, výrobce Velká Británie).
- Digitální elektrická váha SARTORIUS Basic <sup>plus</sup>, typ BP 3100 S (rozsah měření 3100 g, rozlišení 0,01 g, výrobce Německo).
- Trhací stroj UTS TESTSYSTEME, typ UTS 50, software PHOENIX (rozlišení 0,001 mm a 0,001 N, výrobce Německo).
- Brinellova lupa POLDI (rozsah měření 0 -8 mm, rozlišení 0,1 mm, zvětšení lupy 12 x, výrobce Česká republika).

## 5. Vyhodnocení výsledků včetně statistických metod

### 5.1 Výsledky zkoušek

#### 5.1.1 Vyhodnocení výsledků zkoušek tvrdosti

Výsledky dílčích tvrdostí jsou uvedeny v příloze v tabulkách 1 a 2. Vyhodnocení statistických metod podle dřevin je uvedeno ve srovnávacích tabulkách 4 a 5, které uvádím zde.

Tab.č.4

Dřevina BO		Transversální		Radiální		Tangenciální	
Název	Symbol	Brinell	Janka	Brinell	Janka	Brinell	Janka
průměr	$\bar{x}$	53	35,6	21	25,5	23	26,8
minimální hodnota	$x_{\min}$	42	29,8	16	18,1	16	19,3
maximální hodnota	$x_{\max}$	66	45,0	32	34,7	32	35,3
směrodatná odchylka	<b>s</b>	6,51	3,26	3,33	3,82	3,85	4,39
suma hodnot	$\Sigma$	2665	1782	1072	1273	1148	1340
variační koeficient	<b>v</b>	12,22	9,15	15,51	14,98	16,79	16,38
rozptyl	$\sigma^2$	42,39	10,64	11,07	14,56	14,85	19,26
kvantil 5 %	$x_K$	42	30	16	19	17	19

Tab.č.5

Dřevina BK		Transversální		Radiální		Tangenciální	
Název	Symbol	Brinell	Janka	Brinell	Janka	Brinell	Janka
průměr	$\bar{x}$	70	81,8	33	61,4	37	65,1
minimální hodnota	$x_{\min}$	62	71,0	24	52,9	31	54,0
maximální hodnota	$x_{\max}$	85	91,8	46	74,2	48	76,9
směrodatná odchylka	<b>s</b>	5,63	4,42	3,67	3,87	3,70	5,51
suma hodnot	$\Sigma$	3497	4090	1659	3072	1826	3255
variační koeficient	<b>v</b>	8,04	5,41	11,05	6,30	10,15	8,47
rozptyl	$\sigma^2$	31,65	19,56	13,43	14,99	13,72	30,41
kvantil 5 %	$x_K$	61	74	27	55	30	56

### **5.1.2 Vyhodnocení výsledků na základě hustoty**

Hodnoty hustoty jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze v tabulce č.3. Vyhodnocení statistických metod hustoty je uvedeno v příloze v tabulce č.6. Dále jsem zpracoval závislost tvrdosti na hustotě podle jednotlivých metod na jednotlivých plochách, které jsou uvedeny v přílohách č. VI – IX.

### **5.1.3 Vyhodnocení výsledků na základě F – testu**

Na základě tohoto testu jsem zjišťoval, zda se rozptyly na jednotlivých plochách u obou zkoumaných metod liší významně či nevýznamně. Výsledky testu prokázaly splnění podmínek homogenity rozptylů na všech plochách u obou dřevin, jen u borovice na transversální ploše a buku na tangenciální ploše nebyla homogenita rozptylů potvrzena. Tyto výsledky byly stanoveny na hladině významnosti  $\alpha = 95 \%$ . Tento test je předpokladem pro další vyhodnocení na základě T – testu.

### **5.1.4 Vyhodnocení výsledků na základě T – testu**

Na základě tohoto testu jsem zjišťoval, zda se průměrné hodnoty tvrdosti obou zkoumaných metod na jednotlivých plochách liší významně či nevýznamně. Použil jsem test s dvoustranným rozdělením. Pro transversální plochu u borovice a tangenciální plochu u buku jsem použil dvojitý výběrový test s nerovností rozptylu. Pro ostatní plochy u obou dřevin jsem použil dvojitý výběrový test s rovností rozptylu. Výsledky testu prokázaly nesplnění podmínek homogenity průměrných hodnot na všech třech zkoumaných plochách a to u obou dřevin. Lze tedy konstatovat, že průměrné hodnoty tvrdosti obou porovnávaných metod se liší víc než náhodně. Tyto výsledky byly stanoveny na hladině významnosti  $\alpha = 95 \%$ .

## **5.2 Diskuse výsledků**

### **5.2.1 Diskuse výsledků tvrdosti**

Výsledné hodnoty tvrdosti obou porovnávaných metod bývají v literatuře uváděny

v širokém rozpětí. Někde jsou uváděny jako střední hodnota měření, jinde i včetně maximální a minimální hodnoty.

Na základě vypočtených hodnot tvrdosti lze všeobecně konstatovat, že hodnoty tvrdosti zjištěné metodou Brinell nabývají menších hodnot oproti tvrdosti zjištěné metodou Janka. Jen na transversální ploše u borovice hodnota tvrdosti zjištěná metodou Brinell nabývá větších hodnot.

Výsledky stanovené metodou Janka vykazují proti metodě Brinell nižší hodnotu variačního koeficientu, a to na všech třech plochách u obou zkoušených dřevin. U metody Brinell na transversální ploše, u buku i borovice, nabývá hodnota směrodatné odchylky větších hodnot než u metody Janka. Na plochách radiálních a tangenciálních u metody Brinell nabývá hodnota směrodatné odchylky nižších hodnot proti metodě Janka.

### **5.2.2 Diskuse výsledků na základě hustoty**

Vztah mezi tvrdostí a hustotou není nutné zdůrazňovat. Obecně lze říci, čím větší je hustota dřeva, tím větší je jeho tvrdost. Tento vztah však nemá přímou závislost. Hustota u borovice vykazuje značný rozsah hodnot. U buku nejsou rozdíly jednotlivých hustot tak velké. Průměrné hodnoty hustoty u obou dřevin jsou v porovnání s tabulkovými hodnotami odpovídající. Vyhodnocení výsledků tvrdosti v závislosti na hustotě neprokázalo těsnější závislost.

Na základě porovnání grafů závislosti tvrdosti na hustotě (viz. přílohy č. VI – IX) lze konstatovat, že u borovice na transversální ploše je těsnější závislost u metody Brinell, na radiální a tangenciální ploše je těsnější závislost u metody Janka. U buku na transversální ploše je opět těsnější závislost u metody Brinell, na radiální a tangenciální ploše je těsnější závislost u metody Janka. Hodnota spolehlivosti na jednotlivých plochách nabývá nízkých hodnot, v důsledku toho není možno jednoznačně potvrdit závislost tvrdosti na hustotě.

Na transversální ploše u borovice stanovené metodou Brinell je hodnota spolehlivosti 59 %, u metody Janka 41 %. Na radiální ploše u borovice stanovené metodou Brinell je hodnota spolehlivosti 40 %, u metody Janka 77 %. Na tangenciální ploše u borovice stanovené metodou Brinell je hodnota spolehlivosti 50 %, u metody Janka 80 %.

Na transversální ploše u buku stanovené metodou Brinell je hodnota spolehlivosti 7 %, u metody Janka 6 %. Na radiální ploše buku stanovené metodou Brinell je hodnota



spolehlivosti 8 %, u metody Janka 9 %. Na tangenciální ploše buku stanovené metodou Brinell je hodnota spolehlivosti pouze 1 %, u metody Janka 12 %.

### **5.2.3 Diskuse metod zjišťování tvrdosti**

Obě porovnávané metody vykazují značný rozptyl dílčích tvrdostí. Metoda Brinell vykazuje na transversálních plochách větší rozptyl jednotlivých tvrdostí, ale je nutné podotknout, že hodnota spolehlivosti závislosti tvrdosti na hustotě nabývá větších hodnot oproti metodě Janka. Na základě F – testu nebyla prokázána významná statistická závislost mezi tvrdostí podle Brinella a Janka. Obě zkoumané metody vycházejí z původní Brinellovy metodiky, ale jejich výsledky jsou zcela odlišného charakteru a nelze je obecně porovnávat. Metoda Brinell poskytuje hodnoty tvrdosti s nižší variabilitou výsledků na radiální a tangenciální ploše ve srovnání s metodou Janka. Na transversálním řezu poskytuje Brinellova metoda vyšší variabilitu výsledků hodnot tvrdosti než metoda Janka.

## 6. Závěr

Provedl jsem měření tvrdosti dřeva na dvou reprezentativních dřevinách, borovici a buku, podle metody Brinell i Janka. Musím podotknout, že rozsah měření nebyl proveden v takovém počtu, který by byl potřebný pro jednoznačné posouzení hodnot tvrdosti. I přesto považuji získané výsledky za statisticky objektivní a na jejich základě mohu konstatovat:

- Hodnoty tvrdosti stanovené metodou Brinell vykazují vyšší variabilitu výsledků na transversální ploše v porovnání s metodou Janka.
- Metoda Janka vykazuje vyšší variabilitu výsledků na radiální a tangenciální ploše v porovnání s metodou Brinell.
- Vyhodnocení zjištěných výsledků neprokázalo významnější statistickou závislost mezi porovnávanými metodami.
- Vyhodnocení zjištěných výsledků v závislosti na hustotě podle jednotlivých autorů nepotvrdilo jednoznačnou závislost tvrdosti na hustotě.

Nedovolím si jednoznačně vyzdvihnout některou z porovnávaných metod, jelikož obě mají své místo ve výzkumu dřeva. Brinellova metoda prošla za svou existenci jistými úpravami, kdežto metoda Janka nebyla za téměř 100 let své existence upravována. U metody Brinell musím poukázat na nesnadné stanovení zbytkového vtisku na podélných plochách. Proti metodě Janka hovoří velikost zkušebních vzorků, na kterých je indenter zatlačován až do hloubky 5,64 mm. Jedná se ještě o tvrdost dřeva jako vlastnost povrchu? Za úvahu by stálo porovnání metody Brinell s metodou Chalais – Meudon používanou ve Francii.

Závěrem mohu jen poznamenat, že tvrdost dřeva jako komplexní vlastnost materiálu, je v technické praxi využívána jen podvědomě. Jsou však odvětví dřevozpracujícího průmyslu a některé jeho výrobky, kde je vlastností ceněnou a nelze ji opomíjet.

## 7. Seznam použité literatury

- BALABÁN, K. Anatomie dřeva. 1. vydání. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 216 s.
- BÍLEK, K. et al. Zkoušky tvrdosti pro uživatele tvrdoměrů Emcotest a Shimadzu [online]. Publikováno 2.4.2002 [cit. 2009-01-10]. Dostupné z: [http://www.metrotest.cz/zkousky\\_tvrdosti.pdf](http://www.metrotest.cz/zkousky_tvrdosti.pdf)
- BODIŠ, P. Cítace a citování. Studijní a informační centrum České zemědělské univerzity v Praze [online]. Publikováno 15. 2. 2005 [cit. 2009-01-20]. Dostupné z: <http://www.sic.czu.cz/?dl=1&f=852>
- BODIŠ, P. Doporučení pro psaní diplomových prací. Studijní a informační centrum České zemědělské univerzity v Praze [online]. Publikováno 1. 8. 2004 [cit. 2009-01-20]. Dostupné z: <http://www.sic.czu.cz/?dl=1&f=853>
- ČSN 49 0136. Metóda zisťovania tvrdosti podľa Janka. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1984. 8 s.
- ČSN EN 1534. Parkety a jiné dřevěné podlahoviny – Stanovení odolnosti proti vtisku (Brinell). Praha: Český normalizační institut, 2001. 12 s.
- ČSN EN ISO 2039-1. Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1: Metoda vtláčením kuličky. Praha: Český normalizační institut, 2002. 12 s.
- ČSN 49 0108. Dřevo. Zisťovanie hustoty. Praha: Český normalizační institut, 1994. 8 s.
- DOLEŽAL, J. Matematickostatistické metody v dřevařském průmyslu. Praha: SNTL, 1973. 204 s. SIP – 417080/02663 – 301-03-2.
- HLUCHÝ, M. et al. Nauka o materiálu. 1. vydání. Praha: SNTL, 1976. 360 s. L13-C2-IV-87/25445.
- JAREŠ, V. Základní zkoušky kovů a jejich teorie. 1. vydání. Praha: Academia, 1966. 209 s. 21-041-66.
- KOLLMANN, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage. Berlin: Springer – Verlag, 1951. 1050 s.
- MATOVIČ, A. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. 1. vydání. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. 212s. ISBN 80-7157-086-9.
- MUSIL, I. et al. Lesnická dendrologie 1, Jehličnaté dřeviny. 1. vydání. Praha: ČZU, 2002. 198 s. ISBN 80-213-0992-5. s. 47-52.

- NIMRICHTER, V. Porovnání různých zkušebních metod zjišťování tvrdosti dřeva a převodního koeficientu. Diplomová práce. Praha: ČZU, 1999. 68 s.
- OPRCHAL, A. Porovnání různých zkušebních metod zjišťování tvrdosti dřeva a převodního koeficientu. Diplomová práce. Praha: ČZU, 1999. 44 s.
- PLAČEK, J. Co je to když se řekne... parkety? [online]. Publikováno 17.4 2004 [cit. 2009-02-03]. Dostupné z: <http://www.propodlahy.cz/art,asp?id=473>
- POŽGAJ, A. et al. Struktura a vlastnosti dřeva. 1.vydanie. Bratislava: Príroda, 1993. 486 s. ISBN 80-07-00600-1.
- ŠLEZINGEROVÁ, J. – HORÁČEK, P. – GANDELOVÁ, L. Nauka o dřevě. 1. vydání. Brno: MZLU, 1998. 184 s. ISBN 80-7157-194-6
- ÚRADNÍČEK, L. – CHMELAR, J. Lesnická dendrologie. 2 část Listnáče I. 1. vydání. Brno: MZLU, 1995. 119 s. ISBN 80-7157-169-5. s. 3-8.
- WAGENFÜR, R. – SHEIBER, CH. Holtzatlas. 1. Auflage. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1974. 690 s. LSV 3933.

## **Seznam příloh**

Příloha č. I – Borovice - výsledky měření tvrdosti

Příloha č. II – Buk – výsledky měření tvrdosti

Příloha č. III – Výsledky měření hustoty

Příloha č. IV – Srovnávací tabulky tvrdosti

Příloha č. V – Srovnávací tabulka hustoty

Příloha č. VI – Borovice - závislost tvrdosti Brinell na hustotě

Příloha č. VII – Borovice – závislost tvrdosti Janka na hustotě

Příloha č. VIII – Buk – závislost tvrdosti Brinell na hustotě

Příloha č. IX – Buk – závislost tvrdosti Janka na hustotě

Příloha č. X – Tvrdost dřev na transversální ploše

## Výsledky tvrdosti dle Brinella a Janka (MPa)

Tab.č.1

BO	Transversální		Radiální		Tangenciální	
	Brinell	Janka	Brinell	Janka	Brinell	Janka
1	60	45,0	24	28,0	20	32,3
2	60	36,4	19	30,2	24	30,6
3	54	44,1	20	31,1	24	30,5
4	52	43,2	27	31,7	18	26,6
5	62	36,9	23	27,8	21	28,9
6	54	38,4	19	28,5	24	28,2
7	62	37,6	24	27,0	20	30,0
8	60	35,3	26	28,3	19	28,3
9	52	35,4	21	25,5	23	24,0
10	60	36,7	21	30,2	23	35,3
11	60	34,9	25	24,9	19	30,7
12	66	33,3	20	26,0	24	29,0
13	60	36,5	24	27,7	20	28,5
14	62	35,7	21	27,3	23	29,8
15	48	35,1	19	21,3	25	21,2
16	57	35,7	24	26,5	20	27,0
17	57	36,5	19	26,6	24	28,1
18	54	37,7	32	29,1	16	30,4
19	57	35,7	21	27,1	23	28,7
20	60	34,7	22	24,9	21	27,4
21	54	36,8	26	28,6	19	30,7
22	60	36,0	23	34,7	21	30,3
23	60	39,6	22	28,7	22	29,8
24	46	36,0	18	23,5	28	21,9
25	57	36,1	23	25,9	21	29,5
26	46	35,5	16	23,8	30	26,7
27	54	37,2	25	27,2	19	34,8
28	44	32,1	16	20,1	30	22,2
29	46	32,1	16	22,7	30	20,2
30	48	32,0	22	21,3	22	24,5
31	48	32,0	27	21,3	18	27,7
32	60	37,4	22	29,5	21	28,2
33	66	35,9	22	27,4	21	28,2
34	54	35,6	25	26,0	19	30,0
35	46	33,3	17	20,5	29	20,4
36	44	32,4	16	20,6	32	21,1
37	50	39,9	22	25,9	21	30,2
38	42	32,3	16	22,2	30	20,2
39	42	37,6	17	23,0	29	19,7
40	54	38,9	25	29,9	19	27,8
41	50	32,4	19	18,1	25	19,3
42	44	30,3	18	20,6	27	19,8
43	50	30,1	20	19,5	24	22,5
44	46	34,3	23	24,2	21	30,1
45	54	35,2	21	20,7	23	22,2
46	48	35,6	19	20,0	24	21,4
47	52	30,5	22	25,9	22	30,9
48	46	32,9	21	21,5	23	21,6
49	52	29,8	18	20,2	28	19,9
50	54	37,7	25	30,0	19	32,4

## Výsledky tvrdosti dle Brinella a Janka (MPa)

Tab.č.2

BK	Transversální		Radiální		Tangenciální	
	Brinell	Janka	Brinell	Janka	Brinell	Janka
1	66	80,9	34	57,5	39	69,0
2	72	83,9	33	64,7	34	57,2
3	76	83,1	33	63,3	36	68,6
4	66	85,8	36	70,1	42	59,1
5	69	72,5	32	61,2	37	64,5
6	69	82,1	33	63,8	32	59,2
7	69	83,8	31	61,9	36	56,5
8	66	83,3	32	60,8	34	54,9
9	76	77,7	37	61,8	39	73,5
10	72	83,5	40	63,2	34	65,6
11	76	83,1	34	60,6	39	66,7
12	66	80,4	37	69,6	40	67,7
13	69	86,1	34	74,2	37	67,9
14	72	81,9	27	66,9	39	66,2
15	66	84,5	24	57,5	36	65,3
16	76	73,3	30	61,2	33	65,9
17	69	83,1	34	59,6	37	67,4
18	62	85,0	33	64,7	36	59,3
19	66	82,4	37	60,3	39	61,5
20	62	80,1	33	58,6	42	74,1
21	62	78,0	29	59,9	39	60,1
22	69	85,2	34	59,2	31	65,7
23	62	91,8	33	63,5	37	72,3
24	69	83,4	33	59,1	32	60,9
25	72	91,7	32	66,0	33	75,4
26	72	78,5	36	57,9	37	62,7
27	72	74,5	34	62,8	36	62,1
28	76	87,4	27	55,6	33	62,1
29	85	78,2	32	59,7	34	73,4
30	72	85,7	29	61,9	39	66,1
31	80	79,8	31	62,7	39	76,9
32	66	77,6	32	59,1	34	76,3
33	66	78,6	30	60,8	33	61,1
34	66	80,7	31	57,2	32	61,2
35	62	86,9	32	66,3	33	61,1
36	85	80,3	31	58,8	42	61,3
37	69	83,6	30	64,3	32	59,0
38	69	79,5	37	62,7	31	54,0
39	69	90,8	32	63,9	48	65,8
40	80	79,9	32	58,2	34	68,3
41	76	75,7	33	61,7	44	60,9
42	66	84,0	40	59,1	39	64,1
43	69	87,1	33	62,2	40	64,9
44	69	80,8	31	56,1	44	71,1
45	72	81,4	33	62,7	36	68,4
46	62	80,2	33	55,7	33	66,4
47	66	71,0	39	61,5	33	65,6
48	72	80,6	36	52,9	39	72,6
49	66	81,3	46	59,6	33	64,6
50	69	79,2	36	59,2	39	61,2

## Výsledky hustoty dřeva (kg/m<sup>3</sup>)

Tab.č.3

Hustota dřeva				
č. vzorku	BO	BO	BK	BK
1	581,82	580	731,10	730
2	556,34	555	748,70	750
3	588,27	590	742,76	745
4	567,58	570	744,17	745
5	560,85	560	723,95	725
6	560,53	560	740,58	740
7	559,03	560	740,64	740
8	567,86	570	735,39	735
9	455,48	455	713,45	715
10	597,10	595	715,36	715
11	569,54	570	725,35	725
12	561,07	560	728,73	730
13	554,60	555	711,98	710
14	559,32	560	703,14	705
15	438,22	440	711,37	710
16	555,25	555	701,09	700
17	555,45	555	709,77	710
18	576,76	575	747,74	750
19	563,23	565	728,37	730
20	556,01	555	714,16	715
21	581,49	580	722,32	720
22	588,90	590	722,41	720
23	563,11	565	714,28	715
24	467,75	470	712,33	710
25	557,47	555	723,70	725
26	453,54	455	729,21	730
27	570,23	570	726,66	725
28	450,37	450	704,43	705
29	450,07	450	706,48	705
30	458,40	460	704,39	705
31	456,83	455	719,83	720
32	566,96	565	721,74	720
33	560,27	560	704,37	705
34	558,71	560	696,76	695
35	442,80	445	730,21	730
36	412,15	410	703,90	705
37	566,61	565	751,50	750
38	442,89	445	747,61	750
39	470,57	470	715,51	715
40	555,14	555	708,55	710
41	449,25	450	704,45	705
42	444,43	445	751,53	750
43	448,73	450	725,76	725
44	551,70	550	716,39	715
45	447,59	450	721,78	720
46	455,81	455	707,53	710
47	537,25	535	700,68	700
48	452,84	455	721,51	720
49	447,99	450	729,43	730
50	548,72	550	698,77	700



## Srovnávací tabulky tvrdosti (statistické hodnoty)

**Tab.č.4**

Dřevina BO		Transversální		Radiální		Tangenciální	
Název	Symbol	Brinell	Janka	Brinell	Janka	Brinell	Janka
průměr	$\bar{x}$	53	35,6	21	25,5	23	26,8
minimální hodnota	$x_{\min}$	42	29,8	16	18,1	16	19,3
maximální hodnota	$x_{\max}$	66	45,0	32	34,7	32	35,3
směrodatná odchylka	$s$	6,51	3,26	3,33	3,82	3,85	4,39
suma hodnot	$\Sigma$	2665	1782	1072	1273	1148	1340
variační koeficient	$v$	12,22	9,15	15,51	14,98	16,79	16,38
rozptyl	$\sigma^2$	42,39	10,64	11,07	14,56	14,85	19,26
kvantil 5 %	$x_K$	42	30,2	16	19,1	17	19,5

**Tab.č.5**

Dřevina BK		Transversální		Radiální		Tangenciální	
Název	Symbol	Brinell	Janka	Brinell	Janka	Brinell	Janka
průměr	$\bar{x}$	70	81,8	33	61,4	37	65,1
minimální hodnota	$x_{\min}$	62	71,0	24	52,9	31	54,0
maximální hodnota	$x_{\max}$	85	91,8	46	74,2	48	76,9
směrodatná odchylka	$s$	5,63	4,42	3,67	3,87	3,71	5,51
suma hodnot	$\Sigma$	3497	4090	1659	3072	1826	3255
variační koeficient	$v$	8,04	5,41	11,05	6,30	10,15	8,47
rozptyl	$\sigma^2$	31,65	19,56	13,43	14,99	13,72	30,41
kvantil 5 %	$x_K$	61	74,4	27	55,0	30	55,9

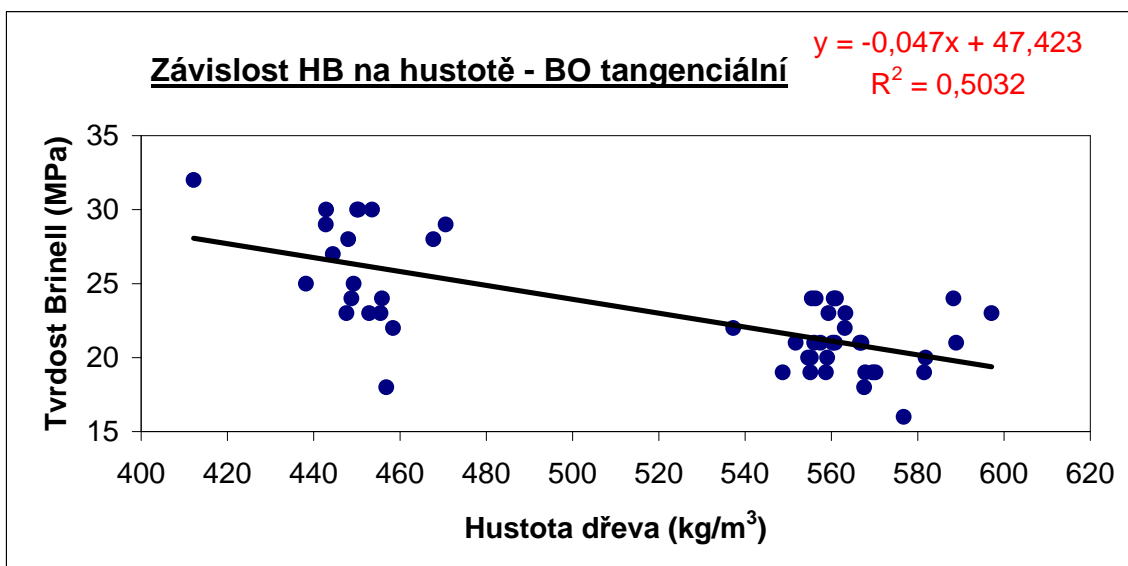
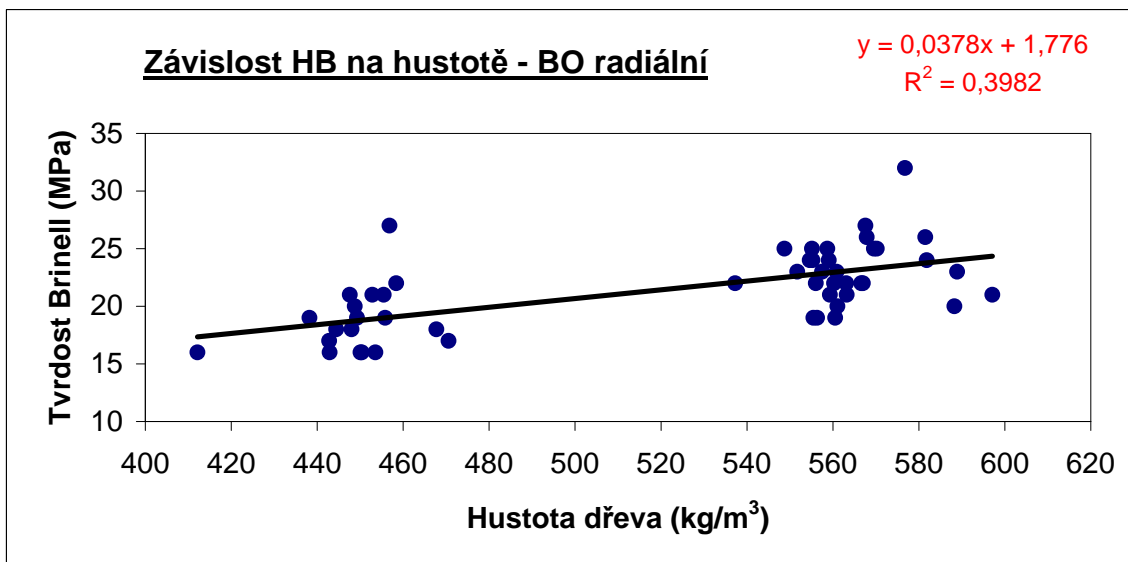
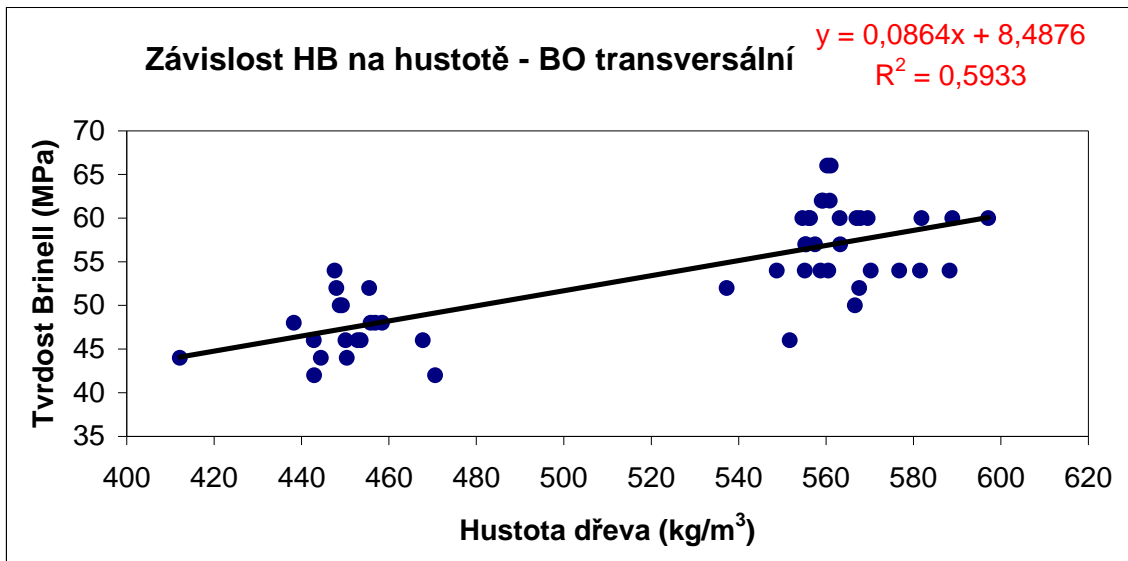
## Srovnávací tabulka hustoty (statistické hodnoty)

Tab.č.6

Dřevina		BO	BK
Název	Symbol		
průměr	$\bar{x}$	520	720
minimální hodnota	$x_{\min.}$	410	695
maximální hodnota	$x_{\max.}$	600	750
směrodatná odchylka	$s$	57,57	15,21
suma hodnot	$\Sigma$	26043	36062
variační koeficient	$v$	11,05	2,11
rozptyl	$\sigma^2$	3314,32	231,22
kvantil 5 %	$x_K$	425	695

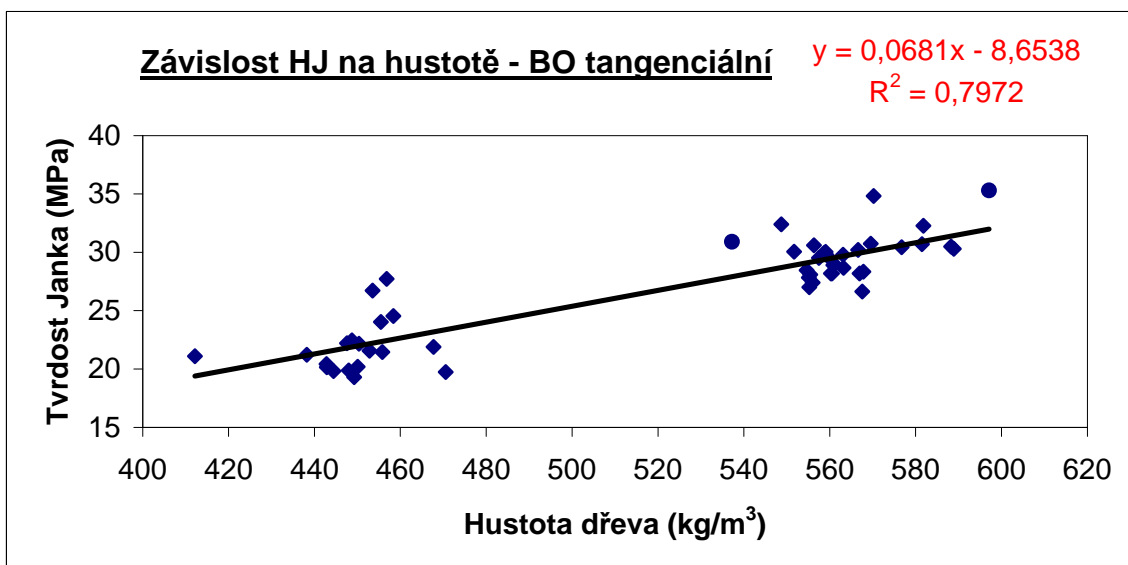
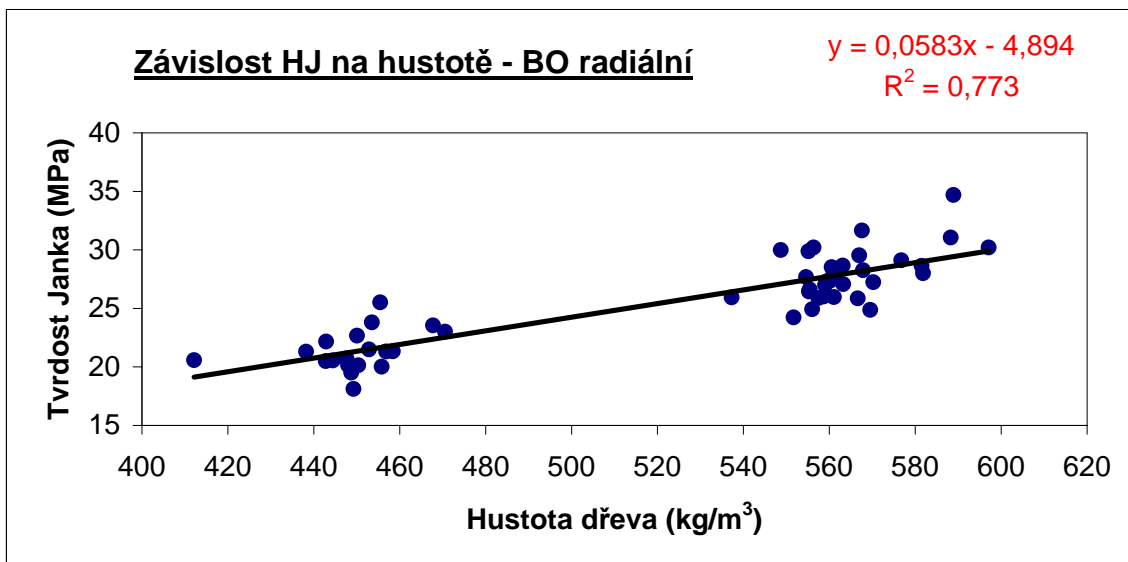
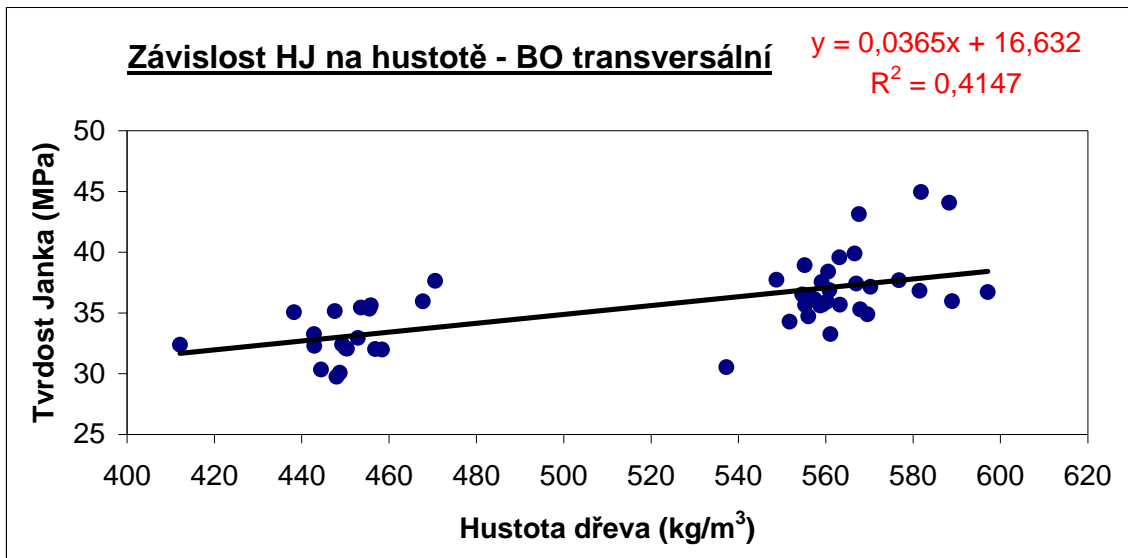
# Závislost tvrdosti Brinell na hustotě borovice

Graf č.1



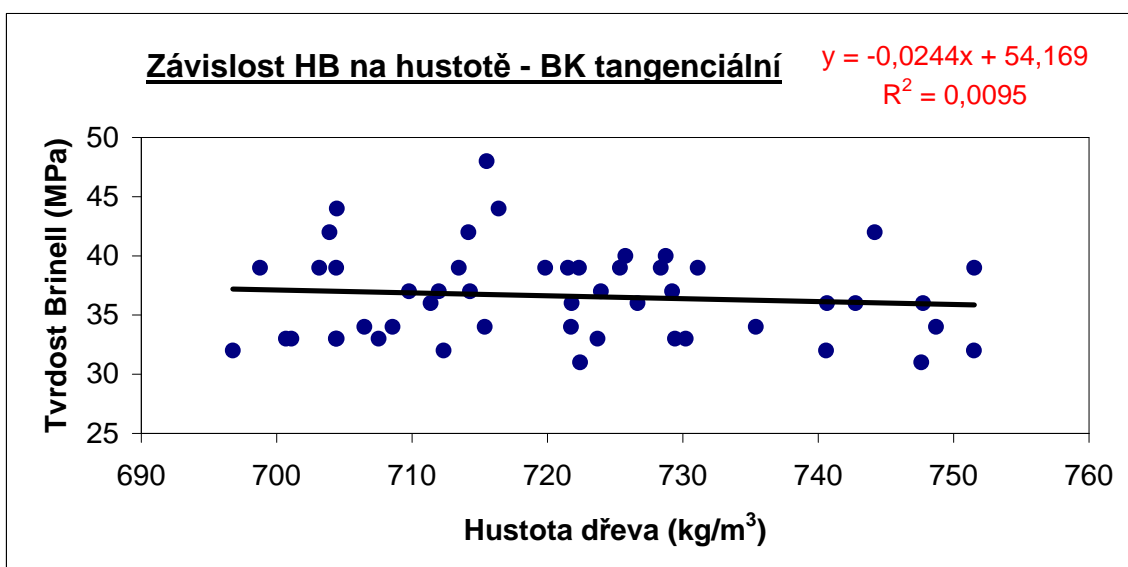
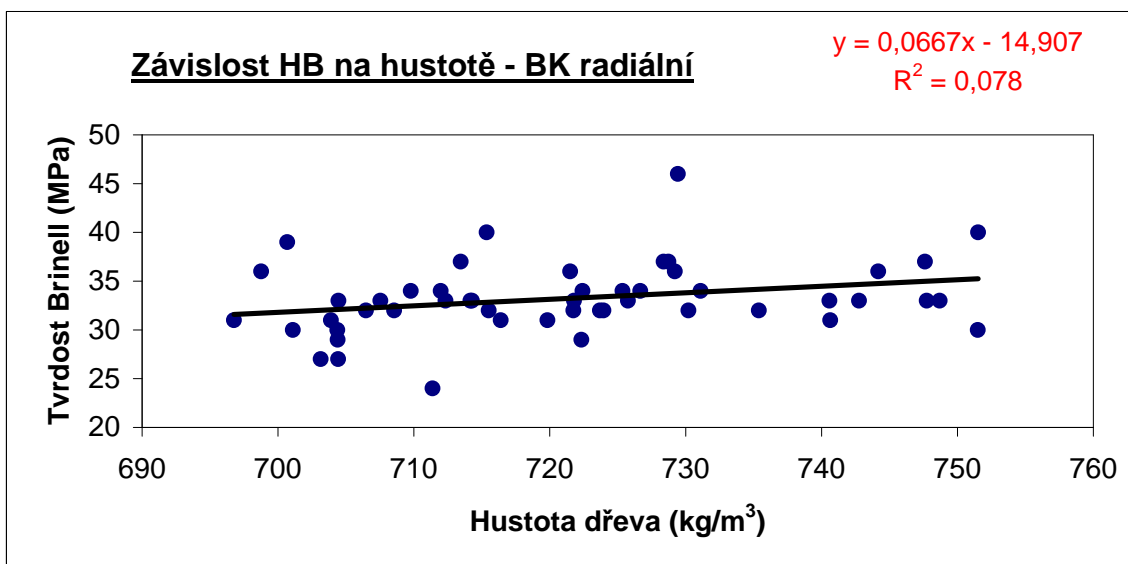
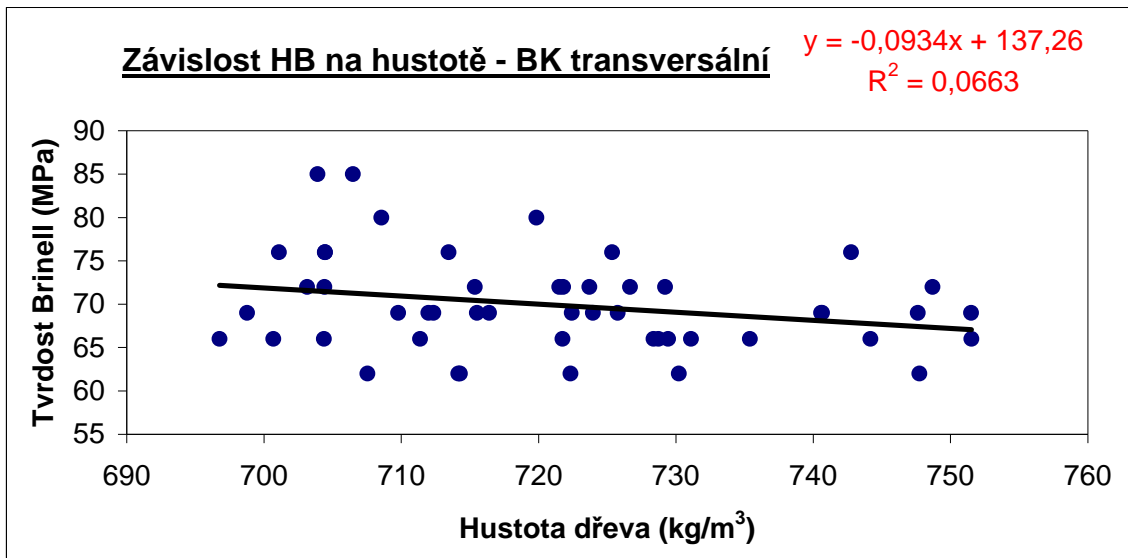
# Závislost tvrdosti Janka na hustotě borovice

Graf č.2



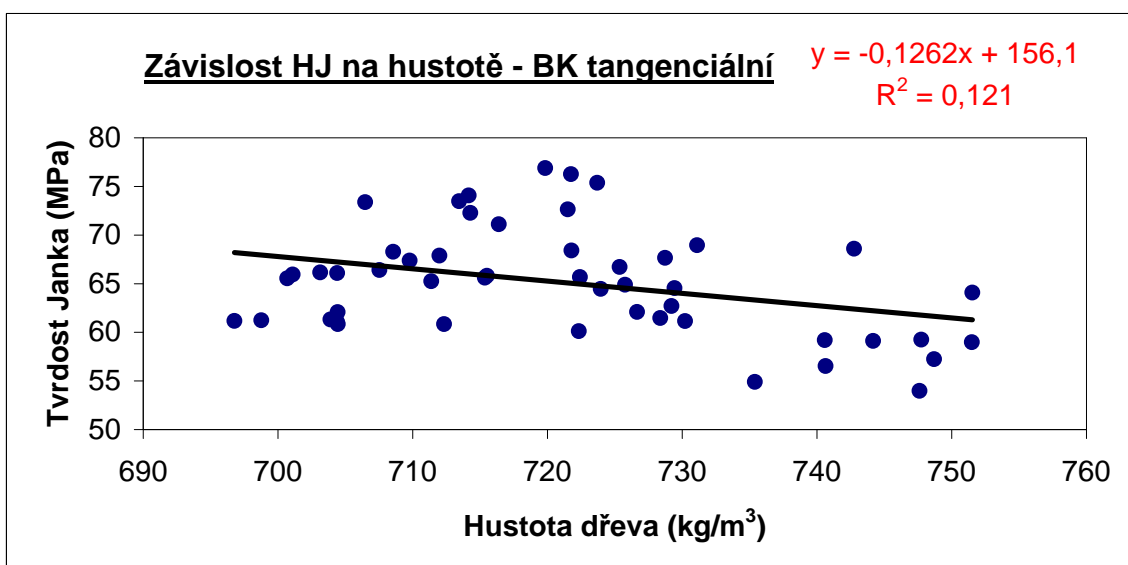
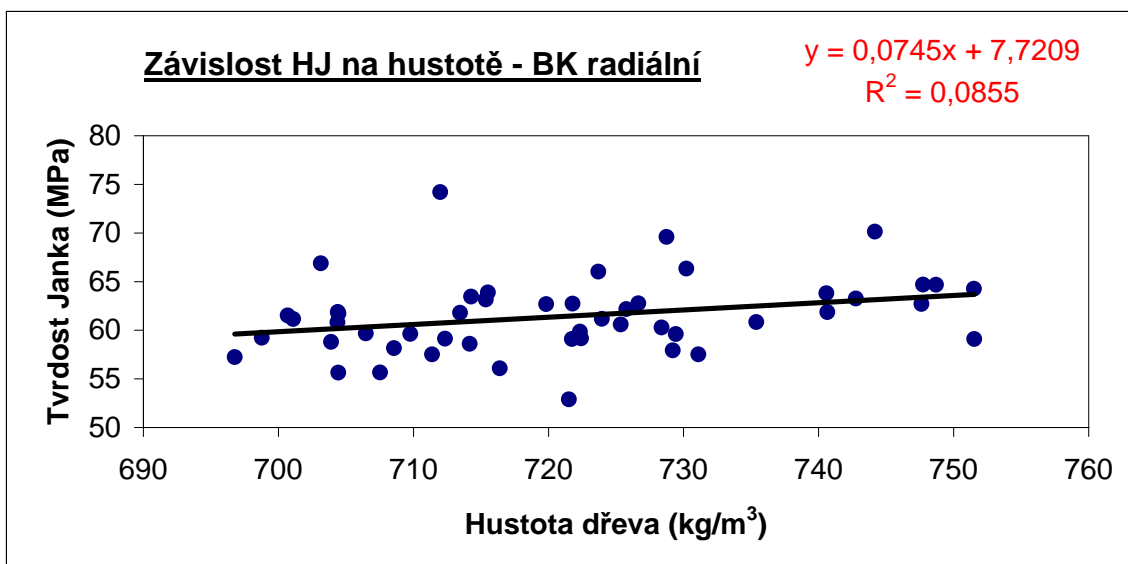
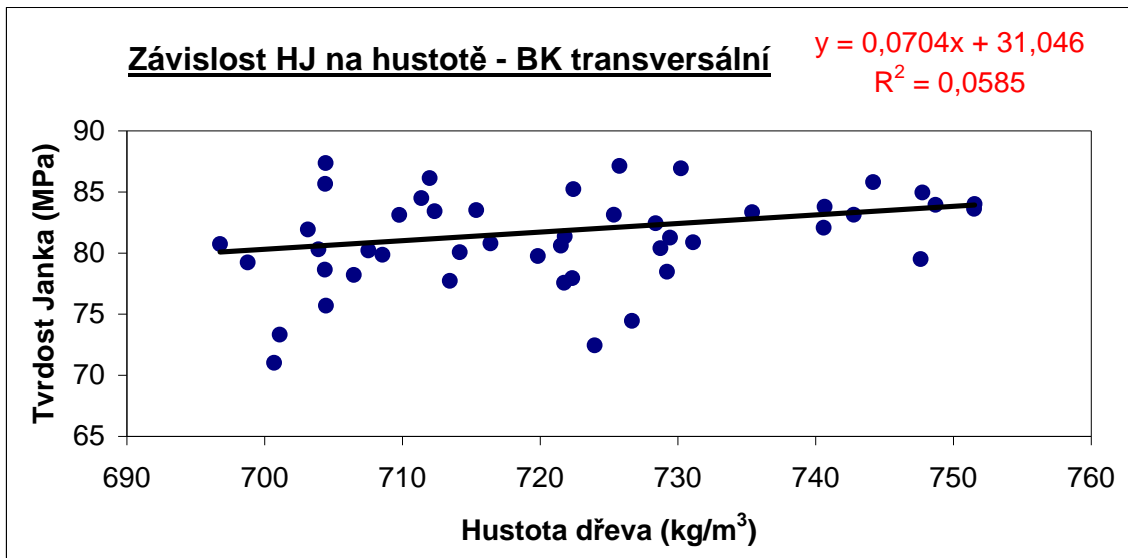
# Závislost tvrdosti Brinell na hustotě buku

## Graf č.3



# Závislost tvrdosti Janka na hustotě buku

Graf č. 4



## Tvrdość dřev na transversální ploše

Tab.č.7

Dřevina	tabulková	tabulková	přepočtená	přepočtená	hustota
	HB (kp/mm <sup>2</sup> )	HJ (kp/cm <sup>2</sup> )	HB (Mpa)	HJ (Mpa)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
Acer pseudoplatanus	6,2	670	61	65,7	630
Alnus glutinosa	3,5	440	34	43,1	550
Carpinus betulus	7,1	890	70	87,2	830
Quercus robur	6,6	660	65	64,7	690
Quercus petraea	6,6	690	65	67,6	680
Juglans nigra	5,0	720	49	70,6	610
Juglans regia	7,0	720	69	70,6	680
Robinia pseudacacia	7,8	870	76	85,3	770
Fagus silvatica	7,2	780	71	76,4	720
Fraxinus excelsior	6,5	740	64	72,5	690
Pirus communis	6,0	790	59	77,4	760
Populus trumula	2,3	344	23	33,7	490
Salix alba	2,3	330	23	32,3	350
Tilia cordata	3,8	330	37	32,3	530
Ulmus carpinifolia	6,4	660	63	64,7	680
Abies alba	5,3	340	52	33,3	590
Larix decidua	3,2	380	31	37,2	470
Picea abies	3,2	270	31	26,5	470
Pinus silvestris	4,0	300	39	29,4	520
Thuja plicata	2,5	300	25	29,4	360